



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“IMPACTO AMBIENTAL Y NORMATIVIDAD DE LA
DESTRUCCIÓN DE ARMAS QUÍMICAS”**

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

KAREN GARRIDO OLVERA



México, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

PRESIDENTE: Prof. José María García Saiz
VOCAL: Prof. Benjamín Ruiz Loyola
SECRETARIO: Prof. José Manuel Méndez Stivalet
1er SUPLENTE: Profra. María del Rayo Salinas Vázquez
2do SUPLENTE: Prof. José Alfredo Vázquez Martínez

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Química Experimental y Aplicada, Edificio B,
Facultad de Química, U.N.A.M.

Asesor: Prof. Benjamín Ruiz Loyola

Sustentante: Karen Garrido Olvera

Agradecimientos

A mis padres, por darme su apoyo incondicional sin condiciones y por guiarme hasta este camino. ¡Los quiero mucho!

A la UNAM, por brindarme la educación profesional que me dará la oportunidad de contribuir al desarrollo del país y de crecer como persona, a la vez que me permitió encontrar personas que ahora son fundamentales en mi vida.

A Benjamín Ruiz, por ser mi asesor y guía no sólo en lo académico, sino también de vida. Gracias por tu paciencia, consejos, pláticas y muchos chistes.

A Pepe, por creer en mí.

Al grupo Ch-R-S-G-K y Carlos, me reí tanto con ustedes que sería imposible olvidarlos. Ecuaciones Diferenciales, los viernes y Los Amigos no se borrarán tan fácilmente de mi memoria.

A todos mis amigos universitarios, por vivir conmigo esta experiencia día a día, con desvelos, experimentos que huelen feo, clases de 7 a.m., exposiciones, laboratorio, etc. Siempre los llevaré en el corazón.

A mis amigas de la prepa, que aunque están un poco locas, siempre me han apoyado y brindado su amistad sin reparo. ¡Las quiero nenas!

Índice

Introducción.....	6
1. Generalidades.....	8
1.1 Antecedentes.....	8
1.2 Convención de Armas Químicas.....	10
1.3 Arma Química: Definición.....	11
1.4 Clasificación de Armas Químicas según los efectos causados en el organismo.....	19
2. Métodos de Destrucción de Armas Químicas e Instalaciones.....	24
2.1 Programa de Desarme.....	24
2.2 Material de Almacenamiento y de no-Almacenamiento.....	25
2.3 Dificultades de manejo de agentes químicos.....	27
2.4 Métodos de destrucción de Material de Almacenamiento.....	33
2.5 Métodos de destrucción del Material de no Almacenamiento.....	50
2.6 Destrucción del material energético.....	59
2.7 Disposición de desechos secundarios.....	64
2.8 Seguridad.....	65
2.9 Sistema de monitoreo.....	70
2.10 Descontaminación.....	74
2.11 Desmantelamiento.....	75
3. Impacto Ambiental del Desarme y Control de Emisiones.....	76
3.1 Impacto ambiental de la destrucción de armas químicas.....	76
3.2 Emisiones gaseosas (incineradores y hornos).....	79
3.3 Agua de lavado (neutralización).....	86
3.4 Cubierta metálica de municiones o contenedores.....	87
3.5 Efluentes de la destrucción de explosivos y propelentes.....	88
3.6 Efluente del tratamiento biológico.....	89
3.7 Recuperación de Agua.....	90
3.8 Salmuera.....	91
3.9 Residuos de clausura.....	92
3.10 Proyectos de limpieza.....	93
4. Marco Legal.....	93
4.1 Adopción de la Convención de Armas Químicas.....	94
4.2 Medidas legislativas.....	96
4.3 Normas y Leyes Mexicanas posiblemente aplicables a la destrucción de armas químicas.....	98
4.4 Normas y Leyes de los Estados Unidos de Norteamérica aplicables a la destrucción de armas químicas.....	104
5. Conclusiones.....	113
Bibliografía.....	117

Referencias electrónicas	120
Anexo A. Propiedades fisicoquímicas de agentes químicos	122
Anexo B. Algunos artículos de la <i>Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción, el Almacenamiento y el Empleo de las Armas Químicas y sobre su Destrucción</i> . (Organización para la Prohibición de las Armas Químicas)	123
Anexo C. Procesos de destrucción de armas químicas y disposición final de residuos.....	129
Anexo D. Caracterización del ejército de Estados Unidos para la descontaminación para materiales expuestos.....	131
Anexo E. Listado de acrónimos.....	132

Introducción

Las armas químicas lesionan, incapacitan o matan de diversas maneras: atacando al sistema nervioso o a los pulmones, o interfiriendo en la capacidad del cuerpo para absorber oxígeno. Otras causan ampollas y quemaduras graves. Los efectos crueles e indiscriminados que este tipo de armas de destrucción masiva causan han sido motivo principal para la prohibición, y posteriormente, la destrucción de este tipo de arsenales y de los complejos para su producción.

En documentos como los emanados de la Primera Conferencia de Paz de La Haya (1899) y del Protocolo de Ginebra (1925), los Estados se comprometieron a cumplir varias normas con el fin de erradicar el uso de armas químicas y biológicas. Pero fue con la firma de la *Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, Producción, Almacenamiento y Empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción* (CAQ -1993), que se logró un acuerdo multilateral sobre la prohibición y destrucción de armas químicas. El tratado entró en vigor en 1997, prohibiendo el desarrollo, la producción, la transferencia, el almacenamiento y el empleo de armas químicas. De igual manera, se exige a los participantes que declaren cualquier actividad relacionada con las armas químicas y que las destruyan dentro de los plazos acordados.

Cerca de 70,000 toneladas de armas químicas se encontraban en 2003 almacenadas en Estados Unidos, Rusia y otros cuatro países. El tener almacenadas armas químicas implica una serie de problemas, más allá de representar un peligro para la comunidad que se encuentra en las cercanías. Algunos de ellos serían el robo de estas armas para fines terroristas, la proliferación de investigación y desarrollo de este tipo de armas, así como la contaminación de suelo y agua por fugas o por un mal método de destrucción.

El impacto ambiental de la destrucción de armas químicas ha sido estudiado y controlado por los efectos que la exposición a dichos agentes causan al ser humano y al medio ambiente mas este control debe ser regulado por métodos y normas de salud y ambientales que contemplen todos los posibles escenarios de exposición.

México es considerado un país pacifista, en cuanto a incursión de problemas internacionales se refiere; el objetivo de esta tesis es conocer los métodos empleados internacionalmente para la destrucción de las armas químicas, saber si las Normas mexicanas contemplan dichos casos y en su defecto cómo podría prepararse ante ellos.

1. Generalidades

1.1 Antecedentes

Las armas químicas han formado parte de la historia desde la época de los griegos y de los chinos, quienes usaban humos arsenicales para evacuar lugares cerrados o el empleo del dióxido de azufre para la inmovilización de tropas. Tácticamente, la aplicación de estas armas ha servido para provocar bajas, por lesión o muerte, para ocasionar caos y reducir la velocidad de avance de la tropa enemiga.

A finales del siglo XIX la investigación y almacenamiento de las armas químicas comienza a ser preocupante para la seguridad de la comunidad internacional por el gran arsenal que ciertos países bélicos poseían. Por lo que en 1846 en la Convención de Bruselas, se prohíbe el uso de armas envenenadas y más tarde, en 1899, en las Convenciones de la Haya se restringe el uso de gases asfixiantes y deletéreos.

Posteriormente, en la Primera Guerra Mundial se usan por primera vez los agentes químicos a gran escala, como referencia está la batalla de Ypres (Bélgica) donde los alemanes liberan gas cloro en las trincheras enemigas causando 5,000 muertes y 15,000 casos de intoxicación en las tropas francesas, canadienses y argelinas. Se calcula que en esta guerra mundial, se emplearon poco más de 120,000 toneladas de agentes químicos entre los que destacan el gas cloro, el fosgeno y el gas mostaza; mientras que las cifras oficiales reportan cerca de 160,00 heridos y 180,000 muertes causadas por este tipo de armas. [1]

Debido a lo anterior, el siguiente intento por controlar el uso de las armas químicas se dio en 1925 en la Convención de Ginebra con el Tratado de Versalles, en donde el *Protocolo para la prohibición del uso de gases asfixiantes,*

venenosos y otros gases, y de métodos bacteriológicos de operaciones militares hace explícita prohibición de sustancias químicas como medio de ataque a tropas enemigas, sin embargo no prohíbe el desarrollo, producción y almacenamiento de éstas. El hueco que existía en el tratado, permitió que en el periodo de entreguerras se empezara una carrera armamentista lo que significaba para muchas naciones, una oportunidad para armarse en caso de guerras futuras, propiciando el auge de la investigación, producción y almacenamiento.

Al llegar la Segunda Guerra Mundial en 1939, la investigación y el desarrollo de las armas químicas disminuyó drásticamente debido al interés generado por la bomba nuclear; sin embargo eso no impidió el desarrollo de los Agentes G, los cuales son gases organofosforados que atacan el sistema nervioso. Este tipo de compuestos son mucho más dañinos que los previamente producidos, los más conocidos son el tabún (GA), sarín (GB) y somán (GD). El ataque con sustancias químicas a las tropas enemigas en esta guerra no sucedió, pero se tienen registros que los alemanes emplearon como arma química el insecticida Zyklon B (cianuro de hidrógeno) para conducir a la muerte a miles de judíos. También, se dio un accidente en Italia, donde al ser atacados por alemanes los buques americanos anclados en el puerto de Bari, se liberaron poco más de 100 toneladas de gas mostaza que se encontraban contenidos en ellos sobre militares y civiles.

El temor del uso de este tipo de armas en contra de la población civil creció entre los gobernantes, por lo que se realizaron algunos esfuerzos para implementar programas de desarme creados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU-1945), integrada poco después de la Segunda Guerra Mundial. [2]

Más tarde, a la mitad de la década de 1950, los americanos desarrollaron otra familia de agentes nerviosos a partir de un agente V, la cual es particularmente peligrosa, ya que puede ser producida a partir de materiales comerciales como son los insecticidas.

La estrategia por parte de la Organización de las Naciones Unidas era desarmar armas por género y para 1980 apenas empezaba a dar resultados. Pero esta noticia se vio opacada por el uso masivo de armas químicas en la guerra entre Irán e Iraq, las cuales provocaron miles de heridos y víctimas con diferentes discapacidades futuras. La presión de la opinión pública después de lo acontecido en Vietnam y posteriormente en Irán e Iraq, propició que se creara un instrumento jurídico internacional que las declarara ilegales, es decir, que se prohibiera el uso y producción de armas químicas. [2]

1.2 Convención de Armas Químicas

En 1993 la Conferencia de Desarme de la ONU aceptó el texto denominado *Convención sobre las Armas Químicas (CAQ)*, en donde se logra por primera vez un acuerdo multilateral para la eliminación total de una categoría completa de armas de destrucción masiva. En él se estableció un riguroso control internacional de armamentos, procedimientos de verificación internacional sobre recopilación de datos y de instalaciones químicas, así como de inspecciones periódicas. Además, se prohíbe para las naciones signatarias el desarrollo, producción, adquisición, almacenamiento, transferencia y empleo de las armas químicas. Para el cumplimiento de lo pactado se creó la *Organización para la Prohibición de Armas Químicas (OPAQ)* en 1997.

La OPAQ, en su reporte anual, ha publicado las siguientes cifras en cuanto a la situación de actividades hasta Abril del 2010. [3]

- Agentes químicos declarados hasta el 30 de Abril del 2010 71,194 toneladas
- Agentes químicos destruidos hasta el 30 de Abril del 2010 41,762 toneladas

- 8.67 millones de Contenedores/municiones declaradas hasta el 30 de Abril del 2010
- 3.93 millones de Contenedores/municiones destruidas hasta el 30 de Abril del 2010
- 70 Instalaciones de producción de armas químicas declaradas hasta el 30 de Abril del 2010
- 37 Instalaciones de destrucción de armas químicas declaradas hasta el 30 de Abril del 2010
- 38 Instalaciones de almacenamiento de armas químicas declaradas hasta el 30 de Abril del 2010
- 35 Instalaciones declaradas con armas químicas abandonadas hasta el 30 de Abril del 2010
- 47 Instalaciones declaradas que poseen antiguas armas químicas hasta el 30 de Abril del 2010
- Estados parte que han declarado haber destruido todos sus arsenales: Albania, la India y un Estado Parte Anónimo.

1.3 Arma Química: Definición

La definición de arma química ha ido evolucionando con el paso del tiempo, debido a las características que se han ido sumando conforme al empleo de éstas, como son las propiedades fisicoquímicas de la sustancia, los efectos en la salud a corto, mediano y largo plazo, el uso y producción de las mismas. En la actualidad la definición de arma química se encuentra establecida por la Convención de Armas Químicas (1993), cuyo Artículo 2° define a las armas químicas como productos químicos tóxicos y sus precursores, municiones o dispositivos creados con el único fin de causar la muerte o daños a través de las propiedades tóxicas de las sustancias químicas tóxicas, las cuales serían dispersadas por medio del uso de los dispositivos y municiones. Debe saberse que como precursor se entiende que es *“cualquier reactivo químico que intervenga en cualquier fase de la producción por cualquier método de una sustancia química tóxica. Queda incluido cualquier componente clave de un sistema químico binario o de multicomponente”*. [4] La misma Convención,

también define una sustancia química tóxica como a *“toda sustancia química que, por su acción química sobre los procesos vitales, pueda causar la muerte, la incapacidad temporal o lesiones permanentes a seres humanos o animales. Quedan incluidas todas las sustancias químicas de esa clase, cualquiera que sea su origen o método de producción y ya sea que se produzcan en instalaciones, como municiones o de otro modo.”* [4]

En este sentido es como la Convención de Armas Químicas establece tres listas de sustancias químicas tóxicas (Tablas 1.3.1, 1.3.2 y 1.3.3) que como tales son armas químicas o precursores de ellas, y ya que poseen un uso comercial o de investigación, deben ser reguladas por las diferentes instancias según la normatividad de cada país signatario. Se dividen en:

- **Grupo 1.** Sustancias químicas cuyo uso comercial es nulo o muy bajo, son empleados principalmente en proyectos de investigación o con fines médicos. La producción de este tipo de sustancias arriba de 100g debe ser notificada a la OPAQ de manera inmediata y queda estrictamente prohibido el almacenamiento de más de una tonelada de dichos materiales.
- **Grupo 2.** Compuestos con un uso moderado industrial y que poseen un alto potencial como precursores.
- **Grupo 3.** Sustancias químicas producidas y empleadas a gran escala. Debido a su amplio uso, la regulación de este tipo de sustancias suele ser un poco más laxa en cuanto a producción y más restringida o controlada en cuanto a transporte y distribución. Si una planta produce más de 30 toneladas/año, debe ser reportada a la OPAQ y será inspeccionada por el mismo organismo internacional.

Tabla 1.3.1. Grupo 1. Químicos que no tienen o tienen un uso comercial bajo [5]

Químicos Tóxicos (agentes químicos para la guerra)	Ejemplos		
	Nombre común	Código	Nombre
<p>* R₂ fosfonofluoridato de O- R₁</p> <p>R₁ ≤ C₁₀, incluyendo cicloalquilos</p> <p>R₂ = metil, etil, n-propil, isopropil</p>	Sarín	GB	metilfosfonofluoridato de O-isopropilo
	Somán	GD	Metilfosfonofluoridato de O-pinacolilo
<p>* N,N-diR₂ fosforamidocianidato de O-R₁</p> <p>R₁ ≤ C₁₀, incluyendo cicloalquilos</p> <p>R₂ = metil, etil, n-propil, isopropil</p>	Tabún	GA	N,N-dimetil fosforoamidocianidato de O-etilo
<p>* S-2-diR₂aminoetil R₃ fosfonotiolato de O-R₁</p> <p>y las sales protonadas o alquiladas correspondientes</p> <p>R₁ = H o ≤ C₁₀, incluyendo cicloalquilos</p> <p>R₂ = metil, etil, n-propil, isopropil</p> <p>R₃ = metil, etil, n-propil, isopropil</p>		VX	S-2-diisopropilaminoetil metilfosfonotiolato de O-etilo
<p>* Mostazas de azufre</p>	Gas mostaza	H	sulfuro de bis(2-cloroetilo)
	Sesquimostaza		1,2-bis(2-cloroetiltio)etano

	<p>bis(2-cloroetiltio)metano</p> <p>1,3-bis(2-cloroetiltio)-n-propano</p> <p>1,4-bis(2-cloroetiltio)-n-butano</p> <p>Clorometilsulfuro de 2-cloroetilo</p> <p>1,5-bis(2-cloroetiltio)-n-pentano</p> <p>bis(2-cloroetiltiometil)éter</p> <p>Mostaza O</p> <p>bis(2-cloroetiltioetil)éter</p>
* Lewisitas	<p>L-1 2-clorovinildicloroarsina</p> <p>L-2 bis(2-clorovinil)clororarsina</p> <p>L-3 tris(2-clorovinil)arsina</p>
* Mostazas de nitrógeno	<p>HN1 bis(2-cloroetil)etilamina</p> <p>HN2 bis(2-cloroetil)metilamina</p> <p>HN3 tris(2-cloroetil)amina</p>
* Saxitoxina	
* Ricina	

Precursores (precursores inmediatos)

<p>* Fosfonildifluoruros de R₁ R₁ = metilo, etilo, n-propilo, isopropilo</p>	<p>DF Metilfosfonildifluoruro</p>
<p>* O-2-diR₂aminoetil R₃ fosfonito de O-R₁ y las sales protonadas o alquiladas correspondientes R₁ = H o ≤ C10, incluyendo cicloalquilos R₂ = metil, etil, n-propil, isopropil R₃ = metil, etil, n-propil, isopropil</p>	<p>QL O-2-diisopropilaminoetilmetilfosfonito de O-etilo</p>
<p>* Cloro sarín</p>	<p>metilfosfonocloridato de O-isopropilo</p>
<p>* Cloro somán</p>	<p>metilfosfonocloridato de O-pinacolilo</p>

Tabla 1.3.2 Grupo 2. Químicos con uso comercial moderado y alto riesgo como precursores [5]

Químicos Tóxicos (agentes químicos potenciales para la guerra)	Ejemplos		
	Nombre común	Código	Nombre
* Amitón	Amitón		fosforotiolato de O,O-dietil S-[2-(dietilamino)etilo] y las sales protonadas o alquiladas correspondientes
* PFIB			1,1,3,3,3-pentafluoro-2-(trifluorometilo) de 1-propeno
* BZ			benzilato de 3-quinuclidinilo

Precursores (precursores inmediatos)

* Químicos que contienen un átomo de fósforo enlazado con un solo grupo metilo, etilo o propilo, pero no a otros átomos de carbono	dicloruro de metilfosfonilo metilfosfonato de dimetilo (no incluye: Fonofos, etilfosfonotiolotionato de O-etilo S-fenilo)
* dihaluro de N,N- diR ₁ fosforamidatos R ₁ = metil, etil, n-propil, isopropil	
* N,N-diR ₂ fosforamidato diR ₁	

R ₁ = metil, etil, n-propil, isopropil R ₂ = metil, etil, n-propil, isopropil	
* tricloruro de arsénico	
* ácido 2,2-difenil-2-hidroxiacético	
* quinuclidinol-3	
* cloruro de N,N-diR ₁ aminoetilo-2 y las sales protonadas correspondientes R ₁ = metil, etil, n-propil, isopropil	
* N,N-diR ₁ aminoetan-2-ol y las sales protonadas correspondientes R ₁ = metil, etil, n-propil, isopropil	(no incluye: N,N-dimetilaminoetanol y N,N-dietilaminoetanol)
* N,N-diR ₁ aminoetano-2-tiol y las sales protonadas correspondientes R ₁ = metil, etil, n-propil, isopropil	
* Tiodiglicol	sulfuro de bis(2-hidroxi-etilo)
* alcohol pinacolílico	3,3-dimetilbutan-2-ol

Tabla 1.3.3 Grupo 3. Químicos producidos y empleados a gran escala [5]

Químicos tóxicos (viejos agentes químicos para la Guerra)

- Fosgeno
- Cloruro de cianógeno
- Cianuro de hidrógeno
- Cloropicrino

Nombre químico

dicloruro de carbonilo

tricloronitrometano

Precursores (precursores inmediatos)

-
- Pentacloruro de fósforo
- Tricloruro de fósforo
- Fosfito trimetilico
- Fosfito trietilico
- DMHP
- DEHP
- Monocloruro de azufre
- Dicloruro de azufre
- Etildietanolamina
- Metildietanolamina
- Trietanolamina

Oxicloruro de fósforo

fosfito trietilico

fosfito dimetilico

1.4 Clasificación de Armas Químicas según los efectos causados en el organismo

Existen varios criterios para clasificar armas químicas, en este caso citaré la clasificación según los efectos que causan en la salud humana o por los efectos fisiológicos producidos en diversos estudios. Se dividen en los siguientes grupos:

1. Gases asfixiantes o irritantes pulmonares

Sustancias que al ser inhaladas interrumpen la absorción del oxígeno o irritan de manera intensa las vías respiratorias, impidiendo de este modo la respiración.

2. Gases vesicantes

Este tipo de agentes provocan ampollas al entrar en contacto con la piel, ya que son irritantes tisulares y por lo general poseen una acción sistémica adicional. Existen dos grupos principales, uno de ellos a los que se conoce como *mostazas* y otros son los derivados de la dicloroarsina. La diferencia principal entre ellos es que los segundos causan como efecto adicional edema pulmonar.

3. Gases de la sangre o hemogases

Agentes que alteran la composición de la sangre al bloquear el transporte de oxígeno.

4. Psicomiméticos

Aquellos que causan efectos alucinógenos similares a los del LSD (dietilamida de ácido lisérgico), interfiriendo con las funciones mentales y corporales normales. No provocan daños permanentes y no requieren asistencia médica posterior.

5. Neurogases o gases nerviosos

Comprende a los compuestos organofosforados que inhiben la enzima acetilcolinesterasa tisular en los humanos, causando la parálisis inmediata de las células nerviosas en todo el cuerpo, aún expuesta a pequeñas dosis. Se dividen en dos familias químicas distintas:

- **Agentes G.** Actúan principalmente por inhalación de agentes tóxicos derivados de los ésteres de alquilo del ácido metilfosfonofluorídrico.
- **Agentes V.** La exposición para este tipo de agentes debe de ser por penetración cutánea o por inhalación. Son derivados de ésteres de alquilo del ácido dialquilaminoetilmetilfosfonotiólico.

6. Defoliantes y anticultivos

Compuestos que normalmente se emplean como herbicidas o plaguicidas, y que al usarse en grandes volúmenes provoca que los árboles y arbustos aledaños, pierdan sus hojas y en ciertas ocasiones mueran. El tiempo de exposición persistente es muy variado, llegando a ser hasta decenas de años. Aunque no actúa directamente sobre humanos, este tipo de sustancias químicas permite terminar con los suministros de alimentos del enemigo, así como de lugares donde existe la posibilidad de ocultarse.

7. Discapacitantes (lacrimógenos u hostigantes)

Usados por la policía y militares con la finalidad del hacer cumplir la ley y controlar manifestaciones. Este tipo de productos químicos se desarrollaron a inicios del siglo XX, se pueden subdividir de la siguiente manera:

- **Clase A.** Causa invalidez física temporal como sueño, debilidad, ceguera; y no implican peligro de muerte o invalidez permanente.
- **Clase B.** Agentes que en pequeñas dosis causan invalidez física temporal, pero en dosis mayores pueden ser mortales o causar efectos permanentes.
- **Clase C.** Sustancias químicas que producen incapacidad mental.

Los agentes con mayor uso a partir de la Primera Guerra Mundial hasta la fecha se observan en la Tabla 1.4.1, los cuales se encuentran ordenados de acuerdo a su toxicidad relativa. Adelante, en la tabla 1.4.2 se enlista una relación detallada con síntomas y efectos según el agente al que se está expuesto, así como algunos ejemplos del tipo de armas químicas

Tabla 1.4.1 Agentes con mayor uso desde la Primera Guerra Mundial hasta la fecha [5]

Agente	Código	Toxicidad relativa ^a
Cloro	CL	1
Cloropicrino	PS	1
K-Stoff	-	2 ^b
Cloruro de cianógeno	CK	2
Cianuro de hidrógeno	AC	5 ^c
Etildicloroarsina	ED	5
Fosgeno	CG	6
Difosgeno	DP	6
Fenildicloroarsina	PD	7
Mostaza	H/HD ^d	13
Mostaza de Nitrógeno	HN ₃	13
Lewisita	L	15
Tabún	GA	50
Sarín	GB	200
Somán	GD	400
VX	VX	2000 ^e

^a Calculado de datos de toxicidad por inhalación, relativo a LC₅₀= 20000 mg-min/m³ para la cloropicrino, ó 50 mg-min/m³ para GD. LC₅₀ se encuentra definido como la dosis de inhalación (concentración por tiempo) de vapor que sería fatal para el 50% de una población expuesta.

^b Basado en el valor para el clorometil cloroformato.

^c Reportado como variable, depende del tiempo de exposición.

^d HD es H destilado.

^e Basado en una dosis en aeros

Tabla 1.4.2 Síntomas y efectos de los agentes químicos por tipo [6]

Tipo	Agente	Síntomas	Efectos
Asfixiantes	Fosgeno	Disnea, efecto lacrimógeno y paro respiratorio.	Daña el sistema respiratorio provocando asfixia y lo inunda de mucosidad.
Vesicantes	Gas mostaza, lewisita	Dolor en el área afectada, conjuntivitis, ampollas en la piel.	Produce abrasiones en la piel y ojos.
Hemogases	Cianuro de hidrógeno	Respiración rápida y convulsiones	Impide una oxigenación celular adecuada, de manera que el organismo presenta fallas en órganos vitales.
Psicomiméticos	Dietilamida de ácido lisérgico	Sensación de agudeza sensorial, reducción de capacidad motora, alteración de la percepción del dolor/espacio/tiempo.	Modifica el proceso de regulación de la serotonina.
Neurogases	Sarín, tabún, somán, VX	Disnea, sudoración, salivación, convulsiones y visión nublada.	Inhibición de la enzima acetilcolinesterasa.

	Gas lacrimógeno, gas pimienta	Irritación ocular severa.	Dolor agudo en zona ocular y ceguera temporal.
Discapacitantes	BZ	Confusión, alucinaciones, regresión de comportamientos automáticos de origen.	Efectos en el sistema nervioso periférico.

2. Métodos de Destrucción de Armas Químicas e Instalaciones

Las armas químicas que están almacenadas consisten en su mayoría de siete agentes o combinaciones de estos. Entre los agentes se incluyen los vesicantes como el gas mostaza (H- compuesto con 20-30% de impurezas, HD – compuesto casi puro y HT- es una mezcla de 60% de HD y el 40% de bis[2(2-cloroetil)etil]éter y lewisita, así como algunos gases nerviosos como sarín (GB), somán (GD), VX y en menores cantidades tabún (GA) y ciclosarín (GF).

La mayoría de estos compuestos se encuentran cargados en municiones o en contenedores, donde han permanecido un tiempo promedio de 40 años. Esto se debe en gran medida a la carrera armamentista que se dio después de la II Guerra Mundial. Estados Unidos y la Unión Soviética fabricaron en conjunto poco más de 70,000 toneladas de armas químicas hasta 1990 [7], sin embargo no son los únicos países que han declarado poseer armas químicas en su territorio.

2.1 Programa de Desarme

Después de años de negociación, en la Convención de Armas Químicas (CAQ, 1993) se establece por primera vez en un tratado internacional la prohibición del desarrollo, la investigación, la producción, el uso, el almacenamiento y la transferencia de armas químicas, además de comprometer a los estados parte a destruir todas las reservas de armas químicas y las plantas de producción que posean, así como a prevenir que vuelvan a surgir las prácticas antes mencionadas. En 1997, casi cuatro años más tarde, entra en vigor la CAQ, en donde Estados Unidos de América, Rusia, India, Alemania, Corea del Sur, entre otros, y posteriormente Albania y Libia, prometen destruir sus arsenales para el 2007, con una posible extensión hasta el 2012. [8]

Las tecnologías existentes para la destrucción de armas químicas y las instalaciones de producción, son cerca de 100 posibles. Sin embargo las más utilizadas son la incineración, la neutralización y bituminización, las cuales se describirán a profundidad más adelante. [8] La primera es ampliamente usada en

los Estados Unidos como método de destrucción de armas químicas, pero produce grandes volúmenes de efluentes gaseosos que deben ser tratados antes de emitirlos a la atmósfera. La segunda y tercera, son métodos complementarios empleados en la Federación Rusa. Poseen la ventaja de ser más simples que la incineración, más la alta producción de desechos sólidos impide que sea el método perfecto a utilizar.

2.2 Material de Almacenamiento y de no-Almacenamiento

El programa de destrucción de material de no almacenamiento y de no almacenamiento se diferencian por el material que deben destruir. Como material de almacenamiento se conoce a todas las armas químicas que se posean en las diferentes instalaciones que puedan ser usadas en combate y a las sustancias que se encuentran en contenedores; y como material de no almacenamiento, al resto de los artículos asociados con armas químicas. Esto es, municiones recuperadas, enterradas y armas químicas binarias, así como las instalaciones de producción.

El programa de desarme de ambos tipos de materiales debe cumplir cierta metodología, con el fin de contar con la máxima seguridad posible hacia al público en general, al ambiente y a las personas involucradas en la desactivación. Algunas actividades que se engloban en este programa se describen a continuación [9]:

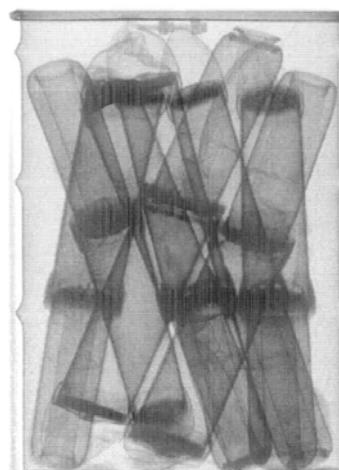


Fig. 2.2.1 Rayos X de un tambo que contiene 8 cohetes alemanes Traktor. [7]

- 1) Recolección y análisis de información de material almacenado y no almacenado.

