



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

Análisis de los accidentes por sustancias químicas
peligrosas en México, sus efectos a la salud y al
ambiente.

Tesis

Para obtener el título de

Biólogo

Presenta:

Rodrigo Omar Bárcenas Palacios

Directora de tesis: Dra. Cecilia Izcapa Treviño

Centro Nacional de Prevención de Desastres

CENAPRED

Asesor interno: Biól. Maricela Arteaga Mejía

Ciudad de México 8 de octubre de 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"
DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.

Comunico a usted que el alumno **BÁRCENAS PALACIOS RODRIGO OMAR**, con número de cuenta **307010742**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **08 de octubre de 2019** a las **09:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE Dra. IDALIA LETICIA FLORES GÓMEZ

VOCAL Dra. CECILIA IZCAPA TREVIÑO*

SECRETARIO Biól. MARICELA ARTEAGA MEJÍA

SUPLENTE Biól. AIDA ZAPATA CRUZ

SUPLENTE Biól. IRENE CASTILLO CHAIRES

Four handwritten signatures are shown, each on a horizontal line. From top to bottom, they correspond to the President, Vocal, Secretary, and Suplente.

El título de la tesis que presenta es: **Análisis de los accidentes por sustancias químicas peligrosas en México, sus efectos a la salud y al ambiente.**

Opción de titulación: Tesis

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad de México, a 05 de septiembre de 2019

DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD

DIRECTOR
ZARAGOZA
DIRECCIÓN

RECIBÍ
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.
Dr. JOSÉ LUIS GÓMEZ MÁRQUEZ
JEFE DE CARRERA

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la Facultad de Estudios superiores mi escuela donde tuve mi formación académica y profesional como futuro Licenciado, a la Universidad Nacional Autónoma de México que desde la preparatoria me brindó una vocación, mediante docentes dedicados y comprometidos más allá de su matrícula y su deber hasta donde las atribuciones de marcaban el título de profesor.

Un agradecimiento especial al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) el cual me brindó la oportunidad el presente tema de tesis, el cual me ha otorgado el honor de servir a mi país, a mi familia y a Dios, con algo que va más allá de un tema para obtener el grado profesional, sino una retribución a la sociedad en la que me he desarrollado a lo largo de la niñez, adolescencia y vida adulta, por la información recabada para la realizar las estadísticas y resultados de esta tesis

A la profesora Maricela Arteaga Mejía que me permitió formarme en mi último año como uno de sus alumnos y quien me instruyó, apoyó en momentos difíciles más allá de su deber académico y formó parte esencial para que concluyera la carrera.

A la Dra. Cecilia Izcapa Treviño, por permitirme desarrollar el tema de tesis en el CENAPRED, conocer y valorar el tema de la protección civil, por mostrar la mejor disposición hacia la investigación y desarrollo de este tema de tesis, así como una orientación guiada y didáctica a través de los temas que me permitieran desarrollar este tema de tesis.

DEDICATORIAS

El siguiente trabajo de tesis quiero dedicárselo a mis padres: María Antonia Palacios Herrera (mi madre) y Tomás Bárcenas Medina (mi padre), quienes nunca han dejado de creer en mí, que a pesar de mi edad nunca han vacilado en tomarme de la mano, que me inculcaron valores sólidos que me han definido y sacado adelante en momentos complicados.

A mis hermanos Claudia Nayelli Bárcenas Palacios y Alan Lezama Huetzoyuca. A mi hermano que siempre ha tenido una plática interesante y amena, cuyo cariño y aprecio siempre ha sido la base de nuestras conversaciones. Mi hermana, la cual también ha cargado con el peso de educarme, cuyo espíritu protector de mujer me ha protegido y defendido.

Mis amigos de la Universidad que me demostraron una amistad que implica obligaciones, los cuáles me apoyaron aun cuando yo no me atrevía a pedirles ayuda, a ustedes Brenda, Cesar, Eduardo, Javier, Karen, Luis, Noé, Sandra, Lourdes, este es el modo que tengo aparte de recordarlos en mi mente y corazón, de recordarlos a lo largo del tiempo y que los lectores conozcan que existe gente grande como ustedes.

A mi familia, primos tíos que cuya definición de familia va más allá de un parentesco, más bien de un compromiso de amor y protección.

Por último a mis Abuelos, que me heredaron lo mejor de dos mundos a mi madre y a mi padre.

ÍNDICE

Resumen	1
Introducción	2
3. Marco teórico	3
3.1. Antecedentes	3
3.2. Prevención de desastres	8
3.3. Fenómenos químico-tecnológicos	9
3.4. Características de peligrosidad de las sustancias químicas	11
3.5. Causas de los accidentes químicos	14
3.6. Afectaciones a la salud	15
3.7. Afectaciones al medio ambiente	18
3.8. Restauración de sitios contaminados	21
3.8.1. Características de los contaminantes en el suelo	22
3.8.2. Agua	26
3.9. Marco jurídico	27
3.10. CENAPRED	29
4. Planteamiento del problema	29
5. Justificación	30
5.1. Preguntas de investigación	31
6. Objetivos	31
7. Método	32
8. Resultados	33
9. Conclusiones	59
10. Perspectivas	61
11. Referencias	62
Anexos	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales vías de exposición del organismo ante una sustancia tóxica.	16
Figura 2. Porcentaje de sustancias peligrosas involucradas en emergencias ambientales.	19
Figura 3. Transporte de contaminantes en el suelo.	23
Figura 4. Accidentes urbanos e industriales por año para el periodo 2005-2009.	34
Figura 5. Porcentaje de accidentes industriales y urbanos: 2005-2009.	34
Figura 6. Concentrado de accidentes, número de muertos y número de heridos en el periodo 2005-2006.	37
Figura 7. Análisis de sustancias que aparecen con mayor frecuencia en accidentes (2005-2009).	40
Figura 8. Sustancias presentes en accidentes industriales y urbanos.	41
Figura 9. Incendios urbanos por lugar de evento.	42
Figura 10. Causas de incendios urbanos periodo 2005-2009.	42
Figura 11. Materiales involucrados en accidentes industriales y urbanos.	43
Figura 12. Accidentes por año durante el transporte terrestre de sustancias por entidad federativa.	44
Figura 13. Tipo de accidentes de acuerdo con su clasificación (acumulado de 5 años).	45
Figura 13.1. Tipo de accidentes de acuerdo con su clasificación por año.	45
Figura 14. Total de accidentes período 2005-2009.	46
Figura 15. Accidentes acontecidos en el periodo 2005-2009 clasificados por tipo de unidad de transporte.	47
Figura 16. Vehículos involucrados en accidentes de acuerdo con su capacidad (L) y porcentaje del total de accidentes.	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Accidentes químicos más relevantes en México en los últimos 30 años.	7
Tabla 2. Accidentes industriales clasificados por evento en un periodo de 5 años.	35
Tabla 3. Accidentes urbanos clasificados por evento en el periodo de 5 años.	35
Tabla 4. Accidentes por año divididos en categorías; número de accidentes, número de muertos y heridos.	36
Tabla 5. Accidentes clasificados de acuerdo con el número de incidentes para cada sustancia involucrada en accidentes industriales.	39
Tabla 6. Causas de los accidentes durante el transporte de sustancias peligrosas (2005-2009).	48
Tabla 7. Sustancias presentes en accidentes durante su transporte terrestre.	50
Tabla 8. Clasificación de las sustancias involucradas de acuerdo con sus características de peligrosidad.	51
Tabla 9. Descripción de accidentes relevantes durante el transporte.	54
Tabla 10. Información de las Sustancias Peligrosas (Datos de seguridad).	55
Tabla 11. Propuesta de remediación de suelos contaminados.	56

Abreviaturas

CENACOM. Centro Nacional de Comunicación y Operación

CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres

BLEVE. Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (Explosión de vapores en expansión de un líquido en ebullición).

SEDUE. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología

PEMEX. Petróleos de México

SEDENA. Secretaría de la Defensa Nacional.

LEGEEPA. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

LGPC. Ley General de Protección Civil.

NFPA. National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra Incendios).

HMIS. Hazardous Material Identification System.

ANR. Atlas Nacional de Riesgos.

SGA o GHS. Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos.

COV. Compuestos orgánicos no halogenados.

COV. Compuestos orgánicos volátiles halogenados.

COSVs. Compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados.

COSVs. Compuestos orgánicos semivolátiles halogenados.

COP. Contaminantes Orgánicos Persistentes.

OMS. Organización Mundial de la Salud.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

PROFEPA. Procuraduría Federal para la Protección al Ambiente.

COATEA. Centro de Orientación para Atención de Emergencias.

1. Resumen

En el presente trabajo se analizaron diversas bases de datos y se procesaron para obtener información estadística cuya fuente es el Centro Nacional de Comunicación y Operación (CENACOM) el cual reportó al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) los accidentes de origen industrial-urbano y de transporte que ocurrieron en la república mexicana en los años 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009. Dicha información denominada "reportes de caso" contiene información registrada por el CENACOM con ayuda de diferentes instituciones ya sean federales o locales, como protección civil, Heroico Cuerpo de Bomberos y personal de protección al ambiente, que estuvieron presentes después del evento.

Estos reportes de accidentes contienen información referente a lo ocurrido en cada uno, como la fecha, las posibles causas, las sustancias involucradas y los eventos que se presentaron (derrame, incendio, explosión, entre otros) así como el número de muertos y heridos. Para propósito de este trabajo se consideraron todos los eventos donde estuvieron involucradas las sustancias peligrosas, así como los eventos con daños directos o indirectos a la salud. Esta información se revisó y ordenó en forma de base de datos de Excel, a partir de la cual se analizó la información que permitió reconocer el tipo de accidentes, sustancias, lugar, causas, muertos, lesionados, estados y municipios, donde se presentaron los accidentes.

Se clasificó la información en accidentes urbanos, industriales y de transporte con el fin de cuantificar el daño a la población y al ambiente a partir de los accidentes de tipo industrial y urbano constituyeron el daño más fuerte en cuestión de pérdida de vidas humanas, siendo los incendios aquellos eventos con mayor frecuencia, mientras que los accidentes por transporte afectaron principalmente a arroyos, canales de riego y suelos de producción agrícola. Principalmente por derrame de combustóleo y gasolinas.

La exposición directa como ingestión, contacto con la piel, inhalación o indirecta como liberación en suelo, agua u atmósfera, puede manifestarse como intoxicación, la cual es una característica de peligrosidad que pueden presentar las sustancias. Dependiendo del grado de exposición se clasifica así como la vía de contacto con la sustancia química peligrosa, pueden tener consecuencias inmediatas y a largo plazo así como síntomas temporales los cuáles pueden terminar con la muerte de la persona que tuviera contacto directo con la sustancia.

El pH, temperatura, humedad del sitio donde ocurrió el accidente son factores esenciales para el desarrollo de los microorganismos encargados de consumir y degradar los contaminantes tanto en agua como en suelo.

En la mayoría de los casos las medidas propuestas para recuperar sitios contaminados por sustancias no requieren gran inversión financiera, ni métodos complicados debido a que la mayoría de las sustancias pueden ser transformadas ya que son principalmente compuestos orgánicos.

2. Introducción

Debido a su naturaleza geográfica México se encuentra situado en una región que lo hace vulnerable ante diversos fenómenos naturales, así como otros riesgos generados por las actividades económicas y el desarrollo industrial del país (García., *et al*, 1995). Los accidentes que involucran sustancias químicas peligrosas tienen gran importancia en diferentes aspectos, ya que cuando ocurren, se ve afectada la población, el ambiente y las propiedades que se ubican dentro del mismo margen sistémico. Los accidentes químicos pueden clasificarse en derrame, fuga, incendio o explosión de acuerdo con el evento que puede presentarse y dependiendo del lugar donde ocurren, los que suceden durante el transporte terrestre y en ductos, pueden dividirse en urbanos e industriales. Las causas que ocasionan dichos accidentes pueden tener diversos orígenes, como son las naturales ocasionadas por fenómenos meteorológicos, volcánicos, sísmicos entre otros, o bien por fallas mecánicas o por causas que involucran a los seres humanos, que pueden deberse a múltiples variables, ya sean negligencia o errores.

La liberación de sustancias peligrosas al ambiente puede ocasionar problemas a la salud de la población y contaminación del suelo, aire y agua. Como son: la formación de nubes tóxicas, por un incendio o explosión, intoxicación aguda, lesiones físicas, quemaduras, daños en el sistema endócrino e inclusive la muerte, por la formación de contaminación se puede que alcanzar un río o lago, o bien se infiltre en el suelo.

Los accidentes ocurridos en México con sustancias peligrosas en las últimas tres décadas, ponen de manifiesto la vulnerabilidad de las comunidades ante eventos que involucran dichas sustancias, lo cual demanda la responsabilidad por parte de los gobiernos estatales y municipales de establecer una forma segura en el manejo de estas sustancias químicas peligrosas, en el desarrollo de políticas públicas para el almacenamiento, uso y transporte de las mismas, así como exigir a toda empresa que maneje sustancias peligrosas, el desarrollo de las medidas que deben realizarse durante y después de un accidente consecuencia de la liberación de sustancias que dejen expuestas a sus efectos a la población, infraestructura, suelo y agua.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) ha sistematizado información sobre los accidentes ocurridos en el país que involucran sustancias químicas peligrosas, a partir de los reportes de casos relevantes del Centro Nacional de Comunicación y Operación (CENACOM) y de las notas periodísticas registradas en diversos medios de comunicación, en este trabajo se llevó a cabo el análisis de esta información (durante el periodo comprendido del año 2005 al 2009) con la finalidad de conocer cuáles son las sustancias peligrosas que están involucradas en un mayor número de accidentes, los estados y municipios dónde han sido más frecuentes estos accidentes y el número de eventos industriales, urbanos así como los incidentes ocurridos en el transporte de sustancias peligrosas.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes

Desde los años 70 se han presentado eventos importantes por su magnitud de daño, como es el caso de Seveso Italia, por mencionar un ejemplo a nivel internacional, que trajo como consecuencia el progreso y desarrollo de acciones para la prevención de accidentes industriales. Los cuales permitieron establecer y modificar políticas referentes a toda actividad que involucre un riesgo potencial debido al manejo de sustancias peligrosas para los empleados, población cercana y áreas económicas (Landucci, et al., 2017).

Los accidentes con sustancias peligrosas que han ocurrido en México muestran el riesgo que representa el manejo de estas, así como las afectaciones a la salud de la población y al ambiente. Estos eventos han generado consecuencias a corto, mediano y largo plazo en la salud de los habitantes, así como en el ambiente, afectando los sitios donde han acontecido dichos incidentes.

La presencia de poblaciones vulnerables a eventos con sustancias peligrosas en México debido a su cercanía a aquellos lugares donde se producen, manejan y disponen dichas sustancias han tenido serias consecuencias que han repercutido directamente en áreas habitadas, en la infraestructura y en el ambiente, lo cual pone en alerta a las instituciones generando la necesidad de realizar planes de prevención y análisis de riesgo para accidentes con sustancias peligrosas, los cuales puedan ser incorporados en los Planes de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial (La Jornada, 2011).

A continuación, se describen algunos de los accidentes más importantes debido a las consecuencias que tuvieron en la población, el ambiente y los costos económicos que implicaron.

La explosión en la planta de gas LP ubicada en San Juan Ixhuatepec, considerado el peor accidente a nivel mundial ocurrido con esta sustancia. El 18 de noviembre de 1984 se registró una fuga de gas en la estación de almacenamiento de PEMEX, sobreviniendo al día siguiente a las 5:35 horas una explosión, el gas a presión provocó que las llamas se elevaran a 600 metros de altura, quedando cientos de personas “desintegradas” por el calor de la llama, así como por el impacto de la onda expansiva. Informó el diario “Excélsior” (2014), registrándose 11 explosiones. La tragedia no evitó que al menos seis gaseras en la zona sigan con sus actividades logrando tras el evento que se construyera sólo una central de bomberos. La explosión fue de tipo BLEVE por sus siglas en inglés Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion que en español significa “Explosión de vapores en expansión de un líquido en ebullición”. Este tipo de evento es originado cuando se produce la explosión de un recipiente a presión ocurriendo un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados (Bestratén & Turmo, sin año).

El incendio en la planta de Anaversa, la cual se estableció en Córdoba, Veracruz, con el fin de formular, envasar, almacenar y distribuir plaguicidas, se localizaba en la zona central de la ciudad donde se ubicaban en sus cercanías, escuelas, una estación de ferrocarril y comercios. Desde que se iniciaron las actividades de la planta, vecinos se quejaban de síntomas como irritación de ojos, nariz y garganta, lo que provocó que pobladores demandaran a las autoridades la reubicación de la planta, días antes que se presentara el incendio /fuga de plaguicidas ya se habían reportado al menos tres incendios en la fábrica (La Jornada, 2011).

El entonces secretario de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) Patricio Chirinos Calero expidió un permiso provisional de operación para la planta, a pesar de que dicha empresa mezcladora no contaba con las medidas necesarias para operar. El viernes 3 de mayo de 1991 aproximadamente a las 13:20 horas inició un incendio seguido de una serie de explosiones en el interior de la planta, el incendio no pudo ser controlado o apagado debido a que los extintores se encontraban vacíos. Las acciones de bomberos y vecinos no impidieron la contaminación de pozos y arroyos de donde se surtían las familias ocasionando la clausura de 120 pozos, presentándose la intoxicación de algunos vecinos, meses después se presentaron casos de dermatitis los cuales se relacionaron a residuos dentro de la planta que entraban en las casas debido al viento y que dichos residuos se impregnaban en la ropa. Según datos oficiales, las instituciones de salud atendieron a 292 personas con los siguientes síntomas: debilidad muscular, náuseas y dolor abdominal, dificultad respiratoria y visión borrosa.

Otro caso de trágicas consecuencias fueron las explosiones por gasolina en el sistema de alcantarillado ocurridas en Guadalajara, Jalisco, el 22 de abril de 1992, ocurrieron aproximadamente a las 10:00 horas destruyendo 15 kilómetros de calles, dejando como saldo de 210 a 700 muertos, 800 heridos y 15 000 personas sin hogar Ver imagen 1. El 21 de abril del mismo año vecinos reportaron a través de radiodifusoras y algunos diarios un fuerte olor a gasolina proveniente de las alcantarillas y tomas de agua, además de presencia de humo en las alcantarillas, ese mismo día trabajadores del ayuntamiento y de Protección Civil, encontraron altos niveles de gasolina y otros hidrocarburos; sin embargo, los trabajadores mencionaron que no era necesaria la evacuación de la zona. Tres días después se presentaron 10 explosiones ocurriendo las dos últimas a las 11:16 horas. Así mismo ocho días antes que se presentaran explosiones en el alcantarillado, técnicos de PEMEX detectaron pérdida de presión en el poliducto sur proveniente de la refinería en Salamanca.

Las investigaciones arrojaron que las posibles causas del accidente pudieron haber sido:

- Tubos de agua nuevos hechos de cobre revestido de zinc, los cuales reemplazaron una tubería de acero perteneciente a Pemex, la humedad ocasionó una reacción electrolítica que originó la corrosión de los metales, creando un agujero por donde se derramó la gasolina al subsuelo y en la tubería principal del municipio.

- Debido a la forma en U del alcantarillado, así como la dificultad de los sólidos para fluir mediante gravedad, provocó que los gases y líquidos de hidrocarburos se acumularan, con lo cual mediante el choque de dos metales se produjeron una o más chispas, las cuales detonaron las explosiones (La Jornada, 2011, Proceso, 2010 y Blanco, 2006).

Explosión de artificios pirotécnicos en Celaya, ocurrida el 26 de septiembre de 1999 en la central de abastos de Celaya, Guanajuato, ubicada a un lado de la central de autobuses. Aproximadamente a las 10 de la mañana del domingo se registró la primera de dos explosiones que ocurrieron en aquel día, donde un polvorín “clandestino” que se encontraba en el mercado, el cual almacenaba una tonelada de explosivos, explotó generando varios heridos, y confusión generada por escombros y una nube de polvo, una vez reportadas las primeras acciones por parte del cuerpo de bomberos se registró una segunda explosión, donde aquellas personas que se dispusieron a brindar ayuda se involucraron en un segundo suceso que les resultaría perjudicial quedando atrapados en la explosión.

La negligencia por parte del dueño de la abarrotera que almacenaba pirotecnia, los permisos otorgados por parte de la SEDENA con conocimiento del entonces gobierno estatal, contribuyeron a generar un “factor de riesgo” que no tardó en hacerse presente, privando de la vida a 56 personas y dejando 350 heridos (Álvarez, et al. 2009).

En México las dos actividades que implican el manejo de sustancias peligrosas, involucradas en muchos accidentes, son la pirotecnia y la actividad petrolera.

La pirotecnia en México se encuentra presente durante fiestas cívicas, patronales, económicamente constituye una fuente de trabajo a diferentes niveles: producción, venta y manejo de fuegos pirotécnicos. La fabricación de juegos pirotécnicos aún sigue siendo “artesanal”, donde la innovación tecnológica junto con las medidas de seguridad para su manipulación aún no ha sido empleada en México por sus productores. Los accidentes producidos por la acción de pirotecnia principalmente explosiones, generan una onda expansiva con consecuencias relativas, dependiendo del explosivo y cantidad que contiene un fuego pirotécnico, ocasionando quemaduras de primero, segundo o tercer grado y pérdida de extremidades o incluso la muerte (Álvarez, et al., 2009).

Los compuestos manejados en la fabricación de pirotecnia se clasifican de acuerdo a la función para la cual son empleados en: oxidantes químicos como nitratos (NO_3^-), cloratos (ClO_3^-) y percloratos (ClO_4^-), combustibles tales como carbón, azufre y metales (magnesio, magnalium y aluminio), por último, las sales metálicas que producen las diferentes gamas de color dependiendo de la especie química; por ejemplo, el bario da la coloración verde, el sodio produce el color amarillo, la sal de cobre que durante su combustión produce un tono azul, por último, el tono rojo se produce al agregar sales de estroncio. (Tomado del Instituto Mexiquense de la Pirotecnia (IMEPI)). La manufactura, traslado y comercialización de los artefactos

pirotécnicos ha demostrado ser de alta peligrosidad y una constante de riesgo debido a su frecuente uso en fiestas patronales.

Debido a la industria petrolera en México, la presencia de los hidrocarburos y sus derivados se encuentra distribuida en toda la República Mexicana, con la presencia de centros petroquímicos, refinación y terminales de almacenamiento y distribución, de ahí su alta frecuencia en accidentes industriales, urbanos y de transporte.



Imagen 1. Explosiones en Gasoducto (Guadalajara, México, 1992). Tomado de Morales, 2005: p.224.

En la tabla 1 se describen algunos de los accidentes ocurridos en México con sustancias peligrosas (eventos socio-organizativos) durante los últimos 30 años, reportando la sustancia involucrada, la entidad federativa donde sucedieron, número de muertos, heridos y afectados.

Tabla 1. Accidentes químicos más relevantes en México en los últimos 30 años. Fuente: CENAPRED, 2016.

Fecha	Estado	Sustancia química	Evento	Lugar del accidente	No. de muertos	No. de lesionados
19/11/1984	México, San Juan Ixhuatepec	Gas LP	Explosión (BLEVE)	Terminal Satélite Norte de Pemex	650	2 500
11/12/1988	Distrito Federal, Venustiano Carranza	Pirotécnicos	Explosión	Mercado de la Merced	62	87
04/05/1991	Veracruz, Córdoba	Paratión (paratión metílico, paraquat, pentaclorofenol, 2.4D)	Derrame, incendio y explosión	Empresa Agricultura Nacional de Veracruz (Anaversa)	Sin definir	300
22/04/1992	Jalisco, Guadalajara	Gasolina	Derrame y explosión	Red de alcantarillado	190	1470
26/09/1999	Guanajuato, Celaya	Pirotécnicos	Explosión	Central de abastos (almacenamiento clandestino)	56	365
31/12/2002	Veracruz, Veracruz	Pólvora	Explosión	Zona de mercados del centro de la ciudad	28	
19/12/2010	Puebla, San Martín Texmelucan	Diésel y combustóleo (crudo)	Explosión	Ducto Nuevo Teapa - Venta de Carpio	30	52
18/09/2012	Tamaulipas, Reynosa	Gas	Explosión e incendio	Ducto de la Central de Medición de Gas Km 19 de PEMEX	33	46
07/05/2013	México, Xalostoc	Gas LP	Explosión	Autotanque de doble semirremolque	27	31
28/12/2014	Puebla, Esperanza	Amoniaco	Fuga	Autotanque de doble semirremolque Km 223+800 autopista Puebla-Córdoba	4	18
26/03/2015	Tabasco, Huimanguillo	Gasolina	Derrame y explosión	Autotanque de doble semirremolque Carretera Villahermosa – Coatzacoalcos	20	10
20/04/2016	Veracruz, Coatzacoalcos	Cloruro de vinilo	Explosión	Petroquímica Mexicana de Vinilo, área de hornos	32	136

3.2 Prevención de desastres

Refiriendo a García, *et al.*, (1995), el cómo se generan áreas de riesgo tiene que ver con el desarrollo urbano-industrial en ciudades donde el crecimiento físico y demográfico fue espontáneo y acelerado a partir de la primera mitad del siglo XX, derivando en la transformación no planeada y acelerada en los usos de suelo, lo cual repercutió directamente en la población e infraestructura al no ir de manera conjunta con los planes de desarrollo urbano en cuestiones de manejo ni ordenamiento del territorio.