- 2) Identificación y asesoramiento de sitios con posibles municiones enterradas.
- 3) Coordinación de transporte de armas químicas recuperadas hacia lugares de almacenamiento temporal.
- 4) Destrucción de material químico en el sitio de producción, bajo condiciones de seguridad y protección al público en general y al ambiente.
- 5) Investigación, desarrollo, evaluación y selección de métodos de disposición para todo el material de almacenamiento y/o de no almacenamiento.
- 6) Destrucción de armas químicas binarias, material químico bélico variado, municiones recuperadas e instalaciones de producción de armas químicas de acuerdo a la Convención de Armas Químicas, conforme a las normas ambientales y de seguridad pública.
- 7) Recuperar y destruir material químico, con el interés de salvaguardar el ambiente y al público en general.

El programa de destrucción de material de no almacenamiento debe incluir la planeación estratégica de la ejecución del desarme y cómo deshacerse de los residuos del antiguo complejo de producción de armas químicas, así como la recuperación de armas químicas enterradas, para después destruirlas y someter al suelo en el que estaban a un programa de remediación. La mayor parte del material removido debe ser descontaminado antes de embarcarlo al sitio de reciclaje o a los tiraderos de basura, sólo si es necesario. Sin embargo este programa es vulnerable a cambios y ajustes debido a que no se conoce las cantidades exactas del material, las condiciones o la naturaleza del los agentes que se pudieran encontrar.

Es necesario contemplar métodos de eliminación o disposición para las corrientes de residuos que resultan del destruir armas químicas y desmontarlas, algunas de ellas se nombran a continuación:

- a. El agente químico drenado de la cavidad de la munición
- b. Material energético: propelentes, iniciadores, cargas explosivas, espoletas y las partes metálicas a las que están unidas
- c. Carcasas o cubiertas de metal de las municiones
- d. Embalaje, del cual la mayoría no se encuentra contaminado
- e. Efluentes gaseosos y aire del sistema de ventilación, aire acondicionado y calefacción
- f. Filtros usados de carbón activado durante el tratamiento de los efluentes gaseosos

2.3 Dificultades de manejo de agentes químicos

Existen otros motivos que han impulsado la desactivación y destrucción de armas químicas, entre los que figuran la degradación de los agentes químicos con el tiempo y la inestabilidad del propelente o de material explosivo; mismos que atentan a la seguridad de las personas que colaboran en dichas instalaciones y a las comunidades vecinas. A continuación se explicarán más a detalle algunos de los problemas que se presentan por almacenamiento prologando de armas químicas.

- Se han llevado a cabo algunas evaluaciones, hechas por el ejército de Estados Unidos, las cuales han arrojado que un almacenamiento posterior al 2004 puede considerarse no seguro. [9] Esto se debe a que algunas de las municiones cuentan con propelente, el cual inherentemente es un compuesto inestable y que debe ser estabilizado para prevenir reacciones que provoquen alguna ignición espontánea. Los estabilizadores se degradan con el tiempo, por lo que el periodo de almacenamiento es determinado por la cantidad de estabilizador presente en el propelente. En la actualidad, gran parte del arsenal acumulado ya no cuenta con el propelente por motivos de seguridad.
- De acuerdo con diferentes reportes, se sabe que los agentes nerviosos, en particular el agente GB, se tornan ácidos y pueden llegar a corroer las partes metálicas de las municiones que los contienen. Algunas ocasiones, por corrosión, el metal presenta hoyos por los cuales el agente puede

fugarse en estado líquido o vapor. Estas fugas pueden ser internas o externas.

- Algunos de los métodos de destrucción han sido desarrollados para drenar el agente químico líquido de las municiones y después incinerarlos. Sin embargo, el estado de agregación de los agentes no es el mismo en todas las municiones debido a que los estabilizadores de los agentes han degradado su estado original. Por ejemplo, en el misil M55 se ha encontrado que el agente químico GB se encuentra en gel o en estado semisólido, atribuido a la presencia de la diisopropilcarbodiimida (DICDI) o a la hidrólisis del mismo GB, por lo que no es posible drenar o vaciar el contenido. [10]

Debido a lo anterior, se requirió el diseño de una alternativa para poder sacar el contenido del misil y que se pudiera continuar con la destrucción del arma.

- En varias de las instalaciones se ha encontrado mercurio en muestras de municiones que contienen HD. [11] Existen algunas suposiciones con respecto al origen del mercurio que incluyen: la contaminación con mercurio a partir de la difusión de las bombas en la destilación, el mercurio de manómetros rotos que permitieron contaminar el HD, mercurio residual en los contenedores, entre otros. Sin embargo, no se ha podido conocer la razón respecto a su procedencia, así como tampoco a la forma y la concentración en que se encuentra. Pero se ha observado una concentración alta de mercurio en el efluente de gases y en los compuestos hidrolizados o incinerados después de la destrucción del agente químico.

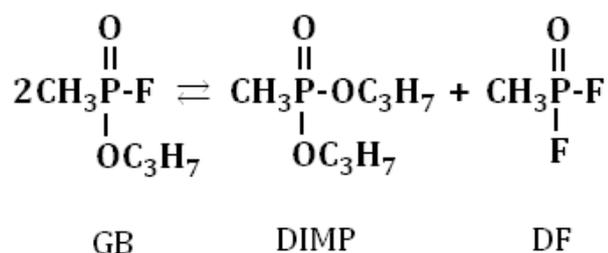
2.3.1 Mecanismos y productos del deterioro de algunos agentes químicos

El estudio de la degradación de sustancias es una tarea laboriosa, pero debe hacerse con el fin de tener el conocimiento de qué productos se han generado con el paso del tiempo y así reducir el riesgo al momento de destruir las municiones. Este estudio debe analizarse como una función del tiempo,

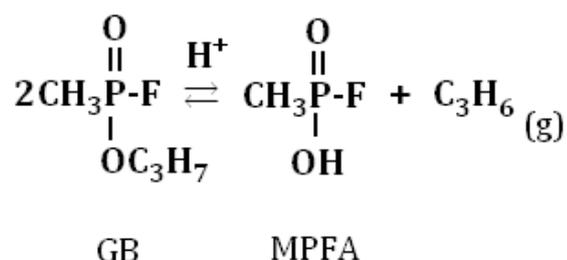
temperatura, inhibidores e impurezas. [12] Varios investigadores han discutido diversos mecanismos de reacción de los agentes tóxicos para conocer los productos generados, los más aceptados serán resumidos a continuación.

GB- Existen tres mecanismos que han sido identificados para la degradación del GB almacenado.

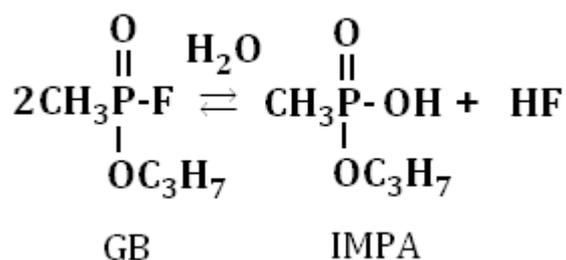
- (I) En este mecanismo se muestra como el GB puede formar diisopropilmetilfosfonato (DIMP) y difluoro metilfosfónico (DF) de manera reversible.



- (II) Hidrólisis catalizada por medio ácido para formar ácido metilfosfonofluórico (MPFA).



- (III) Hidrólisis en medio neutro para formar ácido isopropilmetilfosfónico (IMPA)



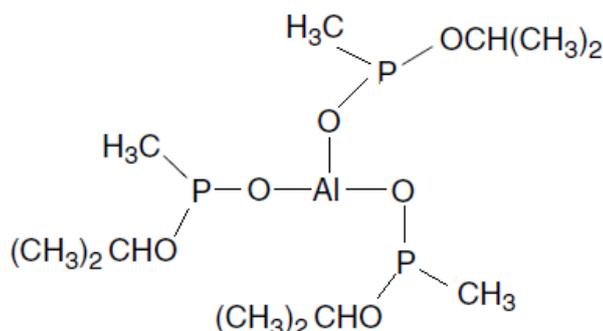
Al formarse DIMP, este puede ser hidrolizado a su vez para formar IMPA, el cual puede ser también hidrolizado para formar ácido metilfosfónico (MPA). Todos estos productos son ácidos, por lo que se debe esperar una ligera aceleración en la descomposición del GB. Esto se debe a que las reacciones anteriores son catalizadas en medio ácido, por lo que es posible que se dé un mecanismo auto catalítico cuando el estabilizador se haya agotado.

La producción del ácido fluorhídrico, que es producto del mecanismo de reacción III, puede reaccionar con el aluminio del cuerpo de la munición para formar AlF_3 y liberar hidrógeno gaseoso. El fluoruro de aluminio formará complejos con otros iones de flúor para formar aniones más estables como AlF_6^{3-} .

Por otro lado, en algunas municiones se ha visto que este agente se encuentra en un estado semisólido o cristalizado, complicando las operaciones de drenado del agente de la munición. Como se mencionó anteriormente, se atribuye esta anomalía a la hidrólisis del GB y a la formación de complejos de aluminio fosforados. [1]

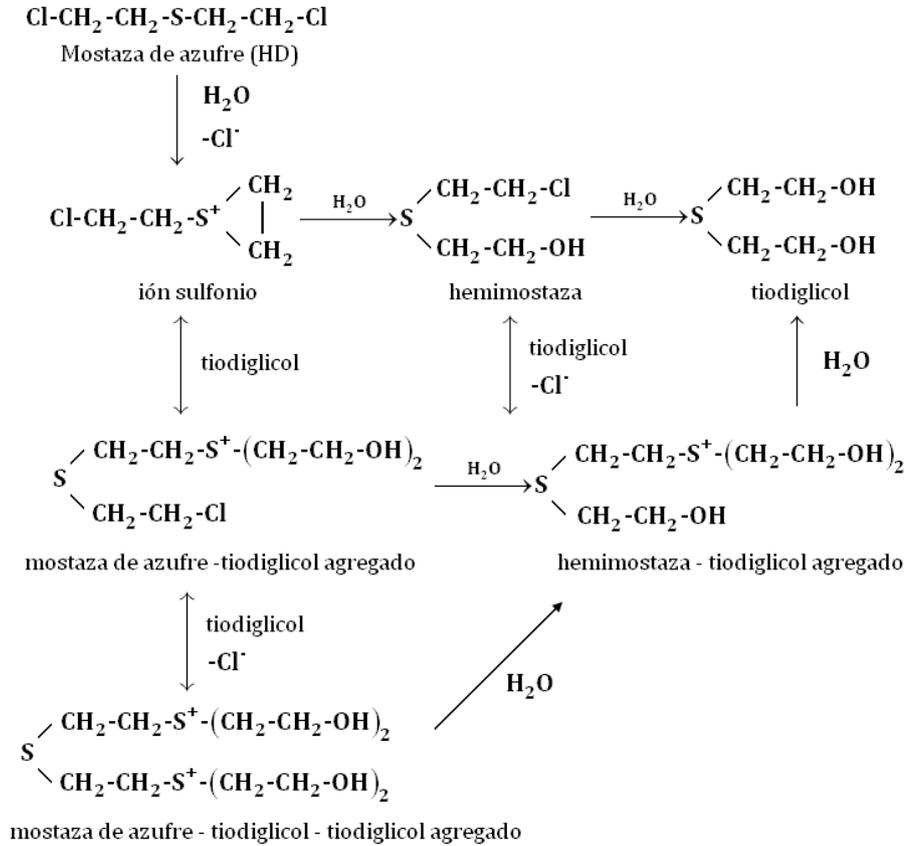
Los iones de aluminio, producto de la corrosión de las partes metálicas del cuerpo de la munición, y el IMPA reaccionan para formar el complejo triisopropilmetilfosfonatoaluminato, con la siguiente estructura:

Figura 2.3.0 Estructura propuesta para el complejo triisopropilmetilfosfonatoaluminato [12]

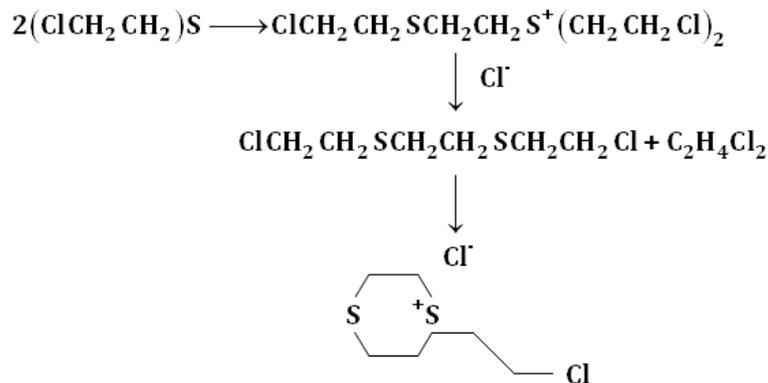


La mayoría de los complejos son líquidos viscosos, que pueden formar un sólido un poco soluble en GB o compuestos fosforados poliméricos.

HD - El agente HD (sulfuro de bis-2-cloroetilo), mejor conocido como mostaza, presenta en las reacciones de descomposición la siguiente secuencia [12]:

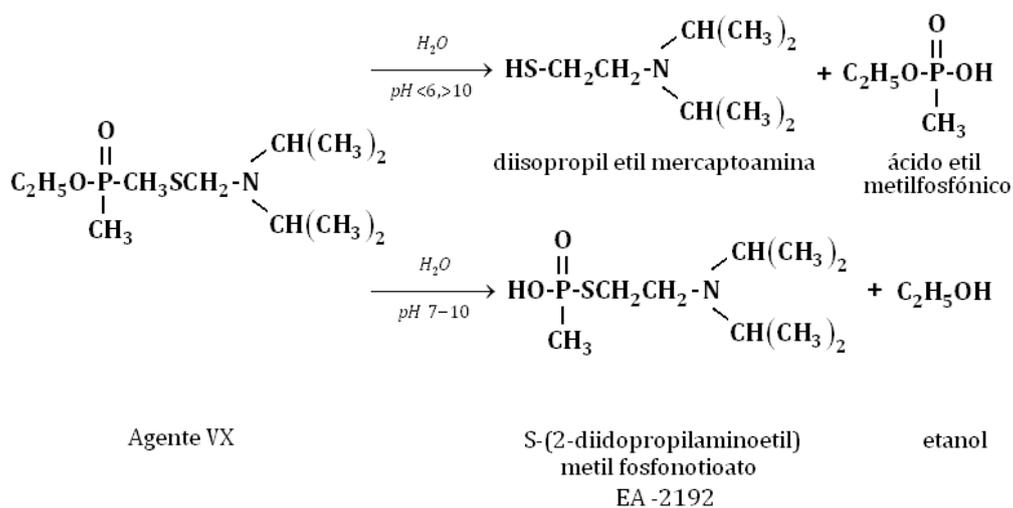


Posteriormente puede llevarse a cabo un siguiente mecanismo de reacción, que es el responsable de la formación de residuos semisólidos. Estos aglomerados se encuentran entre un 20-30% del volumen de los contenedores de bulto para la mostaza, inclusive en algunas municiones el 70% del agente se encuentra en esas condiciones. Los residuos están conformados por cloruro de S-(2-cloroetil)-1,4-ditiano, HD atrapado y hierro disuelto. El mecanismo de la formación del ión ditiano es:



Tanto la reacción de hidrólisis como la formación de los residuos semisólidos pueden ocasionar la corrosión del depósito de acero, así como a las válvulas y sellos que se encuentran en los contenedores de bulto. Al formarse el ácido clorhídrico, éste reacciona con el hierro y produce cloruro ferroso y libera hidrógeno gaseoso, lo cual da origen a la formación de espuma al momento de abrir el contenedor.

VX - La hidrólisis de este agente se favorece en medio ácido o básico para que el enlace fósforo-azufre quede expuesto, si es en medio neutro el enlace expuesto será el fósforo-etoxi. [12] De esta manera es posible que el VX se degrade en los siguientes productos:



La rapidez de reacción para la hidrólisis de este compuesto es lenta, debido a que el grupo amino terciario al donar electrones, hace que este agente sea una base de Lewis. [12] Como consecuencia, se espera que el VX posea una degradación lenta y un largo tiempo de vida para almacenamiento. Sin embargo, uno de los productos de descomposición, el ácido etilmetilfosfónico, es ácido por lo que puede corroer los contenedores de acero y tornar el medio ácido.

Tabla 2.3.1 Productos del deterioro de los agentes químicos [12]

Agente	Productos de la descomposición
VX	Tiolamina; ácido etilmetilfosfónico; etanol; tioeter de bis(2-diisopropilaminoetilo); disulfuro de bis(2-diisopropilaminoetilo); o,o'-dietilmetil fosfonolato; o,o'-diisopropilaminoetilmercaptano; o,S-dietil metil fosfonotiolato; sulfuro de diisopropilaminoetiletilo; o,S-dietil metil fosfonato; N,N'-diisopropilamino etilmetilfosfonato; S-etil, S-diisopropilaminoetilmetilfosfonotiolato; o-etil, S-diisopropilaminoetilmetilfosfonotiolato; S'-diisopropilaminoetilmetilfosfonotiolato; diisopropilamina
GB	ácido fluorhídrico, ácido isopropilmetilfosfónico; isopropanol; propeno; metilfosfonofluoridato; diisopropilmetilfosfonato; ácido metilfosfónico
Mostaza (HD)	ácido clorhídrico; ácido sulfhídrico; etilendicloro; cloruro de vinilo; disulfuro de 2,2'-diclorodietilo

2.4 Métodos de destrucción de Material de Almacenamiento

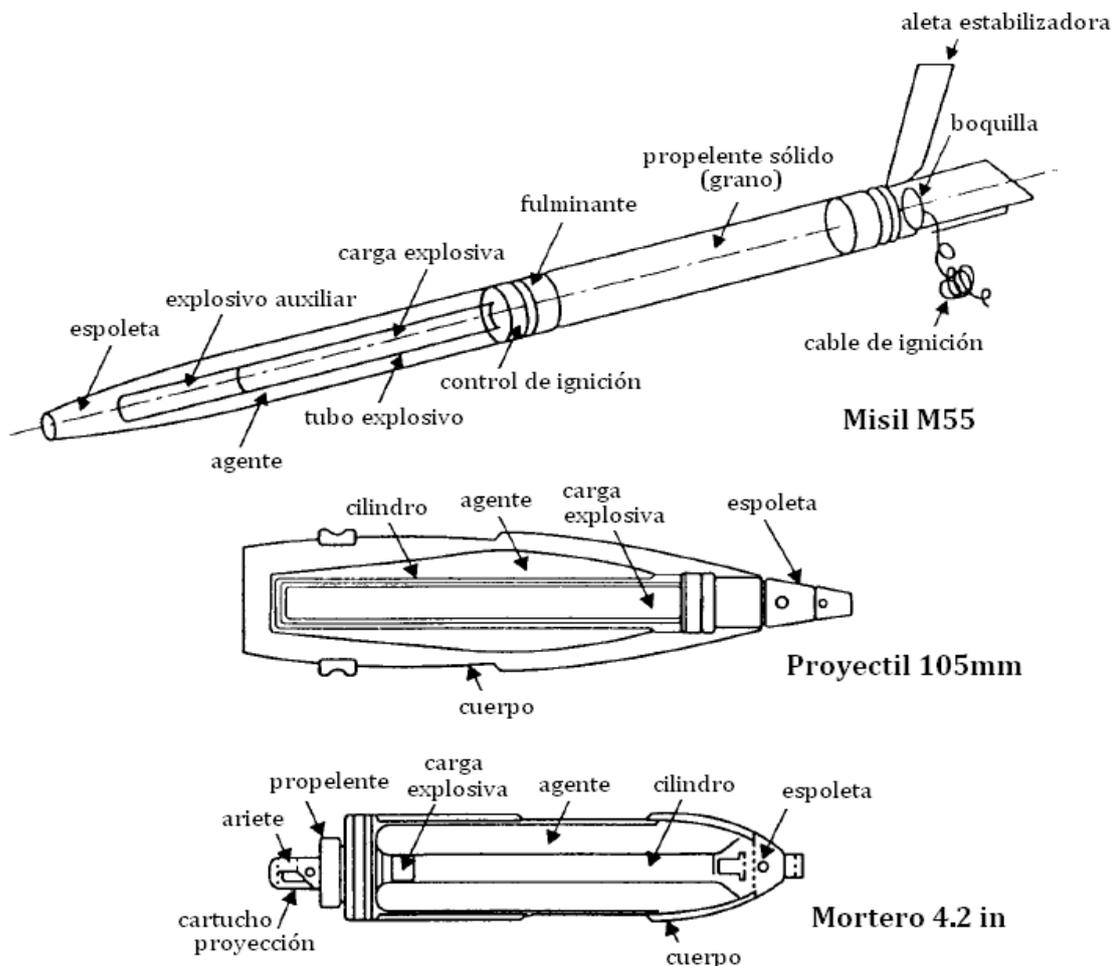
La elección del método de destrucción de las armas químicas depende en gran medida de la configuración en la que se presenta el arma, así como donde se encuentra almacenada la munición y la seguridad que representa transportarla. [5].

- a. *Configuración.* Los agentes químicos se encuentran almacenados en tres configuraciones básicas
 1. proyectiles, cartuchos, minas y cohetes que pueden contener algún propelente y/o componentes explosivos.
 2. municiones liberadas por aviones que no contienen componentes explosivos.
 3. contenedores de acero de una tonelada.

La mayor parte de las reservas se encuentran en contenedores, además de que en promedio, los agentes tienen una antigüedad de 30 a 50 años.

- b. *Almacenamiento y seguridad.* La mayor parte del armamento se encuentra alojado en un área de confinamiento en las instalaciones de producción. Por lo general se encuentra en estantes, cajas, latas o guardadas individualmente en “igloos” diseñados específicamente para ciertos agentes.

Figura 2.4.1 Configuración de almacenamiento de algunas municiones. [5]



Sin embargo, los factores que tienden por definir la elección de un método sobre otro por parte de las autoridades se centran en los siguientes puntos: maduración

del proceso, eficacia del proceso, seguridad, aceptación por parte de normas y leyes existentes, problemas con los residuos secundarios y finalmente, el costo del proceso.

Las tecnologías de destrucción de material de almacenamiento alternas a la incineración, deben utilizarse en conjunto; ya que por sí mismas no son suficientes para tratar toda el arma química y desecharla (Ver Tabla 2.4.1). Existen varias combinaciones de métodos de destrucción, algunas se mencionan a continuación. La mayoría se basa en la neutralización del agente.

1. Neutralización e incineración.
2. Neutralización, oxidación con aire húmedo y oxidación biológica.
3. Neutralización y oxidación con agua supercrítica.
4. Neutralización y tratamiento biológico.

Tabla 2.4.1 Capacidad de diferentes métodos para la destrucción de material de almacenamiento [5]

Tecnología	¿Puede destruir/descontaminar la tecnología...?			
	Agente químico	Explosivos y propelentes	Partes metálicas	Embalaje
Incineración	sí	sí	sí	sí
Oxidación con sales fundidas	sí	sí	no	no
Oxidación en cama fluidizada	sí	sí	no	no
Pirólisis con metal fundido	sí	sí	sí	no
Pirólisis con plasma	sí	no	no	no
Gasificación de vapor	sí	no	no	no
Oxidación con aire húmedo	sí	sí	no	no
Oxidación con agua supercrítica	sí	sí	no	no
Neutralización química	sí	no	no	no

A continuación se describirán algunos de los métodos para la destrucción de armas químicas, algunos de ellos se encuentran en fase de diseño y en pruebas

de laboratorio, otros ya se emplean actualmente en diferentes plantas de destrucción de armas químicas:

I. Combustión en cama fluidizada

Es una tecnología que ha sido empleada para eliminar residuos urbanos peligrosos y desechos en centrales eléctricas, por lo que se ha comprobado la posibilidad de arranque y paros continuos del equipo con una seguridad relativa. Sin embargo, la dificultad en el empleo de esta técnica radica en lograr la eficiencia de destrucción esperada de agentes químicos, así como alcanzar los límites de emisiones de los gases emitidos.

Procedimiento

1. Como medio de transferencia de calor, es utilizada una cama fluida de un sólido granular con el combustible apropiado (2-5 % del peso total del lecho). En el caso de la destrucción de agentes químicos, el sólido debe ser óxido de aluminio u óxido de calcio para mejores resultados. [5]
2. La temperatura debe estar limitada entre 850-900 °C, debido a que no se permite la fundición del lecho.
3. Durante la combustión el material se mantiene en suspensión por un flujo de gas, principalmente aire. Como resultado se obtiene una mezcla turbulenta del gas y de los sólidos, que a su vez reduce el riesgo de explosión de propelentes y explosivos.

II. Criofractura

Esta técnica ha sido estudiada como un procedimiento previo a la incineración, ya que se ha encontrado que es apropiado para el inicio de la destrucción de municiones degradadas. Consiste en enfriar la munición con nitrógeno líquido a -148°C [13], de modo que se pueda fracturar (trozar) en pequeñas partes mediante una prensa, posteriormente se tendrá que emplear una tecnología alterna para el tratamiento final.

Una de las ventajas que posee este método es la facilidad de acceso al agente contenido dentro de la munición sin poner en riesgo la seguridad del

personal que labora en dichas instalaciones; por lo que se puede destruir cualquier tipo de munición sin importar el estado en el que se encuentre. Aún así, el procedimiento debe realizarse dentro de cámaras que son capaces de contener explosiones y en las que el sistema de ventilación se encuentra conectado a un sistema de control de emisiones gaseosas. Alguno de los riesgos que conlleva es que existan incendios debido a los propelentes y los posibles efectos de la incineración del agente y de los componentes explosivos a una temperatura de alimentación baja, debido a que no se han investigado completamente.

III. Congelamiento

Es un método en el cual las municiones son enfriadas antes de accesar al agente, especialmente para las armas que contienen mostazas, para evitar que se produzca espuma. Esto se lleva a cabo en cuartos de enfriamiento que operan entre -28° y -23°C , con un tiempo de residencia para las municiones de 11 a 15 horas, dependiendo del modelo de transferencia de calor al que se ajuste el material. Después de remover las municiones fuera del cuarto de enfriamiento, éstas deben permanecer a una temperatura menor a los 12°C , debido al punto de fusión de la mostaza, por 3 horas. [14] Posteriormente, para la destrucción del agente se procederá a incinerarlo en el horno de tratamiento para metales.

Al usar este procedimiento, el mantenimiento del cuarto de drenado se reduce al ya no tener que limpiar los derrames y descontaminarlo. Sin embargo no se tiene experiencia sobre la oxidación del agente al entrar al incinerador en ese estado de agregación, lo que podría ocasionar proyecciones del agente o generar modificaciones en la temperatura y presión de operación, entre otros problemas.

IV. Destrucción fotocatalítica

Es una tecnología que usa un proceso de transferencia heterogéneo de electrones (oxidación o reducción), donde un semiconductor (dióxido de titanio TiO_2) es activado por una energía luminosa igual o mayor que el intervalo de la banda óptica del material semiconductor (luz UV), catalizando la reacción. El agente orgánico es reducido u oxidado hasta dióxido de carbono, agua y sales minerales.

La destrucción de agentes químicos y contaminantes por TiO_2 en condiciones de temperatura y presión ambientales ha sido ampliamente estudiadas. [15] De manera que se ha reportado y demostrado la completa mineralización de agentes, como la mostaza, en medio seco o acuoso, así como la remoción del arsénico a través de la oxidación fotocatalítica del arsénico a arsenito seguida de la adsorción sobre la superficie del óxido de titanio.

V. Digestión ácida

El diseño de este proceso se inició en Francia, sin embargo aún no se encuentra disponible al público ya que aún se encuentra a prueba. Se ha reportado la destrucción de municiones que contienen fosgeno, gas mostaza, cianuro de hidrógeno y gases nerviosos. El proceso de digestión ácida usa ácido nítrico 7 M para acceder al contenido de las municiones, destruir la carcasa y oxidar el relleno. El ácido carcome el acero que contiene las sustancias peligrosas, hace que las espoletas sean inoperables y elimina los agentes químicos. Una cantidad de calor considerable es liberado debido a la reacción exotérmica que se produce entre el ácido y el acero, mismo que debe ser removido. [15]

Procedimiento

1. La munición es colocada en el reactor y se sella.
2. Se hace circular el ácido nítrico a través del reactor, el calor generado se remueve a través de un intercambiador de calor con una recirculación.
3. La reacción se mantiene hasta que es neutralizado el agente y el componente energético, después el reactor es drenado y la munición removida.

Como residuo se tiene la solución ácida que contiene ácido nítrico gastado, permanganato, hidróxido de sodio y agua de lavado. Este residuo requiere tratamiento posterior para su disposición final, sin embargo el contenido energético debe ser filtrado antes de que sea tratada la corriente líquida.

Existen notables desventajas en el procedimiento en cuestiones de seguridad, como la concentración del ácido, la manipulación del agente, la formación de compuestos inestables debido a reacciones secundarias, entre otros.

VI. Gasificación de vapores

También se conoce como reformación, es un proceso sencillo en donde los materiales orgánicos son tratados con vapor sobrecalentado en condiciones de reducción, para producir moléculas orgánicas simples. Normalmente se opera en un sistema cerrado, por lo que se reduce el riesgo de operación y de accidentes en el área de destrucción de armas químicas.