El “riesgo” según CENAPRED (2004), lo define como la probabilidad de que ocurran daños, pérdidas, efectos negativos en poblaciones y bienes, a consecuencia de eventos o fenómenos.

Los fenómenos definidos en la Ley General de Protección Civil (2017) son:

- A. Geológicos. Evento cuyos efectos son directos en la corteza terrestre como son los sismos, erupciones volcánicas, tsunamis, inestabilidad de laderas.
- B. Hidrometeorológicos. Generados por factores atmosféricos, como: ciclones, lluvias, inundaciones, heladas, sequías y ondas cálidas.
- C. Químico-Tecnológicos. se define como aquel agente perturbador que se haya generado por la acción violenta de diversas sustancias derivadas de su interacción molecular o nuclear. Resultando en: incendios, explosiones, fugas tóxicas, radiaciones y derrames.
- D. Sanitario-ambientales. Acciones perjudiciales para la población, animales, cosechas, ecosistemas derivadas de la liberación de agentes biológicos causando alteración en la salud o la muerte en seres vivos.
- E. Socio-organizativos. Aquel evento generado por errores humanos o acciones premeditadas: concentraciones masivas de población, terrorismo, sabotaje, vandalismo, accidentes terrestres, marítimos y aéreos.

El riesgo se calcula mediante la siguiente fórmula: $r = f(P V E)$, donde **r** se refiere al riesgo (situación en que puede darse la posibilidad de desencadenar un evento), **P** es el peligro definido como una situación que produce un nivel de amenaza a la vida, la salud o al ambiente, la probabilidad de que ocurra un fenómeno perjudicial de cierta magnitud, durante un momento y sitio dado. La vulnerabilidad expresada como **V** se refiere a la susceptibilidad que tienen los sistemas expuestos a un fenómeno perturbador para recibir un daño que afecte sus funciones o integridad estructural. Por último, la exposición o grado de exposición (**E**) es la cantidad de

personas, bienes y sistemas que se encuentran en el lugar y/o momento del evento que son propensos a recibir daños, con relación al tiempo que estén expuestos (edificios dañados, falla de servicios, dificultad para acceder al lugar, entre otros factores).

El análisis de riesgo consiste en identificar, evaluar y controlar riesgos sistemáticos a partir de la información disponible, con el fin de evitar daños, o en su mejor caso tomar medidas para su prevención (Santos, 2010). Conocer características de aquellos eventos que puedan tener consecuencias fatales y la manera que incide en los asentamientos humanos, infraestructura y entorno.

La gestión integral de riesgos (LGPC, 2017) involucra las siguientes etapas: Identificación de riesgos, previsión-prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción. Involucra a los tres niveles de gobierno, se encarga de crear acciones para: identificar, analizar, evaluar, controlar y reducir riesgos, tomando en cuenta su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción.

Mitigación y prevención: es la Identificación de riesgos, diseño de acciones, programas para mitigar (atenuar) y reducir o evitar que los accidentes ocurran (prevención) medidas de mitigación y prevención como son: albergues, rutas de evacuación y simulacros. La atención de emergencias se refiere a acciones tomadas antes, durante y después de un desastre con la finalidad de minimizar la pérdida de vidas humanas, bienes, servicios, planta productiva (apoyo a damnificados). Recuperación y reconstrucción consiste en recuperar los sitios afectados a tal punto que la zona recupere, en la medida de lo posible, las condiciones con que contaba anteriormente (CENAPRED, 2004).

3.3 Fenómenos químico-tecnológicos

Los accidentes químicos se pueden definir como la ocurrencia de un fenómeno mayor como resultado de actividades que involucran almacenamiento, procesamiento o transferencia de una o más sustancias químicas peligrosas, afectando de manera directa e indirecta: ambiente y personas (Arcos e Izcapa, 2003).

Los accidentes con sustancias peligrosas pueden ocurrir en las instalaciones que producen, procesan o almacenan estas sustancias. El almacenamiento se realiza en instalaciones industriales, donde se llevan a cabo procesos de producción, en instalaciones comerciales donde por ejemplo se vende pirotecnia o plaguicidas y en instalaciones de servicio como los aeropuertos que almacenan grandes cantidades de combustible para abastecer las aeronaves.

Asimismo, los accidentes ocurren también durante el transporte terrestre (carretero o ferrocarril), marítimo o aéreo de las sustancias químicas, las cuales se llevan de una instalación a otra o al sitio donde se utilizan o comercializan. En México, este

transporte se realiza principalmente a través de autotransporte y ferroviario (Sistema Nacional de Protección Civil, 2006).

Las propiedades fisicoquímicas de las sustancias químicas como presión de vapor, temperatura de ebullición, densidad, pH, límites de inflamabilidad, etcétera les confieren características peligrosas tal como inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad y radiactividad (Sistema Nacional de Protección Civil, 2006). Cuando ocurre un accidente con sustancias peligrosas los eventos que pueden presentarse son incendios, explosiones, fugas y derrames. Los accidentes dependiendo de sus consecuencias se clasifican en eventos de tipo químico (derrame, fuga), de tipo térmico (incendio) y de tipo mecánico (explosión).

Un accidente, según el Real Decreto 1193/2003 de España, es aquel evento ya sea fuga, derrame, explosión derivado de cualquier actividad que suponga un riesgo cuyo efecto repercuta en el área, o alrededor del sitio donde ocurre un accidente, afectando personas o el ambiente.

Los fenómenos químicos de acuerdo con el Real Decreto, 1193/2003 y el Acuerdo por el que se emite el Manual de Organización y Operación del Sistema Nacional de Protección Civil, publicado el 13/07/2018 se definen de la siguiente manera:

Fuga: liberación de una sustancia, sea un gas a condiciones de temperatura y presión ambientales, la cual se presenta debido a rupturas o pérdida de contención en el recipiente de almacenamiento o en la tubería que la conduce. Puede generarse una nube tóxica derivada de las condiciones ambientales y el contacto con otras sustancias presentes y de las propiedades fisicoquímicas que presente la sustancia, que en caso de que la población sea expuesta al gas puede presentar lesiones, intoxicación, incluso la muerte dependiendo de las concentraciones de la nube gaseosa.

Derrame: escape de cualquier sustancia líquida o sólida en partículas o mezcla de ambas, de cualquier recipiente que la contenga. Los efectos de las fugas dependiendo de las propiedades físico-químicas de las sustancias (corrosividad, punto de fusión, temperatura de evaporación) son la formación de nubes tóxicas, o un líquido volátil, causando daños a la salud de las personas, como intoxicaciones, enfermedades o síntomas tales como mareo, dolor de cabeza, náusea, irritación en ojos y vías respiratorias; pero si es un líquido o sólido tóxico el daño ocurre cuando se está en contacto directo con la sustancia a través de la piel o inhalando los vapores o partículas que desprende.

Incendio: fuego no controlado de grandes proporciones al que le siguen daños materiales (con características de volatilidad, inflamabilidad, entre otras) y que puede causar lesiones o pérdidas humanas y deterioro del ambiente. Mientras que el fuego es una reacción química que consiste en la oxidación violenta de la materia combustible y se manifiesta con desprendimiento de luz, calor, humo y gases en grandes cantidades. Existen diferentes tipos de incendios dependiendo de las condiciones en que ocurren se dividen en: Incendio de charco, dardo de fuego,

incendio de nube de gas o llamarada. Los efectos de los incendios son la generación de radiación térmica durante el proceso de combustión, y la formación de gases y humo por la combustión incompleta de los materiales involucrados.

Explosión: es la liberación repentina y violenta de una cantidad considerable de energía en un lapso muy corto, debido a un impacto fuerte, por reacción química de ciertas sustancias o por ignición de ciertos materiales, que provoca la expansión violenta de gases. Se manifiesta por la aparición de efectos acústicos, térmicos y mecánicos. Dentro de esta categoría existen las explosiones confinadas, no confinadas y tipo BLEVE.

Radiación: emisión y propagación de energía, a través del vacío o de un medio materia (R_x , R_γ), en forma de onda electromagnética o bien en forma electromagnética ($\alpha, n.p., \dots$).

3.4 Características de peligrosidad de las sustancias químicas

La actividad industrial implica el manejo de sustancias químicas, muchas de las cuales tienen propiedades fisicoquímicas que les dan características peligrosas tales como toxicidad, inflamabilidad, explosividad y corrosividad representando un peligro para la salud humana, las construcciones y/o el medio ambiente. A continuación, se describen estas características peligrosas (CENAPRED, 2014).

Inflamabilidad: determinada por dos propiedades físicas; punto de inflamación y la volatilidad, se entiende por inflamabilidad la capacidad que presenta una sustancia ya sea gas, líquido y sólido para encenderse y una vez encendido la velocidad con que las llamas se extinguen.

Corrosividad: son aquellas sustancias con capacidad de quemar, irritar, destruir tejidos y material orgánico, cuando es ingerida una sustancia corrosiva tejidos del pulmón y estómago se ven directamente afectados.

Reactividad: es la capacidad de algunas sustancias para descomponerse o reaccionar con otras sustancias o elementos de manera que pueden producir un evento violento.

Toxicidad: es la capacidad que posee una sustancia de producir daños en tejidos, lesiones, afectaciones en la salud en el corto, mediano y largo plazo cuando se ingiere, inhala o absorbe dicha sustancia química.

Explosividad: capacidad de generar una onda expansiva debido a la liberación instantánea de energía, generando además gases, calor y sonido.

En México, la clasificación de sustancias químicas peligrosas en instalaciones se ha realizado de acuerdo con la norma NOM-018-STPS-2000 "Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo". En esta norma se establece la forma de

identificación y clasificación de las sustancias. Las propiedades que toma en cuenta son daños a la salud, inflamabilidad y reactividad, dándole valores en una escala de 0 a 4 para indicar el grado de peligro que presentan, siendo 4 el de mayor peligro. Sin embargo, a partir de octubre de 2018 entró en vigor la NOM-018-STOS-2015 “Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo”, la cuál se publicó el 9 de octubre de 2015 y se dieron tres años a partir de esa fecha para su entrada en vigor en el país, pero actualmente seguimos pasando por el proceso de transición de este nuevo sistema y el que establece la norma anterior, si bien el nuevo sistema sustituye al anterior, aún gran parte del transporte, almacenamiento y demás señalización se sigue utilizando de acuerdo con la NOM-018-STPS-2000.

Este sistema establece dos opciones de identificación, una en forma pictogramas, de peligros físicos que son utilizados para identificar los peligros de las sustancias químicas peligrosas o mezclas. así como los códigos de identificación H los cuáles inician con la letra H seguido de 3 dígitos cada uno denota una clase de peligro y categoría de peligro diferente, de igual manera se encuentran los códigos de identificación H y sus indicadores de peligro para la salud, ver anexo 7. Por último, los códigos de identificación P y sus consejos de prudencia son indicaciones que para cada tipo de código se da una “recomendación” a tratarse para la sustancia que contenga este tipo de código. Para evitar contacto directo con la sustancia o mezcla, inhalación, intoxicación y toda consecuencia derivada de la manipulación de las sustancias peligrosas. El modelo rombo coincide completamente con el sistema de identificación de materiales peligrosos establecido por la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (National Fire Protection Association NFPA) en el estándar NFPA/704, mientras que el modelo rectángulo concuerda con el Sistema de Identificación de Materiales Peligrosos HMIS por sus siglas en inglés (Hazardous Materials Identification System) desarrollado por la Asociación Nacional de Pinturas y Recubrimientos, ambos sistemas fueron desarrollados en los Estados Unidos (Arcos e Izcapa, 2003).

El Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de productos (SGA o GHS) establece criterios para clasificar sustancias y mezclas de acuerdo con sus peligros físicos, para la salud y para el medio ambiente. Incluye además elementos armonizados para la comunicación de peligros, como etiquetado, pictogramas y fichas de seguridad. Los criterios establecidos en la SGA se basan en lo descrito en un documento denominado Libro Púrpura.

El SGA se aplica a todos los productos químicos, excepto aquellos productos que se encuentren regulados a través de sus propias leyes o reglamentos, estos son: productos farmacéuticos, aditivos alimentarios, artículos cosméticos y residuos de plaguicidas en alimentos. El público al que está dirigido son los consumidores de los productos químicos, los trabajadores relacionados al sector transporte y los que brindan servicios de emergencia (Tomado de ghs-sga.com).

Las sustancias peligrosas se clasifican para su transporte en las siguientes clases de riesgo (Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, 1993).:

1. Explosivos
2. Gases comprimidos, refrigerados, licuados o disueltos a presión
3. Líquidos inflamables
4. Sólidos inflamables
5. Oxidantes y peróxidos orgánicos
6. Tóxicos agudos (venenosos) y agentes infecciosos
7. Radiactivos
8. Corrosivos
9. Biológico infeccioso
10. Varios

De manera genérica, los compuestos químicos de acuerdo con su composición atómica pueden ser, compuestos orgánicos formados por átomos de carbono o compuestos inorgánicos los cuáles no contienen carbono en su estructura, pero sí pueden contener metales.

Los compuestos orgánicos se dividen en seis grupos:

- (1) Compuestos orgánicos volátiles (COV) no halogenados;
- (2) Compuestos orgánicos volátiles (COV) halogenados;
- (3) Compuestos orgánicos semivolátiles (COSVs) no halogenados;
- (4) Compuestos orgánicos semivolátiles (COSVs) halogenados;
- (5) Combustibles y
- (6) Explosivos.

Compuestos orgánicos volátiles. Forman parte de contaminantes atmosféricos que a su vez se clasifican en compuestos orgánicos e inorgánicos (metales y aniones, entre otros). Dentro de los contaminantes atmosféricos orgánicos tenemos a los volátiles (COVs), los semivolátiles (COSVs) y los no volátiles (CONVs). Las sustancias consideradas como COVs son aquellas que a excepción del metano contengan átomos de carbono o hidrógeno o que puedan estar sustituidos por halógenos, oxígeno, azufre, nitrógeno, fósforo, exceptuando a los óxidos de carbono y a los carbonatos (Volke y Velasco, 2002).

3.5 Causas de los accidentes químicos

Las causas de los accidentes químicos pueden ser (DOF, 2016, Arcos e Izcapa, 2003):

- I. Naturales. Eventos como sismos, huracanes, inundaciones, erupciones volcánicas, etcétera, estos eventos dañan las instalaciones donde se manejan las sustancias peligrosas.
- II. Fallas operativas en los procesos. Alteración o desviaciones de las variables del proceso básicamente presión, temperatura, concentración y gasto de alimentación
- III. Fallas mecánicas en los procesos. Que pueden ocurrir en las bombas, válvulas, instrumentos de control y sensores; así como, en las unidades empleadas para el transporte de las sustancias como fallas en los frenos o neumáticos.
- IV. Fallas humanas. Como una mala selección de los materiales de construcción, de equipos y recipientes de almacenamiento, falta de instrumentos de control, errores en el diseño y en sí errores humanos que ocurren durante la operación de los equipos o las unidades de transporte, ya sea por falta de capacitación, por no seguir los procedimientos de operación o bien por no cumplir con las normas de seguridad.
- V. Pérdida de servicios auxiliares tales como agua, vapor, energía eléctrica y aire comprimido
- VI. Causas premeditadas que se refieren al sabotaje, robo de instrumentación o materiales que forman parte de la infraestructura de los lugares que almacenan sustancias peligrosas.

Los accidentes químicos tienen efectos negativos sobre:

- La salud de la población a corto y a largo plazo, produciendo efectos agudos, por ejemplo: irritación de ojos, piel, tracto respiratorio, náusea, vómito, daño renal, hepático, gastrointestinal, respiratorio o neurológico. Muerte, lesión, invalidez, intoxicación, enfermedad.
- El ambiente, ya que se puede contaminar el agua superficial y subterránea, el suelo, el aire, presentarse daño o muerte de plantas, animales y microorganismos, también puede haber contaminación de cultivos.
- La economía local, ya que puede haber suspensión de la actividad productiva de la instalación afectada, importantes pérdidas materiales de la industria en

equipos, construcciones, etc., pérdida de empleos directos e indirectos, gastos por reconstrucción de viviendas y servicios públicos y para el auxilio de la población afectada (DOF, 2016).

3.6 Afectaciones a la salud

Los accidentes químicos tienen consecuencias negativas sobre la salud de la población a corto y largo plazo, produciendo efectos agudos ya sean: irritación de ojos, piel, tracto respiratorio, náusea, vómito, daño renal, hepático, gastrointestinal, respiratorio o neurológico.

Las consecuencias inmediatas a la población por un accidente químico son: muerte, lesión, invalidez, intoxicación y enfermedad (dependiendo del grado y concentración de la sustancia).

Un agente tóxico es toda sustancia que en cualquier estado físico ya sea sólido, líquido o gas, pueda causar daños en las funciones del cuerpo, dependiendo de la cantidad del agente tóxico los efectos pueden ser transitorios, permanentes o inclusive causar la muerte. La razón por la que estos agentes provocan daños a los humanos es debido a cómo se conforman los seres vivos en sus niveles más bajos, en moléculas y átomos, al igual que sucede con las sustancias químicas, moléculas y átomos, por lo que interactúan reaccionando a nivel bioquímico dentro de los organismos, lo cual provoca desestabilización en células, órganos y sistemas.

Se denomina intoxicación cuando un producto químico tóxico se acumula en el organismo debido a la entrada directa (ingestión, inhalación, contacto dérmico) o interacción con un producto tóxico. En la figura 1 se presentan las principales vías de exposición del organismo ante una sustancia química.

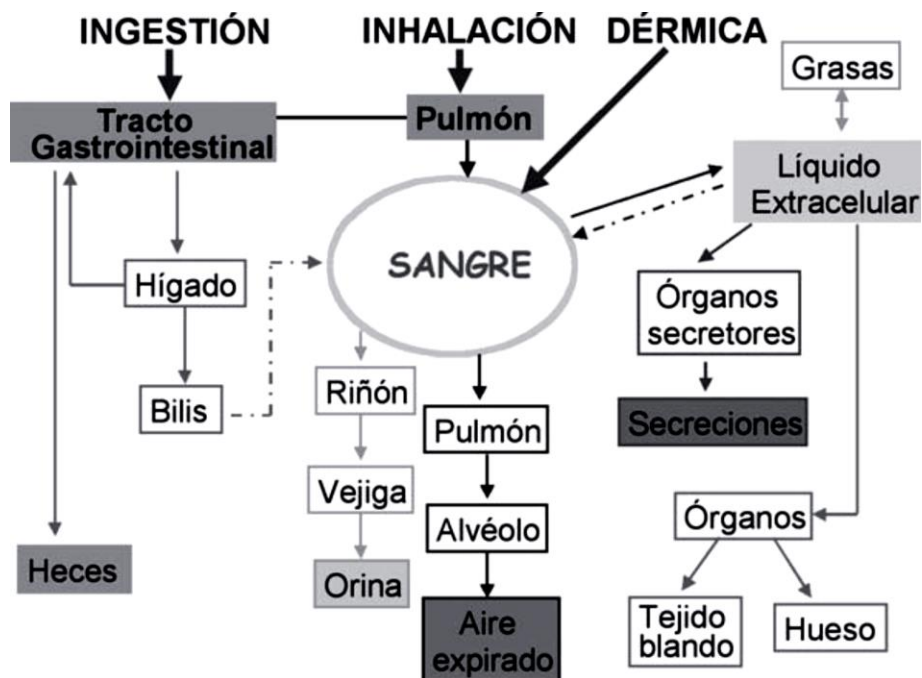


Figura 1. Principales vías de exposición del organismo ante una sustancia tóxica.

Fuente: Sistema Nacional de Protección Civil (2006).

Los tipos de intoxicación que pueden presentarse son agudos, sub-aguda o crónica, dependiendo del grado de exposición del agente químico. Una intoxicación aguda sucede cuando existe una exposición de corta duración y el agente químico es absorbido en un periodo no mayor a 24 horas, con efectos inmediatos causando: irritación de nariz, garganta, conjuntivas oculares, quemaduras, colapso o depresión del sistema nervioso central, náuseas, vómito, diarrea, asfixia.

También se puede presentar intoxicación sub-aguda, causada por exposiciones consecutivas a concentraciones bajas de la sustancia química. Las sustancias pueden entrar a los organismos por diferentes vías, durante su transporte en la sangre y oxígeno llegando al sistema circulatorio y propagándose a los órganos vitales (figura 1). La intoxicación crónica se presenta durante la exposición de manera frecuente y en períodos de tiempo largos por parte de un agente tóxico a dosis bajas, los efectos se manifiestan a largo plazo en el sistema nervioso central y periférico con daños renales, hepáticos y pulmonar (CENAPRED, 2014).

La exposición de algunos agentes químicos puede causar asma (Vincent, *et al.*, 2017) ya que algunas sustancias químicas, así como proteínas derivan en la producción de antígenos e inmunoglobulina o IgE, provocando reacciones alérgicas: estornudos, sibilancia y anafilaxis, en conjunto con irritación en piel y erupciones.

Las dioxinas forman parte de los COP o contaminantes orgánicos persistentes, son compuestos altamente tóxicos, se encuentran presentes en gran variedad de productos utilizados cotidianamente (www.cnrcoop.es). Éstas se almacenan y transportan a través de los seres vivos permaneciendo por periodos de tiempo largos debido a su estabilidad química y fijación a tejido graso, lo cual implica que

estamos directamente en contacto ya que la mayoría de productos cárnicos las contienen, de igual manera se encuentran dispersas en el ambiente, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) propone un índice máximo de ingesta de las dioxinas a 70 pg/kg/mes (1 picogramo/kg= 1.0×10^{-15}) sin que esta sustancia en esa cantidad repercuta en la salud del individuo.

La combustión generada principalmente por los incendios urbanos produce liberación de dioxinas y furanos, los cuales se encuentran en productos que contengan grupos aromáticos (furanos) o cloro Cl^{-1} (dioxinas) que las clasifica dentro del grupo de los organoclorados, se han usado en la fabricación de plaguicidas, blanqueadores y otros productos industriales. Como efectos de la exposición a dioxinas y furanos podemos nombrar afectaciones a órganos vitales (corazón, hígado,), sistema inmune, glandular (tiroides), inclusive cáncer. Una vez liberados a la atmósfera se depositan en suelo, agua, animales y vegetales. Otras fuentes de organoclorados son la industria química, blanqueamiento de papel en la industria papelera y depuración de aguas (Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente, 2017, OMS, 2016).

Otra fuente de contaminación son los compuestos orgánicos volátiles denominados COVs, ya que se sabe que son tóxicos y en algunos casos presentan mutagenicidad, neurotoxicidad y efectos carcinogénicos, se encuentran presentes derivados de actividades petroleras y refinamiento, pueden presentarse en forma de gas y materia particulada. Algunos ejemplos de COVs son el acetato de metilo y de etilo, benceno, clorobenceno, cloroformo, estireno, xileno. Pueden acarrear problemas en disminución de fertilidad, alteración cromosómica, malformaciones congénitas (Nolasco, 2009).