Algunas de las desventajas de esta tecnología son el alto costo por suministro de energía, el uso de un sistema de enfriamiento adecuado a la operación para la remoción de calor generado y la necesidad de otro procedimiento para la oxidación de los productos, más éstos se pueden ver superados debido a que el manejo de las sustancias químicas serían en extremo complicadas por el alto contenido de elementos como flúor, fósforo y nitrógeno.

VII. Incineración

Este tipo de procedimiento ha sido el más empleado en Estados Unidos (con 25,467 toneladas de sustancias químicas destruidas) desde que la Academia Nacional de Ciencias en 1984 determinó que era el método más conveniente para la destrucción de municiones con agente químico. [5] Esto se debe a los bajos costos de operación, además de que produce una menor cantidad de desechos finales. También ha sido empleado en Alemania, el Reino Unido, Canadá, Iraq y Rusia.

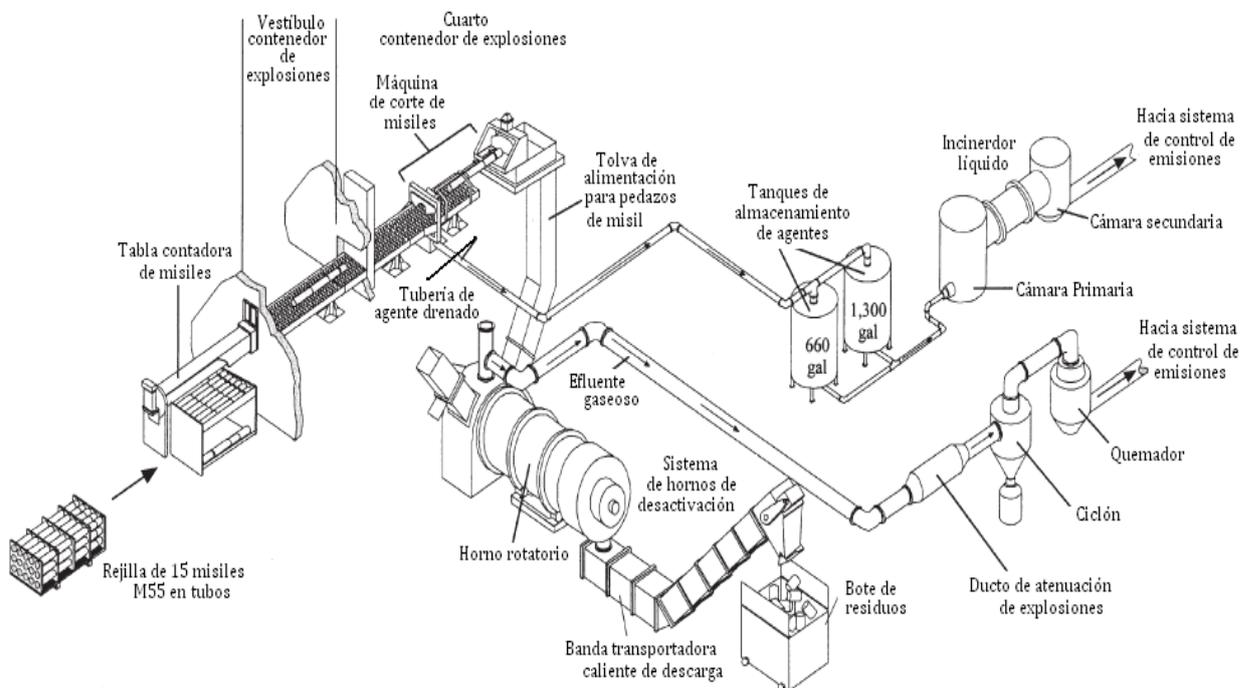
El proceso de incineración es específico de los agentes a tratar y a la configuración de las municiones por destruir, sin embargo es muy efectiva para eliminar el agente tóxico y los componentes energéticos. El porcentaje de eliminación que se requiere a través de este método para GB y VX es el 99.99999%, para las mostazas es de 99.99995% y para el material energético del 99.99% o mayor. [15] En esta operación se oxida el agente en estados químicos estables, como son agua, dióxido de carbono y compuestos inorgánicos de azufre, fósforo, nitrógeno, cloro, flúor y metales como el arsénico.

Procedimiento

1. Las armas químicas son transportadas desde el almacén hasta el área de desempacado. Antes de que sean movidas, el contenedor debe ser revisado para observar si existe alguna fuga o derrame.
2. Las municiones son desmanteladas por máquinas, la cuales separan a los agentes y a los explosivos del cuerpo.
3. Cada componente del arma, es incinerado en uno de los cuatro incineradores:
 - a) El **incinerador de líquidos** para destruir el agente químico. Es un incinerador que posee dos cámaras de combustión, en la primera el agente químico es rociado con aire y quemado a 1500°C. En la segunda cámara, se encuentra otro sistema de incineración a 1090°C para asegurar la combustión completa y la destrucción de los agentes.
 - b) El **incinerador de desactivación** para eliminar explosivos. El principal componente de este incinerador es un horno rotatorio que opera entre los 540–820 °C. Cuenta con placas internas que mantienen el movimiento horizontal de los residuos de las partes metálicas y polvo a través del horno. Para una velocidad de rotación aproximada de 1.85 rpm (rotaciones por minuto), el tiempo de residencia para sólidos es de 6.5 minutos.

- c) **Horno de metales** para la descontaminación de los cuerpos contenedores del proyectil y del agente. Este horno opera a 780°C o más para que los materiales que se vayan a procesar puedan ser calentados hasta 540°C por un periodo no menor de 15 minutos.
- d) **Incinerador de embalaje** para destruir el empaque de la munición y la basura creada por las operaciones anteriores.

Figura 2.4.1 Proceso de destrucción por incineración de misiles M55 en Estados Unidos [10]



Para el control de emisiones, se coloca un post quemador donde se somete a la corriente gaseosa a una temperatura de 1204°C. Después, pasa por un sistema de reducción de contaminantes, donde se enfría y se neutralizan los componentes y residuos provenientes de los tubos de escape. Los residuos que se tienen en el incinerador de embalaje y en el de desactivación, son guardados y enviados a un tiradero de basura.

Sin embargo, se tiene conocimiento de que en incineradores de alta temperatura es posible la liberación de dioxinas y furanos, mismos que se han vinculado con el cáncer, deformaciones, daño neurológico y otras enfermedades debido a una exposición prolongada. Es por esto que el ejército de Estados Unidos ha decidido no quemar los trajes protectores que pudieran producir este tipo de emisiones, así como monitorear y controlar las emisiones de gases tóxicos; también se busca la posibilidad de implementar tecnologías con menor impacto ambiental y con una mayor aceptación de la sociedad civil que vive en las cercanías de las instalaciones de destrucción de armas químicas.

VIII. Neutralización química

Es un proceso que altera químicamente y físicamente las propiedades del agente químico para obtener como producto una sustancia ineficaz para el uso por el que fue creada. Por lo general, el proceso debe ser completado con la incineración para destruir el resto del material.

Para llevar a cabo este método se deben mezclar los agentes químicos (7-20% peso) con otras sustancias (i.e. hidróxido de sodio) para formar compuestos con una menor toxicidad. Existen varias ventajas en torno a este proceso como son la baja o nula producción de efluentes gaseosos, operación a baja presión y evita la formación de dioxinas, furanos y otros productos a partir de compuestos clorados debido a la baja temperatura de operación. Cuando se aplica esta técnica a las mostazas, sólo es posible usar como medio de neutralización agua y se genera ácido clorhídrico por la hidrólisis. Después de esta reacción, es cuando se agrega la base, con el fin de que cambie el pH hasta 10.5- 12.

Al finalizar la operación, es necesario aplicar un tratamiento u oxidar los productos ya que aún no son amigables al ambiente, además de que el contenido de los presentes es variable. Para esto, se retiene el agente hidrolizado en tanques agitados con circuitos de recirculación, donde se

analiza que el agente se haya destruido en un 99.9999% de la cantidad original y que la solución se mantenga en una fase.

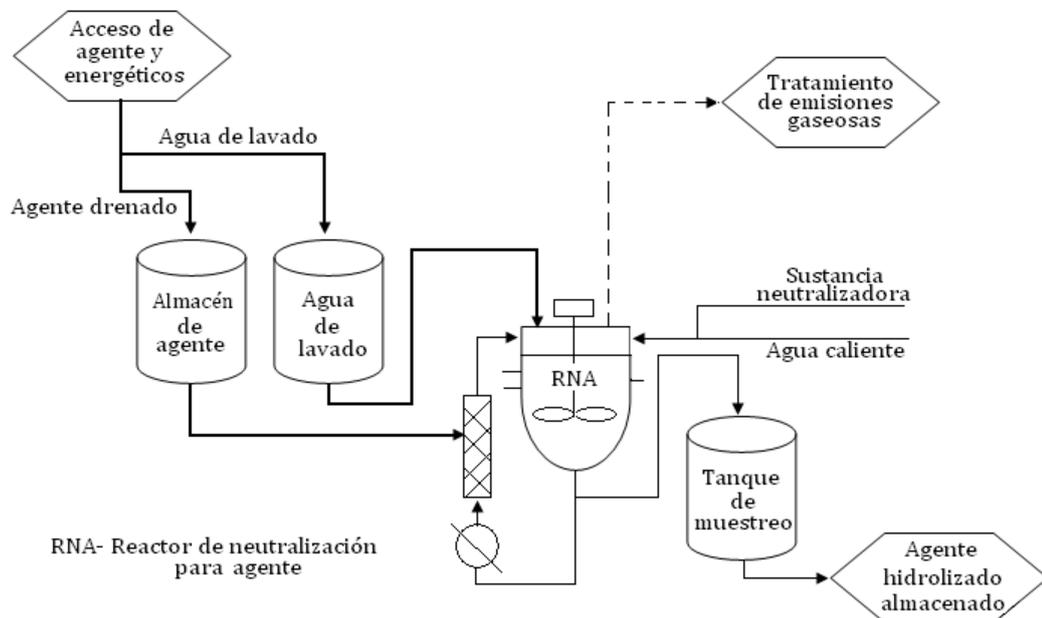
Tabla 2.4.2 Parámetros de neutralización de agentes en Estados Unidos [11]

	Agente		
	GB	VX	HD
Concentraciones de alimentación de agente			
Agente (% peso)	7.5	16.6	8.6
Base (% peso) (de 50% NaOH)	11.34	17.44	ajusta el pH a 10-12
Agua (% peso)	81.16	65.96	91.4
Parámetros del sistema y especificaciones de operación			
Temperatura de operación (°C)	60	90	90
Velocidad máxima base (unidades por hora)	40 cohetes y 15 proyectiles	48 cohetes y 26 proyectiles	26 proyectiles
Velocidad máxima (lb de agente/ día)	15,540	15,379	7,301
Tiempo total por lote (min)	168	516	243
Lotes por reactor al día	6	2.5	2.5
Peso total de agente destruido (tons)	305.7	127.2	90.63
Concentración máxima de agente para alcanzar el 99.9999% de eficiencia de destrucción (ppb)	75	160	85

Como método se ha empleado en Canadá, Japón, Iraq, Italia, Bélgica, Rusia, Estados Unidos, entre otros, para la destrucción de agentes como la lewisita, mostazas, VX, GA, GB, GD y GF(O-ciclohexilmetilfosfonofluoridato). Los países que reportaron un tratamiento posterior diferente a la incineración fueron Iraq y Bélgica. En el primero, de 1991 a 1994 destruyeron agentes como GA, GB y una mezcla de GB y GF, usando como tratamiento final el bombeo del producto hidrolizado hasta una laguna de concreto donde reposó hasta evaporación y el residuo seco se mezcló con el concreto y fue enterrado dentro de más concreto. En Bélgica, en el 2002, también usaban éste método para la destrucción de aproximadamente 60 combinaciones de agentes producidos en la I Guerra Mundial [15]; de los cuales los productos de la hidrólisis fueron tratados por medio de un incinerador de residuos peligrosos.

En Italia, la modificación a proceso básico se hizo respecto a la sustancia neutralizadora, que cambia a peróxido de hidrógeno. Ahí se realiza la destrucción de agentes como el Clark I (difencilcloroarsina), Clark II (difencilcianoarsina) y adamsita (DM), la cual produce una solución ácida que contiene arsénico y se neutraliza con carbonato de calcio. Posteriormente son mezcladas con arena, cemento y agua para formar una pasta, que luego se deposita en contenedores de concreto reforzado para disposición final.

Figura 2.4.2 Diagrama de flujo simplificado de la neutralización de agentes [11]



IX. Oxidación con agua supercrítica

El objetivo de esta alternativa para la destrucción de agentes químicos, es tener una oxidación completa, es decir, que no se obtengan productos en la solución de una combustión incompleta. Para lograr esto, se trabaja con agua a temperaturas arriba de 374°C de temperatura y una presión cercana a las 220 atmósferas, que son condiciones de estado supercrítico del agua.

En este estado, el agua existe en una sola fase que difiere enormemente de sus propiedades físicas que normalmente observamos. Por ejemplo, a estas condiciones la densidad del agua es de apenas 100kg/m^3 , mientras que en estado líquido es de $1,000\text{kg/m}^3$. Esto se debe, a que en densidad supercrítica, las distancias intermoleculares son mayores que en condiciones normales. Como resultado, se tiene que los puentes de hidrógeno sean atenuados y que el agua se comporte como un solvente no polar. [11] Con este ligero cambio en la distancia intermolecular entre las moléculas del agua, es posible la disolución de alcanos y oxígeno molecular en el agua supercrítica, para que esto a su vez elimine la resistencia interfacial hacia el oxígeno y sea transportado en el agua.

Procedimiento

1. Es necesario realizar una descontaminación previa, por lo que se introduce el agente en una solución acuosa diluida (20% peso).
2. La mezcla de los agentes con agua debe ser presurizada, para posteriormente ser sometida a calentamiento. Esto se hace con el fin de que todos los compuestos orgánicos sean solubles en el agua.
3. Después, la temperatura se incrementa hasta lograr la oxidación de la solución. Las típicas condiciones de operación de este procedimiento es temperatura de 600°C y presión de 250 atm, con tiempos de residencia de un minuto o menos.
4. Como productos se obtienen dióxido de carbono, nitrógeno gaseoso, sales y ácidos inorgánicos. El efluente no contiene NO_x (óxidos de nitrógeno) y SO_x (óxidos de azufre), dioxinas y furanos.

Hasta el momento no ha sido usada para la eliminación de armas químicas a gran escala por los problemas de corrosión que suele acarrear, pero ha sido probada por compañías privadas obteniendo buenos resultados en cuanto a destrucción y eficiencia.

X. Oxidación con aire húmedo

Al igual que el método de combustión en cama fluidizada, esta tecnología es empleada mundialmente para el desecho de residuos sólidos urbanos y peligrosos. Se fundamenta en la lenta oxidación de los compuestos orgánicos a temperaturas bajas (300°C), comparadas con la temperatura de combustión. Mas la oxidación debe llevarse a cabo a altas presiones y en presencia de agua, lo que implica riesgos en la operación y la necesidad de tratamiento del efluente líquido antes de ser liberado al ambiente.

A pesar de que no se ha empleado directamente para la destrucción de armas químicas, se han realizado pruebas con insecticidas y fungicidas que poseen estructuras similares a los agentes químicos y se han obtenido buenos resultados.

XI. Oxidación de sales derretidas

Esta técnica que combina el tratamiento químico y térmico se desarrolló antes de 1950. Ha sido utilizada desde entonces para la desactivación de municiones que contienen agente mostaza, mas nunca se ha implementado como proceso a gran escala.

Procedimiento

1. La munición y oxígeno, son alimentados a un baño de sales derretidas. Las sales pueden ser carbonato de sodio o una mezcla de carbonato de sodio y de potasio.
2. Los desechos reaccionan con la sal, oxidándose y liberan dióxido de carbono, agua, nitrógeno y oxígeno.
3. De la mezcla formada se remueven las sales, para volver a procesarla y reciclarla o llevarla a un relleno sanitario pertinente. Es necesario el tratamiento, ya que la mezcla contiene la mayoría de las sales producidas por incineración (fluoruro de sodio, cloruro de sodio,

sulfatos, etc.), pero el volumen generado será mayor debido al material sin reaccionar que se encuentra en el baño de sales.

Algunas desventajas de este proceso como son la posibilidad de explosión de los vapores sobrecalentados y la emisión de compuestos como óxidos de nitrógeno, cloro e hidrocarburos, han impedido que se emplee en la destrucción de grandes volúmenes de armas químicas.

XII. Pirólisis con metal fundido

Emplea una aleación de metales (cobre, hierro y cobalto) a temperaturas cercanas a los 1650°C para descomponer los compuestos orgánicos, como son los agentes químicos. Debido a las características antes mencionadas, este horno puede combinar las funciones de tres equipos usados en la técnica de incineración. Sin embargo, el control de emisiones y el tratamiento de los efluentes, sería muy costoso, al ser flujos con alto contenido en hollín (por la pirólisis de metales) y de material particulado, además de necesitar un quemador posterior de gases.

XIII. Pirólisis con plasma

Es una tecnología que consiste en pasar una corriente eléctrica a través de un flujo de aire a baja presión, para que de este modo se separen los compuestos químicos en elementos en un campo de plasma. Este procedimiento se lleva a cabo a altas temperaturas, cercanas a los 5500°C. [5] Debido a las altas temperaturas se genera una gran cantidad de efluente gaseoso por lo que se debe de contar con tratamiento posterior para el control de emisiones de estos.

Se han desarrollado varios procesos a partir de esta tecnología, uno de ellos creado por suizos en 1994 (MGC/PLASMOX) ha alcanzado eficiencias de 99.99999% al procesar adamsita, Clark I, Clark II, fosgeno y lewisita. [15] Se ha utilizado este proceso para la destrucción de agentes químicos en Suiza, Alemania y Albania. En este último se destruyeron cerca de 20 toneladas de

sustancias químicas tóxicas en el 2001. Los costos de implantar esta tecnología para destruir arsenales químicos, es muy costosa debido a las operaciones y equipo necesario.

XIV. Técnica rusa (Neutralización y bituminación)

Este proceso se centra en el empleo de solventes orgánicos para neutralizar a los agentes químicos específicos como VX, VR (la versión rusa de VX), GB y GD. Los residuos serán solidificados y tendrán la consistencia de pasta, estilo betún.

La técnica consiste de dos etapas. En la primera el agente (VX o VR) es neutralizado con una solución conocida como RD-4, la cual contiene isobutilato de potasio disuelto en isobutanol y N-metilpirrolidinona (NMP). [15] El VR y el RD-4 reaccionan a presión atmosférica y a 90-95°C por 30 minutos, de manera que el enlace azufre-fósforo se rompe y formen diisobutilmetilfosfonato y otros productos. En la segunda etapa, la mezcla reaccionante es agregada al bitumen, que es una mezcla altamente viscosa compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos. Al introducirse se encuentra a una temperatura aproximada de 130-140°C y después se incrementa lentamente hasta llegar a alcanzar 180°C, de esta manera se forman compuestos fosforados con baja volatilidad y toxicidad. La N- metilpirrolidinona se vaporiza junto con el isobutanol, los cuales se condensan más adelante en el proceso. Como producto final se tiene como sólido el bitumen con sales, donde las concentraciones de VR y VX son considerablemente menores al límite de detección de la cromatografía de gases de 1×10^{-4} mg/ml.

Para la destrucción de los gases sarín y somán, éstos se disuelven en etanolamina con un 20% de agua y son calentados a 110°C por una hora, de manera que el enlace fósforo-flúor se rompa. Los compuestos formados son añadidos a la mezcla de hidróxido de calcio y bitumen, para después ser calentados hasta 200°C bajo presión reducida por una hora. Los alcoholes producidos y la etanolamina en exceso son destilados de la mezcla del

bitumen y ésta última se deja reposar hasta solidificar. Al igual que en la mezcla de bitumen para VX y VR, las concentraciones de GB y GD fueron menores a las detectadas por el cromatógrafo de gases.

Se considera que por cada kilogramo de VX o VR destruido se generarán 3kg de bitumen con sales y por cada kilogramo de GB o GD eliminado se tendrán entre 5-7kg de producto, por lo que podrían ser de 4 a 6 toneladas de residuos finales al destruir todo el arsenal ruso por este método, mismas que tendrán que ser llevadas a un relleno sanitario apropiado. A través de esta tecnología, Rusia planea destruir sus agentes nerviosos que son cerca del 80% de sus armas químicas, es decir 40,000 toneladas. Para el 2006, tenían 1,260 toneladas de producto hidrolizado almacenado en tambos. [15]

XV. Tratamiento biológico (Biotratamiento)

Se aplica este tratamiento a compuestos hidrolizados libres de agentes tóxicos, a varios condensados y al agua de proceso. Se recolectan estas corrientes de desecho por 30 días y se preparan para el tratamiento; por lo que se les agrega hidróxido de sodio para ajustar el pH y nutrientes (sales de amonio o urea).

Posteriormente la mezcla es colocada en un módulo de alimentación, el cual contiene 4 biorreactores con células inmovilizadas. En cada biorreactor son biodegradados las cantidades traza de los agentes y otros compuestos orgánicos en productos inocuos, principalmente dióxido de carbono, agua, sulfatos y otros minerales oxidados. Estos serán analizados para verificar el buen desempeño de este método.

Las condiciones a las que opera el biorreactor como la concentración de nutrientes, la velocidad de alimentación, temperatura, pH y oxígeno disuelto son muy importantes, ya que de ellas depende que el tratamiento tenga un buen rendimiento. Un buen resultado de este procedimiento se considera

cuando es posible remover más del 95% de los agentes y un 90% más del total de compuestos orgánicos.

XVI. Vitrificación

Es un proceso en el cual se derriten materiales para producir vidrio o sustancias con características similares. El residuo a tratar es mezclado con aditivos que son capaces de formar vidrio, y materiales ricos en sílice. Después son secados usando un secador rotatorio y calentamiento indirecto. El efluente de gases se separa del vapor que se obtiene al secar el vidrio y se conduce a un sistema de filtración para su tratamiento.

Para disposición final del vidrio formado, se construye un contenedor de acero con una capa de material aislante, otra de arena y finalmente de material refractario. Ésta última capa se encontrará en contacto con el vidrio y únicamente en la parte de abajo del contenedor se colocará una capa de tierra sobre el material refractario. Con el fin de monitorear los residuos, se contará con puntos de muestreo del interior de la cámara.

Al cerrar el contenedor se calentará a 1300°C por 140 horas por medio de energía eléctrica, con el fin de formar un material fundido. Los gases liberados se harán pasar por un filtro un sistema de control de emisiones antes de ser liberados a la atmósfera. Después se deja enfriar para que forme el vidrio y se llena el contenedor con tierra hasta el 90% de su volumen, se analiza la mezcla y después se lleva a almacenaje o a enterrar. [15] Este procedimiento no se ha aplicado a la destrucción de armas químicas o de agentes, sólo para material radiactivo. Sin embargo las altas temperaturas y el largo tiempo de residencia permiten creer que las puede destruir de forma completa.

2.5 Métodos de destrucción del Material de no Almacenamiento

Debido a las normas de seguridad y transporte, la destrucción del material de no almacenamiento debe tratarse lo más cercano posible al sitio. A continuación se

muestra una tabla con los métodos de destrucción del material de no almacenamiento adoptado por el ejército de Estados Unidos:

Tabla 2.5.1. Métodos de disposición usados por el ejército de Estados Unidos [5]

Categoría	Método de disposición
Armas químicas binarias	
Precursores líquidos	Incineración fuera del sitio
Azufre	Relleno sanitario
Cubiertas de metal y otros materiales no contaminados	Fundición
Material químico militar variado	
Material energético: cargas explosivas, espoletas, propelente.	Incineración
Cubiertas de metal y otros materiales no contaminados	Fundición
Armas químicas recuperadas	Neutralización
Antiguas plantas productoras de armas químicas	
Material contaminado	Incineración
Equipo e instalaciones no contaminadas	Demolición
Material químico militar enterrado	
Gran cantidad, sitios explosivos	Incineración
Poca cantidad, sitios explosivos	Incineración portátil
Poca cantidad, sitios no explosivos	Neutralización portátil
Equipos de identificación de agentes químicos	Neutralización portátil

Las armas químicas de no almacenamiento varían desde pequeñas bombas hasta proyectiles de 8 pulgadas (TB1-4), otras contienen cargas explosivas o material energético además de los agentes químicos; en cambio, otras tendrán muestras de hasta 110g/pieza, pero ningún componente explosivo. También varía la presentación del componente tóxico ya que puede encontrarse como líquido no diluido, en solución con cloroformo o como un adsorbato en carbón. Por esto es necesario un sistema de evaluación que analizará el estado de las armas recuperadas e inclusive podrá determinar el agente que se encuentre en el interior de la munición; para llevar esto a cabo son usadas pruebas no intrusivas como rayos X y espectroscopía isotópica de neutrones. Los rayos X proveen información sobre la presencia o no de material energético como espoletas,

propelentes o explosivos y detecta si la munición contiene algún agente químico. La espectroscopía isotópica de neutrones brinda información para la identificación del agente químico contenido basado en la presencia de elementos como azufre, arsénico, cloro y nitrógeno. Por lo general la caracterización por este método es certera, pero la interpretación de los datos puede verse afectada por algunos productos de la corrosión.

Posteriormente se hace una confirmación sobre el agente químico a través de espectroscopía de masas y cromatografía de gases, con una pequeña muestra del vapor de la cabeza de la munición. Este paso es sumamente importante para que se use la adecuada neutralización del agente. La clasificación y el reporte de la munición rescatada deben presentarse ante la Convención de Armas Químicas y ante la dependencia local que las normas señalen.

Después del análisis, deben neutralizarse las armas (Ver *Diagrama 2.5.1*) en los diferentes sistemas móviles de destrucción de las armas químicas según la configuración (agente y contenido explosivo) y condiciones (limpia, corroída, etc.) de la munición. Los sistemas y tecnologías de destrucción de armas químicas recuperadas son:

I. Sistema de destrucción explosiva (EDS) – Estados Unidos

Sistema móvil en el cual se destruyen municiones que poseen una configuración explosiva y son peligrosas para transportarlas o almacenarlas. El EDS-1 puede procesar municiones que contienen 0.45kg de TNT (trinitrotolueno) o algún explosivo equivalente, el EDS-2 destruye municiones hasta con 1.36kg de TNT o equivalente y ocasionalmente con municiones conteniendo 2.26kg de TNT o equivalente. En sus inicios, este equipo fue diseñado para la destrucción de municiones y armas peligrosas e inestables que no pudieran ser transportadas.

Se abre la munición por medio de una carga explosiva dentro de una cámara, que es la primera pared contenedora. Después los explosivos

detonan todos los materiales energéticos que existen en el arma y provee acceso al relleno donde se encuentra el agente químico. Este se destruye por medio de una sustancia neutralizadora al ser inyectada dentro de la cámara, que por lo general es 90% metiletilamina y 10% de agua. El agente ya neutralizado se almacena en tanques y posteriormente es enviado a una planta de tratamiento de residuos peligrosos.

Cada EDS se encuentra contenido en una estructura de contención de vapores (VCS), que es la segunda capa protectora, la cual consiste en arcos de aluminio conectados por membranas, estilo módulos. Tiene un sistema de escape de gases que cuenta con filtros de carbón activado y mantiene una presión negativa en comparación con la relativa que se encuentra en el exterior. Este sistema intenta capturar los vapores de los agentes que resulten de las operaciones en el interior realizadas. El sistema de escape consiste en prefiltros, filtros de aire particulados de alta eficiencia y filtros de carbón activado.

En este sistema, es necesario realizar muchas operaciones manuales: desempacar municiones, colocarla en un sistema de supresión de fragmentación, adherirle cargas explosivas, depositarla en un contenedor para la explosión y sellar el mismo. Las operaciones siguientes como la detonación, la inyección del neutralizador, el muestreo de vapores, drenarlo y enjuagarlo también es trabajo que se debe realizar de manera manual. La destrucción de una munición por este método requiere de 2 a 4 horas de trabajo.

Cabe destacar que el enjuague de la parte metálica de la munición con agente neutralizante (solución de NaOH) o con agua caliente, es únicamente para preparar el metal para un posterior tratamiento y disposición.

II. Sistema de respuesta rápida (RRS) – Estados Unidos

Sistema transportable diseñado para la destrucción y disposición de series identificables de agentes químicos. El sistema completo ocupa cuatro remolques: operaciones, soporte, suministro y plataforma de soporte

analítico. El primero es en donde se abren las ampollas, botellas o tarros; son identificadas y neutralizadas o reempacadas. El remolque de soporte, como el nombre lo menciona lleva material de repuesto. El de suministro provee de energía eléctrica a través de generadores y permite que el sistema continúe trabajando. La plataforma de soporte analítico permite realizar estudios en equipos analíticos para mayor precisión en los resultados para la determinación de concentraciones de sustancias tóxicas. En el remolque de operaciones los paquetes de agentes químicos son abiertos en una caja sellada. La composición de atmósfera dentro de la caja se encuentra monitoreada para detectar contaminantes que se encuentran en las piezas que salen o entran al paquete. Después, son llevados a la unidad de desempacado, donde se separan las piezas. El contenido de cada envase es caracterizado, posteriormente es vertido en un contenedor mayor y es identificado por un método no intrusivo como la espectroscopía Raman.