Los plaguicidas debido a su amplio uso en el sector agrario representan una fuente importante de envenenamiento debido a las intoxicaciones que se presentan por el uso incorrecto y poca capacitación para su manejo, es más fácil prevenir las afectaciones por contacto, ingestión, inhalación, absorción dérmica, que tratar los síntomas o afectaciones que pueden causar a la salud, ya sea que la exposición a los plaguicidas haya sido durante corto o mediano plazo. Los síntomas debido a la intoxicación por plaguicidas pueden ser de manera inmediata o dentro de las 12 horas siguientes al contacto, manifestándose síntomas como transpiración, salivación, lagrimeo, rinorrea y broncorrea. En el caso de los plaguicidas denominados organofosforados (Morgan, 1989 y Smith & Helmick, 1993). De acuerdo con la FAO existe también el riesgo de aquellos plaguicidas que se encuentran en desuso, por lo que al ser productos tóxicos afectan directamente en el ambiente debido a su persistencia, movilidad en el suelo, su solubilidad en el agua y volatilidad.

3.7 Afectaciones al medio ambiente

Las consecuencias de la liberación de las sustancias químicas al ambiente pueden ser la contaminación del agua superficial y subterránea, suelo, aire, daño o muerte de plantas, animales, microorganismos y posible afectación de cultivos (Arcos e Izcapa, 2003).

Contaminación es un término referido a la presencia en el ambiente de toda sustancia ajena a un sistema natural que sola o en combinación con otra(s) que al entrar en contacto con el ambiente puede incorporarse a éste, cambiar la estructura molecular natural ya sea del agua, suelo, flora y fauna (LGEEPA, 2017 art. 3, fracc. VI y VII).

A consecuencia de las constantes actividades industriales como la minería, la operación de una industria química básica, petroquímica, etcétera, existe una constante producción de residuos peligrosos difíciles de cuantificar. No sólo el manejo de residuos y/o sustancias peligrosas representan un riesgo tanto para quienes las manejan (producción, transporte, almacenamiento, disposición), también los daños ocasionados producto de los accidentes con dichas sustancias como fugas, derrames e incendios, ponen en riesgo de manera directa e indirecta a la población, causando daños en el ambiente como la contaminación de los suelos que actúan como un sistema dinámico (SEMARNAT, 2002).

Aquellos eventos en los que se encuentren involucradas sustancias peligrosas en perjuicio de la población y el ambiente se les denominan emergencias ambientales. Las sustancias involucradas en mayor número de emergencias ambientales para el año 2002 (Figura 2), fueron el petróleo crudo con mayor porcentaje de accidentes, seguido por combustibles (gasolinas, diésel, combustóleo), amoníaco, ácidos y gas natural. La superficie para suelos contaminados durante 1999 fue de 25,967 km² (Volke y Velasco, 2002). Si el territorio nacional cuenta con una extensión continental de 1.9 millones de km² entonces hablaríamos del 1.3% de la superficie contaminada, sólo para ese año sin contar con que no todos los sitios contaminados reciben tratamiento para reducción o eliminación de la contaminación.

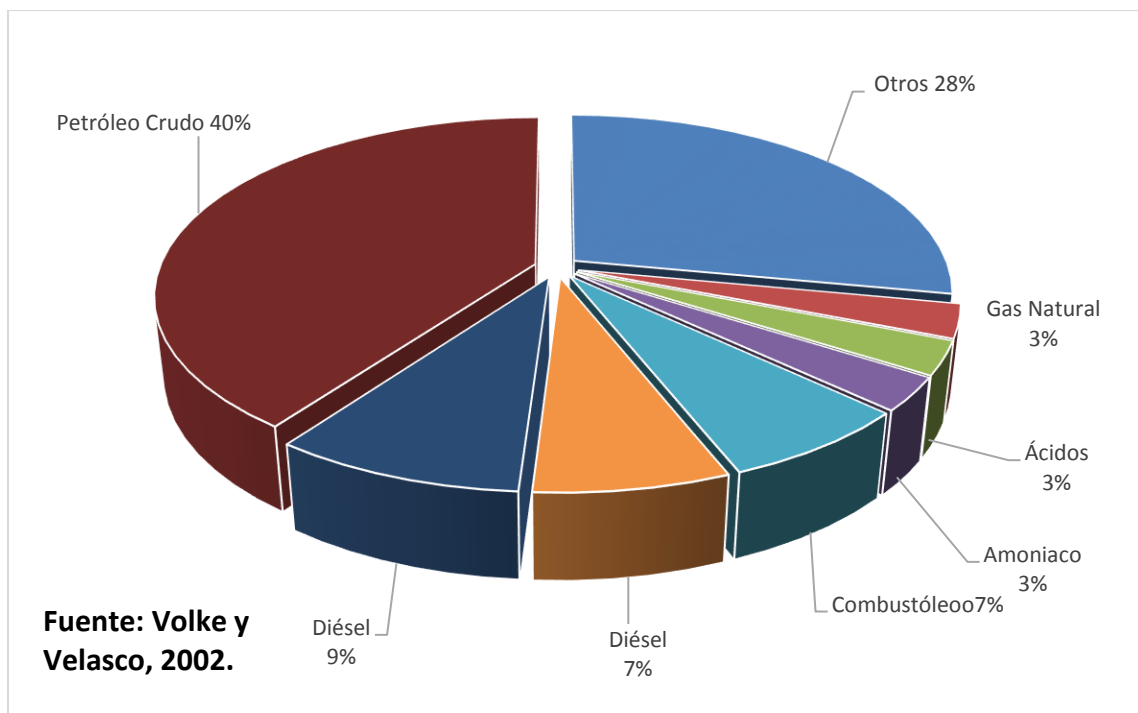


Figura 2. Porcentaje de sustancias peligrosas involucradas en emergencias ambientales. Volke y Velasco, 2002.

La contaminación del manto freático y sistemas de agua implica graves problemas en la salud de la población como puede ser un derrame de sustancias peligrosas que llegue a un cuerpo de agua, el cual sea usado para el suministro de agua potable a la población o bien para el riego de cultivos.

Debido a un accidente químico se produce liberación de gases, líquidos o sólidos afectando de manera adversa el funcionamiento de sistemas como suelo, corrientes hidrológicas, atmósfera y la biota, también pueden causar incendios o explosiones producto de la interacción de la sustancia con el ambiente debido a las propiedades de éstas (Arcos e Izcapa, 2003).

La Procuraduría Federal para la Protección del Ambiente (PROFEPA, 2015) cuenta con un Centro de Orientación para Atención de Emergencias conocido por sus siglas como COATEA, que proporciona información sobre las propiedades físicas y químicas, reactividad, toxicidad, incompatibilidades y efectos a la salud de sustancias químicas; estrategias de control de fugas, derrames, incendios así como explosiones de sustancias químicas; atención a emergencias ambientales, base de datos constantemente actualizada, también proporciona información referente a la cantidad de sustancias transportadas y usadas a diario en todo el mundo.

Contaminación de suelo

El suelo y subsuelo constituyen un recurso natural difícilmente renovable que desempeña funciones como medio filtrante durante la recarga de los mantos acuíferos y la protección de estos, en él se llevan a cabo los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, es el sustento para las redes tróficas, actúa como soporte para la vegetación, además es el espacio donde se realizan las actividades para la producción de alimentos de origen agrícola y ganaderas (Ortínez B., *et al.*, 2003). Es el material no consolidado en la superficie de la tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas terrestres, que ha estado sometido a la influencia de factores pedogenéticos y ambientales: material parental, clima, macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante un lapso y generando un producto: el suelo, que difiere del material del cual se derivó en varias propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas (Jaramillo D.F., 2002).

El suelo tiene múltiples definiciones, así como fue citado en Páez B. R. 2000, según Alexander (1990), es un estrato característicamente diferente del lecho rocoso subyacente, en el que se sustenta la vida vegetal y del cual las plantas obtienen soporte mecánico y muchos de sus nutrimentos. Químicamente, el suelo contiene una gran cantidad de sustancias orgánicas que no se encuentran en los sustratos más profundos. El ambiente edáfico es uno de los sitios más dinámicos en interacciones biológicas en la naturaleza, en el cual se realizan la mayor parte de las reacciones bioquímicas involucradas en la descomposición de materia orgánica, la intemperización de las rocas y la nutrición de cultivos agrícolas.

El suelo está formado por cinco componentes principales: materia mineral, agua, aire, materia orgánica y organismos vivos. La cantidad de estos constituyentes no es la misma en todos los suelos, sino que varía con el tipo de suelo y la localidad. La cantidad de materia orgánica y mineral, que forman parte de la porción inanimada, es relativamente estable en un determinado lugar; sin embargo, la proporción de aire y agua varía. El aire y el agua juntos representan aproximadamente la mitad del volumen en la mayoría de los suelos, al cual se le llama "espacio poroso"; mientras que la fracción mineral, que en muchos casos contribuye con poco menos de la mitad del volumen, se origina de la desintegración y descomposición de las rocas, transformándose con el transcurso del tiempo (Foth, 1990).

Por lo general la materia orgánica constituye del 1 al 15% del total y se relaciona con la vegetación nativa, pero si la vegetación es constante, la acumulación es regulada por las condiciones climáticas; entendiéndose por materia orgánica, todo el material de origen orgánico que se encuentra en diferentes estados de descomposición en el suelo. Consecuentemente, quedan incluidos bajo este término, residuos animales y vegetales que aún presentan suficiente diferenciación para permitir la identificación (Páez B.R., 2000).

La contaminación de un suelo sucede cuando éste se degrada a consecuencia de la liberación, propagación y acumulación de sustancias, que debido a su

composición química interactúan en las fases que existen dentro de un sistema dinámico como es el suelo: fase gaseosa, acuosa, líquida, estratificación mineral y microbiana. Derivando en la incapacidad del sistema para mantener a las diferentes poblaciones que dependen de ella de manera extrínseca e intrínseca.

Cuando un contaminante se traslada en el medio debido a medios naturales se le denomina advección o convección. Al presentarse el impacto de un contaminante, en cualquier estado de agregación, con un material que provoca el transporte de la sustancia se le conoce como dispersión. La atenuación sucede al degradarse, adsorberse o detenerse el transporte de un contaminante (Izcapa, 2001).

Aquellas zonas por donde un contaminante puede desplazarse (viento, lluvia, corrientes de agua superficiales o subterráneas, tuberías, carreteras) dentro y fuera del medio donde se provocó la contaminación, se les denomina rutas de migración del contaminante, ya que las sustancias químicas no permanecen inmóviles, éstas migran, debido a las características físicas de cada matriz, condiciones meteorológicas, cantidad y concentración de la sustancia química o contaminante presente en el área, así como la fuente de descarga.

3.8 Restauración de sitios contaminados

La restauración de un sitio contaminado consiste en una serie de actividades y procesos para recuperar o restablecer, en la medida de lo posible, las condiciones originales del sitio. Existen diferentes técnicas de restauración dependiendo del principio de operación ya sea físico, químico, biológico o térmico. De acuerdo con la forma de operación o aplicación se clasifican en técnicas in situ, on-site y off-site. La técnica de restauración a emplear dependerá de las propiedades físicas y químicas del suelo y de los contaminantes presentes (Izcapa, 2001).

Para hablar de restauración debe conocerse los siguientes conceptos:

- ❖ Restauración. Regeneración de un sistema a tal punto que éste tenga las mismas condiciones que tenía antes de la perturbación.
- ❖ Rehabilitación. Que un sistema degradado vuelva a tener un estado y actividad productiva, visual y paisajística de acuerdo con el entorno.
- ❖ Recuperación. Cuando el sistema degradado es habitable nuevamente por especies y diversidad biológica que presentaba el sistema antes de la perturbación.
- ❖ Remediación. Uso de técnicas naturales para detener o prevenir la acción degradativa (Hernández y Pastor, 2008).

Existen cuatro tipos de tratamientos: térmicos, físicos, químicos y biológicos. Los tratamientos físicos son utilizados con el fin de separar y/o recuperar diversos componentes de los residuos a partir de sus características físicas como son tamaños de partícula, volumen, capacidad magnética, conductividad eléctrica y color.

Los tratamientos químicos cambian la forma interna de las sustancias mediante procesos que alteran su naturaleza química a través de reacciones, volviéndolos más estables o convirtiéndolos en estructuras más simples que permitan su degradación posterior por microorganismos. En la mayoría de los casos se estabiliza una sustancia y posteriormente se trata mediante otra técnica, es decir los métodos químicos son usados como pretratamientos o como parte de trenes de tratamiento.

También se encuentran los tratamientos térmicos que consisten en la incineración de las sustancias sólidas peligrosas. Algunos plaguicidas pueden ser sometidos a este tipo de técnicas (organofosforados) mientras que los organoclorados durante su combustión generan sustancias de mayor afectación a la salud como las dioxinas.