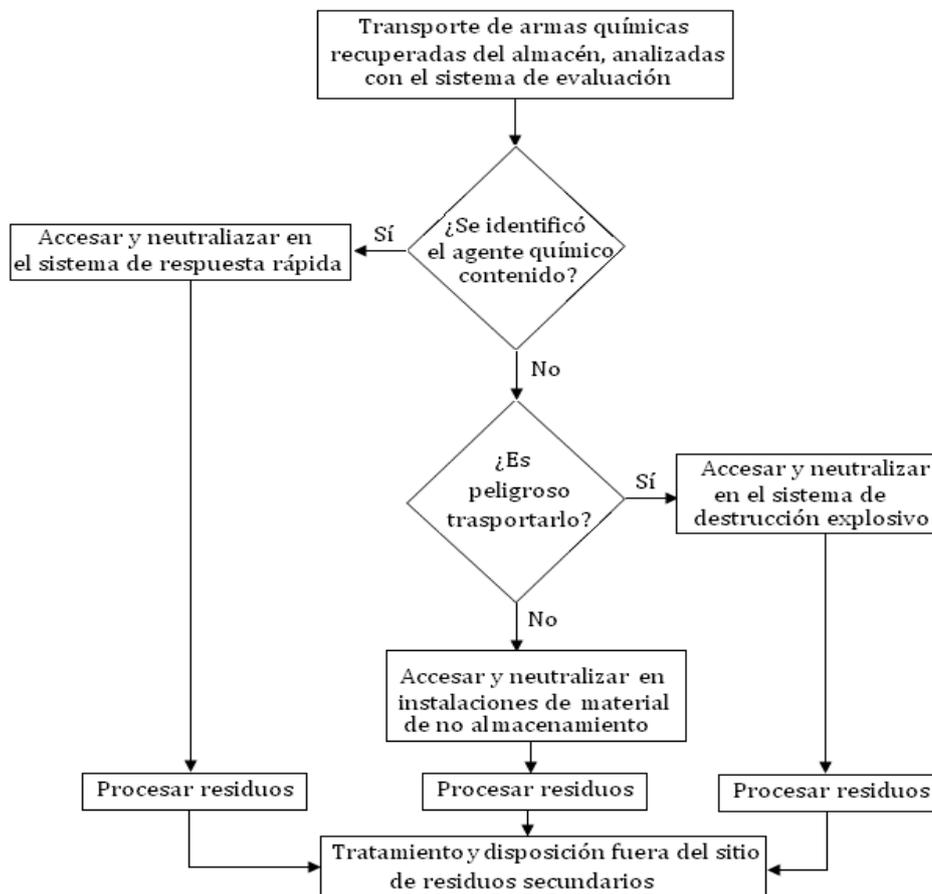
Aquellos que contengan compuestos químicos industriales son reempacados y enviados a un sitio de depósito y tratamiento para destrucción. Los recipientes que contengan H, HD, L son aplastados en un pequeño reactor, el cual contiene una sustancia neutralizadora. Los productos de esa reacción son empacados y enviados para tratamiento final.

En la estación de neutralización, los contenedores de vidrio se colocan en un reactor con el neutralizador apropiado basado en un solvente orgánico. Después es sellado y el cuello de la botella o ampollita es roto, de manera que se libera el contenido en la solución neutralizadora. Luego de transcurrir la reacción de neutralización, los contenidos del reactor son descargados a un tambo de desechos líquidos que serán llevados a una estación de transferencia para su disposición final.

El aire que sale de las cajas donde se abren los recipientes, es liberado a la atmósfera después de pasar por varios filtros. Debe de pasar por un filtro para remover el polvo, posteriormente pasará por dos filtros de carbón activado para remover el cloroformo y los agentes químicos. Después el aire es conducido a través de otros dos filtros de carbón activado impregnados

con complejos metálicos para remover trazas de los contaminantes ya mencionados. Finalmente se filtrará por el filtro de alta eficiencia antes de ser descargado en la atmósfera. Los gases son monitoreados antes y después de ser liberados con el fin de conocer las concentraciones de cloroformo o de algún agente químico a través de un monitor de seguridad. Una complicación del estudio de la composición del aire es que debe de ser de amplio espectro, con el fin de que sea capaz de identificar 8 toxinas diferentes y el cloroformo de manera simultánea.

Diagrama 2.5.1 Diagrama de flujo de destrucción de armas químicas no almacenadas en Estados Unidos. [16]



Los métodos empleados para la destrucción del agente que se encuentra en el material de no almacenamiento es la neutralización y la hidrólisis, por lo que complementan a las dos tecnologías previamente mencionadas. La neutralización se usa para la destrucción de agentes químicos en donde se emplea un reactivo

orgánico, en cambio en la hidrólisis es necesario un reactivo acuoso para destruirlo.

III. Detonación controlada en cámara (CDC) – Bélgica

En sus inicios se conocía como la cámara de explosiones Donovan o la cámara de detonación contenida, que reemplazó a las operaciones de detonación a campo abierto. Al igual que los sistemas anteriormente descritos, provee un ambiente de contención para prevenir que salgan disparados fragmentos metálicos, metales pesados y demás productos.

Esta tecnología consiste de tres componentes: la cámara de detonación, cámara de expansión y la unidad de control de emisiones. Existen diferentes versiones de los equipos que permiten la destrucción de municiones con cargas de 5.44kg de TNT o equivalente o hasta de 27.21kg de TNT o equivalente.

Para la destrucción, el proyectil se envuelve y se coloca en la cámara de detonación, cerca de él se suspenden bolsas de agua para absorber un poco de la energía de la explosión y para producir vapor que reaccionará con los vapores de los agentes. Al producirse la explosión, ésta fragmenta la munición, se detona cualquier material energético contenido en el arma y se libera el agente químico. El calor, oxígeno y vapor en las cámaras de detonación y expansión, destruyen el 99.99% de los agentes químicos. Después de la detonación, se mantienen cerradas las puertas por 2 minutos para mantener la presión y temperatura. Se inyecta a la cámara aire caliente u oxígeno gaseoso para que sea más fácil la descomposición de los agentes que se lleguen a adherir a las paredes u otros sólidos, luego los gases son liberados a través de la unidad de control de emisiones. Los residuos sólidos que se producen al destruir armas químicas como carbón, hollín, grava, polvo y algunas partes metálicas, más tarde serán transportados fuera del sitio para su tratamiento último.

IV. Detonación en cámara con bomba de vacío integrada (DAVINCH) – Japón

Al igual que el proceso anterior, esta tecnología hace una detonación controlada para la destrucción de municiones químicas, solo que el explosivo que se usa para detonarla y accesar al agente es una suspensión. La munición y el agente son destruidos en una cámara con doble pared de acero, de la cual se extrae el aire antes de producir la detonación (0.0136 atm) para que se produzca un menor volumen de gases; la cámara se vuelve a presurizar después de la detonación a 1 atm. Debido a la alta temperatura (aprox. 2000°C) y presión (10 gigapascales ó 98,692.32 atm) generadas por la onda de choque inicial, seguida de una cavitación a alta velocidad y después por una bola de fuego, el agente es eliminado por este proceso. Es un método en seco que no requiere de tratamiento posterior para el agente ya que es destruido en el contenedor.

Este método es ampliamente utilizado en Japón para destruir bombas recuperadas con agentes que inducen al vómito (Clark I y Clark II), con lewisita y mostaza. [15] El equipo completo pesa cerca de 75 toneladas y debido al diseño con el que cuenta, así como el material con el que está construido, tiene la habilidad de confinar los gases a alta presión sin necesidad de contar con una cámara de expansión que los contenga después de la detonación. Por su diseño tiene la capacidad para contener la detonación de 45kg de TNT o equivalente en su versión más pequeña (DV45), para la versión más grande (DV65) tiene la capacidad de contener 65kg de TNT o equivalente.

Para el lavado de este equipo se han empleado aerosoles electrostáticamente cargados y después se rocían las paredes con agua para eliminar la solución descontaminante. El efluente de gases es limpiado, filtrado y almacenado en un tanque neutralizador. Después se envían a una cámara de combustión, luego son enfriados y filtrados por carbón activado, antes de ser liberados a la atmósfera.

Debido al calor generado por la bola de fuego, las partes metálicas son descontaminadas hasta el punto de que pueden ser empleadas por el público, ya que los residuos remanentes del agente en ellos no sobrepasan el límite recomendado para el público en general. La compañía que posee esta tecnología estima que se tiene una eficiencia de destrucción y remoción (DRE) para la cámara de detonación del >99.9999%. [15]

V. Horno secundario Dynasafe – Suecia

Es un horno estático en forma de esfera, que tiene una cámara de detonación con doble pared de acero inoxidable adentro de una estructura de contención. La cámara puede operar en ambientes oxidantes o pirolíticos. Las municiones son calentadas entre 400-600°C para producir una deflagración o detonación de la carga explosiva contenida en ella. El agente químico es destruido como resultado de la onda explosiva de la detonación, la presión (9.87 atm) o la descomposición debido al calor. En este método no es empleada una carga o solución explosiva, así como ningún agente neutralizante para los agentes.

Al estar en operaciones, el efluente de gases generado por el proceso es continuamente extraído y por medio de aire comprimido o nitrógeno desalojado de la cámara; posteriormente es enviado para un análisis de composición y luego a un ciclón, para remover el polvo y parte del material particulado. El resto del diseño del sistema de control de emisiones dependerá de los requerimientos ambientales que sea necesario cumplir.

Este equipo ha sido empleado por una gran diversidad de países en el continente europeo como son España, Portugal, Alemania y Suecia, siendo el último el más activo de ellos. Ha sido utilizado para destruir detonadores, pequeñas municiones, armas convencionales y minas. [15] Sin embargo en diferentes pruebas realizadas con municiones que contienen el agente, no es posible asegurar que este ha sido eliminado al presentarse algunas fugas por no estar todas las municiones herméticamente cerradas. Debido a lo anterior se requieren diferentes análisis para constatarlo incrementando los

costos y tiempo de operación. En los casos en los que las municiones posean un contenido mayor a 31 kg de mostaza o 100kg de GB, el agente y la munición deben ser tratados por separado.

Tabla 2.5.2 Tabla comparativa de las tecnologías existentes para la destrucción municiones recuperadas. [15]

	Áreas de evaluación ^a			
	Madurez del proceso	Eficiencia y eficacia del proceso	Seguridad en el proceso	Problemas respecto a residuos secundarios
Sistema de destrucción explosiva (EDS)	✓	✓	✓	0
Detonación controlada en cámara (CDC)	✓	✓	✓	0
Detonación en cámara con bomba de vacío integrada (DAVINCH)	✓	✓	✓	✓ ^b
Horno secundario Dynasafe	✓	✓ ^c	✓	0

^a Leyenda: ✓ → aceptable; 0 → parcialmente aceptable; - → inaceptable; ? → falta de información

^b DAVINCH es una tecnología más aceptada por el público porque ha demostrado la habilidad para el tratamiento de residuos gaseosos.

^c Se evaluó la habilidad de contención del sistema de control del Dynasafe para confirmar la destrucción del agente en todas las municiones que lo contienen.

2.6 Destrucción del material energético

Para iniciar con el proceso de destrucción de explosivos y propelentes del material de almacenamiento, éstos deben ser removidos de los proyectiles y misiles que los contienen. Para esto, las municiones son depositadas en una banda transportadora por separado, primero se les drenará el agente y luego se les llevará a la máquina cortadora, donde serán cortadas las municiones en secciones, para que de este modo se pueda dar tratamiento a los segmentos con contenido energético.

Los cortes serán divididos en dos botes, uno contendrá las secciones donde antes estaba el agente, cargas explosivas, espoletas y la hélice de aluminio; en el otro serán depositados los segmentos con propelente. Esta clasificación tiene el objetivo de mantener alejados el propelente y el aluminio, ya que pueden originar un incendio y quemarse al estar presente ambos compuestos en la hidrólisis al

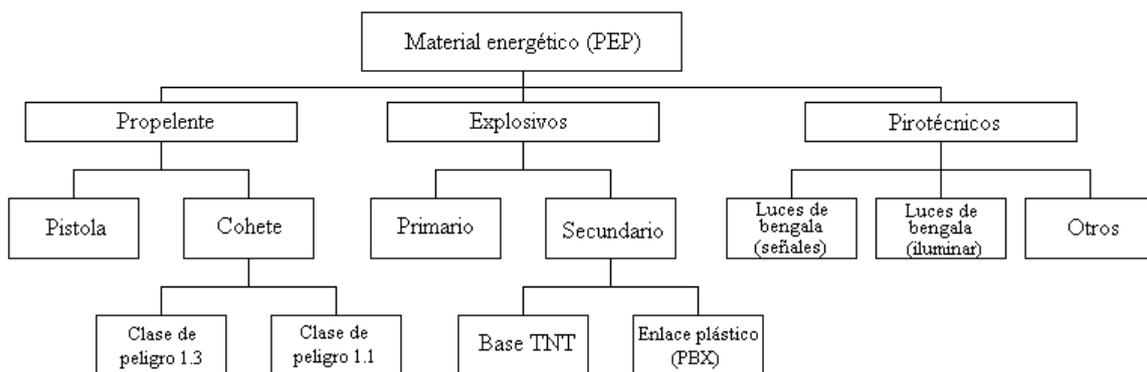
usar una solución básica. Los métodos de destrucción pueden variar de una planta a otra, pero tratan de buscar soluciones que permitan la recuperación de los recursos y el reciclaje.

El propelente más usado en municiones militares (i.e. misiles M55) es el M28, éste contiene una doble base: nitroglicerina (NG) y nitrocelulosa (NC). Ambos componentes se degradan lentamente en condiciones de almacenamiento, generando calor y óxidos de nitrógeno. Para postergar la fecha de caducidad, se le agrega un estabilizador como la 2-nitrodifenilamina para que reaccione con los óxidos producidos. En caso de que el estabilizador se agote y la velocidad de degradación y generación de calor sea suficientemente rápida, existe la posibilidad de auto ignición. [10]

2.6.1 Clasificación y destrucción de residuos explosivos

Los residuos explosivos engloban a los propelentes, los materiales explosivos y pirotécnicos (PEP), los cuales entran en la categoría de material energético. Este tipo de sustancias tienden a iniciar o mantener una liberación de energía al ser expuestos al calor, fricción, incompatibilidad química, descarga eléctrica o algún choque.

Diagrama 2.6.1 Clasificación de materiales energéticos [5]



Clase de peligro 1.3 - materiales que producen fuego en masa y tienen un menor riesgo de causar la fragmentación de la munición que los contiene.

Clase de peligro 1.1 –materiales que pueden ocasionar una explosión.

I. Explosivos

Clasificados como primarios o secundarios acorde a sus características de iniciación. Los primarios (i.e. azida de plomo, estifnato de plomo) son altamente susceptibles a la iniciación; generalmente se les llama explosivos iniciadores, por la capacidad de encender los explosivos secundarios. Los secundarios (i.e. TNT, RDX-ciclonita, tetril) son aún más empleados que los primarios, ya que son formulados para que detonen bajo circunstancias específicas.

II. Propelentes

En este apartado se incluyen los propelentes para armas cortas y cohetes. La mayoría de los propelentes para cohetes son mezclas con clase de peligro 1.3 (fuego en masa y menor riesgo de fragmentación), que se encuentran soportadas por una capa de hule, como oxidante posee perclorato de amonio y como combustible tiene aluminio en polvo; o también son compuestos con clase de peligro 1.1 (peligro de explosión) con nitroglicerina, nitrocelulosa, HMX, perclorato de amonio y aluminio en polvo.

III. Pirotécnicos

Se conocen como luces de bengala y dependiendo de su uso, el contenido varía en cuanto a elementos inorgánicos como óxidos y metales en polvo. Las luces que sirven para iluminar generalmente contienen nitrato de sodio y magnesio; las que se emplean para señalar utilizan bario, estroncio o nitratos de otros metales.

2.6.2 Proceso de destrucción

El método de destrucción más usual para municiones y material energético en el pasado era quema a cielo abierto/ detonación a cielo abierto. En la actualidad este proceso ha sido prohibido como práctica en Europa y en Estados Unidos se

ha tratado de reducir la práctica con la implementación de nuevos procedimientos de destrucción más amigables al ambiente o inclusive el reuso, en algunos casos.

Hidrólisis. En un reactor se colocan los explosivos y se les combina con hidróxido de sodio caliente (35-50% en peso) con un pH mayor a 12, para poder degradar el tetritol, plomo, azida de plomo, nitrato de bario, sulfuro de antimonio, TNT y demás compuestos que pueden estar presentes. Como productos de esta reacción, después de dos horas, se tiene un material sólido que consiste en las partes metálicas de las cargas explosivas y son llevadas posteriormente al horno de descontaminación de partes metálicas; los compuestos hidrolizados líquidos son drenados y la corriente gaseosa de salida, que contiene amoníaco, nitrógeno, monóxido de carbono y varios hidrocarburos volátiles se hacen pasar por el sistema de control de emisiones antes de ser liberados a la atmósfera.

La eficiencia de la reacción dependerá en gran medida de la fase en la que se encuentre el compuesto a tratar, debido a que el área de contacto para los sólidos que serán hidrolizados será el que determinará el porcentaje de destrucción. Los compuestos pueden tener las siguientes presentaciones: líquido como la nitroglicerina y 2,4,6-TNT, sólidos como el RDX y trelil, o como materiales poliméricos como la nitrocelulosa.

Desactivación térmica. Para la desactivación de cartuchos pequeños, espoletas, granadas y municiones, éstas son introducidas a un horno hasta que detonan o son deflagradas. La temperatura de operación del horno de desactivación se encuentra entre 650-820°C por 5 minutos aproximadamente. Para el control de las emisiones de los gases vaporizados, se debe contar con un equipo de filtración conectado al efluente del horno.

Las carcasas y demás componentes metálicos que se extraen del horno, son transportados en una banda al horno de tratamiento para partes metálicas para poder asignarles la descontaminación 5X (Ver Anexo D) y finalmente llevarlos a reciclaje o a un sitio para disposición final.

Sales fundidas. Esta técnica aplica para explosivos y propelentes, en donde éstos son mezclados con agua para después ser inyectados, junto con gases oxidantes, en un contenedor con sales fundidas (carbonato de sodio) entre 400-900°C. De esta forma, la sal oxida al explosivo y los compuestos orgánicos en el agua residual reaccionan con el oxígeno, formando dióxido de carbono, nitrógeno y agua.

Conforme el medio se va oxidando, se va acumulando cloruro de sodio, fosfato de sodio, sulfuro de sodio, entre otros; mismos que deben ser removidos y la sal fundida gastada debe de ser eliminada o regenerada.

Tabla 2.6.1 Material energético presente en las municiones con agentes [11]

Munición/ Componente	Material energético	Composición
Misiles M55/motor de misil	Propelente M28	60% nitrocelulosa 23.8% nitroglicerina 9.9% triacetin 2.6% dimetilftalato 2.0% estearato de plomo 1.7% 2-nitrodifenilamina
Misiles M55/ ignición	Pellets de ignición M62 M2	49% magnesio 49% perclorato de potasio 2.0% MIL-B-10854 32% tiocianato de plomo 40% clorato de potasio 18% carbón 10% laca Egipcia
Misiles M55/ M417 punta detonante	mezcla detonante NOL, carga principal Azida de plomo, carga intermedia Detonador M63, carga baja Iniciador RDX	40% trinitroresorcinato de plomo 20% azida de plomo 20% nitrato de bario 15% sulfuro de antimonio 5.0% tetraceno 100% azida de plomo 98% RDX 2.0% resina de calcio-grafito 100% RDX
Misiles M55/ carga explosiva	Composición B	60% RDX 39% TNT 1.0% grasa
Proyectiles M110/ carga explosiva	Tetritol	70% tetritol 30% TNT

2.7 Disposición de desechos secundarios

Se define como desechos secundarios aquellos residuos que en última instancia tienen que ser tratados fuera de la planta. El origen y las propiedades de este tipo de residuos determina las opciones para ser procesados y su disposición final, sin importar si está o no contaminado. Los desechos generados que podrían generarse durante el proceso de destrucción incluyen trapos, contenedores, tambos plásticos, absorbentes, solventes, pinturas, lubricantes, herramientas, cables, extensiones, equipo de mantenimiento, botas, guantes, overoles, máscaras M40, trajes de protección personal y componentes mecánicos y eléctricos inservibles.

Tabla 2.7.1 Origen y posible tratamiento de desechos secundarios [17]

Residuo	Origen	Posible tratamiento
Carbón activado	Operaciones y clausura	Fuera del sitio
Concreto	Mantenimiento y clausura	Tratamiento para metales o fuera del sitio
Material energético	Operaciones del proceso	Hidrólisis
Cargas explosivas	Operaciones del proceso	Hidrólisis
Cuerpos/carcasas de municiones	Operaciones del proceso	Tratamiento para metales o fuera del sitio
Residuos metálicos	Mantenimiento y clausura	Tratamiento para metales o fuera del sitio
Sólidos no metálicos	Operaciones, mantenimiento y clausura	Tratamiento para metales o fuera del sitio
Residuos del tratamiento de metales	Operaciones y clausura	Fuera del sitio
Artículos cubiertos con hule	Operaciones, mantenimiento y clausura	Tratamiento para metales o fuera del sitio
Solución de descontaminación gastada	Operaciones, mantenimiento y clausura	Hidrólisis u oxidación de agua supercrítica
Residuos de derrame	Operaciones	Tratamiento para metales o fuera del sitio
Sustancias expiradas	Laboratorio	Tratamiento fuera del sitio
Aceite usado	Mantenimiento y clausura	Reciclaje

Artículos como el traje de seguridad, herramientas, equipo de muestreo, contenedores y embalaje son descontaminados por una unidad complementaria en las instalaciones de destrucción de armas químicas, para su reuso en la planta

o fuera de ella. Esta unidad es una cámara calentada eléctricamente, cuyas condiciones de operación (tiempo y temperatura) varían según los materiales a tratar. Los residuos volátiles gaseosos de cualquier agente son tratados posteriormente con el sistema de control de emisiones. Para poder “reclasificar” el material como limpio y poder ser transportado fuera de las instalaciones, debe pasar un análisis de nivel de vapores. Este debe estar por debajo de la unidad.

Otro método que sirve para tratar residuos del mismo tipo de actividades, es a través de una autoclave. Al igual que con la unidad complementaria, las condiciones de operación se seleccionan según el material que ha sido cargado. De la autoclave se extrae el aire por medio de ciclos de calentamiento para promover la vaporización de los líquidos, es calentado a través de vapor a 180°C para promover la hidrólisis del agente. Después del tratamiento, la autoclave es secada con una bomba de vacío y si resultó exitoso el procedimiento, indicado por un monitor, el material puede ser transportado para disposición final.

2.8 Seguridad

2.8.1 Trabajadores

La protección de los trabajadores dentro del sitio de trabajo debe ser adecuada y pertinente, según la parte del proceso en la que participa. Existen lineamientos que se deben de seguir en todas las plantas de destrucción de armas químicas con el fin de reducir accidentes y limitar el riesgo:

- I. Doble pared de contención en los sitios de trabajo.
- II. Monitoreo de la zona de destrucción de armas químicas y desmantelamiento.
- III. Paro de actividades e inicio de investigación al sonar una alarma.
- IV. Equipo de protección personal para minimizar la fatiga y maximizar el campo de visión.

Tabla 2.8.1 Categorización de peligro de áreas de proceso para métodos de destrucción de material de no almacenamiento. [16]

Área de proceso	Categoría de Peligro^a
Área de recepción, almacenaje	D
Área de desempaque	C
Área de preparación para la extracción del relleno	A/B
Área de extracción del relleno	A
Área de cámara de descontaminación	A/B
Área de descontaminación	A
Área del tanque contenedor de agente	A
Área de tratamiento de agente	A,B,C
Área de empaque y almacenamiento de partes metálicas	C/D

^a Las categorías de peligro son definidas como sigue: A identifica un área de procesos tóxicos que se encuentra bajo presión negativa, posiblemente contaminado con agente líquido y se asume que está contaminado con vapor del agente. Es un área de alta peligrosidad y se requiere el uso de trajes de protección personal. La B indica que es un área de procesos tóxicos bajo presión negativa, que posiblemente esté contaminado con vapor del agente. Es un área de alta peligrosidad y se requiere el uso de trajes de protección personal. La C indica que el área de trabajo se encuentra bajo presión negativa y que está sujeto a una contaminación inadvertida con el vapor del agente. Es considerado un área de baja peligrosidad y el uso de equipo de protección no es obligatorio, a menos de que el monitor lo indique. A pesar de que en áreas de categoría C no se espera que se contamine con agentes, el uso de trajes de protección personal debe estar disponible. La D indica que son áreas bajo la presión del ambiente y que no están sujetas a contaminación. Éstas áreas son cuartos de soporte mecánico o eléctrico.

Durante el proceso de destrucción de armas químicas, los riesgos de operación para los trabajadores están estrechamente vinculados con anomalías en las municiones y contenedores, algunas son:

- Exposición a municiones con filtraciones de agente en estado líquido, vapor o ambos. El riesgo se ve atenuado por la combinación de medidas de seguridad en cuanto al diseño de las instalaciones, así como por la vestimenta especial que deben portar los trabajadores.
- La degradación del agente dentro del contenedor puede ocasionar la formación de sólidos y/o geles, que impiden el drenado de las municiones. En algunas plantas de destrucción de armas químicas en las que se ha

presentado este problema, han optado por hacer ligeros cambios en el proceso con el fin de reducir el riesgo para el trabajador.

- El mantenimiento y limpieza del área de trabajo es vital en este tipo de operaciones, ya que una pequeña anomalía o desperfecto puede ocasionar alguna explosión o liberación de agentes químicos. Con el fin de reducir estos riesgos, se debe de limpiar y remover los explosivos periódicamente del piso de los cuartos de contención; en otra área del proceso también deben ser limpiados los derrames y salpicaduras de sustancias tóxicas al abrir las municiones.
- Las municiones que contienen mostazas, deben ser destapadas con precaución; ya que al degradarse éste forma hidrógeno gaseoso que puede estar a una presión de 200 libras por pulgada cuadrada (psia). Debido a sus límites de flamabilidad y explosividad, es un riesgo para los trabajadores.

Tabla 2.8.2 Tipos de equipo para protección personal empleados en instalaciones de destrucción de armas químicas en Estados Unidos [18]

Tipo de equipo para protección personal	Descripción
Nivel A	Máxima protección dérmica y de vías respiratorias, se usa un traje completamente sellado con protección química y un respirador.
Nivel B	Suministro de aire para respirar 45 minutos, traje de protección química (traje de plástico con capucha).
Nivel C	Respirador con purificador de aire, overoles desechables con protección dérmica, casco y zapatos/botas de seguridad.
Nivel D modificado	Casco y zapatos/botas de seguridad, no es necesaria la protección de vías respiratorias. La protección para la piel se determinará dependiendo del trabajo a realizar (overoles, delantales, guantes, careta). Debe portarse una máscara M40 ^a para uso en emergencias.
Nivel D	No se utiliza protección en vías respiratorias, la protección es proporcionada por la ropa de trabajo y puede volverse a usar o usar overoles desechables, cascos y zapatos/botas de seguridad. Debe portarse una máscara M40 para uso en emergencias.

^a La máscara protectora M40 es una careta antigas utilizada para protegerse de las concentraciones de agentes químicos y biológicos.

Tabla 2.8.3 Uso del equipo de protección personal acorde al área [18]

Tarea	Requerimiento de equipo para protección personal
Operaciones/respuesta de emergencia	Nivel B
Arranque del proceso	Nivel D
Manipulación de municiones	Nivel C
Muestreo de residuos líquidos y vapores	Nivel C
Manejo de tambos drenados	Nivel D
Muestreo de residuos sólidos y remoción de carcasas	Nivel C
Transferencia del agente entre el contenedor y tanques	Nivel C
Monitoreo del aire	Nivel D
Mantenimiento de rutina	Nivel D
Personal de apoyo	Nivel D
Técnicos del sistema de monitoreo	Nivel C
Personal de descontaminación	Nivel C

2.8.2 Equipo de seguridad

Los sistemas de seguridad deben ser considerados en todas las plantas que trabajan, ya que son necesarios para una operación segura durante el proceso, para el paro y cierre de las instalaciones. Algunos ejemplos de equipos que pueden encontrarse en plantas de destrucción de armas químicas son los sistemas de monitoreo (Ver 2.9 *Sistemas de monitoreo*), inspección de válvulas de alivio, sistemas de ventilación, aire acondicionado y calefacción, protección contra incendios, alarmas de emergencia, sistemas de paro de emergencia, sistemas de control de temperatura, entre otros.

Conforme va pasando el tiempo y se va incrementando el desgaste de los equipos, va incrementando la necesidad de asegurar la funcionalidad del equipo y de los sistemas de soporte que son críticos para una operación con seguridad. Existen diversos factores que afectan la efectividad de los sistemas de soporte, por lo que se requiere de revisiones y evaluaciones periódicas a estos equipos.

2.8.3 Cambio y reemplazo de equipo

Al paso del tiempo, la operación de los equipos produce un desgaste constante. El nivel de desgaste y la necesidad de cambio, depende en gran medida de las

condiciones de trabajo de los equipos, por ejemplo si trabajan a presiones muy altas, con materiales muy corrosivos o simplemente por el uso.

La instalación de válvulas, la modificación en la configuración de una tubería, el cambio de instrumentos de monitoreo, entre otros; son cambios que pueden tener un impacto considerable en la integridad del sistema. Pero entre más modificaciones se tenga que hacer a un equipo para que siga funcionando, se tendrá que pensar en un reemplazo en especie. Para asegurar que las modificaciones y los reemplazos no afecten de manera adversa a la operación de la planta, se debe seguir un manual de proceso de modificaciones. Por medio de éste, se analizarán los impactos y riesgos que implica la renovación, sobre todo si la propuesta de ingeniería involucra un cambio físico en la configuración de las instalaciones.

2.8.4 Emergencias

Una respuesta efectiva y rápida ante una emergencia, debe ser planeada con antelación y requiere de conocimientos sobre las propiedades fisicoquímicas de los agentes que se están manejando y cómo se encuentran almacenados. A través de sus propiedades físicas (Ver *Anexo A*) se determina la volatilidad, el comportamiento en incendios y su persistencia en el ambiente. La toxicidad establecerá el impacto en humanos, animales y medio ambiente.