Basados en sistemas naturales como los ciclos biogeoquímicos, se encuentran los tratamientos biológicos, que asimilan o transforman el residuo, en otros casos plantas y microorganismos, pueden acumular el contaminante para poder extraerlo del medio en el que se haya producido la contaminación (Izcapa, 2001). Este tipo de tratamientos utiliza bacterias, protozoarios y hongos los cuales transforman los residuos tóxicos (compuestos orgánicos tóxicos) en compuestos inertes o menos tóxicos, como producto de su metabolismo, ya que, para la población microbiana, las sustancias peligrosas son su fuente de energía y alimento. Los microorganismos involucrados utilizan la materia orgánica junto con elementos nutritivos y oxígeno (en caso de ser requerido), para metabolizarla mediante procesos bioquímicos y fisicoquímicos, obteniendo así energía vital y materia viva, además de formas moleculares estables e inorgánicas presentes en la naturaleza. Por lo tanto, la capacidad bioquímica, genética y ecológica de los microorganismos juega un papel importante en la biodegradación de compuestos orgánicos tóxicos (como se citó en Fernández y Arcos, 1994).

3.8.1. Características de los contaminantes en el suelo

El suelo posee diferentes características que le dan la capacidad de “soportar” agentes nocivos denominada capacidad de amortiguación, de ella dependen tanto la composición física y química del suelo, así como la cantidad de sustancia que ingresa al sistema como agente nocivo (Ortiz, et al., 2007). Los procesos fisicoquímicos que se llevan a cabo en el suelo son:

Transporte de contaminantes: en la figura 3 se representa la forma en que se transportan los contaminantes, así como los procesos que ocurren durante la infiltración vertical del material. El retardo en el transporte de manera descendente conocido como potencial de lixiviación y el transporte ascendente o potencial de volatilización se refiere a la inmovilización de los constituyentes de los residuos. La inmovilización de los compuestos orgánicos tiene que ver con el contenido de materia orgánica del suelo especialmente de sustancias químicas hidrofóbicas, humedad del suelo y presencia de solventes orgánicos (Izcapa, 2003).

Una forma de conocer la velocidad con la que se transporta un constituyente a través de un sistema subsuperficial es describir su inmovilidad relativa para estimar su retardo, lo que describe la relación de la velocidad del contaminante comparada con la rapidez del movimiento del agua a través de la subsuperficie. Por lo tanto, es necesario conocer los procesos que se llevan a cabo en un suelo y en qué interfases ocurren.

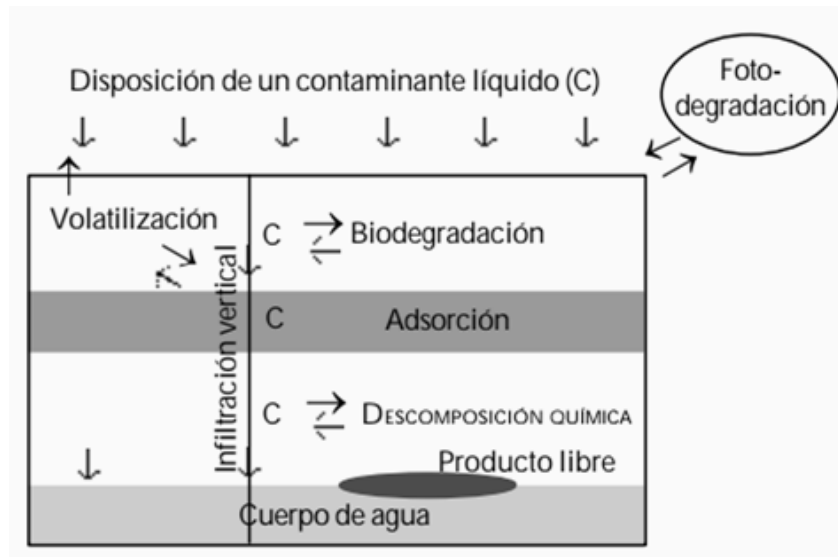


Figura 3. Transporte del contaminante en el suelo y sus disposiciones a través de las diferentes fases hasta llegar a un acuífero (Volke y Velasco, 2002).

Degradación: cada fase del sistema suelo puede ser un sitio donde se llevan a cabo reacciones biológicas y/o abióticas que transforman una sustancia química. La caracterización de la reacción (degradación) de las sustancias químicas específicas en la mezcla residuo/suelo es importante para evaluar la capacidad de asimilación del sitio para cada sustancia química. La degradación de muchos compuestos orgánicos en los sistemas subsuperficiales se puede describir monitoreando su desaparición a través del tiempo. La rapidez de degradación se calcula midiendo la pérdida del compuesto original y la producción de dióxido de carbono en el tiempo de tratamiento, así como la producción y desaparición de productos intermedios.

Transformación/reducción de la toxicidad: la transformación se refiere a la alteración parcial de los constituyentes peligrosos formando productos intermedios. Los productos intermedios pueden ser menos tóxicos que el compuesto original. Para evaluar la reducción de la toxicidad de una sustancia química se pueden usar bioensayos para medir el efecto tóxico de una sustancia química sobre las especies de prueba bajo condiciones específicas. La toxicidad de una sustancia química es proporcional a la severidad de esta sobre la respuesta monitoreada del organismo de prueba. Los procesos que actúan en la subsuperficie determinan cómo se lleva a cabo la partición de sustancias químicas en la subsuperficie, lo cual tiene un efecto significativo en el destino ambiental de una sustancia, estos procesos son:

- Advección
- Dispersión
- Difusión
- Reacciones ácido/base
- Hidrólisis
- Disolución/precipitación
- Oxidación/reducción
- Intercambio iónico y sorción
- Volatilización
- Filtración
- Disociación
- Complejación
- Especiación
- Degradación térmica
- Reacciones fotoquímicas

Algunos parámetros para determinar la evaluación de la contaminación del suelo son: (i) concentración de contaminantes, (ii) profundidad de la contaminación, (iii) fecha de la contaminación. Algunos parámetros de los contaminantes son: (i) vida media, (ii) constante de rapidez de degradación y (iii) biodegradabilidad relativa, Izcapa (2001).

En la recuperación de sitios contaminados se emplean tres tipos de técnicas dependiendo el fin que se le quiera dar a la o las sustancias presentes en el sistema(s), se dividen en: contención, confinamiento y descontaminación (Ortiz, *et al.* 2007; Volke y Velasco, 2002).

Contención, es un proceso mediante el cual se aísla el contaminante a través de barreras físicas, para prevenir o reducir que los contaminantes orgánicos e inorgánicos se propaguen en suelos y aguas subterráneas, no requieren la excavación del sitio se emplean barreras verticales y horizontales, barreras en suelo seco, sellado superficial, sellado profundo y barreras hidráulicas.

El confinamiento, evita la movilidad del contaminante, evitando su migración a través de procesos físico/químicos que reducen la movilidad de los contaminantes, ya sea estabilizando la sustancia, solidificando el contaminante o encapsulando su estructura química (vitrificación).

Descontaminación, reducción de contaminantes presentes en el suelo mediante extracción y separación física o química, de acuerdo con sus propiedades (Bernand, 2006).

Debido a su eficacia y bajo costo los tratamientos biológicos son una alternativa bastante recurrida para el tratamiento sobre todo de suelos para tratar espacios contaminados. Los parámetros básicos que afectan al proceso microbiológico son: la fuente de energía y sustrato, la biodegradabilidad del sustrato y la población microbiana.

Fuente de energía y sustrato. Los microorganismos se clasifican según la fuente de obtención de energía en: a) autótrofos emplean luz y dióxido de carbono, b) quimiolitótrofos llevan a cabo reacciones de óxido-reducción de compuestos inorgánicos y emplean dióxido de carbono) y c) heterótrofos llevan a cabo reacciones de óxido-reducción de compuestos orgánicos y utilizan el carbono orgánico.

Biodegradabilidad del sustrato. Si bien la mayoría de las sustancias orgánicas son biodegradables, existen compuestos que resisten la degradación (recalcitrantes) o que degradan muy lentamente (persistentes). La biodegradabilidad de un compuesto depende en gran medida de su estructura molecular. A pesar de la estabilidad química de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, compuestos comúnmente encontrados en sitios contaminados, un gran número de microorganismos -bacterias, hongos y levaduras- son capaces de utilizarlos como fuentes de carbono y de energía. La velocidad a la que los microorganismos oxidan los hidrocarburos varía marcadamente, los alcanos saturados se degradan rápidamente, los alcanos ramificados son más resistentes a la biodegradación que los alcanos normales (la resistencia aumenta con el número de ramificaciones), los hidrocarburos aromáticos son más difíciles de degradar y los hidrocarburos aromáticos policíclicos se degradan en muy baja proporción.

Población microbiana. El tratamiento biológico implica una compleja interacción de diversas especies microbianas. La biodegradación de compuestos orgánicos se basa en la oxidación biológica de los mismos por la acción de microorganismos. La degradación espontánea se debe a la actividad de microorganismos autóctonos, también denominados indígenas. Los procesos degradativos naturales acontecen en general por el concurso de poblaciones microbianas mixtas, que operan bajo complejas regulaciones simbióticas. Las poblaciones mixtas suelen ser muy eficientes en la utilización de sustratos complejos tales como residuos de hidrocarburos. La velocidad de transformación de moléculas complejas en moléculas sencillas está en función de la masa microbiana activa, en algunos casos se estimula el desarrollo de poblaciones depuradoras autóctonas y en otros se incorporan cultivos microbianos provenientes de cepas aisladas, seleccionadas y adaptadas en laboratorio. En una mezcla de poblaciones microbianas no sólo son importantes aquellos organismos que pueden iniciar procesos catabólicos sino también los consumidores secundarios. Algunos microorganismos pueden utilizar hidrocarburos para su crecimiento como única fuente de carbono, entre ellos se incluyen bacterias, actinomicetos, levaduras y hongos.

En el proceso de biodegradación de hidrocarburos, los microorganismos producen una serie de catalizadores biológicos denominados enzimas, que se liberan al exterior de la célula y atacan las moléculas de los contaminantes orgánicos transformándolas en formas más fácilmente asimilables. Solo unas pocas especies son capaces de degradar hidrocarburos gaseosos, mientras que los hidrocarburos parafínicos líquidos son atacados por un mayor número de especies. La degradación de hidrocarburos alifáticos saturados es un proceso básicamente

aeróbico, el oxígeno es necesario para iniciar el ataque microbiano a la molécula, mientras que la degradación de hidrocarburos alifáticos insaturados puede efectuarse en forma aeróbica y anaeróbica, al igual que los aromáticos.

Los mecanismos bioquímicos de la degradación son complejos y dependen de las condiciones fisicoquímicas del medio, del tipo de sustrato y del microorganismo. Dichos mecanismos no están totalmente estudiados y sólo se ha investigado la degradación de algunos compuestos específicos. Cada especie de microorganismos tiene una capacidad específica para degradar hidrocarburos: solo ataca algunos compuestos específicos y en un grado determinado. Cuando se tiene una mezcla compleja, como puede ser un lodo de refinería se recurre al uso combinado de un grupo de especies degradadoras. Estos conjuntos de microorganismos se denominan consorcios microbianos.

Tomado de: <http://www.bvsde.paho.>

3.8.2 Agua

Los contaminantes orgánicos se pueden clasificar con base en su: volatilidad, biodegradabilidad, solubilidad, concentración y otras propiedades físicas que puedan ser específicas o de interés para la tecnología que se esté considerando. Los contaminantes inorgánicos generalmente no son susceptibles de tratarse con sistemas de tipo biológico, es más recomendable emplear sistemas fisicoquímicos, tales como filtración, coagulación, sedimentación y precipitación química. Los compuestos que tienen mayor objeción generalmente son los elementos metálicos y ocasionalmente los iones amonio, nitrato, y sales disueltas incluyendo sales de cloruro y sulfato de sodio y calcio. Los contaminantes también pueden presentarse en forma de suspensiones, emulsiones, y flóculos, los cuales se remueven por combinación de métodos físicos y químicos (Izcapa, 2001, Fernández y Arcos, 1994).

A continuación, se presentan las recomendaciones generales que sirven de guía para el desarrollo de un sistema de tratamiento para aguas contaminadas con sustancias peligrosas.

Muchas tecnologías de tratamientos físicos y químicos, excepto los sistemas biológicos, no remueven realmente el contaminante, sólo lo transfieren o transforman a una fase o especie diferente en la cual puede ser concentrado, colectado y manejado más económicamente, Aunque en ocasiones la concentración de un contaminante puede incrementar su toxicidad potencial. Todos los sistemas de tratamiento tienen subproductos o corrientes residuales las cuales deben tratarse para su disposición, si el sistema de tratamiento remueve un material y concentra la “corriente subproducto”, ésta se puede volver un residuo peligroso y el costo de la disposición de la corriente residual puede tener un impacto mayor sobre los costos del tratamiento total.

Si están presentes emulsiones, sólidos suspendidos o aceites, se debe considerar su remoción como un primer paso en el tratamiento.

Si están presentes metales a niveles extremadamente bajos (generalmente menos de 0.1 mg/L) se debe considerar el uso de intercambio iónico, ultra-filtración u ósmosis inversa más que sedimentación y precipitación.

Los compuestos orgánicos solubles presentes en concentraciones menores de 1 mg/L se pueden remover con tratamiento biológico, pero con dificultad y sólo si el sistema se puede mantener y optimizar asegurando que se mantienen los niveles críticos de nutrientes requeridos para el crecimiento biológico.

La eficiencia de un sistema de tratamiento con carbón activado puede disminuir por la presencia de elementos inorgánicos comunes tales como sales y iones férricos. El carbón servirá como medio para el crecimiento de limo y bacterias, por lo tanto, los sistemas de tratamiento con carbón activado requieren desinfección y regeneración periódica.

La oxidación química con cloro no siempre resulta en la formación de halometanos u otros compuestos clorados. La oxidación usando cloro o dióxido de cloro a niveles correctos, puede reducir muchos compuestos a dióxido de carbono y agua. El dióxido de cloro es un oxidante más fuerte que el cloro, pero no tiende a formar halometanos o cloraminas. La oxidación con ozono generalmente es más cara y menos eficaz que la oxidación con dióxido de cloro o cloro (Izcapa, 2001).

3.9 Marco jurídico

Las leyes y herramientas jurídicas permiten la consulta, o bien el asesoramiento para desarrollar de manera segura las actividades económicas que involucran el manejo, transporte y uso de sustancias peligrosas. Con motivo particular de esta investigación se requirió el apoyo en las siguientes leyes y normas para fundamentar los objetivos y la justificación:

En caso de que se presente un accidente químico durante el transporte terrestre de sustancias peligrosas y ocurra la contaminación del suelo o en algunos casos inclusive del agua y atmósfera, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece que quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar al ambiente, está obligado a prevenir, minimizar, o reparar los daños que cause, así pues, deberá asumir los costos que dicha afectación implique. La prevención de las causas que los generan es el medio más eficaz para evitar los desequilibrios ecológicos (Artículo 15 fracción IV y VI). “La responsabilidad en el manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contrate los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría y los residuos sean entregados a dichas empresas, la responsabilidad por las operaciones será de éstas, independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los generó...” Capítulo VI artículo 151.

De acuerdo con la LGEEPA, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales previa opinión de las Secretarías de Energía, de Economía, de Salud, de Gobernación, y del Trabajo y Previsión Social, establece la clasificación de las actividades que deben considerarse como altamente riesgosas para el equilibrio ecológico, con base en las características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, de los materiales que se generen o manejen en los establecimientos industriales, comerciales o de servicios, considerando además, los volúmenes de manejo y la ubicación del establecimiento. Art. 146.

Hasta la fecha se han publicado en el Diario Oficial de la Federación dos listados sobre las sustancias tóxicas, explosivas e inflamables, cuyo manejo dentro de instalaciones industriales, comerciales y de servicio de las sustancias sea igual o superior a la cantidad de reporte establecida en los listados, determinan la actividad como altamente riesgosa. El primer listado se refiere al manejo de sustancias tóxicas y se publicó el 28 de marzo de 1990, el segundo listado se refiere al manejo de sustancias inflamables y explosivas y fue publicado el 4 de mayo de 1992.

La cantidad de reporte se define como la cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que, al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes. El Artículo 147 de la LGEEPA, establece que “la realización de actividades industriales, comerciales o de servicios altamente riesgosas, se llevarán a cabo con apego a lo dispuesto por esta Ley, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas oficiales mexicanas correspondientes”. “Quienes realicen actividades altamente riesgosas en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría un estudio de riesgo ambiental, así como someter a la aprobación de dicha dependencia y de las Secretarías de Gobernación, de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos”.

Asimismo, el Artículo 30 de la misma Ley, establece que “cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la presente Ley, la manifestación de impacto ambiental para nuevos proyectos deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente”.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, mediante el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, establece la clasificación de las sustancias según el grado de peligrosidad, las especificaciones de los vehículos a emplearse, las condiciones de seguridad y la documentación requerida, todo relacionado con el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos (DOF 20/11/2012). El fin es garantizar el transporte de forma segura de las sustancias comprendiendo su naturaleza, física y reacción para evitar daños antes, durante y después del transporte de éstas.

Referente a límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos según lo establecido en la NOM-138.SEMARNAT/SSA1-2012, los parámetros a evaluar se deben seleccionar dependiendo a la clase a la que pertenecen ya sea ligera, media o pesada, así como el uso de suelo y niveles máximos permisibles de cada contaminante en el suelo.

3.10 Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)

La Secretaría de Gobernación cuenta dentro de sus áreas con la Coordinación General de Protección Civil, de esta Coordinación dependen del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Dirección General de Protección Civil, de la cual depende el Centro Nacional de Comunicación y Operación (CENACOM). Este Centro recibe los reportes de casos relevantes de accidentes por parte de las unidades estatales de protección civil (LGPC, 2014).

El CENAPRED, es la institución técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil encargada de crear, gestionar y promover políticas públicas en materia de prevención de desastres y reducción de riesgos a través de la investigación, el monitoreo, la capacitación y la difusión. Tiene entre sus atribuciones, el apoyo técnico al Sistema Nacional de Protección Civil, así como la integración del Atlas Nacional de Riesgos (LGPC, 2014).

Esta instancia ha desarrollado el Atlas Nacional de Riesgos, el cual se basa en un sistema de información geográfica que permite realizar un análisis espacial sobre la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición, la información se muestra mediante mapas donde se integra información a nivel nacional, estatal, municipal y de localidades, este atlas cuenta con eventos naturales históricos, bases de datos, información geográfica y demás herramientas que permiten el análisis y la simulación de escenarios de riesgos, así como la visualización de zonas con posibles peligros y daños.

4. Planteamiento del problema

En México, las repercusiones que han tenido los accidentes más importantes con sustancias químicas peligrosas en cuanto a los daños a vidas humanas, a la salud, así como al ambiente son un punto de análisis para todas las entidades federativas, en las cuales se ubican empresas que manejen diversas sustancias químicas peligrosas (Sistema Nacional de Protección Civil, 2006).

Debido a la afectación en la salud de la población y al ambiente que provocan los accidentes con sustancias químicas peligrosas, resulta necesario identificar cuáles son las sustancias involucradas, para de esta manera determinar los posibles efectos a la salud de la población expuesta en el lugar cercano al accidente, así como proponer de manera general medidas de restauración del suelo y el agua que podrían implementarse en el sitio afectado, considerando las propiedades fisicoquímicas de las sustancias identificadas. El registro y análisis de la información sobre los accidentes químicos tiene como propósito llenar el vacío que existe

actualmente en el país sobre el tema, ya que la información referente al número de accidentes con sustancias químicas no se ha logrado conjuntar en su totalidad a partir de diferentes fuentes y realizar un análisis integral de esta información.

5. Justificación

Los diversos accidentes que han involucrado sustancias peligrosas nos muestran la necesidad de identificar la peligrosidad de estas, conocer el número de accidentes ocurridos en cada estado, lo cual permita en diferentes niveles de gobierno, realizar planes de atención de emergencias, así como establecer acciones de protección civil, que prevengan y puedan evitar catástrofes en el futuro.

De acuerdo con la LGPC (2014) el artículo 19, fracción XXII y el artículo 23, establecen que es obligación de la Secretaría de Gobernación (SEGOB) el desarrollo, así como la actualización del ANR, a través del CENAPRED como apoyo técnico del Sistema Nacional de Protección Civil. El artículo 41 de la LGEEPA (2018), establece que las entidades federativas y los municipios con arreglo a lo que dispongan las legislaturas locales, fomentarán la investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación, asimismo promoverán programas para el desarrollo de técnicas y procedimientos que permitan prevenir, controlar y abatir la contaminación, propiciar el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, preservar, proteger y restaurar los ecosistemas para prevenir desequilibrios ecológicos y daños ambientales, determinar la vulnerabilidad, así como las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático.

Con el análisis de la información generada a partir de los reportes de accidente se generan datos que pueden emplearse en el análisis del riesgo químico-tecnológico, que ayuden a establecer los puntos vulnerables, así mismo esta información puede ser integrada al ANR, como se establece en las funciones que tiene el CENAPRED para la generación de estadísticas y capas de información que permitan generar políticas públicas, conjuntando a los tres niveles de gobierno, así como a las diversas dependencias involucradas, que utilicen esta información para elaborar sus planes de trabajo.

Con base en los resultados obtenidos se identificarán las sustancias involucradas mayormente involucradas en accidentes carreteros, con el fin de proponer las técnicas de restauración más convenientes para los sitios que pudieran resultar contaminados con dichas sustancias.

5.1 Preguntas de investigación

De acuerdo con los reportes de accidentes con que se cuenta, ¿Cuáles son los estados con mayor número de accidentes relacionados con sustancias peligrosas?

¿Qué sustancias son las que se presentan con mayor frecuencia en los accidentes reportados?

¿Cuáles son las medidas de restauración para mitigar los daños por sustancias peligrosas, según la bibliografía?

6. Objetivo general

Analizar los accidentes con sustancias químicas peligrosas ocurridos en México y sus implicaciones a la salud de los pobladores y al ambiente, para proponer medidas generales de restauración de sitios contaminados.

Objetivos específicos

- Analizar las bases de datos de los años 2005, 2006, 2007, 2008 y 2009 de los accidentes con sustancias peligrosas, para elaborar estadísticas a partir de las cuales se pueda determinar el número de accidentes por entidad federativa, las principales sustancias peligrosas involucradas, los municipios donde han ocurrido más accidentes, el tipo de evento que se presenta, el número de muertos y heridos y las probables causas.
- Clasificar los accidentes por tipo de evento (fuga, derrame, incendio o explosión) y por el lugar donde se presentan (urbano, industrial o durante el transporte).
- Determinar las principales sustancias químicas peligrosas involucradas en accidentes, para que las unidades de protección civil estatales y municipales, conozcan qué tipo de sustancia atenderán durante la emergencia, el tipo de evento que ocurrió como fuga, derrame, incendio o explosión, para que puedan diseñar las medidas de atención y cuenten con el equipo de protección personal adecuado.
- Determinar los posibles daños a la salud y al ambiente ocasionados por las principales sustancias involucradas en accidentes.
- Proponer de manera general las posibles medidas de restauración en agua y suelo en caso de accidentes que puedan dañarlos.

7. Método

1. A partir de la captura y el análisis de los reportes de caso proporcionados por el CENACOM se elaboraron gráficas que representan los acumulados para accidentes industriales y urbanos durante cinco años, el periodo de estudio se consideró del año 2005 al 2009.
2. Se registró en una hoja de cálculo la información generada por el CENACOM a partir de los “reportes de caso” relacionados con los accidentes que involucran sustancias químicas peligrosas, ocurridos en los años 2005 al 2009.
3. La hoja de cálculo se elaboró con los siguientes campos: número de muertos, número de heridos, entidad federativa, municipio, causas del accidente, tipo de accidente, clave del municipio, descripción del evento. Así como, de existir, se registró la distancia de afectación o distancia de evacuación y la cantidad de sustancia involucrada.
4. Se clasificaron los eventos según hayan presentado: fuga, derrame, incendio y explosión y si es de origen industrial, urbano o durante el transporte.
5. Una vez capturada la información requerida, se analizó y se elaboraron gráficas de acuerdo con el porcentaje de accidentes industriales y urbanos, el número y porcentaje de accidentes por estado, tipo de evento que ocurre en cada accidente (fuga, derrame, incendio o explosión), en el caso particular de los incendios urbanos se analizaron los lugares donde se presentaron los accidentes (casa habitación, basureros, comercios, entre otros) y la causa del accidente (desconocida, corto circuito, provocado, entre otros).
6. A partir del análisis de la información se construyó un panorama sobre el número de accidentes, tipo de evento ocurrido, afectaciones a la población (muertos y heridos), sustancias involucradas, causas del accidente y sitio del evento. Si la información lo contempla las cantidades de material liberadas durante el evento.
7. A partir de los análisis de la información, se determinó dónde impactó el evento (suelo, agua, manto freático) ya que en algunos casos principalmente en transporte se reportaban lugares, así como daños al ambiente provocados por el evento, para proponer medidas ya sean de: restauración ecológica, descontaminación, tratamiento de suelo o agua dependiendo de la sustancia,

cantidad involucrada, información que se disponga respecto al accidente o el análisis de la afectación a la población.