En el caso de ocurrir un accidente, la magnitud del impacto en los humanos y en el medio ambiente depende de:

- La cantidad y el tipo de agente liberado.
- La forma en que fue liberado (explosión, derrame, etc.).
- Condiciones meteorológicas.
- El número de personas que son expuestas potencialmente al agente.
- El número de personas que no cuentan con equipo de protección personal.
- Distancia entre el accidente y la comunidad más cercana.
- Edad, género y salud de la población expuesta.
- Ruta y duración de la exposición.

- Duración de descontaminación y tratamiento médico.

Por igual deben de considerarse los daños que se ocasionan al ambiente como la contaminación de fuentes de agua, suministro de alimentos, entre otros. Además, de que la contaminación ambiental afectará las operaciones posteriores en la planta y la evacuación del personal por el transporte inmediato de los agentes por aire.

2.9 Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo del aire del área de trabajo es de vital importancia ya que prevendrá a la población que se encuentre en las instalaciones en ese momento. Los sistemas deben de ser capaces de monitorear una amplia variedad de agentes, no sólo los presentes en el programa de almacenamiento, sino también mostazas nitrogenadas (HN-3) y arsénicos (PD) y cumpliendo con los límites de exposición. Lo anterior se logra a través de lo siguientes sistemas de monitoreo:

I. Sistema de monitoreo miniatura para agentes químicos (MINICAMS).

Reporta la concentración del agente en el aire en un periodo de 3 a 10 minutos y emite una alarma en caso de que un agente sobrepase los límites de concentración establecidos.

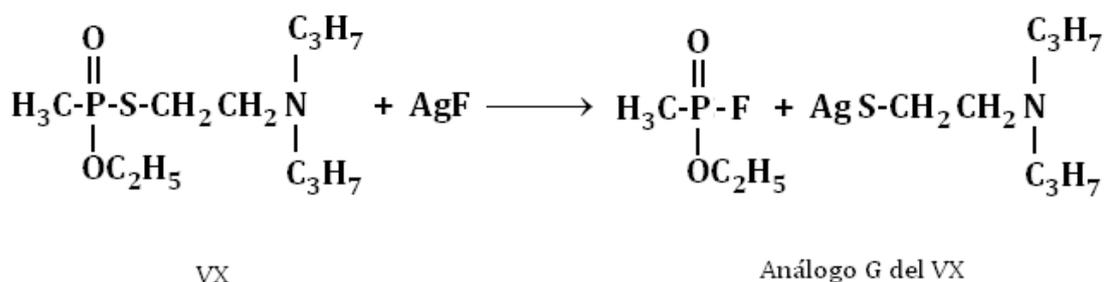
Este tipo de monitores por lo general usan tubos de vidrio empacados con un sólido polimérico para tomar las muestras. La separación de los agentes de alguna sustancia que interfiera con el proceso se realiza a través de la cromatografía capilar de gases con temperatura programada. Para poder detectar los agentes como GB, VX y HD se hace uso del detector fotométrico de llama (FPD) o con un detector selectivo de halógenos (XSD) para la de detección de HD.

Sin embargo, para compuestos como el VX que tienen baja volatilidad y mucha afinidad para una adsorción irreversible en superficies, se debe de formar una derivación por medio de una reacción con fluoruro de plata

para que forme un compuesto más volátil y menos reactivo. El compuesto formado es un análogo G del VX, el cual es muestreado y detectado por los monitores. Para que se produzca este cambio, a la entrada del monitor se instala un conducto de conversión revestido con fieltro de poliéster poroso impregnado con fluoruro de potasio y nitrato de plata.

El FPD puede ser operado en el modo específico para fósforo o para azufre, pero a pesar de la selectividad, las emisiones de azufre y las de los hidrocarburos ocasionan interferencias en el modo específico para fósforo. Esto hace que se genere una falsa alarma indicando la presencia de VX, ya que cualquier compuesto con un grupo funcional hidrolizable unido a una parte de la molécula del O-etilmetilfosfona tiene el potencial de generar una falsa respuesta. [19]

Figura 2.9.1 Derivación del VX. [19]



Para detectar el cloro en el HD, algunas MINICAMS usan el detector selectivo de halógenos. El objetivo es oxidar en una flama la muestra para producir átomos de halógeno que reaccionarán con una base activada. El potencial de interferencias utilizando éste método de detección es mucho menos abundante que los detectores de azufre, por lo que se producen menos falsos positivos.

Se encuentra en etapa de diseño una MINICAM que pueda detectar la fenildicloroarsina (PD), debido a la presencia de compuestos con arsénico. PD es el único compuesto arsenical que debe ser continuamente

monitoreado, ya que es el único que tiene propiedades vesicantes y una presión de vapor de interés. El muestreo de PD debe realizarse a través de filtros que lo almacenen, así como a los agentes arsenicales menos volátiles. Después los filtros deberán asimilar los compuestos arsenicales para poder producir una solución acuosa con ellos. El contenido de arsénico en la solución será determinado por métodos como espectroscopía de absorción atómica o por un análisis de plasma inducido. [16]

II. Sistema de monitoreo continuo y automático del aire (ACAMS)

Es un sistema de monitoreo automatizado que opera cerca del tiempo real al igual que los MINICAMS. El procedimiento de muestreo y detección es idéntico al que se presenta en las MINICAMS, con la excepción de que no cuenta con un detector selectivo de halógenos (XSD).

III. Sistema de monitoreo del aire en el área de depósito (DAAMS)

Es utilizado para confirmar la alarma de las MINICAMS y ACAMS, ya que es un método más sensible y por lo mismo más preciso. Sin embargo el tiempo de respuesta es de 1 a 12 horas. [16] Sirve para confirmar la presencia del agente y la concentración que brindó el sistema de alarma. Además, lleva un monitoreo histórico para mostrar los niveles de exposición a los que se ha tenido a la población en general.

Las muestras son recolectadas con una bomba de vacío y unos tubos de muestreo. Éstos últimos están empacados con un sólido adsorbente que atrapa los compuestos presentes en el aire, para que después sean analizados en el laboratorio. La prueba que se utiliza para determinar las sustancias presentes es una cromatografía de gases y luego un detector fotométrico de llama. En vez del detector fotométrico, puede estar configurado con un aparato de ionización química o un detector de masa selectiva. Al conocer la cantidad de agente químico en el tubo con el adsorbente y el volumen total del aire muestreado, puede ser calculado la concentración del agente en el aire.

La diferencia con las ACAMS y MINICAMS radica en el proceso de desorción del agente. En este monitor, el agente desorbido del tubo de muestra es colectado en una cama absorbadora con un pequeño hueco en forma de tubo. Después el agente vuelve a ser desorbido del tubo y pasa a la pre-columna del cromatógrafo de gases.

2.9.1 Propuestas para nuevos sistemas de detección

Se han buscado alternativas para el sistema de monitoreo, con el fin de hacerlo más eficiente, que tenga un mayor nivel de confiabilidad y que garantice un control de calidad. Los únicos sistemas que cumplen con los requisitos de sensibilidad para los límites de la población de trabajadores, son los que trabajan con el muestreo por medio de polímeros porosos, separación a través de la técnica de cromatografía capilar gaseosa y la detección por medio de la fotometría de llama. Sin embargo, se ha incursionado en nuevas tecnologías para la detección con el fin de poder cumplir con los límites y reducir el número de falsos positivos.

Espectroscopía óptica - El espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier, mide la fracción de la radiación absorbida por los agentes por una o varias longitudes de onda, a partir de la cual la concentración de la sustancia tóxica es calculada. Otra opción que se ha propuesto como método óptico es la observación de la interacción de las moléculas del agente químico con el haz de una luz monocromática, la cual puede incluir dispersión inelástica (espectroscopía Raman) o la absorción de la luz de la muestra y la reemisión a una longitud de onda mayor (espectroscopía de fluorescencia) . [19]

Espectrometría de masas - En este tipo de técnicas se ioniza la muestra con una ionización suave en la que las moléculas de la sustancia permanecen intactas o por medio de una ionización fuerte, en el cual la muestra se destruye. Los iones formados pasan a través de un campo eléctrico o magnético, donde son separadas de acuerdo a la relación masa/carga. Cuando la separación de los iones es con una bomba de vacío, se le llama espectrometría de masas; pero si

son separados por una corriente de gas bajo un campo eléctrico fuerte, se le conoce como espectroscopía de movilidad de iones.

Sensores químicos - Se trata de sistemas de sensores químicos a nivel molecular que se encuentran aún en diseño, los cuales buscan unir a la especie química objetivo a una superficie, para generar una señal eléctrica u óptica. Estos nuevos sistemas se han desarrollado en materiales poliméricos y nanosaturados, para obtener una sensibilidad mayor y que sean más selectivos. [19]

Tabla 2.9.1 Resumen de las tecnologías potenciales para crear nuevos sistemas de monitoreo. [19]

Metodología	Sensibilidad	Limitaciones
Espectroscopía de absorción óptica diferencial UV (DOAS)	ppb bajo condiciones óptimas	Carece de absorbancia de UV aceptable; interferencia por componentes en la atmósfera, lluvia, turbulencia en el aire, niebla
Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (OP/ FT-IR)	>0.001 mg agente/m ³ , >0.1ppb bajo condiciones óptimas	Interferencia por componentes atmosféricos, lluvia, turbulencia del aire, niebla.
Espectroscopía Raman con superficie mejorada (SERS)	decenas de ppb	No es en tiempo real; poca reproducibilidad y necesidad de regeneración de sustratos
Espectrometría de masas por ionización química (CIMS)	sub ppt bajo condiciones óptimas	Optimiza la sensibilidad y especificidad; se necesita desarrollar el producto comercial a partir del instrumento
Espectrometría de movilidad de iones (IMS)	ppb to 10 ppt	Alto nivel de falso positivos
Sensores químicos	bajos niveles de ppb	La mayoría son prototipos del laboratorio, no se encuentran disponibles comercialmente

2.10 Descontaminación

La descontaminación empezó a realizarse en la década de 1960 usando solución de hipoclorito de sodio y bolas de naftalina sobre las instalaciones de producción de armas químicas abandonadas. [20] De esta manera, se eliminaban totalmente o parcialmente diferentes agentes oxidados, precursores y degradados del agente. Sin embargo, la limpieza se realizó sin tomar en cuenta las posibles

reacciones con los agentes de limpieza, así como la probable presencia de compuestos organofosforados entre otros.

Hay un sistema de clasificación de sustancias que define los niveles de descontaminación de agentes químicos para diferentes materiales y desecho, definiendo los procedimientos subsecuentes. Uno de esos niveles es llamado 5X, el cual debe ser aplicado a todos los sólidos no combustibles provenientes del horno de desactivación y desechos secundarios metálicos. En este procedimiento, el material se somete a una temperatura de 540°C por quince minutos en una banda transportadora caliente. Después de este tratamiento, los materiales se encuentran totalmente descontaminados y pueden ser utilizados para usos en general o vendidos al público de acuerdo a las normas locales.

2.11 Desmantelamiento

Antes de desmantelar las instalaciones se deben asegurar de que todo el equipo se encuentre perfectamente descontaminado incluyendo las tuberías (líneas de proceso y de abastecimiento), recipientes, tanques y otros equipos de almacenamiento, ya que en la descontaminación que se hizo en 1960 y años posteriores sólo se aplicó el hipoclorito de sodio en las partes de la planta donde se creía que pudiera haber agente químico.

En todo momento, es importante conocer las lecturas de concentración en el aire de los agentes químicos en las áreas de contención, para esto se utilizan las MINICAMS y los sistemas de monitoreo manual.

3. Impacto Ambiental del Desarme y Control de Emisiones

El almacenamiento de armas químicas que con el paso del tiempo se van deteriorando, el abandono en sitios no adecuados y su incorrecta disposición, han acarreado severos problemas ambientales en agua y suelo de la región colindante. Sepultar armas químicas, arrojarlas al mar y detonarlas eran algunos de los métodos más empleados después de la Segunda Guerra Mundial, periodo en el que se empiezan a destruir arsenales con agentes químicos. Algunos escenarios posibles con mayor riesgo a la población son la acumulación del material químico en una capa de suelo, la migración de las sustancias tóxicas a bancos de agua subterráneos, impacto a la salud por exposición media-prolongada para plantas, animales o seres humanos, y finalmente, la descomposición del material químico.

3.1 Impacto ambiental de la destrucción de armas químicas

Una de las primeras técnicas de destrucción de armas químicas fue arrojarlas al mar, tal como se hizo en el Mar del Norte y en el Báltico. La mayor parte de las municiones que fueron depositadas en el mar se encontraban en cajas de madera, mismas que con el tiempo se rompieron y las municiones han estado a la deriva cambiando continuamente de lugar respecto al que fueron depositadas. Algunas de ellas han sido recuperadas por pescadores en Dinamarca, Suecia y Noruega; en el caso de Dinamarca se tuvieron cuatro incidentes de este tipo en el 2005. [21] Los efectos que tienen los agentes al entrar en contacto con el agua de mar varían en cuanto a toxicidad, ya que depende de qué tan soluble sea el agente en el agua. Sin embargo existen compuestos que presentan muy baja solubilidad y poca degradabilidad como es la mostaza, los agentes Clark I y Clark II, y la adamsita.

En 1950 se empleó la técnica de detonación al aire libre para la destrucción de armas químicas en Kambarka, Rusia, en donde se eliminaron 2,000 toneladas de gas mostaza no destilado. A consecuencia de esto, el lugar aún permanece

contaminado con dioxinas policloradas. [22] Otro caso en Rusia sería en Chapaevsk, donde en 1960 se destruyeron 1,200 toneladas de gas mostaza y otros agentes por medio de un tratamiento de incineración mal planeado causando graves accidentes a los operarios, por lo que se decidió enterrar las municiones. Además, las instalaciones de tratamiento de agua residual del proceso no funcionaban correctamente por lo que se eliminaban directamente al Río Chapaevsk y de ahí al Volga. Finalmente, entre 1994 y 1995 se realizó un estudio de impacto ambiental en el sitio y los resultados arrojaron que en el lugar donde se encontraba la planta, los límites de concentración de arsénico en el suelo se excedían por un factor de 8,500 veces, así como subproductos de la producción de lewisita.

Ejemplos como los anteriormente mencionados hay muchos, sin embargo en la actualidad se sabe que métodos de destrucción de armas químicas empleados en las primeras etapas (enterrar en la tierra, arrojarlas a cuerpos de agua o detonar al aire libre) tienen un impacto ambiental de consideración, de manera que se encuentran prohibidos por la Convención de Armas Químicas (CAQ, 1993). Es difícil evaluar el impacto ambiental debido a que no se sabe con precisión el sitio donde fueron enterradas o arrojadas al mar las municiones y tampoco las condiciones en las que se encuentran, por lo que sólo se pueden llevar a cabo tratamientos de saneamiento en los lugares adecuados hasta encontrar municiones con agentes químicos.

Los principales contaminantes que se generan al destruir un arma química son [23]:

- Explosivos (trinitrotolueno (TNT) y aminotoluenos)
- Agentes químicos, en especial mostaza y arsénico
- Hidrocarburos, hidrocarburos clorados, bifenilos policlorados y dioxinas
- Metales pesados (cadmio, cromo, cobre, zinc y mercurio)
- Fósforos corrosivos

Tabla 3.1.1 Algunos métodos de tratamiento para diferentes corrientes de residuo durante el programa de destrucción de armas químicas y clausura de las instalaciones [11]

Tipo de material	Categoría	Corriente	Componentes	Tratamiento	
				En campaña	Clausura
Líquido, combustible	Lubricante	Aceites y lubricantes	Fluídos	1,2,3	4
Líquido, no combustible	Anticongelante	etilenglicol, propilenglicol	Fluídos	1,2,3	4
Líquido, no combustible	Hidráulico	fluidos hidráulicos, agua	Fluídos	1,2,3	4
Sólido, combustible	Carbón	carbón activado	Carbón	1,2,3	4
Sólido, combustible	Carbón	carbón activado con metales	Cu, Zn, Cr ^a	1,2,3	4
Sólido, combustible	Celulósico	restos de madera	Nivel C	1,2,3	4
Sólido, combustible	Celulósico	cajas de madera	Nivel C	1,2,3	4
Sólido, combustible	Elastómero	botas	Goma	1,2,3	4
Sólido, combustible	Elastómero	trajes de seguridad	Goma	1,2,3	4
Sólido, combustible	Halogenado	equipo de soporte de vida	Neopreno	1,2,3	4
Sólido, combustible	Halogenado	cinta de banda transportadora	PVC ^b	1,2,3,4	4
Sólido, combustible	Halogenado	caretas de seguridad	PVC	1,2,3	4
Sólido, combustible	Halogenado	trajes de seguridad	PVC	1,2,3	4
Sólido, combustible	Halogenado	máscara para traje Tyvek	PVC	1,2,3	4
Sólido, combustible	Halogenado	equipo de soporte de vida	PVC	1,2,3	4
Sólido, combustible	Halogenado	materiales Gore-Tex	Teflón	1,2,3	4
Sólido, combustible	Plástico	traje Tyvek	Poliaramida	1,2,3	4
Sólido, combustible	Plástico	bolsas de plástico	Polietileno	1,2,3,4	4
Sólido, combustible	Plástico	bolsas de plástico	Polietileno	1,2,3,4	4
Sólido, combustible	Plástico	soportes para tambos	PVC	1,2,3	4

1→ oxidación con agua supercrítica, 2→ cortadora de embalaje, 3→ Incineración, 4→ tratamiento para partes metálicas

^a Cu, Zn, Cr – cobre, zinc y cromo

^b PVC – Policloruro de vinilo

La cantidad de éstos que será emitida al ambiente dependerá en gran medida de la tecnología de destrucción seleccionada por el Estado parte y de las normas ambientales que en esa nación imperen. En teoría y conforme a los estatutos establecidos por la CAQ y por la Organización para la Prohibición de Armas Químicas (OPAQ, 1997), los métodos empleados deben minimizar el riesgo de exposición al agente durante el almacenamiento, las operaciones de transporte y disposición, y además reducir el impacto ambiental de los efluentes de proceso.

Éstos últimos antes de ser liberados al ambiente o depositados en un relleno sanitario, deben ser analizados para asegurar que los componentes orgánicos e inorgánicos se encuentren en niveles aceptados por la normatividad correspondiente.

En los apartados siguientes se describirá el tratamiento que se aplica a las diferentes corrientes de residuo que emanan de algunos procedimientos de destrucción de armas químicas, con el fin de atenuar el impacto ambiental.

3.2 Emisiones gaseosas (incineradores y hornos)

Al ser destruidos los materiales en el incinerador de líquidos y en el horno de desactivación, los efluentes gaseosos deben ser controlados en un sistema de control de emisiones antes de que sean liberados a la atmósfera, para asegurar que no sean ventilados vapores de los agentes y de otros contaminantes.

3.2.1 Control de emisiones para agentes químicos

El sistema de control de emisiones gaseosas, los hace pasar por un ducto atenuante, donde son rociados con agua de proceso por medio de aspersores, para reducir la temperatura del gas. Después pasan por un ciclón para separar partículas de gran tamaño. Las partículas más grandes son llevadas a un quemador que opera a 1200°C y un tiempo de residencia mínimo de 2 segundos. La corriente gaseosa remanente, pasa a un lavador Venturi, donde se inyecta una solución al 18% en peso de solución cáustica, y se combina con los componentes ácidos del gas formando sales de sodio. Estas son removidas como salmuera en una torre de lavado posterior con agua y son almacenadas para un proceso posterior (reducción) o llevadas a otra planta de tratamiento fuera del sitio. En el proceso de reducción, a través de una serie de evaporadores, se cristaliza la salmuera. Antes de ser finalmente liberados los gases a la atmósfera, estos pasan por filtros de aire de alta eficiencia (HEPA) y filtros de carbón activado, que dependiendo de los contaminantes presentes en la corriente se encuentran o no impregnados de azufre. Esto es para reducir la concentración de los agentes tóxicos presentes en el aire hasta niveles inofensivos para los

operadores, el ambiente y la población que vive en las cercanías. El sistema de filtros cuenta con diez unidades de filtración y cada de una de ellas posee:

- a) Pre filtros - Remueven partículas grandes como el polvo.
- b) Filtro de aire de alta eficiencia (HEPA) - Remueve partículas hasta de 0.3 micras.
- c) Seis filtros de carbón activado. Remueven los agentes químicos de la corriente gaseosa a través del proceso de adsorción.
- d) Filtros de aire para remover partículas finas de carbón.
- e) Ventilador.

Filtros de Carbón Activado

El uso del carbón activado en los sitios de destrucción de armas químicas se debe a su propiedad adsorbente y que de manera eficaz remueven las impurezas y/u olores de los contaminantes en el aire. Debido a esto se ha implementado su uso en la mayoría de los sistemas de ventilación y en filtros, con el fin reducir al máximo la liberación de los agentes al ambiente, para proteger al personal que labora en el sitio y a las comunidades aledañas. Se debe tomar en cuenta:

- Límites de emisión de gases de desecho
- Cumplimiento con la concentración de emisión
- Control de las partes por billón del agente químico

Principios del sistema de control

La base teórica bajo la cual se usa el carbón activado como medio para controlar las emisiones de una planta es por las propiedades adsorbentes con las que cuenta. El proceso de adsorción, hace que se separe el soluto de la fase fluida, al mismo tiempo en la superficie del sólido adsorbente se puede llevar a cabo una fisisorción (fuerzas de dispersión de London o por Van der Waals) o una quimisorción (enlaces químicos, i.e. hidrólisis). Es posible que se absorba un producto, el cual subsecuentemente es desorbido en el sitio para ser usado en

otra aplicación. Esto implica que el carbón activado puede regenerarse y ser utilizado nuevamente.

El carbón activado se produce a partir de residuos de petróleo, carbón, madera, conchas y frutos secos. La elección del precursor y el proceso de activación determinará las propiedades como: la distribución del tamaño de poro, área superficial y composición química. Posteriormente es expuesto a un flujo de aire, para que la superficie se sature por grupos funcionales oxidantes. Las reacciones que se lleven a cabo en la superficie del adsorbato dependen en gran medida a las propiedades moleculares de éste y del precursor. [24]Debido a que la humedad por lo general se encuentra presente, siempre se tendrá cierta cantidad de agua adsorbida, principalmente en los microporos. Esto promoverá las reacciones de hidrólisis entre el agua y los agentes químicos en la superficie del adsorbato.

Uso del carbón activado en la planta

La mayoría de las unidades absorbedoras y los filtros nunca han sido expuestos a algún tipo de agente, ya que varía el nivel de exposición de acuerdo en qué parte del proceso se encuentran colocadas como se muestra en la Tabla 3.2.1. El carbón activado se encontrará expuesto principalmente en dos lugares en el proceso durante operaciones normales: en los filtros del sistema de ventilación donde se hace la recopilación de los agentes previamente a su destrucción y la otra, es en los filtros del sistema de ventilación, del aire acondicionado y del sistema calefacción que se encuentra en las instalaciones de destrucción de armas químicas.

Sin embargo, con el paso del tiempo los agentes adsorbidos pueden llegar a reaccionar con el agua, que de igual forma ha sido adsorbida del ambiente, formando compuestos hidrolizados complicando la disposición del carbón activado como residuo. Para algunos de los compuestos que permanecen hidrolizados en la superficie del carbón activado no es posible cuantificar de manera precisa su concentración debido a la falta de métodos sensibles para

hacerlo. De igual manera es casi imposible saber si existen cantidades traza de los agentes químicos depositados.

Tabla 3.2.1 Usos del carbón activado en las instalaciones de destrucción de armas químicas [24]

Uso	Nivel de exposición al agente esperado
Filtro en el sistema de recolección de agentes	Alto. Es expuesto a los gases de ventilación donde los agentes son recolectados para empezar el tratamiento de destrucción.
Partes 1 y 2 del sistema de HVAC	Alto. En esas partes del proceso es donde procesan las municiones para su destrucción.
Partes 3,4,5 y 6 del sistema HVAC	Ninguno.
Filtros del sistema de control de emisiones	Ninguno. Por diseño se espera que el agente sea eliminado por el método seleccionado.
Filtros del ciclón del incinerador de desactivación	Ninguno.
Filtro de la campana de extracción (laboratorio)	Ninguno.
Filtros para máscaras de seguridad	Ninguno, a menos de que la máscara sea usada en un área donde estén presentes vapores de agente.
Filtro del sistema de ventilación del cuarto de control	Ninguno.
Filtro del sistema de ventilación del laboratorio	Ninguno.
Filtro del sistema de ventilación del edificio de mantenimiento	Ninguno.

Los agentes químicos adsorbidos se degradan sobre el carbón activado con el tiempo, y este periodo de degradación puede reducirse al incrementar la humedad relativa del ambiente al haber mayor cantidad de agua adsorbida. Pero al destruir barriles o municiones que contienen mercurio (derivados de las mostazas) se deben cambiar los filtros de carbón activado por otros impregnados con azufre. La exposición del carbón activado al mercurio, sucede en el sistema de control de emisiones que se encuentra a la salida de los incineradores. [24]

Cuando se está destruyendo HD/HT, el mercurio se encontrará presente y el azufre impregnado en el carbón activado será quien lo secuestre del efluente. Por

lo que el tratamiento de este carbón activado deberá de ser diferente, al estar altamente contaminado.

Tratamiento de disposición

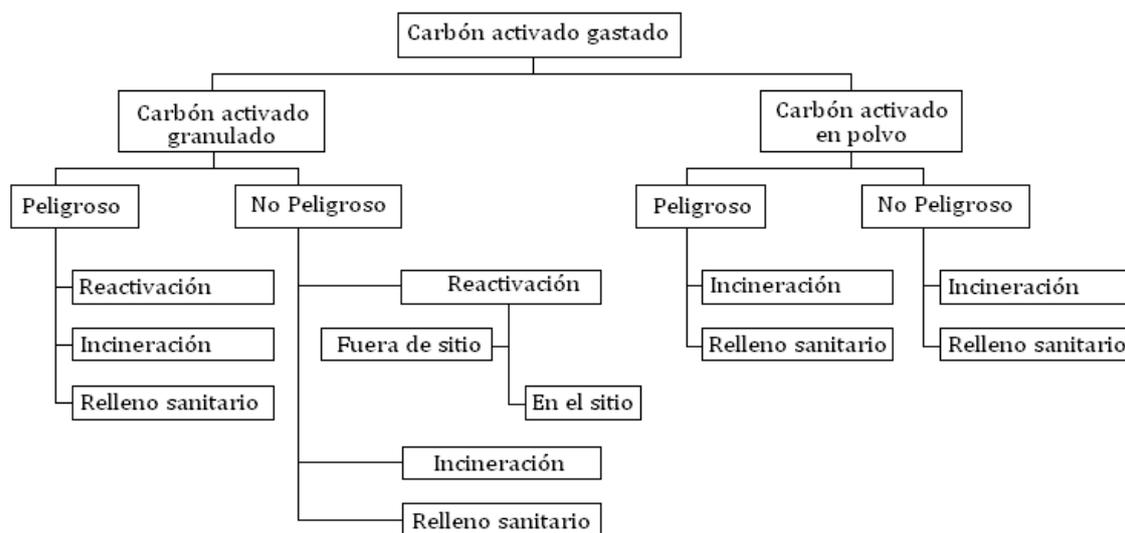
Las técnicas comerciales para disposición del carbón activado son la reactivación, el depósito en un tiradero de basura, la micronización y la incineración, estas últimas son complementarias.

- a. Reactivación del carbón activado clasificado como 0 X (carbón que no ha sido expuesto al agente). Se lleva a cabo en un horno rotatorio donde se evapora el agua y solventes contenidos, los compuestos volátiles e hidrocarburos son vaporizados. El resto de las impurezas son destruidas por calcinación o pirólisis. Para la reactivación, se hace pasar el carbón por vapor a 980°C en un medio bajo de oxígeno.
- b. Depósito del carbón activado 1X en un tiradero de basura (carbón activado que ha sido expuesto al agente). Es uno de los más usados debido a su bajo costo y es la principal opción en caso de que el carbón no sea apto para una reactivación. Sin embargo, existe la posibilidad de que los contaminantes se filtren.
- c. Micronización e incineración del carbón activado 1X. Es el procedimiento más caro de disposición, más es el único que ha sido aprobado por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) en Estados Unidos para ser utilizado en el sitio como método de eliminación de residuos. Para la micronización, primero se pulveriza el carbón activado usado hasta tener un polvo muy fino, después es arrojado al horno de desactivación en el cual es incinerado. El primer paso se hace con el fin de que se mejore la quema del carbón activado durante la combustión.

En algunos estados de Estados Unidos se permite que el carbón activado que no ha sido expuesto a una concentración mayor que la regulada (Ver 4. Marco

Legal), de agentes químicos en estado líquido o vapor, puedan ser tratados como residuos no peligrosos y que puedan ser eliminados de acuerdo a la regulación de residuos sólidos. [24]

Diagrama 3.2.1 Diagrama esquemático del destino del carbón activado después de uso comercial o industrial. [24]



3.2.2 Control de emisiones para otros contaminantes

La incineración de agentes como la mostaza, así como también la lewisita y GA, producen productos por la combustión que requieren de un tratamiento un poco más específico. Algunos de los productos que requieren de esto son compuestos que contienen arsénico (As), mercurio (Hg), fósforo (P) y ácido clorhídrico (HCl). A pesar de que también pueden estar presentes los óxidos de nitrógeno (NO_x), el equipo de control de emisiones previamente descrito puede reducir las concentraciones de éste en el efluente, de tal modo que se cumple con las normas ambientales que aplican.

Para el control de emisiones de contaminantes como el arsénico y mercurio, al proceso descrito con anterioridad, se le hacen modificaciones y cambios de equipo. Los componentes del proceso quedan ordenados como sigue [25]:

- Enfriamiento rápido de la corriente gaseosa para que disminuya la temperatura desde 1100°C hasta 85°C.
- Torre de lavado empacada.
- Lavadores Venturi.
- Eliminador de vapor.
- Recalentador de gas, para incrementar la temperatura de 21°C hasta 82°C.
- Inyección de carbón activado impregnado con azufre en polvo.
- Filtro de tela Pulsed-Jet.
- Sistema de filtración: prefiltro, filtros de alta eficiencia, filtros con camas granulares de carbón activado impregnado.
- Ventilador de velocidad variable.

Los compuestos podrán ser removidos por varios equipos durante el proceso.

Arsénico - El arsénico se encuentra en la corriente gaseosa del incinerador de líquidos como óxido de arsénico (II) (AsO) al ser un producto de la oxidación a 1100°C. A temperaturas menores pueden existir en equilibrio otros óxidos como son el óxido de arsénico (III) (As₂O₃) y o el óxido de arsénico (V) As₂O₅. A pesar de que el As₂O₃ no es soluble en agua, experimentos sugieren que en presencia de ácido cacodílico [(CH₃)₂AsO₂H], el 60% de las partículas de As₂O₃ pueden ser capturadas en las torres de lavado. [25]

El arsénico se puede capturar por diversas vías debido al diseño del sistema de control de emisiones. Primero se hace la nucleación de As₂O₅ a través del enfriamiento rápido y las torres de lavado, en éste último favorecen el crecimiento de partículas. Luego se remueven las partículas de mayor tamaño en el lavador Venturi y las más pequeñas en filtro de tela Pulsed-Jet. Se espera que cerca del 95% del arsénico se elimine en la torre de lavado Venturi. [25]

Mercurio - El mercurio que entra al sistema de control de emisiones es principalmente mercurio elemental y el cloruro mercurioso (Hg₂Cl₂). En el proceso se prevé que se absorba el Hg₂Cl₂ en las torres de lavado y que el mercurio

elemental más algunas trazas del Hg_2Cl_2 , sean adsorbidos por el polvo de carbón activado impregnado con azufre inyectado o el que se encuentra granulado en filtros. Las eficiencias de los equipos deben de ser cercanas al 50% para la torre de lavado y para el carbón activado impregnado de 95%. [25]

3.3 Agua de lavado (neutralización)

Después de ser drenado el agente químico los proyectiles, municiones o misiles, deben pasar por un proceso de lavado con agua a 43°C y 10,000 psig. [26] El sistema de enjuague debe remover la fracción del agente que se haya hecho gel y no pueda ser decantado por las perforaciones realizadas. También debe utilizarse agua o soluciones diluidas de sosa para descontaminar áreas donde se ha derramado agente.

La corriente líquida producida (agente y agua de lavado) se envía a un tanque colector y posteriormente a un reactor de neutralización. El reactor debe mantener un nivel de pH constante, por lo que es alimentado de igual manera con agua desmineralizada e hidróxido de sodio. Se produce una reacción de hidrólisis, que destruye químicamente el agente en cuestión. La solución resultante es transferida a un tanque de muestreo, donde el contenido es analizado para asegurar que el 99.9999% del agente ha sido destruido.

El segundo tratamiento es por obligación de la Convención de Armas Químicas (CAQ, 1993), con el fin de asegurar la destrucción irreversible de los agentes como método de destrucción del agente hidrolizado, se emplea la oxidación con agua supercrítica. El ambiente que debe imperar en el reactor debe ser altamente oxidante para que convierta la mayoría de los elementos al estado oxidado más estable (i.e. el carbón es oxidado hasta formar dióxido de carbono, el hidrógeno para formar agua, el azufre para formar sulfatos), se logra a 650°C y 3,400 psig. Sin embargo la corriente del agente hidrolizado de alimentación es altamente corrosiva a estas condiciones, ya que las sales pueden precipitar.

Tratamiento de disposición

Al final del segundo tratamiento, el método de destrucción produce corrientes de residuo:

- El recubrimiento de los reactores de oxidación de agua supercrítica, debido al ambiente tan corrosivo con el que se trabaja, se corroe formando un compuesto con titanio.
- El efluente de gases es separado de la corriente líquida y es procesado en el sistema de control de emisiones.
- La fase condensada, que es una mezcla de material líquido y sólido, es enviada al sistema de recuperación de agua.
- También produce sales que son insolubles en el agua supercrítica, pero emergen como lodos y son separados del material líquido a través de filtros. El líquido residual pasa por un sistema de osmosis inversa, el cual recupera alrededor del 70% del agua y el porcentaje restante permanece como salmuera. Ésta última se transporta para su disposición final a los tiraderos correspondientes, pero debe ser analizada para detectar la concentración del agente presente.

3.4 Cubierta metálica de municiones o contenedores

Todos los procesos de destrucción de armas químicas deben contar con un equipo de tratamiento de partes metálicas, que descontaminará el cuerpo de las municiones en el programa de desarme y también al momento de cerrar las instalaciones de producción de agentes. El objetivo de este sistema es asegurar que el metal y otros desechos sean procesados a una temperatura de 540°C por un periodo no menor a 15 minutos, para que de esta manera puedan ser transportados fuera de las instalaciones para su disposición final. Este equipo tratará el revestimiento de las municiones y otros desechos metálicos, algunos plásticos como el cloruro de polivinilo (PVC), teflón, hule, materiales celulósicos, lodos, concreto, madera y algunos trajes de protección.

El proceso se puede dividir en las siguientes partes: una esclusa de aire en la entrada, cámara de procesamiento y otra esclusa de aire a la salida. Los metales son transportados a través del sistema por medio de carros, carretas o una banda transportadora. La pared interna de la cámara debe encontrarse a 650°C, misma que es mantenida caliente por inducción con serpentines externos. A la misma temperatura se introduce vapor sobrecalentado como una corriente gaseosa, que servirá como medio de transporte para el agente vaporizado y otros contaminantes hacia el sistema de control de emisiones.

Tratamiento de disposición

Los gases producidos durante el proceso, son enviados a un sistema de control de emisiones particular. El cual consiste en una unidad de oxidación sin flama, un ciclón para separar partículas y un equipo Venturi. La unidad de oxidación opera a 1100°C, con un tiempo de residencia para los gases de 1 segundo para asegurar la destrucción de dioxinas y furanos de la corriente. Este equipo usa corrientes de gas natural y aire calentado como medio de calentamiento cuando la corriente gaseosa de compuestos orgánicos no es suficiente. Ya enfriada con agua la corriente de salida, pasa por el ciclón removiendo las partículas (mayores a 14 µm de diámetro) que siguen presentes en la corriente gaseosa. El equipo de lavado Venturi se encarga de neutralizar los gases ácidos con sosa cáustica a una temperatura de 50°C, además trata los gases producidos por el proceso de neutralización de agentes y de los agentes hidrolizados almacenados. Posteriormente es enviado al sistema de calefacción, aire acondicionado y ventilación, donde antes de su liberación a la atmósfera pasará por los filtros de carbón activado.

3.5 Efluentes de la destrucción de explosivos y propelentes

En la destrucción de explosivos y propelentes por el método de hidrólisis se generan tres corrientes que deben ser tratadas. Una de ellas, la de

sólidos, que contiene partes metálicas de la carga explosiva; la de líquidos, que es una suspensión de los explosivos hidrolizados; y una gaseosa.

Tratamiento de disposición

Los tratamientos que se deben aplicar a cada una de ellas, son parecidos al resto de los desechos generados. La de sólidos, al tratarse de metales, se transporta al horno de descontaminación de metales; la de gases a un sistema de control específico para material energético.

El efluente líquido, debe someterse a una neutralización de componentes energéticos, donde todo el material energético será destruido y se corroborará con un escaneo diferencial calorimétrico. [26] Posteriormente se hará pasar la corriente a través de un sistema de filtración para hacer precipitar el aluminio con diferentes ácidos (fosfórico, hidroclicóricó y sulfúricó), para después mandarla al reactor de oxidación con agua supercrítica. Es importante remover la mayor cantidad de aluminio posible de la corriente, ya que de otra manera precipitaría, generaría sólidos e interferiría con la operación del reactor de oxidación con agua supercrítica.

La corriente gaseosa proveniente de la hidrólisis y de la neutralización energética, debe ser tratada en una torre de lavado Venturi que remueve el amoniacó con ácidos. Este proceso a su vez crea una corriente secundaria de residuos líquidos y gases, los últimos son enviados al sistema de control de emisiones para su tratamiento.

3.6 Efluente del tratamiento biológico

La principal corriente de salida del tratamiento biológico es una mezcla de agua, dióxido de carbono, sulfatos y minerales. Los cuales después de salir del biorreactor se analizan y si cumplen con una eliminación del 95% del agente químico y 90% del total de los compuestos orgánicos, son descargados en el sistema de recuperación de agua. De otra manera, vuelven a ser alimentados al

biorreactor para otro tratamiento. Otros efluentes son los gases producidos y lodos, los primeros son enviados al sistema de control de emisiones y los segundos son enviados a un relleno sanitario.

Tratamiento y disposición

Sin embargo, en todo el proceso del tratamiento biológico los tanques deben estar ventilados, por lo que liberan gases a la atmósfera. Por cada etapa del proceso existen diferentes filtros y sistemas para el control de emisiones:

- En el tanque de almacenamiento permanecen los lodos por 30 días, mismos que emiten gases a la atmósfera a través de filtros de carbón activado.
- Por cada 4 biorreactores se cuenta con dos esponjas absorbedoras de hierro para remover los compuestos volátiles inorgánicos y los compuestos orgánicos sulfurados (sulfuro de hidrógeno, mercaptanos y tioles). También tiene un quemador para disminuir la humedad relativa antes del sistema de adsorción, un sistema de carbón activado con prefiltro y un filtro de aire de alta eficiencia (HEPA). Finalmente, antes de ser liberada la corriente a la atmósfera se hace pasar por otras dos esponjas absorbedoras de hierro para condensar el agua y enviarla a los clarificadores del sistema de recuperación de agua.

3.7 Recuperación de Agua

El sistema de recuperación de agua junta los efluentes líquidos de los sistemas de tratamiento biológico, de las torres de enfriamiento, de los hervidores o algunas corrientes del agua de lavado. Este sistema incluye dos clarificadores, dos espesantes, dos filtros prensa y un equipo auxiliar. Al pasar por los clarificadores, a la corriente a tratar se le inyecta un polímero para hacer que coagule químicamente y que puedan ser eliminados con facilidad los sólidos suspendidos. Después de este proceso se generarán dos corrientes: la

clarificada y lodos, los últimos continuarán en el sistema de recuperación de agua y la primera será enviada al equipo de reducción de salmuera.

Los lodos, al ser separados de la corriente clarificada se bombearán al equipo espesante, donde se determinará si se le agrega o no dependiendo de su viscosidad. Esta corriente se vuelve a mandar a los clarificadores, para que posteriormente pase a través de los filtros prensa. Éste separa los sólidos de la corriente líquida, la última vuelve a ser recirculada por los clarificadores y la masa sólida es un residuo secundario.

3.8 Salmuera

La salmuera proviene del sistema de control de emisiones (torres de lavado) que reduce los contaminantes del efluente de gases de los incineradores o del sistema de recuperación de agua. Ésta debe ser tratada en un sistema diseñado para su reducción, ya que contiene en este caso agua, sales disueltas, sólidos suspendidos y cantidades traza de metales pesados. [17] El sistema de tratamiento cuenta con dos concentradores de salmuera, dos evaporadores, dos filtros de carbón activado en fase líquida y tres unidades de filtros prensa. Además, para los efluentes gaseosos que se producen a lo largo de este tratamiento, el sistema se encuentra conectado con el equipo de control de emisiones.

Al inicio de este proceso de reducción, la corriente de alimentación debe prepararse por medio de calentamiento y acidificación, de modo que las sales carbonatadas se conviertan a dióxido de carbono. Esto se hace para reducir la incrustación de estas sales en el equipo y que causen daños. El efluente líquido es transferido a tanques de mezclado, donde se hace un incremento de pH al añadir hidróxido de sodio para disminuir la corrosión en los equipos que siguen. Esta mezcla posteriormente es destilada. El vapor que sale del tanque concentrador de salmuera, se encuentra constituido por vapor y gases no

condensables, que son finalmente ventilados en el sistema de control de emisiones. En la corriente líquida del tanque se encuentra el material no volátil, sales, residuos orgánicos y sólidos suspendidos, los cuales son extraídos por medio de la evaporación y cristalización, por lo que el agua resultante se hace pasar por los filtros de carbón en fase líquida. Al terminar todo el tratamiento, el agua es depositada en los tanques de agua de proceso.

3.9 Residuos de clausura

Los residuos que se acumulan a lo largo de la destrucción de armas químicas son almacenados de manera que se traten al final de los proyectos de eliminación de agentes. En algunas instalaciones el tratamiento de estos residuos se hace a la par de las operaciones para que no sea parte de la clausura y que se cierren las instalaciones en el menor tiempo posible.

A continuación se mencionan algunos de los residuos que resultan de las operaciones y que su tratamiento final se prolonga hasta el cierre de la planta, cabe mencionar que algunos deben ser tratados antes de ser transportados por no cumplir con los límites de concentración de agentes químicos para transporte y serán tratados en el sitio.

- Carbón activado gastado proveniente de los filtros.
- Combustible sólido en contenedores.
- Sólidos varios en contenedores.
- Metales (tuberías, bombas, etc.).
- Equipos de protección personal y de seguridad en contenedores.
- Concreto y tierra.
- Solución gastada de descontaminación.
- Líquidos varios.

Algunos de los residuos como el carbón activado gastado, los metales y escombros serán los más voluminosos y que en su mayoría podrán ser tratados

en la etapa de clausura. De estos, el tratamiento más sencillo será para los metales ya que se harán pasar por un horno de metales para su descontaminación. El concreto y escombros deberán ser analizados para conocer las propiedades y la concentración de agentes presentes para poder ser enviado al tratamiento de disposición que más se adecue. Por otro lado, el tratamiento del carbón activado gastado seguirá tres posibles caminos de tratamiento que ya han sido mencionados.

3.10 Proyectos de limpieza

Los proyectos de limpieza post destrucción de armas químicas almacenadas o después de descubrir armas químicas en un sitio, son la base clave para que la comunidad aledaña apoye este tipo de prácticas.

Las tecnologías de limpieza deben de ser económicas, sencillas, sustentables, de acuerdo a la normatividad local y que dentro de lo posible beneficie a la población. Ciertamente, no existe un método único en su tipo aplicable en todos los casos, ya que depende directamente del sitio, el grado de contaminación, el uso posterior que se le quiere otorgar y por último los recursos humanos y económicos disponibles.

Tabla 3.10.1 Posibles métodos de limpieza de antiguos sitios de producción de armas químicas. [8]

Grado de Contaminación	Método de limpieza
Suelo altamente contaminado	Incineración de suelo contaminado en lugares especiales
	Lavado de suelo
	Verificación In-Situ
	Aislamiento del sitio contaminado
Suelo y agua ampliamente contaminadas	Bio remediación
	Recuperación Ecocatalítica
	Aislamiento del sitio contaminado

4. Marco Legal

Para garantizar la destrucción de los arsenales de armas químicas y las instalaciones de depósito, así como las plantas de producción, los gobiernos de los estados participantes de la Convención sobre la Prohibición de las Armas Químicas (CAQ) deben contar con una normatividad rigurosa y una supervisión controlada. La legislación no sólo deberá cubrir las acciones legales contra cualquiera que realice actos sospechosos de robo de agentes químicos o atentados contra instalaciones químicas, sino también debe establecer y regular las normas adecuadas para el control de desecho sólido, emisiones gaseosas y efluentes que provienen de la destrucción de las armas químicas. Por otro lado, la implementación de programas de entrenamiento, la operación de las instalaciones y el diseño del equipo a utilizar para la destrucción de armas químicas deben cumplir con los permisos y reglas establecidas con el fin de resguardar la seguridad de los trabajadores y de las comunidades aledañas.

4.1 Adopción de la Convención de Armas Químicas

El escrito que se originó a partir de la CAQ, que entró en vigor en 1997, ha cobrado importancia a partir del miedo generado debido a las acciones terroristas que amenazan con la seguridad y paz internacional. Este instrumento internacional jurídicamente vinculante, promueve la destrucción y condena la proliferación de las armas químicas, además de establecer un sistema de verificación de la destrucción de las mismas.

La Convención es un tratado multilateral cuyo espíritu reside en prohibir la proliferación de armas químicas y fomentar la destrucción de toda una categoría de armas de destrucción masiva; además, cuenta con el respaldo de la industria química para el control de agentes químicos tóxicos y su verificación. En él también se definen los procedimientos que deben de seguir los países signatarios para los procedimientos de inspección de las instalaciones de armas químicas e

industriales, así como un manual de declaraciones para presentar la información a la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas (OPAQ, 1997) y los avances que se realicen en cuanto a la destrucción de armas químicas. (Ver *Anexo B*)

México firmó la CAQ en 1993 y fue aprobada por el Senado de la República en Julio de 1994 [27], sin embargo fue hasta abril de 1997 cuando entró en vigor a nivel internacional y en el país. Al ser uno de los estados parte de dicho instrumento (188 naciones para el 2010, [28]), México se encuentra en la obligación de realizar las acciones pertinentes para la implementación de la CAQ a nivel nacional por lo que en el 2004 se establece la *Comisión Intersecretarial en materia de Desarme, Terrorismo y Seguridad Internacional*. En la actualidad como Autoridad Nacional ante la Organización sobre la Prohibición de las Armas Químicas (OPAQ) se reconoce a un grupo de trabajo presidido por la Secretaría de Gobernación. Para dicho trabajo se realizan acciones conjuntas entre varias dependencias:

- Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE)
- Secretaría de Gobernación (SG)
- Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA)
- Secretaría de Marina (SEMAR)
- Secretaría de Seguridad Pública (SSP)
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP)
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)
- Procuraduría General de la República (PGR)

También cuentan con la participación de las siguientes instituciones para asuntos técnicos, científicos y de inspección [27]:

- Secretaría de Economía (SE)
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA)
- Secretaría de Salud (SS)

- Secretaría de Energía (SENER)
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ)
- Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA)
- Instituto de Química y Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Desde que la Convención fue abierta a firma, México ha sido un activo participante en cada uno de los órganos de la OPAQ, promoviendo la adopción de dicho instrumento y la verificación oportuna de instalaciones. Debido a lo anterior, ha podido presidir el Consejo Ejecutivo de la OPAQ durante los periodos 1999-2000 y 2009-2010. [30] Conforme dicta el Artículo III de la CAQ, México declaró en 1997 que no posee, ni ha poseído, ni tampoco produce armas químicas [31]; más eso no lo exime del cumplimiento de algunos artículos de la Convención relativos a la no proliferación como son los que se refieren a las actividades prohibidas de la Convención (Art. VI), medidas de aplicación (Art. VII), desarrollo económico y tecnológico (Art. XI), entre otros.

4.2 Medidas legislativas

Al firmar la CAQ, los estados participantes se encuentran en la posición de modificar normas legislativas y administrativas para poder aplicar la Convención dentro del mismo. Con ese motivo, México ha enviado a la Secretaría Técnica de la OPAQ las acciones que ha hecho respecto a la aplicación de la Convención sobre las armas químicas en el ámbito penal, de lo cual se puede resaltar lo siguiente:

- En el Artículo 133 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos se establece que todos los tratados que estén de acuerdo con las leyes del Congreso de la Unión y que se celebren por el Presidente de la República, con la aprobación del senado, serán Ley Suprema de toda la Unión. De esta manera se afirma que lo pactado por el embajador de

México al firmar la CAQ en enero de 1993, la aprobación del Senado de la República en julio de 1994 y unos días más tarde la ratificación del instrumento por el Presidente de la República, hacen que inmediatamente la *Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción, el Almacenamiento y el Empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción* entre como decreto y sea publicado en el Diario Oficial de la Federación.[39]

- En la *Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos*, en su artículo 10 declara que el uso de artificios de guerra, gases y sustancias químicas son de uso exclusivo militar. Es de importancia mencionar que esta Ley Federal data de 1971 y que su más reciente modificación fue en el 2004, por lo que en el momento en el que fue redactada aún no se definía el término arma química por lo que se empleó en su momento la expresión “sustancia química”, misma que puede ser aplicada a toda la materia. Por lo que es necesario una definición más detallada sobre la sustancia para reducir el margen de error.

Por otro lado, en esta ley queda asentado que los gases y sustancias químicas, que entendemos como armas químicas debido al contexto, son de uso exclusivo militar, sin embargo existen las armas químicas que se clasifican como discapacitantes (ie. Gas lacrimógeno) que son empleadas por algunos organismos de seguridad pública.

- Modificación a la *Ley de Seguridad Nacional*, por iniciativa del Centro de Investigación y Seguridad Nacional, en donde se señala en su artículo 5 fracción VIII que son amenazas a la seguridad nacional todos los actos que se refieran al *tráfico ilegal de materiales nucleares, armas químicas, biológicas y convencionales de destrucción masiva*. Cabe señalar que a pesar de que se introduce el término de armas químicas en la legislación nacional, existe un problema de definición en cuanto al término “armas convencionales de destrucción masiva”. Ya que por armas convencionales se entiende que son *dispositivos diseñados para matar, lesionar o dañar, aunque no exclusivamente, por medio de los efectos de elementos*

altamente explosivos, energía cinética o incendiario, por lo que no son armas de destrucción masiva, sino lo opuesto. [40]

- A través del Proyecto de Decreto *La Ley Federal de Armas y Municiones, Sustancias Químicas y Explosivos*, en sus artículos 11 y 104, se hace referencia a las penas y sanciones a quien realice actividades ilícitas con armas nucleares, químicas y/o biológicas.[27] Sin embargo es un proyecto que por diversos motivos y acontecimientos en el país no ha sido aprobado por el Senado de la República.
- Para el control, registro y autorización de la importación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, se designó a la *Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicida, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas* (CICOPLAFEST). Esta comisión apoya la participación de la iniciativa privada y facilita el cumplimiento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (Normas Oficiales Mexicanas- NOM's y Normas Técnicas.)
- La *Ley Federal para el Control de Sustancias Químicas Susceptibles de Desvío para la Fabricación de Armas Químicas* publicada en junio de 2009 regula la elaboración, producción, consumo y transferencia de las sustancias químicas enunciadas en el apéndice I de la misma Ley. También controlará el desarrollo, conservación, comercialización, uso, empleo, posesión, tenencia, transporte, trasbordo, confinamiento y destino de las sustancias que se encuentren en el mismo listado. [41]

4.3 Normas y Leyes Mexicanas posiblemente aplicables a la destrucción de armas químicas

La generación, acumulación, tratamiento, almacenamiento y disposición de los residuos peligrosos se encuentran regulados por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales a través de reglamentos y normas oficiales, por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, por la *Ley General para la*

Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, Diario Oficial de la Federación, 2003) y por la *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA, Diario Oficial de la Federación 1988). Ésta última se encarga de evaluar los residuos producidos y determinará si son o no peligrosos, para posteriormente poder manejarlos adecuadamente.

4.3.1 Residuos peligrosos

Se considera residuo sólido *a todos los desechos orgánicos, inorgánicos, cenizas, residuos de la ciudad, cadáveres de animales, vehículos abandonados, residuos industriales, residuos de demoliciones, residuos de la construcción, residuos biológico-infecciosos y residuos de las plantas de tratamiento de aguas.* Mas tarde, a partir de la publicación de la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (LGPGIR, Diario Oficial de la Federación, 2003) se clasificarán los residuos sólidos como peligrosos, sólidos urbanos y especiales, debido a que se busca fomentar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la correcta clasificación y la gestión de estos residuos para poder remediar sitios ya contaminados o prevenir que lo sean.

Se define como residuo peligroso *a aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfiera a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley.* (LGPGIR, 2003)[32]

4.3.2 Normas Oficiales Mexicanas aplicables al transporte, identificación y manejo de los residuos sólidos peligrosos

Normas de la Secretaría del Medio Ambiente y de Recursos Naturales [33]

- **NOM-052-SEMARNAT-2005.** Establece las características, el procedimiento de identificación y clasificación de los residuos peligrosos, así como los listados de las sustancias que se consideran como residuos peligrosos.
- **NOM-053-SEMARNAT-2005.** Establece el procedimiento para realizar el análisis de la muestra extraída y determinar los constituyentes del residuo que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente.
- **NOM-053-SEMARNAT-2005.** Propone el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993.
- **NOM-055-SEMARNAT-2003.** Dicta los requisitos que deben cumplir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente tratados.
- **NOM-057-SEMARNAT-1993.** Determina los requisitos de diseño, construcción y operación de las celdas de un confinamiento controlado para residuos sólidos.
- **NOM-058-SEMARNAT-1993.** Establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
- **NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.** Define, clasifica y establece las especificaciones de manejo de residuos peligrosos biológico infecciosos.
- **NOM-098-SEMARNAT-2002.** Señala las especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes de la incineración de residuos.

Tabla 4.3.1 Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos. [33]

Contaminante	Unidades	Límite de emisión
CO	mg/m ³	63
HCl	mg/m ³	15
NOx	mg/m ³	300
SO2	mg/m ³	80
Partículas	mg/m ³	50
Arsénico, cobalto, selenio, níquel, manganeso y estaño	mg/m ³	0.70
Cadmio	mg/m ³	0.07
Plomo, cromo total, cobre y zinc	mg/m ³	0.70
Mercurio	mg/m ³	0.07
Dioxinas y furanos - instalaciones	ng/m ³	0.20

nuevas		
Dioxinas y furanos -instalaciones existentes antes de la publicación de esta NOM	ng/m ³	0.50

- **NOM-133-SEMARNAT-2000.** Muestra las especificaciones de manejo de los bifenilos policlorados
- **NOM-004-SEMARNAT-2002.** Establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final.

Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes [34]

- **NOM-003-SCT/2008.** Establece las características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-004-SCT/2008.** Señala los sistemas de identificación de unidades destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-005-SCT/2008.** Menciona la información de emergencia para el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-005-SCT2-1994.** Menciona la información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-006-SCT2-2000.** Proporciona los aspectos básicos para la revisión ocular diaria de la unidad destinada al autotransporte de materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-007-SCT2/2002.** Establece el marcado de envases y embalajes destinados al transporte de sustancias y residuos peligrosos.
- **NOM-009-SCT2/2003.** Dicta la compatibilidad para el almacenamiento y el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos explosivos.
- **NOM-010-SCT2/2003.** Menciona la compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-011-SCT2-1994.** Señala las condiciones para el transporte de las sustancias, materiales y residuos peligrosos en cantidades limitadas.

- **NOM-018-SCT2-1994.** Muestra las disposiciones para la carga, acondicionamiento y descarga de materiales y residuos peligrosos en unidades de arrastre ferroviario.
- **NOM-019-SCT2/2004.** Establece las disposiciones generales para la limpieza y control de remanentes de sustancias y residuos peligrosos en las unidades que transportan materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-020-SCT2-1995.** Proporciona los requerimientos y especificaciones (SCT306, SCT 307 y SCT 312) generales para el diseño y construcción de autotanques destinados para el transporte de materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-023-SCT2-1994.** Brinda la información técnica que debe contener la placa que portan los autotanques, recipientes metálicos intermedios para granel y envases con una capacidad mayor a 450 litros que transportan materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-024-SCT2/2002.** Establece las especificaciones para la construcción y los métodos de prueba de los envases y embalajes de las sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- **NOM-028-SCT2/1998.** Señala las disposiciones especiales para los materiales y residuos peligrosos inflamables transportados.
- **NOM-032-SCT2-1995.** Establece las especificaciones para la construcción de contenedores cisterna destinados al transporte multimodal de materiales peligrosos.
- **NOM-043-SCT/2003.** Proporciona el documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

4.3.3 Límites de emisiones para algunos contaminantes que se pueden tener en la destrucción de armas químicas

Como se mencionó anteriormente, México ha declarado que no posee armas químicas por lo que no se encuentra en la posición de tener que destruir un arsenal completo en cierto periodo de tiempo. Pero, ¿si las tuviera? A continuación se mencionan algunas de las normas oficiales aplicables en cuanto al límite de emisiones.

- **NOM-043-SEMARNAT-1993** Establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

Tabla 4.3.2 Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas [33]

Flujo de gases m ³ /min	Zonas críticas ^a mg/m ³	Resto del país mg/m ³
5	1536	2304
10	1148	1722
20	858	1287
30	724	1086
40	641	962
50	584	876
60	541	811
80	479	719
100	437	655
200	326	489
500	222	333
800	182	273
1000	166	249
3000	105	157
5000	84	127
8000	69	104
10000	63	95
20000	47	71
30000	40	60
50000	32	48

^a Como zonas críticas se refiere a las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población de Coahuila de Zaragoza-Minatitlán, Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, Estado de Guanajuato; Tula-Vito-Apasco, Estado de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la zona fronteriza norte.

- **NOM-085-SEMARNAT-1994** Dicta los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno de fuentes fijas que utilizan combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones. También establece los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión. (Ver Tabla 4.3.3)

Tabla 4.3.3 Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de diferentes contaminantes [33]

Capacidad del equipo de combustión MJ/h	Tipo de combustible empleado	Densidad del humo Número de mancha u opacidad	Partículas suspendidas totales (PST) mg/m ³ (kg/106 kcal) 1,2			Bióxido de azufre ppm V (kg/106 kcal) 1,2			Óxidos de nitrógeno ppm V (kg/106 kcal) 1			Exceso de aire de combustión % en volumen 5
			ZMCM	ZC3	RP	ZMCM	ZC3	RP	ZMCM	ZC3	RP	
Hasta 5,250	Combustóleo o gasóleo	3	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
De 5,250 a 43,000	Líquidos	NA	75 (0.106)	350 (0.426)	450 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	190 (0.507)	190 (0.507)	375 (0.959)	40
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	190 (0.486)	190 (0.486)	375 (0.959)	
De 43,000 a 110,000	Líquidos	NA	60 (0.805)	300 (0.426)	400 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	30
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	
Mayor de 110,000	Sólidos	NA	60 (0.090)	250 (0.375)	350 (0.525)	550 (2.16)	1,100 (4.31)	2,200 (8.16)	110 (0.309)	110 (0.309)	375 (1.052)	25
	Líquidos	NA	60 (0.085)	250 (0.355)	350 (0.497)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	

¹ Concentraciones referidas a 25°C, 760 mmHg, 5% de oxígeno en volumen y base seca. Entre paréntesis se expresa el equivalente de la concentración en unidades de kg/10⁶ kcal. ² Los valores de emisión de partículas, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno podrán ser determinados con promedios ponderados de fuente fija, al hacer uso descrito en el 5.2 de esta Norma. ³ Zonas críticas ⁴Se refiere únicamente a las zonas metropolitanas de las ciudades de Monterrey y Guadalajara y las ciudades de Tijuana, Baja California y Cd. Juárez, Chihuahua. ⁵ Determinado con la siguiente ecuación: $EA = (O_2 - 0.5CO) * 100 / (0.264N_2 - O_2 + 0.5CO)$, donde O₂, CO y N₂ corresponde al por ciento en volumen de oxígeno, monóxido de carbono y nitrógeno respectivamente

4.4 Normas y Leyes de los Estados Unidos de Norteamérica aplicables a la destrucción de armas químicas

La acumulación, recuperación, tratamiento, almacenaje y disposición de los residuos peligrosos están regulados por el Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés) y las enmiendas de Residuos Sólidos Peligrosos de 1984. [35] Todos los residuos que se deriven del manejo y destrucción de los agentes químicos y municiones deben ser manipulados bajo las normas estatales aplicables, si son determinados peligrosos, serán tratadas bajo el acta y las enmiendas previamente mencionadas, así como por el Acta de Respuesta Integral Ambiental, Compensación y Responsabilidad Social. [26]

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, conocida como la EPA (Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés), que es la encargada de proteger la salud humana y el medio ambiente, teniendo como prioridades la calidad del aire, el cambio climático, la seguridad de sustancias químicas, la limpieza, entre otros. Además, esta institución es la encargada de desarrollar normas y procedimientos que definan a los residuos peligrosos como tales. También establece el manejo y tratamiento de estos residuos bajo la RCRA y promueve la estabilización o solidificación para cumplir los estándares de disposición de dichas sustancias. Por otro lado, autoriza que los estados regulen los residuos peligrosos dentro de sus fronteras bajo el RCRA sin embargo las medidas adoptadas no deben ser menos restrictivas que las adoptadas por la EPA (40 Code of Federal Regulation (CFR) 271).

4.4.1 Residuos Peligrosos

Existen dos tipos de residuos peligrosos que ya han sido regulados por la EPA y por la RCRA:

- a. Residuos característicos. Aquellos residuos sólidos que presentan alguna propiedad de: ignición, corrosión, toxicidad o reactividad. Los residuos sólidos peligrosos pueden ser líquidos, sólidos, gases o lodos, desechos de productos comerciales tales como líquidos de limpieza o plaguicidas, o los subproductos de procesos de producción (40 CFR 261.21-261.24)
- b. Residuos listados. Son los residuos sólidos que se encuentran específicamente listados por la EPA o por algún órgano regulatorio estatal. (40 CFR 261.11)

Una de las principales diferencias entre estos dos tipos de residuos, radica que bajo la normatividad de la RCRA, cualquier residuo derivado del tratamiento, almacenaje o disposición de un residuo listado, es considerado a su vez residuo listado. De igual manera, la mezcla de residuos sólidos con otro residuo listado, también es llamada residuo listado. Por lo que, en ambos casos, se debe cumplir con la normatividad correspondiente.

4.4.2 Elección de método de destrucción

Los factores que hacen que se elija un método de destrucción sobre otro tienen que ver con dos puntos importantes: el arma a destruir y la eficacia del proceso. Ciertamente los costos de operación y la seguridad inclinarán la balanza sobre la elección de una tecnología sobre otra. Debido a que no se tienen parámetros establecidos, se evalúan los procedimientos considerando la eficacia del proceso/ rendimiento de la destrucción de los agentes químicos y de otros residuos del proceso, de manera que sea consistente con las normas ambientales del país y con los requerimientos de la Convención de Armas Químicas. El parámetro descrito anteriormente, fue establecido por la RCRA y es mejor conocido como la

eficiencia de destrucción y remoción (DRE) (40CFR 264.343). El DRE se define como la diferencia entre la cantidad de agente químico que entra al proceso y la cantidad que es emitida a la atmósfera después del sistema de control de emisiones. Por ejemplo, para tecnologías como la incineración se requiere de un DRE de 99.99999%. [15]

Bajo la normatividad de la RCRA, un DRE de 99.99% es requerido para todos los residuos que representan algún riesgo para la salud humana o el ambiente. Un DRE, como el que se requiere para la incineración de agentes químicos, significa que una molécula de constituyente orgánico principal del residuo peligroso es emitida al aire por cada millón de moléculas del residuo peligroso que entra al incinerador. [17]

4.4.3 Regulación de la tecnología que otorga el máximo control posible

En 2005, bajo la autorización del Acta de Aire Limpio y la RCRA, la EPA publicó los límites nacionales de emisión al aire de contaminantes peligrosos provenientes de equipos con cámara de combustión o incineradores, mismos que reflejan la aplicación de la tecnología que otorga el máximo control posible (MACT) sobre las emisiones.

Esta norma controla los siguientes contaminantes:

- Dioxinas y furanos
- Mercurio
- Metales semivolátiles (cadmio y plomo)
- Metales de baja volatilidad (arsénico, berilio y cromo)
- Materia particulada
- Otros contaminantes como cloruro de hidrógeno, gas cloro, compuestos orgánicos contaminantes

4.4.4 Límites de exposición

Los límites actuales de exposición para concentraciones en el aire de armas químicas para su destrucción en Estados Unidos fueron establecidos por el Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CDC), creados con el fin de proteger a los trabajadores y al público en general. Para esto, se integró la información de corta y larga exposición de compuestos químicos en animales, para determinar si algunos tipos de agentes poseían un riesgo aún mayor para los trabajadores. De esta manera se implementó un sistema de control adecuado para evitar la exposición a los agentes, así como el posterior tratamiento de residuos.

Se dividen en los siguientes tipos:

- a. Límites de corta exposición (menores a 15 min)
- b. Límites para la población trabajadora (trabajadores sin protección)
- c. Límites para la población en general
- d. Límite peligroso inmediato para la vida o salud

Tabla 4.4.1 Límites de exposición de agentes químicos en el aire propuestos por el Centro de Control y Prevención de Enfermedades (2005) y límites guía para exposición aguda para GA, GB, VX y HD implementados por la U.S. EPA/NRC(National Research Council) (2003). [19]

Límites de exposición de	GA/GB mg/m ³ , 1mg/m ³ = 160 ppb	VX mg/m ³ , 1mg/m ³ = 84 ppb	HD mg/m ³ , 1mg/m ³ = 141 ppb
Tipo de límite			
Límite de corta exposición (STEL)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}	3.0×10^{-3}
Límite para la población trabajadora (WPL)	3.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	4.0×10^{-4}
Límites de exposición para la población en general (GPL)	1.0×10^{-6}	6.0×10^{-7}	2.0×10^{-5}
Límite peligroso inmediato para la vida o salud (IDLH)	1.0×10^{-1}	3.0×10^{-3}	7.0×10^{-1}
Límites guía para exposición aguda (AEGL) ^a			

1hr AEGL -1 ^a	2.8×10^{-3}	1.7×10^{-4}	6.7×10^{-2}
1hr AEGL -2 ^a	3.5×10^{-2}	2.9×10^{-3}	1.0×10^{-1}
8hr AEGL-1 ^a	1.0×10^{-3}	7.1×10^{-5}	8.0×10^{-3}
8hr AEGL-2 ^a	1.3×10^{-2}	1.0×10^{-3}	1.3×10^{-2}

^a Límites guía para la exposición aguda (AEGLs) son una medida de comunicación del peligro desarrollado por el Comité nacional de asesoramiento, para establecer los niveles guía de exposición aguda para sustancias peligrosas. El comité desarrolló los siguientes lineamientos para el diseño uniforme de los estándares de respuesta de emergencias para el público en general, las cuales se definen:

AEGL-1: La concentración en el aire de una sustancia por arriba de lo predicho para una población, que incluye individuos susceptibles, podría presentar incomodidad, irritación o algunos efectos asintomáticos. Sin embargo, los efectos no incapacitan y son reversibles al cesar la exposición.

AEGL-2: La concentración en el aire de una sustancia por arriba de lo predicho para una población, que incluye individuos susceptibles, podría causar efectos adversos a la salud irreversibles y de larga duración.

AEGL-3: La concentración en el aire de una sustancia por arriba de lo predicho para una población, que incluye individuos susceptibles, podría ocasionar la muerte o efectos riesgosos para la salud.

Los agentes pueden estar presentes en el lugar de trabajo como vapor, aerosol o ambos, pero los límites de exposición para concentraciones en aire son independientes del estado en el que se presente.

Los límites de corta exposición son definidas como exposiciones que serían aceptables en un periodo menor a 15 minutos para trabajadores sin protección. Para agentes como el GB y GA esto no debe ocurrir más de 4 veces al día, y por lo menos una hora debe transcurrir entre las exposiciones. En cambio, para compuestos como VX sólo debe de haber una exposición diaria

4.4.5 Límites de control de residuos para transporte

La RCRA tiene para cada método de destrucción de armas químicas aprobado límites de control de residuos (WCL), abajo de los cuales cierto residuo puede ser transportado fuera del sitio para tratamiento adicional o disposición final. Generalmente se considera como residuo no peligroso a los materiales que se analizan (Metodología SW-846, U.S. EPA) y poseen una concentración menor a los límites de control.

Existen otros límites aprobados por el ejército de los Estados Unidos y la RCRA que sirven para caracterizar los residuos que se generan en una planta de destrucción de armas químicas como son:

- Nivel de vapor filtrado (VSL) – límite de control utilizado para aprobar el transporte de materiales fuera del sitio basado en la concentración del agente en la atmósfera superior de los paquetes de estos residuos.
- Designaciones para nivel de contaminación (0, 1X, 3X y 5X – *Anexo D*)- caracteriza y clasifica el nivel de contaminación con el agente de los materiales expuestos. Esta designación se remite a la historia de descontaminación a la que ha sido sometido el residuo en cuestión.
- Límite de corto periodo (STL) – es una concentración, a la que generalmente se le expresa en términos de miligramos de agente por metro cúbico de aire. El valor hace referencia a la máxima concentración a la que puede estar expuesto un trabajador sin protección sin presentar algún daño en la salud.

4.4.6 Transporte fuera del sitio

Las normas de transporte de desechos y de residuos tóxicos son particulares de los estados, sin embargo tanto la EPA como el Departamento de Transporte de Estados Unidos (DOT) se encuentran en la posición de proporcionar información complementaria y recomendaciones para establecer las normas de transporte (10 CFR 49) , además de que deben cumplir los requerimientos federales.

Para el transporte de residuos químicos peligrosos (ie. Solución de hidróxido de sodio gastada), se debe de cumplir con las reglas impuestas por el DOT, la cual incluye normas para el empaque, marcado de las sustancias, seguridad del vehículo, carteles y requisitos para el conductor.

Tabla 4.4.2 Criterios establecidos por la EPA para la aprobación del transporte fuera del sitio de los residuos peligrosos generados en una planta de destrucción de armas químicas. [17]

Agente Contaminantes	Medida directa (Extracción ^a , ppb)	VSL (Nivel de vapor filtrado) ^b	Proceso de descontaminación histórico ^c
GA,GB	20	1 STL ^d (0.0001 mg/m ³)	5X
VX	20	1 STL (0.00001 mg/m ³)	5X
HD	200	1 STL (0.003 mg/m ³)	5X

^a Métodos analíticos definidos en el plan de análisis de residuos: ppb, partes por billón.

^b VSL ≥ 1 límite de corto periodo (STL)

^c 5X, libre de agente basado en una descontaminación térmica a 537°C por 15 minutos.

^d STL, límite de corta duración

4.4.7 Permisos especiales

La mayoría de las instalaciones cuenta con contenedores, tanques, cámaras y diferentes unidades que permiten el almacenamiento de las armas químicas, cada una de ellas requiere un permiso o norma aplicable para su operación, tratamiento de efluentes, disposición o reciclaje. Existen reglas que aplican a unidades específicas como los tanques o incineradores, pero hay otros equipos que son regulados de acuerdo a la función que realizan. Las normas de la RCRA Subparte X no se refieren a las especificaciones del equipo, sino al desempeño que deben cumplir al operar para que no afecten al medio ambiente y a la salud humana. Los permisos que deben generarse para una correcta disposición, dependen mucho de la información proporcionada a la agencia y los permisos que tienen otros equipos con funciones similares; por lo que este tipo de trámite suele ser lento.

4.4.8 Ley Nacional de Política Ambiental (NEPA)

Es una política nacional que promueve la mejora del medio ambiente, para esto requiere de la participación de varias agencias federales y que, a través de diversos instrumentos, le proporcionen la información necesaria para integrar las

evaluaciones ambientales para la toma de decisiones a nivel nacional considerando el impacto ambiental.

Por lo general la evaluación del impacto ambiental se realiza cuando algún impacto que pueda afectar la calidad de vida del hombre o del ambiente pueda suceder o si es necesario determinar si el impacto es de importancia, a este trabajo se le conoce como Declaración de Impacto Ambiental (EIS). El análisis debe incluir el impacto a corto y largo plazo, el uso de recursos y el impacto acumulado, ya que ayuda a determinar si deben desarrollarse planes de acción para poder mitigar los efectos que se generen. Para el caso de la destrucción de armas químicas, el ejército de Estados Unidos tuvo que hacer un EIS para cada uno de los sistemas de destrucción de armas químicas, que incluye el sistema de respuesta rápida (RRS) y el sistema de destrucción explosivo. Para algunas tecnologías se concluyó que son ambientalmente seguras y que los subsistemas pueden utilizarse en el futuro. En cambio, con otros realizó propuestas y mencionó algunos cambios de estrategia, debido a que era necesaria una investigación más a fondo y una extensión de tiempo para la destrucción de armas químicas.

4.4.9 Clausura

El plan de clausura debe estar autorizado por la RCRA con el fin de conseguir el permiso para esta acción. Esta regla aplica a todas las plantas de tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos peligrosos en Estados Unidos. Este plan debe incluir la descripción de eliminación, transporte, tratamiento, almacenamiento o disposición de todos los residuos peligrosos antes de la clausura, así como el procedimiento a seguir para la remediación, control de contaminación y descontaminación de las instalaciones (equipo, estructuras y diversos componentes), del suelo y cuerpos de agua; con el fin de minimizar o eliminar el daño a la salud humana o al medio ambiente. (40 CFR 264.11; 264.112; 264.114).

5. Conclusiones

La destrucción de armas químicas tuvo sus inicios después del final de la Segunda Guerra Mundial en 1945, por dos razones: la desaprobación internacional respecto al uso de esa categoría de armas y la degradación del armamento producido previamente a esta guerra. El último motivo se veía influido por el desarrollo de nuevas tecnologías de dispersión de agentes químicos y la creación de nuevos agentes mucho más tóxicos que posibilitaban la producción de un arsenal más dañino y por ende más peligroso. Lo anterior desembocó a la eliminación de armas químicas por métodos que en la actualidad se encuentran estrictamente prohibidos por diferentes organizaciones internacionales como son enterrar, detonar a cielo abierto o bajo suelo, y arrojar al mar las municiones. Numerosos casos de contaminación de cuerpos de agua y de suelo se han descubierto a partir de una eliminación no planeada, también se han dado accidentes de exposición a agentes químicos al sacar del agua o del suelo municiones con agente químico degradado causando problemas a quien los descubre.

La implementación de la Convención de Armas Químicas (CAQ, 1993) como tratado internacional multilateral ha buscado prohibir y evitar el desarrollo, producción, adquisición, almacenamiento, transferencia y empleo de las armas químicas; con el fin de no sólo buscar la seguridad internacional, sino evitar futuras catástrofes y muertes de inocentes.

Ciertamente es iluso pensar que las diferentes naciones eliminarán sus armas químicas porque puede causar accidentes, lesionar o incapacitar a civiles, dañar al medio ambiente, etc. Y que se quedarán completamente desarmadas ante posibles enemigos. La destrucción de armas químicas que se está llevando a cabo en la actualidad es por la degradación de los agentes viejos almacenados que se tienen, porque hay nuevas y mejores tecnologías que las reemplacen y no hay un motivo por el cual se deba gastar en mantener almacenadas armas degradadas. La CAQ no pudo llegar en mejor momento, destruir arsenales químicos viejos y

obtener de esta manera reconocimiento internacional de ser una nación que busca la paz y la seguridad.

Por otro lado el proceso de destrucción de armas químicas no es sencillo como lo era, ya que como cualquier proceso químico, existen efluentes y residuos que se generan al llevar a cabo esta tarea. Por lo que se debe de contar con una planeación estratégica que incluya la disposición de los residuos generados en cada etapa del proceso, desde el embalaje de almacenamiento hasta los cuerpos metálicos de las municiones. El método de destrucción que se seleccione será en gran medida el que permita reducir o ampliar el número de desechos generados, así como considerar cuales equipos y materiales puedan estar expuestos a una contaminación con agentes químicos.

México al ser país no poseedor de dicho armamento no se encuentra en la necesidad de elegir un tratamiento de destrucción de armas químicas ni debe enfrentar a una sociedad a la cual debe convencer de que la selección del método de destrucción fue el correcto y que el impacto al ambiente será minimizado. Pero sí se encuentra en la posición de acatar ciertos artículos de la Convención como es el implementar medidas legales para cumplir con ésta, el proporcionar información completa sobre las sustancias químicas introducidas y exportadas por la industria química en el país, medidas penales respecto a la producción, almacenamiento y uso de las armas químicas, entre otros.

México ha cumplido parcialmente los puntos a los que se encuentra comprometido, ya que hasta hace algunos años no había rendido cuentas o proporcionado ninguna información a la OPAQ sobre las sustancias químicas que se utilizan en la industria químicas del país. Respecto a las medidas legislativas que se han establecido para penar y controlar la producción, almacenamiento, proliferación, uso y venta de armas químicas en el país algunas ya se han establecido en la Constitución, en la Ley de Seguridad Nacional o en alguna Ley Federal. Sin embargo las penas y sanciones que se busca establecer apenas se encuentran en proyectos de ley o como simples recomendaciones para

modificación, por lo que en ese ámbito aún falta mucho trabajo por hacer. La Ley Federal para el Control de Sustancias Químicas Susceptibles de Desvío para la Fabricación de Armas Químicas que fue aprobada en junio del año pasado.

Respecto a la redacción en algunas Leyes Federales se ha observado incongruencias esto es por no utilizar la definición correcta de ciertos términos como “sustancias químicas” - expresión que puede ser empleada para hablar de toda la materia, por lo que no brinda una definición explícita del producto al que se refiere; o también “armas convencionales de destrucción masiva” – el término armas convencionales es el opuesto a lo que se conoce como armas de destrucción masiva, ya que las primeras usan como principio de funcionamiento explosivos, energía cinética o algún compuesto incendiario y las últimas alguna tecnología biológica, química o nuclear. Lo anterior no sólo invita que las autoridades responsables de la redacción y aprobación de las normas en el país contacten a personas con los conocimientos en la materia que las orienten, sino que hagan lectura de lo que escriben y observen los huecos, contradicciones e incongruencias que invitan a los ciudadanos a abusar y finalmente a infringir la ley.

México cuenta con la normatividad adecuada en cuanto a impacto ambiental de residuos peligrosos y la disposición de los mismos en caso de tener que llevar a cabo la destrucción de armas químicas, pero considero que sería un desastre si se tuviera que llevar a cabo este proceso. Se darían casos de corrupción, fugas de corrientes al no contar con el material adecuado por una mala licitación, entre muchos otros. En cuestiones de elección de método de destrucción, niveles de exposición para la seguridad de los trabajadores en dichas instalaciones y niveles de exposición para la población que se encuentra a los alrededores, tendría que recurrir a recomendaciones propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) o algún Estado Parte que haya estado en esa posición, de manera que pudieran asesorar en la materia a las autoridades pertinentes. Ciertamente al leer y revisar muchas de las normas ambientales del país se puede ver la referencia o influencia de normas que existen en Estados Unidos.

El conocer las ventajas y desventajas de los métodos de destrucción existentes, los sistemas de medición de niveles de concentración muy bajos para la detección de agentes químicos y los niveles de exposición permitidos cada vez más bajos, posibilitan la elección de la tecnología de destrucción de armas químicas que se adecue más a las necesidades de dicha comunidad bajo ciertas circunstancias. De esta manera, en un mundo donde el poder y la corrupción no existe, se promueve la reducción de la generación de residuos nocivos al ambiente y al ser humano, la minimización del riesgo en la operación de las plantas de destrucción e involucra al país en la garantía de la seguridad internacional.

Bibliografía

- [1] González Mondragón, Brisa Julieta. *Establecimiento en el código penal federal de los tipos de penales para prevenir y sancionar las conductas relacionadas con el manejo de armas químicas, en el cumplimiento a la convención internacional en la materia*. Tesis de licenciatura, para obtener el título de licenciado en derecho, Facultad de Derecho - Seminario de Derecho Penal, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, México, D.F., Marzo 2008.
- [5] Noyes, Robert. *Chemical Weapons Destruction and Explosive Waste/Unexploded Ordnance Remediation*. Noyes Publications, Westwood, New Jersey, EUA, 1996.
- [6] Rodríguez Fernández, Claudia Leonor. *Modo de acción de compuestos neurotóxicos y vesicantes empleados como agentes de guerra químicas*. Tesis de licenciatura, para obtener el título de química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, México, D.F., 2008.
- [7] Comisión de Armas de Destrucción Masiva. *Las Armas del Terror: Librando al mundo de las armas nucleares, biológicas y químicas*. UNESCO Extea y Asociación para las Naciones Unidas en España, 2006.
- [8] Green Cross. *Legacy of wars and conflicts: Chemical weapons destruction*, 2003.
- [10] Committee on Review of Army Planning for the Disposal of M55 Rockets at Anniston chemical Agent Disposal Facility, National Research Council. *Assessment of Processing Gelled GB M55 Rockets at Anniston*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2003.
- [11] Committee to Assess Designs for Pueblo and Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plants, National Research Council. *Interim Design Assessment for the Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plant*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2005.
- [12] Committee on Review and Evaluation of the Army Chemical Stockpile Disposal Program, National Research Council. *Effects of Degraded Agent and Munitions Anomalies on Chemical Stockpile Disposal Operations*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2004.
- [14] Committee on Review and Evaluation of the Army Chemical Stockpile Disposal Program, National Research Council, Board on Army Science and Technology. *A Modified Baseline Incineration Process for Mustard Projectiles at Pueblo Chemical Depot*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2001.

- [15] Committee on Review and Evaluation of International Technologies for the Destruction of Non-Stockpile Chemical Materiel, National Research Council. *Review of International Technologies for Destruction of Recoveries Chemical Warfare Materiel*. National Academies Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2006.
- [16] Committee on Review and Assessment of the Army Non-Stockpile Chemical Material Demilitarization Program: Pine Bluff, National Research Council. *Assessment of the Army Plan for the Pine Bluff Non-Stockpile Facility*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2004.
- [17] Committee to Review Secondary Waste Disposal and Regulatory Requirements for the Assembled Chemical Weapons Alternative Program, National Research Council. *Review of Secondary Waste Disposal Planning for the Blue Grass and Pueblo Chemical Agent Destruction Pilot Plants*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2008.
- [18] Committee on Review and Assessment of the Army Non-Stockpile Chemical Materiel Demilitarization Program: Workplace Monitoring, National Research Council. *Impact of Revised Airborne Exposure Limits on Non-Stockpile Chemical Materiel Program Activities*. National Academies Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2005.
- [19] Committee on Monitoring Chemical Agent Disposal Facilities, National Research Council. *Monitoring at Chemical Agent Disposal Facilities*. National Academies Press. National Academy Press, Washington, D.C., EUA, 2005.
- [20] Committee on Continuing Operability of Chemical Agent Disposal Facilities and Equipment, National Research Council. *Assessment of the Continuing Operability of Chemical Agent Disposal Facilities and Equipment*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2007.
- [24] Committee to Examine the Disposal of Activated Carbon from the Heating and Air Conditioning Ventilation Systems at Chemical Agent Disposal Facilities; National Research Council. *The Disposal of Activated Carbon from Chemical Agent Disposal Facilities*. The National Academies. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2009.
- [25] Committee on Disposal of Legacy Nerve Agent GA and Lewisite Stocks at Desert Chemical Depot; National Research Council. *Disposal of Legacy Nerve Agent GA and Lewisite stocks at Desert Chemical Depot Letter Report*. The National Academies, National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2009.
- [26] Committee to Review Secondary Waste Disposal and Regulatory Requirements for the Assembled Chemical Weapons Alternative Program; National

Research Council. *Review of Secondary Waste Disposal Planning for the Blue Grass and Pueblo Chemical Agent Destruction Pilot Plants*. The National Academies. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2008.

- [27] Montes de Oca Santillán, Elsa Liliana .. *La implementación de la convención de armas químicas a nivel internacional: Análisis de las acciones realizadas por México para su cumplimiento (1997-2004)*. Tesis de licenciatura, para obtener el título de Licenciado en Relaciones Internacionales, Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, México, D.F., Mayo de 2008.
- [32] Procuraduría Federal de Protección al Ambiente - PROFEPA. *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Diario Oficial de la Federación, Octubre de 2003.
- [36] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. *Norma oficial mexicana NOM-043-SEMARNAT-1993 que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas*. Diario Oficial de la Federación, Abril de 2003.
- [37] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. *Norma oficial mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994 contaminación atmosférica -fuentes fijas- para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos, gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión*. Diario Oficial de la Federación, Abril de 2003.
- [38] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. *Norma oficial mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, protección ambiental- incineración de residuos especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes*. Diario Oficial de la Federación, Octubre de 2004.
- [39] Ruiz Loyola, Benjamín. *Legislación Nacional*. Revisión de Documentos.
- [41] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión - Secretaría General. *Ley Federal para el Control de Sustancias Químicas Susceptibles de Desvío para la Fabricación de Armas Químicas*. Diario Oficial de la Federación, Junio de 2009.

Referencias electrónicas

- [2] Centro de Información Naciones Unidas-Cuba, México y República Dominicana. *Armas químicas*, Marzo 2007.
<http://www.cinu.org.mx/temas/desarme/quimi.htm>
- [3] Organización para la Prohibición de las Armas Químicas (OPAQ)-Datos y Cifras. *Marcha de la destrucción de las armas químicas*. Electrónico, Abril 2010.
<http://www.opcw.org/sp/novedades-y-publicaciones/publicaciones/datos-y-cifras/#>
- [4] Estados Parte de la Convención. *Convención sobre la prohibición del desarrollo, la producción, el almacenamiento y el empleo de armas químicas y sobre su destrucción*, 1993.
<http://www.opcw.org/sp/convencion-sobre-las-armas-quimicas/texto-completo/>
- [13] General Atomics. Cryofracture. Página electrónica, Mayo 2010.
<http://www.ga.com/atg/APS/cryofracture/index.php>
- [21] Stock, Thomas. *Sea- Dumped Chemical Weapons Under the CWC - More questions than answers? Plugwash Meeting no. 324, Noordwijk, The Netherlands*, (1):7, March 2007.
<http://www.pugwash.org/reports/cbw/52nd-workshop-2007/9-Stock.pdf>
- [22] Fedorov. *The Soviet Legacy. CBR Ne Convergence*, 09:35–37, 2009.
http://www.cbrneworld.com/pdf/09_summer_The_Soviet_legacy.pdf
- [23] Smith, Gar. *La OTAN se vuelve inútil - Posguerra Mundial*. Revista del Sur - Third World Network, (73), Noviembre 1997.
http://www.redtercermundo.org.uy/revista_del_sur/texto_completo.php?id=1111
- [28] Databases Status of Treaties. *Convention on the Prohibition of the Development, Production, Stockpiling and use of Chemical Weapons and on their Destruction*. Electrónico, Consulta Junio de 2010.
http://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVI-3&chapter=26&lang=en#top
- [29] Secretaría de Relaciones Exteriores - SRE. *Composición de la Autoridad Nacional*. Electrónico, Actualización Marzo de 2007, Consulta Junio 2010.
<http://www.sre.gob.mx/anopaq/autnalmex.htm>
- [30] Secretaría de Relaciones Exteriores – SER - Comunicado 042. *México presidirá el Consejo Ejecutivo de la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas (OPAQ)*. Electrónico, Actualización Febrero 19 de 2009. Consulta Junio de 2010.

http://www.sre.gob.mx/csocal/contenido/comunicados/2009/feb/cp_042.html

- [31] Secretaría de Relaciones Exteriores – SER-. *México y la Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción, el Almacenamiento y el Empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción (CAQ)*. Electrónico, Consulta Junio de 2010.
<http://www.sre.gob.mx/anopaq/mexicoylacaq.htm>
- [33] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. *Normas oficiales mexicanas vigentes*. Electrónico, Consulta Junio de 2010.
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>
- [34] Secretaría de Comunicaciones y Transportes- SCT. *Leyes y normas*. Electrónico, Consulta Junio de 2010.
<http://www.sct.gob.mx/index.php?ie=ISO-8859-1&oe=ISO-8859-1&id=139&cx=013445427454834400542%3A3v-k7110yna&cof=FORID%3A11&q=leys+y+normas&sa=ir&siteurl=www.sct.gob.mx%2Fcoordinacion-de-la-sociedad-de-la-informacion-y-el-conocimiento%2F#1238>
- [35] U.S. Environmental Protection Agency. *National Environmental Policy Act (NEPA)*, Consulta 4 de Mayo 2010. <http://www.epa.gov/compliance/nepa/>
- [40] Instituto de la Organización de las Naciones Unidas para la Investigación del Desarme. *Armas Convencionales*. Electrónico, Consulta Junio de 2010.
<http://www.unidir.org/pdf/articles/pdf-art2336.pdf>

Anexo A. Propiedades fisicoquímicas de agentes químicos

Agente	Mostaza		Lewisita	Tabún	Sarín	Somán	VX
Código	HD	HT	L-1	GA	GB	GD	VX
Fórmula	C ₄ H ₈ Cl ₂ S		C ₄ H ₈ Cl ₂ S	C ₅ H ₁₁ N ₂ O ₂ P	C ₄ H ₁₀ FO ₂ P	C ₇ H ₁₆ FO ₂ P	C ₁₁ H ₂₆ NO ₂ PS
Estado a condiciones normales	líquido	líquido	líquido	vapor	vapor	líquido	líquido/vapor
Temperatura de fusión [°C]	14.45	1.3	-18	-50	-56	-43	-50
Temperatura de ebullición[°C]	218	no es constante al ser mezcla	190	247.5	150	198	292
Descomposición térmica [°C]	180	165-180		150 (2.5 hrs)	150 (2.5 hrs)	130 (4 hrs) ¹	200 (1.5 hrs)
Presión de vapor [mmHg] a 25°C	0.106	0.077	34.6	0.057	2.48	0.401	0.000878
Densidad [g/cm³] a 25°C	1.2685 a 25°C	1.263 a 20°C	1.89 a 25°C	1.0887 a 25°C	1.0887 a 25°C	1.0222 a 25°C	1.0083
Volatilidad [mg/m³] a 25°C	0.0906	0.0783	386	497	18,700	3,930	12.6

¹ Como somán inestable.

Referencias

Committee to Assess Designs for Pueblo and Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plants, National Research Council. *Interim Design Assessment for the Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plant*. National Academy Press. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2005. pág. 9

Committee on Disposal of Legacy Nerve Agent GA and Lewisite Stocks at Desert Chemical Depot; National Research Council. *Disposal of Legacy Nerve Agent GA and Lewisite stocks at Desert Chemical Depot Letter Report*. The National Academies, National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2009. pág. 24

Committee to Review and Assess the Proposals for Design and Operation of Designated Chemical Agent Destruction Pilot Plants. *Review Assessment of the Proposals for Design and Operation of Designated Chemical Agent Destruction Pilot Plants (DCAPP-P-Pueblo: Letter Report)*. The National Academies, National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2006. pág. 3

Material Safety Data Sheet. *Lethal Nerve Agent (GD)* Actualizado en Diciembre de 2004, Consultado Junio de 2010.

http://www.noblis.org/MissionAreas/nsi/BackgroundonChemicalWarfare/MaterialSafetyDataSheets_MSDS_forChemicalAgents/Documents/gdMSDSDec2004.pdf

Anexo B. Algunos artículos de la *Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, la Producción, el Almacenamiento y el Empleo de las Armas Químicas y sobre su Destrucción.* (Organización para la Prohibición de las Armas Químicas)

Artículo I. Obligaciones generales

1. Cada Estado Parte en la presente Convención se compromete, cualesquiera que sean las circunstancias, a:

- a) No desarrollar, producir, adquirir de otro modo, almacenar o conservar armas químicas ni a transferir esas armas a nadie, directa o indirectamente;
- b) No emplear armas químicas;
- c) No iniciar preparativos militares para el empleo de armas químicas;
- d) No ayudar, alentar o inducir de cualquier manera a nadie a que realice cualquier actividad prohibida a los Estados Partes por la presente Convención.

2. Cada Estado Parte se compromete a destruir las armas químicas de que tenga propiedad o posesión o que se encuentren en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, de conformidad con las disposiciones de la presente Convención.

3. Cada Estado Parte se compromete a destruir todas las armas químicas que haya abandonado en el territorio de otro Estado Parte, de conformidad con las disposiciones de la presente Convención.

4. Cada Estado Parte se compromete a destruir toda instalación de producción de armas químicas de que tenga propiedad o posesión o que se encuentre en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, de conformidad con las disposiciones de la presente Convención.

5. Cada Estado Parte se compromete a no emplear agentes de represión de disturbios como método de guerra.

Artículo III. Declaraciones

1. Cada Estado Parte presentará a la Organización, 30 días después, a más tardar, de la entrada en vigor para él de la presente Convención, las declaraciones siguientes, en las que:

- a) Con respecto a las armas químicas:
 - i) Declarará si tiene la propiedad o posesión de cualquier arma química o si se encuentra cualquier arma química en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control;
 - ii) Especificará el lugar exacto, cantidad total e inventario detallado de las armas químicas de que tenga propiedad o posesión o que se encuentren en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, de conformidad con los párrafos 1 a 3 de la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación, salvo en lo que atañe a las armas químicas mencionadas en el inciso iii);
 - iii) Dará cuenta de cualquier arma química en su territorio de la que tenga

propiedad y posesión Otro Estado y se encuentre en cualquier lugar bajo la jurisdicción o control de otro Estado, de conformidad con el párrafo 4 de la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación;

iv) Declarará si ha transferido o recibido, directa o indirectamente, cualquier arma química desde el 10 de enero de 1946 y especificará la transferencia o recepción de esas armas, de conformidad con el párrafo 5 de la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación;

v) Facilitará su plan general para la destrucción de las armas químicas de que tenga propiedad o posesión o que se encuentren en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, de conformidad con el párrafo 6 de la sección A de la Parte IV del Anexo sobre verificación;

b) Con respecto a las antiguas armas químicas y a las armas químicas abandonadas:

i) Declarará si hay en su territorio antiguas armas químicas y proporcionará toda la información disponible, de conformidad con el párrafo 3 de la sección B de la parte IV del Anexo sobre verificación;

ii) Declarará si hay armas químicas abandonadas en su territorio y proporcionará toda la información disponible, de conformidad con el párrafo 8 de la sección B de la parte IV del Anexo sobre verificación;

iii) Declarará si ha abandonado armas químicas en el territorio de otros Estados y proporcionará toda la información disponible, de conformidad con el párrafo 10 de la sección B de la parte IV del Anexo sobre verificación;

c) Con respecto a las instalaciones de producción de armas químicas:

i) Declarará si tiene o ha tenido la propiedad o posesión de cualquier instalación de producción de armas químicas o si se encuentra o se ha encontrado en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control una instalación de esa índole en cualquier momento desde el 10 de enero de 1946;

ii) Especificará cualquier instalación de producción de armas químicas de que tenga o haya tenido propiedad o posesión o que se encuentre o se haya encontrado en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control en cualquier momento desde el 1° de enero de 1946, de conformidad con el párrafo 1 de la parte V del Anexo sobre verificación, salvo en lo que atañe a las instalaciones mencionadas en el inciso iii);

iii) Dará cuenta de cualquier instalación de producción de armas químicas en su territorio de que otro Estado tenga o haya tenido propiedad y posesión y que se encuentre o se haya encontrado en cualquier lugar bajo la jurisdicción o control de otro Estado en cualquier momento desde el 1° de enero de 1946, de conformidad con el párrafo 2 de la parte V del Anexo sobre verificación;

iv) Declarará si ha transferido o recibido, directa o indirectamente, cualquier equipo para la producción de armas químicas desde el 1° de enero de 1946 y especificará la transferencia o recepción de ese equipo, de conformidad con los párrafos 3 a 5 de la parte V del Anexo sobre verificación;

v) Facilitará su plan general para la destrucción de cualquier instalación de producción de armas químicas de que tenga propiedad o posesión o que se encuentre en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, de conformidad con el párrafo 6 de la parte V del Anexo sobre verificación;

vi) Especificará las medidas que han de adoptarse para clausurar cualquier instalación de producción de armas químicas de que tenga propiedad o

posesión o que se encuentre en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, de conformidad con el apartado i) del párrafo 1 de la parte V del Anexo sobre verificación;

vii) Facilitará su plan general para toda conversión transitoria de cualquier instalación de armas químicas de que tenga propiedad o posesión o que se encuentre en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control en una instalación de destrucción de armas químicas, de conformidad con el párrafo 7 de la parte V del Anexo sobre verificación;

d) Con respecto a las demás instalaciones: Especificará el lugar exacto, naturaleza y ámbito general de actividades de cualquier instalación o establecimiento de que tenga propiedad o posesión o que se encuentre en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control y que haya sido diseñado, construido o utilizado principalmente, en cualquier momento desde el 1° de enero de 1946, para el desarrollo de armas químicas. En esa declaración se incluirán, entre otras cosas, los laboratorios y polígonos de ensayo y evaluación;

e) Con respecto a los agentes de represión de disturbios: Especificará el nombre químico, fórmula estructural y número de registro del Chemical Abstracts Service, si lo tuviere asignado, de cada una de las sustancias químicas que mantenga para fines de represión de disturbios. Esta declaración será actualizada 30 días después, a más tardar, de que se produzca cualquier cambio.

2. Las disposiciones del presente artículo y las disposiciones pertinentes de la parte IV del Anexo sobre verificación no se aplicarán, a discreción de un Estado Parte, a las armas químicas enterradas en su territorio antes del 1° de enero de 1977 y que permanezcan enterradas o que hayan sido vertidas al mar antes del 1° de enero de 1985.

Artículo IV. Armas Químicas

1. Las disposiciones del presente artículo y los procedimientos detallados para su ejecución se aplicarán a todas y cada una de las armas químicas de que tenga propiedad o posesión un Estado Parte o que se encuentren en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, excepto las antiguas armas químicas y las armas químicas abandonadas a las que se aplica la sección B de la Parte IV del Anexo sobre verificación.

2. En el Anexo sobre verificación se enuncian procedimientos detallados para la ejecución del presente artículo.

3. Todos los lugares en los que se almacenen o destruyan las armas químicas especificadas en el párrafo 1 serán objeto de verificación sistemática mediante inspección *in situ* y vigilancia con instrumentos *in situ*, de conformidad con la sección A de la Parte IV del Anexo sobre verificación.

4. Cada Estado Parte, inmediatamente después de que haya presentado la declaración prevista en el apartado a) del párrafo 1 del artículo III, facilitará el acceso a las armas químicas especificadas en el párrafo 1 a los efectos de la verificación sistemática de la declaración mediante inspección *in situ*. A partir de ese momento, ningún Estado Parte retirará ninguna de esas armas, excepto para su transporte a una instalación de destrucción de armas químicas. Cada Estado Parte facilitará el acceso a esas armas químicas a los efectos de una verificación sistemática *in situ*.

5. Cada Estado Parte facilitará el acceso a toda instalación de destrucción de armas químicas y a sus zonas de almacenamiento de que tenga propiedad o posesión o que se encuentren en cualquier lugar bajo su jurisdicción o control, a los efectos de una verificación sistemática mediante inspección *in situ* y vigilancia con instrumentos *in situ*.

6. Cada Estado Parte destruirá todas las armas químicas especificadas en el párrafo 1 de conformidad con el Anexo sobre verificación y ateniéndose al ritmo y secuencia de destrucción convenidos (denominados en lo sucesivo “orden de destrucción”). Esa destrucción comenzará dos años después, a más tardar, de la entrada en vigor de la presente Convención para el Estado Parte, y terminará 10 años después, a más tardar, de la entrada en vigor de la presente Convención. Nada impedirá que un Estado Parte destruya esas armas químicas a un ritmo más rápido.

7. Cada Estado Parte:

- a) Presentará planes detallados para la destrucción de las armas químicas especificadas en el párrafo 1, 60 días antes, a más tardar, del comienzo de cada período anual de destrucción, de conformidad con el párrafo 29 de la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación; los planes detallados abarcarán todas las existencias que hayan de destruirse en el siguiente período anual de destrucción;
- b) Presentará anualmente declaraciones sobre la ejecución de sus planes para la destrucción de las armas químicas especificadas en el párrafo 1, 60 días después, a más tardar, del final de cada período anual de destrucción, y
- c) Certificará, 30 días después, a más tardar, de la conclusión del proceso de destrucción, que se han destruido todas las armas químicas especificadas en el párrafo 1.

8. Si un Estado ratifica la presente Convención o se adhiere a ella después de transcurrido el período de 10 años establecido para la destrucción en el párrafo 6, destruirá las armas químicas especificadas en el párrafo 1 lo antes posible. El Consejo Ejecutivo determinará el orden de destrucción y el procedimiento de verificación estricta para ese Estado Parte.

9. Toda arma química que descubra un Estado Parte tras la declaración inicial de las armas químicas será comunicada, desactivada y destruida de conformidad con la Sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación.

10. Cada Estado Parte, en sus operaciones de transporte, toma de muestras, almacenamiento y destrucción de armas químicas, asignará la más alta prioridad a garantizar la seguridad de las personas y la protección del medio ambiente. Cada Estado Parte realizará las operaciones de transporte, toma de muestras, almacenamiento y destrucción de armas químicas de conformidad con sus normas nacionales de seguridad y emisiones.

11. Todo Estado Parte en cuyo territorio haya armas químicas de que tenga propiedad o posesión otro Estado o que se encuentren en cualquier lugar bajo la jurisdicción o control de otro Estado se esforzará al máximo para que se retiren esas armas de su territorio un año después, a más tardar, de la entrada en vigor para él de la presente Convención. Si esas armas no son retiradas en el plazo de un año, el Estado Parte podrá pedir a la Organización y a los demás Estados Partes que le presten asistencia en la destrucción de esas armas.

12. Cada Estado Parte se compromete a cooperar con los demás Estados Partes que soliciten información o asistencia de manera bilateral o por conducto de la Secretaría Técnica en relación con los métodos y tecnologías para la destrucción eficiente de las armas químicas en condiciones de seguridad.

13. Al realizar las actividades de verificación con arreglo al presente artículo y a la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación, la Organización estudiará medidas para evitar una duplicación innecesaria de los acuerdos bilaterales o multilaterales sobre la verificación del almacenamiento de armas químicas y su destrucción concertados entre los Estados Partes.

A tal efecto, el Consejo Ejecutivo decidirá que se limite la verificación a las medidas complementarias de las adoptadas en virtud de esos acuerdos bilaterales o multilaterales, si considera que:

- a) Las disposiciones de esos acuerdos relativas a la verificación son compatibles con las disposiciones relativas a la verificación contenidas en el presente artículo y la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación;
- b) La ejecución de tales acuerdos supone una garantía suficiente de cumplimiento de las disposiciones pertinentes de la presente Convención; y
- c) Las partes en los acuerdos bilaterales o multilaterales mantienen a la Organización plenamente informada de sus actividades de verificación.

14. Si el Consejo Ejecutivo adopta una decisión con arreglo a lo dispuesto en el párrafo 13, la Organización tendrá el derecho de vigilar la ejecución del acuerdo bilateral o multilateral.

15. Nada de lo dispuesto en los párrafos 13 y 14 afectará a la obligación de un Estado Parte de presentar declaraciones de conformidad con el artículo III, el presente artículo y la sección A de la parte IV del Anexo sobre verificación.

16. Cada Estado Parte sufragará los costos de la destrucción de las armas químicas que esté obligado a destruir. También sufragará los costos de la verificación del almacenamiento y la destrucción de esas armas químicas, a menos que el Consejo Ejecutivo decida otra cosa. Si el Consejo Ejecutivo decide limitar las medidas de verificación de la Organización con arreglo al párrafo 13, los costos de la verificación y vigilancia complementarias que realice la Organización serán satisfechos de conformidad con la escala de cuotas de las Naciones Unidas, según lo previsto en el párrafo 7 del artículo VIII.

17. Las disposiciones del presente artículo y las disposiciones pertinentes de la parte IV del Anexo sobre verificación no se aplicarán, a discreción de un Estado Parte, a las armas químicas enterradas en su territorio antes del 1° de enero de 1977 y que permanezcan enterradas o que hayan sido vertidas al mar antes del 1° de enero de 1985.

Artículo VII. Medidas Nacionales de Aplicación

Obligaciones generales

1. Cada Estado Parte adoptará, de conformidad con sus procedimientos constitucionales, las medidas necesarias para cumplir las obligaciones contraídas en virtud de la presente Convención. En particular:

- a) Prohibirá a las personas físicas y jurídicas que se encuentren en cualquier lugar de su territorio o en cualquier otro lugar bajo su jurisdicción, reconocido por el derecho

internacional, que realicen cualquier actividad prohibida a un Estado Parte por la presente Convención, y promulgará también leyes penales con respecto a esas actividades;

b) No permitirá que se realice en cualquier lugar bajo su control ninguna actividad prohibida a un Estado Parte por la presente Convención, y

c) Hará extensivas las leyes penales promulgadas con arreglo al apartado a) a cualquier actividad prohibida a un Estado Parte por la presente Convención que realicen en cualquier lugar personas naturales que posean su nacionalidad, de conformidad con el derecho internacional.

2. Cada Estado Parte colaborará con los demás Estados Partes y prestará la modalidad adecuada de asistencia jurídica para facilitar el cumplimiento de las obligaciones derivadas del párrafo 1.

3. Cada Estado Parte, en el cumplimiento de las obligaciones que haya contraído en virtud de la presente Convención, asignará la más alta prioridad a garantizar la seguridad de las personas y la protección del medio ambiente y colaborará, según corresponda, con los demás Estados Partes a este respecto.

Relaciones entre los Estados Partes y la Organización

4. Con el fin de cumplir las obligaciones contraídas en virtud de la presente Convención, cada Estado Parte designará o establecerá una Autoridad Nacional, que será el centro nacional de coordinación encargado de mantener un enlace eficaz con la Organización y con los demás Estados Partes. Cada Estado Parte notificará a la Organización su Autoridad Nacional en el momento de la entrada en vigor para él de la presente Convención.

5. Cada Estado Parte informará a la Organización de las medidas legislativas y administrativas que haya adoptado para aplicar la presente Convención.

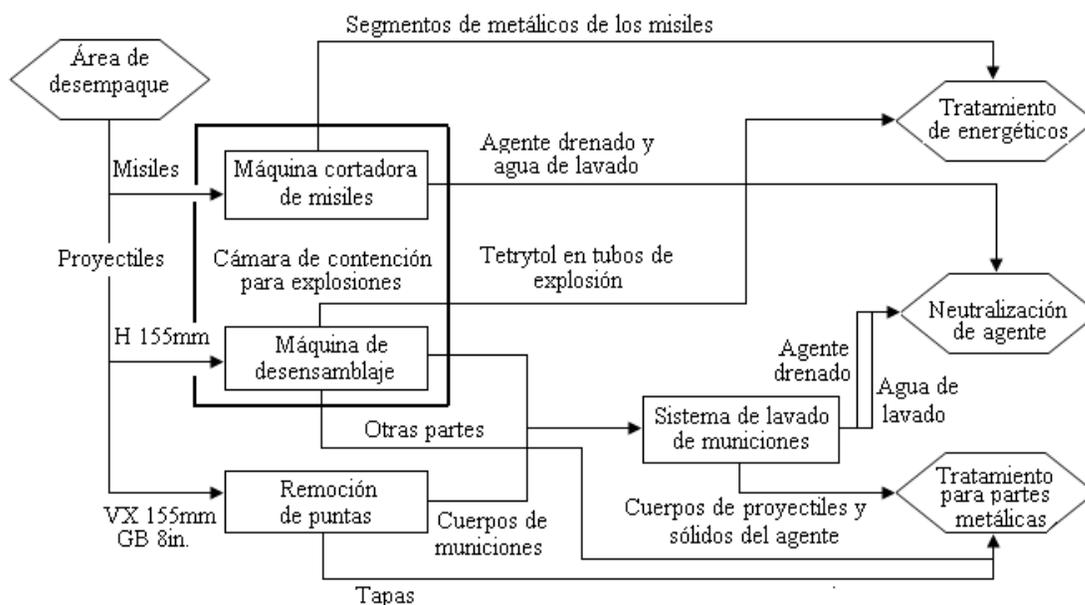
6. Cada Estado Parte considerará confidencial y tratará de manera especial la información y datos que reciba confidencialmente de la Organización respecto de la aplicación de la presente Convención. Tratará esa información y datos en relación exclusivamente con los derechos y obligaciones derivados de la presente Convención y de conformidad con las disposiciones enunciadas en el Anexo sobre confidencialidad.

7. Cada Estado Parte se compromete a colaborar con la Organización en el ejercicio de todas sus funciones y, en particular, a prestar asistencia a la Secretaría Técnica.

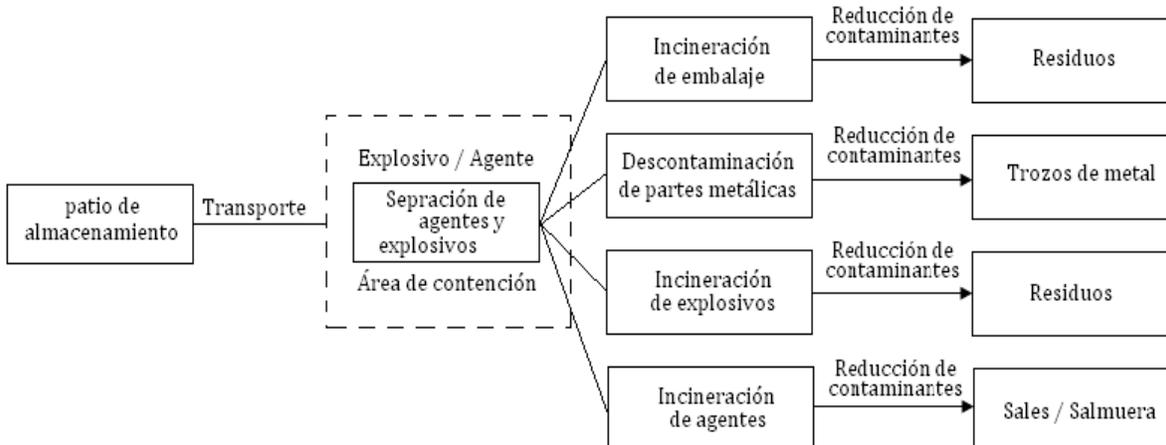
Tomado de la página del Comité Internacional de la Cruz Roja – Bases de datos.
<http://www.icrc.org/web/spa/sitespa0.nsf/html/5TDMHZ>

Anexo C. Procesos de destrucción de armas químicas y disposición final de residuos

Esquema A. Proceso de desensamblaje de proyectiles y misiles. Committee to Assess Designs for Pueblo and Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plants; National Research Council. *Interim Design Assessment for the Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plant.* The National Academies. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2005. pág. 9



Esquema B. Proceso de destrucción por incineración. Noyes, Robert. *Chemical Weapons Destruction and Explosive Waste/Unexploded Ordnance Remediation.* Noyes Publications, Westwood, New Jersey, EUA, 1996.



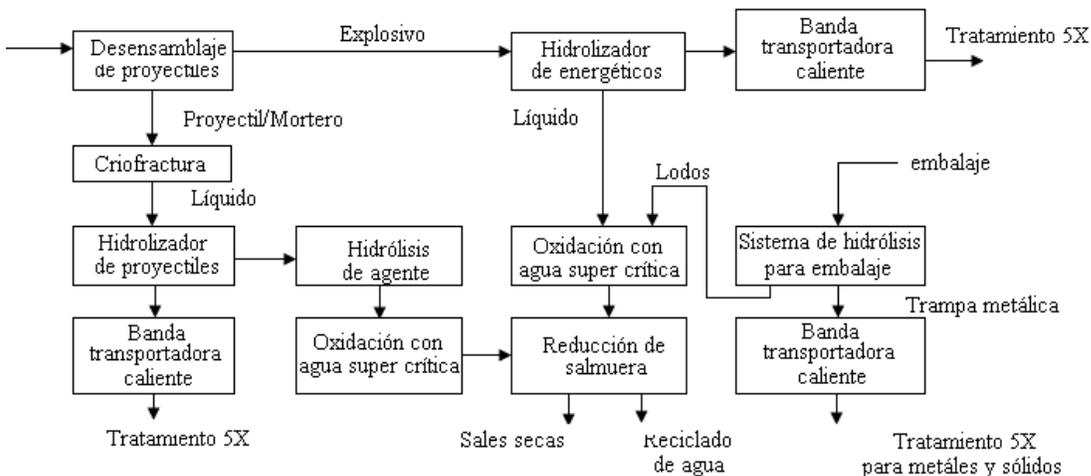
Esquema C. Proceso de destrucción por neutralización y otras técnicas complementarias

Committee to Assess Designs for Pueblo and Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plants; National Research Council. *Interim Design Assessment for the Blue Grass Chemical Agent Destruction Pilot Plant*. The National Academies. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2005. pág. 24



Esquema E. Proceso de destrucción de armas químicas por neutralización, criofractura y otras técnicas complementarias.

Committee on Review and Evaluation of Alternative Technologies for the Demilitarization of Assembles Chemical Weapons: Phase II; Board on Army Science and Technology; National Research Council. *Analysis of Engineering Design Studies for Demilitarization of Assembles Chemical Weapons at Pueblo Chemical Depot*. The National Academies. National Academies Press, Washington, D.C., EUA, 2001. pág. 29



Anexo D. Caracterización del ejército de Estados Unidos para la descontaminación para materiales expuestos.

- **No contaminado con agente 0 (cero).** Indica que cierto artículo, a pesar de encontrarse en un lugar donde se encuentra presente el agente en líquido o vapor, no ha sido contaminado.
- **Nivel de descontaminación 1X (X).** Indica que el artículo expuesto al agente ha sido parcialmente descontaminado. Se requiere de otro tratamiento para que el material puede ser transportado o movido sin necesidad de equipo para protección personal.
- **Nivel de descontaminación 3X (XXX).** Indica que la superficie del material ha sido descontaminado por procedimientos en el sitio, se ha metido en una bolsa para que el aire a su alrededor puede ser analizado y comprobar que las concentraciones no se encuentran por arriba de:

0.0001 mg/m³ para agentes GA/GB

0.00001 mg/m³ para agente VX

0.003 mg/m³ para H o lewisita

0.00003 mg/m³ para agente GD

- **Nivel de descontaminación 5X (XXXXX).** Indica que el artículo ha sido totalmente descontaminado del agente y que puede ser liberado para uso general o vendido al público en general de acuerdo a la ley federal. Esto se puede dar cuando el artículo ha sido tratado con procesos que se sabe que degradan completamente al agente y que al ser analizados muestran que la concentración de agente presente es mínima. Ésta caracterización debe estar certificada por el comandante en jefe o por un representante del Departamento de Adquisiciones de Aviones y Misiles del Ejército de Estados Unidos (DA PAM 385).

Anexo E. Listado de acrónimos

AC	Cianuro de hidrógeno
ACAMS	Sistema de monitoreo continuo y automático del aire. (Automatic and Continuous Air Monitoring System)
AEGL	Límites guía para la exposición aguda
ANIQ	Asociación Nacional de la Industria Química
CAQ	Convención sobre la Prohibición del Desarrollo, Producción, Almacenamiento y Empleo de Armas Químicas y sobre su Destrucción
CANACINTRA	Cámara Nacional de la Industria de la Transformación
CDC	Detonación controlada en cámara (Chamber Detonation Control)
CG	Fosgeno
CIMS	Espectrometría de masas por ionización química
CK	Cloruro de cianógeno
CL	Cloro
DAAMS	Sistema de monitoreo del aire en el área de Depósito (Deposit Area Air Monitoring System)
DF	Difluoro metilfosfónico
DICDI	Diisopropilcarbodiimida
DIMP	Diisopropilmetilfosfonato
DM	Adamsita
DP	Difosgeno
DOAS	Espectroscopía de absorción óptica diferencia UV
DOT	Departamento de Transporte de Estados Unidos
DRE	Eficiencia de destrucción y remoción
ED	Etildicloroarsina
EDS	Sistema de destrucción explosiva (Explosive Destruction System)
EPA	Agencia de Protección Ambiental EU., (Environmental Protection Agency US.)
GA	Tabún
GB	Sarín

GD	Somán
GF	Ciclosarín
H	Mostaza (20-30% de impurezas)
HD	Mostaza casi pura
HEPA	Filtro de aire de alta eficiencia
HMX	Ciclotetrametilentanitramina
HT	Mezcla (60% de HD y 40% de bis[2(2-cloroetil)etil]éter)
IMPA	Ácido isopropilmetilfosfónico
IMS	Espectrometría de movilidad de iones
L	Lewisita
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LSD	Dietilamida de ácido lisérgico
M	Concentración molar
MACT	Máximo control posible
MINICAMS	Sistema de monitoreo miniatura para agentes químicos (Miniature Chemical Agent Monitoring System)
MPA	Ácido meilfosfónico
MPFA	Ácido metilfosfonofluórico
NC	Nitrocelulosa
NEPA	Ley Nacional de Política Ambiental de Estados Unidos
NG	Nitroglicerina
NMP	N-metilpirrolidinona
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OP/FT-IR	Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier
OPAQ	Organización para la Prohibición de Armas Químicas
PD	Fenildicloroarsina
PGR	Procuraduría General de la República
PS	Cloropicrino
PVC	Policloruro de vinilo
RCRA	Acta de Conservación y Recuperación de Recursos

RD-4	Solución de isobutilato de potasio en isobutanol
RDX	Ciclotrimetilentrinitramina
RRS	Sistema de Respuesta Rápida (Rapid Response System)
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SE	Secretaría de Economía
SEDENA	Secretaría de la Defensa Nacional
SEMAR	Secretaría de Marina
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SERS	Espectroscopía Raman con superficie mejorada
SER	Secretaría de Relaciones Exteriores
SG	Secretaría de Gobernación
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SS	Secretaría de Salud
SSP	Secretaría de Seguridad Pública
STL	Límite de corto periodo
TNT	Trinitrotolueno
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
VSL	Nivel de vapor filtrado
VR	Versión Rusa del Compuesto VX
VX	Compuesto VX
WCL	Límites de control de residuos