8. Por último, se describieron las posibles afectaciones a la salud de la población que ocasionan las sustancias químicas, aunado a las propuestas de restauración, rehabilitación, recuperación y remediación para que incidan en la disminución y reducción de la vulnerabilidad de la población a sustancias químicas peligrosas.

La selección de los tratamientos o tecnologías que podrían utilizarse en la recuperación de un suelo contaminado requiere de un diagnóstico formado a partir de información referente a los siguientes aspectos:

- Ubicación geográfica del sitio afectado, así como el uso del suelo
- Origen de la contaminación, tamaño y distribución de la sustancia
- Vías de acceso al área afectada, poblaciones, cuerpos de agua.
- Tipo de vegetación, clima y topografía del sitio
- Características hidrogeológicas. Volke y Velasco, (2002).

8. Resultados

Derivado de la captura y elaboración de gráficas se obtuvieron los siguientes datos estadísticos.

8.1 Accidentes urbanos e industriales

El total de accidentes ocurridos durante el periodo 2005 a 2009 fue de 737. En la figura 4 y las tablas 2 y 3 se presenta el total de accidentes registrados por año dando como resultado 272 de tipo industrial y 465 urbanos. Se observa en la tabla 2 que el año con mayor número de accidentes de tipo urbano fue 2009 con 125. En el año 2009 se observa que fue mayor la diferencia entre los accidentes urbanos e industriales siendo más del doble los de tipo urbanos. Mientras que para los accidentes industriales se presentó la mayor incidencia durante 2008 con 62 casos.

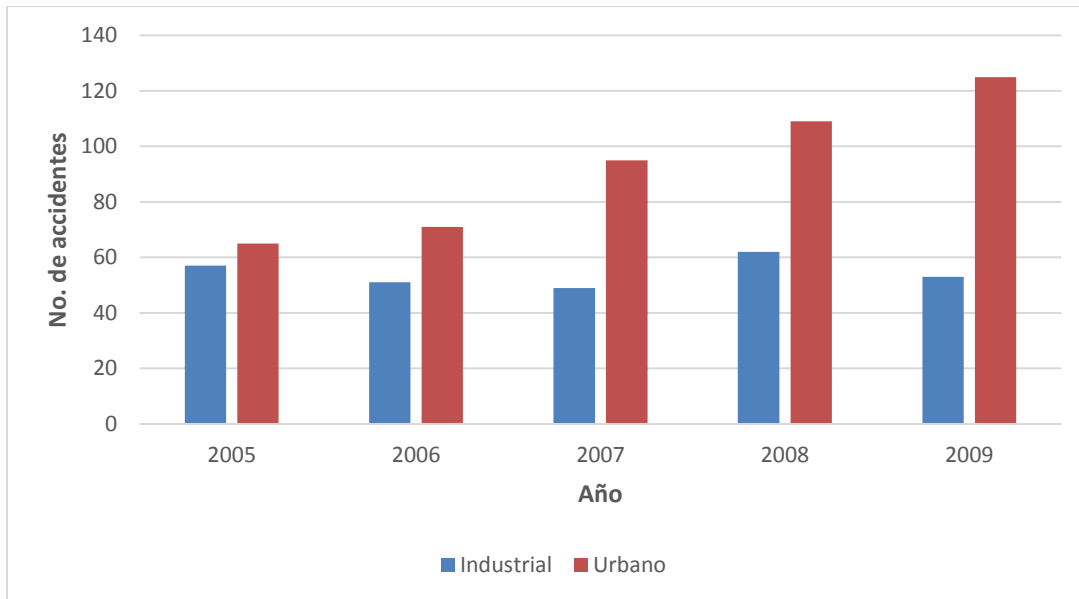


Figura 4. Accidentes urbanos e industriales por año para el periodo 2005 a 2009.

En la figura 5 se muestra la ocurrencia del total de los eventos urbanos e industriales y los porcentajes que representan, se observa que son más los accidentes urbanos que los industriales reportados en el periodo de estudio señalado.

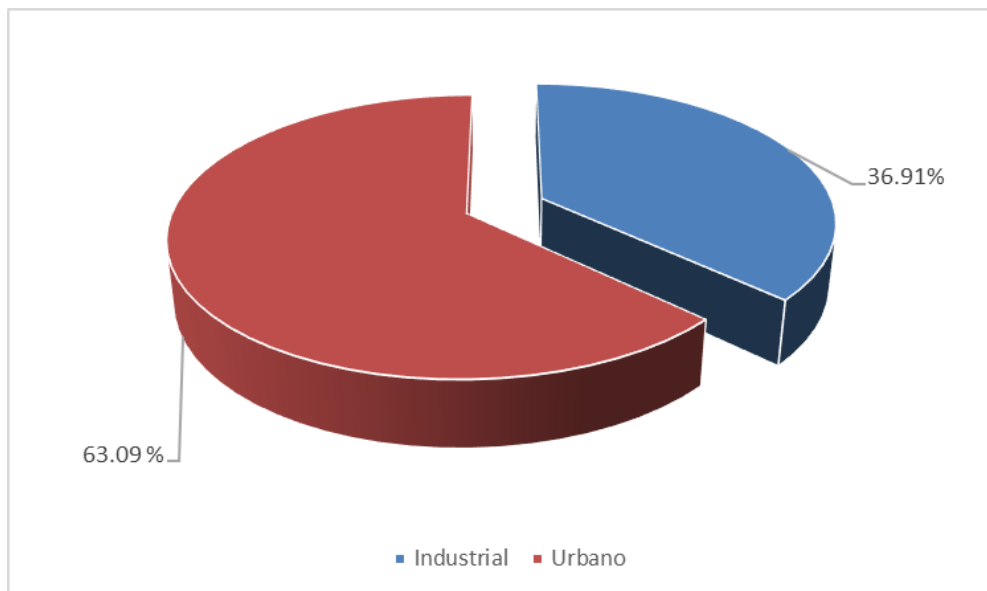


Figura 5. Porcentaje de accidentes industriales y urbanos: 2005-2009

En las tablas 2 y 3, se muestra el número de accidentes con sustancias peligrosas de acuerdo con el evento químico que se presenta para los accidentes industriales y urbanos, respectivamente, siendo estos eventos fuga, derrame, incendio y explosión reportados por año. Se observa que los incendios son los accidentes más

frecuentes durante este periodo, con 91 incidentes de tipo industrial y 235 de tipo urbano, también se detectó la presencia de eventos simultáneo incendio-explósión.

De acuerdo con ambas tablas 2 y 3, se observa que en el año 2008 se registró el mayor número de accidentes industriales con 62 incidentes, con menor frecuencia en el año 2007 se registraron 49 incidentes de tipo industrial, referente a los eventos urbanos el año 2005 presentó el menor número de accidentes en el periodo considerado (cinco años) con 65 casos reportados y el 2009 con 125 eventos registrados, fue el año con mayor número de incidencias.

Tabla 2. Accidentes industriales clasificados por evento en el periodo de 5 años

Tipo de evento	Industrial					Total
	2005	2006	2007	2008	2009	
Incendio	12	21	20	17	21	91
Derrame	20	15	7	13	9	64
Explosión	14	9	11	15	12	61
Fuga	11	6	11	16	11	55
Incendio-explosión	0	0	0	1	0	1
Total	57	51	49	62	53	272

Tabla 3. Accidentes urbanos clasificados por evento en el periodo de 5 años

Tipo de evento	Urbano					Total
	2005	2006	2007	2008	2009	
Incendio	40	33	34	54	74	235
Derrame	4	3	6	7	2	22
Explosión	19	29	44	37	36	165
Fuga	2	6	9	11	13	41
Incendio-Explosión	0	0	0	0	0	0
Atentado	0	0	1	0	0	1
Total	65	71	95	109	125	465

En la tabla 4 se presenta el número total de accidentes por año donde se observa que en 2009 se presentó el mayor número de accidentes con 178, mientras que los años 2006 y 2005 presentaron menor número de accidentes con 122 eventos para cada año.

Tabla 4. Número de muertos y heridos por entidad federativa por año.

Entidad	2009			2008			2007			2006			2005			Total de accidentes	Total de Muertos	Total de heridos
	No. de Accidentes	No. de Muertos	No. de Heridos	No. de Accidentes	No. de Muertos	No. de Heridos	No. de Accidentes	No. de Muertos	No. de Heridos	No. de Accidentes	No. de Muertos	No. de Heridos	No. de Accidentes	No. de Muertos	No. de Heridos			
Aguascalientes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Baja California	7	6	28	3	1	5	6	1	3	3	3	1	3	4	0	22	15	37
Baja California Sur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
Campeche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chiapas	3	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	5	11	0	5
Chihuahua	2	0	0	0	0	0	2	0	0	1	1	7	0	0	0	5	1	7
Distrito Federal	43	2	73	28	2	25	24	3	71	15	0	33	16	2	23	126	9	225
Coahuila	13	0	7	2	0	0	4	0	98	3	66	20	0	0	0	22	9	125
Colima	0	0	0	0	0	0	4	1	2	1	0	0	0	0	0	5	1	2
Durango	0	0	0	2	2	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	10
Guanajuato	7	0	44	18	4	19	13	0	60	15	1	50	10	4	15	63	9	188
Guerrero	4	2	23	4	5	6	2	1	3	5	0	10	1	0	1	16	7	43
Hidalgo	3	1	0	5	2	7	4	1	5	5	2	1	1	0	0	18	6	13
Jalisco	9	12	20	6	6	6	8	5	14	3	2	19	3	0	9	29	25	68
Edo. México	16	1	14	21	6	56	20	17	26	17	15	60	23	17	116	97	56	272
Michoacán	5	0	9	5	0	4	5	5	9	3	4	1	1	0	0	19	9	23
Morelos	3	3	5	5	1	4	2	0	0	4	0	5	7	3	7	21	7	21
Nayarit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	1
Nuevo León	7	0	33	11	0	21	3	0	4	4	1	14	2	1	4	27	2	76
Oaxaca	2	3	9	0	0	0	2	1	2	2	2	1	2	6	3	8	12	15
Puebla	4	12	68	5	6	9	4	2	7	3	1	1	5	9	0	21	30	85
Querétaro	0	0	0	1	0	31	3	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	36
Quintana Roo	3	0	8	1	0	3	3	2	18	0	0	0	0	0	0	7	2	29
San Luis Potosí	2	0	1	3	2	2	1	0	5	2	0	3	0	0	0	8	2	11
Sinaloa	1	0	1	2	0	0	2	0	9	2	0	20	0	0	0	7	2	30
Sonora	7	48	17	2	0	19	3	0	0	3	0	5	3	0	5	18	48	46
Tabasco	8	0	4	3	0	0	5	21	6	5	0	9	7	8	46	28	29	65
Tamaulipas	3	0	0	4	0	123	4	3	9	7	1	9	6	3	4	24	7	136
Tlaxcala	3	1	3	0	0	0	4	0	1	4	0	3	1	1	2	12	2	9
Veracruz	16	1	30	32	2	15	10	0	17	12	15	17	22	14	9	92	32	88
Yucatán	5	0	2	4	0	8	2	0	0	2	0	35	0	0	0	13	0	45
Zacatecas	2	0	7	2	0	4	2	1	0	1	0	0	0	0	0	7	1	11
Total	178	92	406	171	39	377	144	64	369	122	114	324	122	74	250	737	327	1723

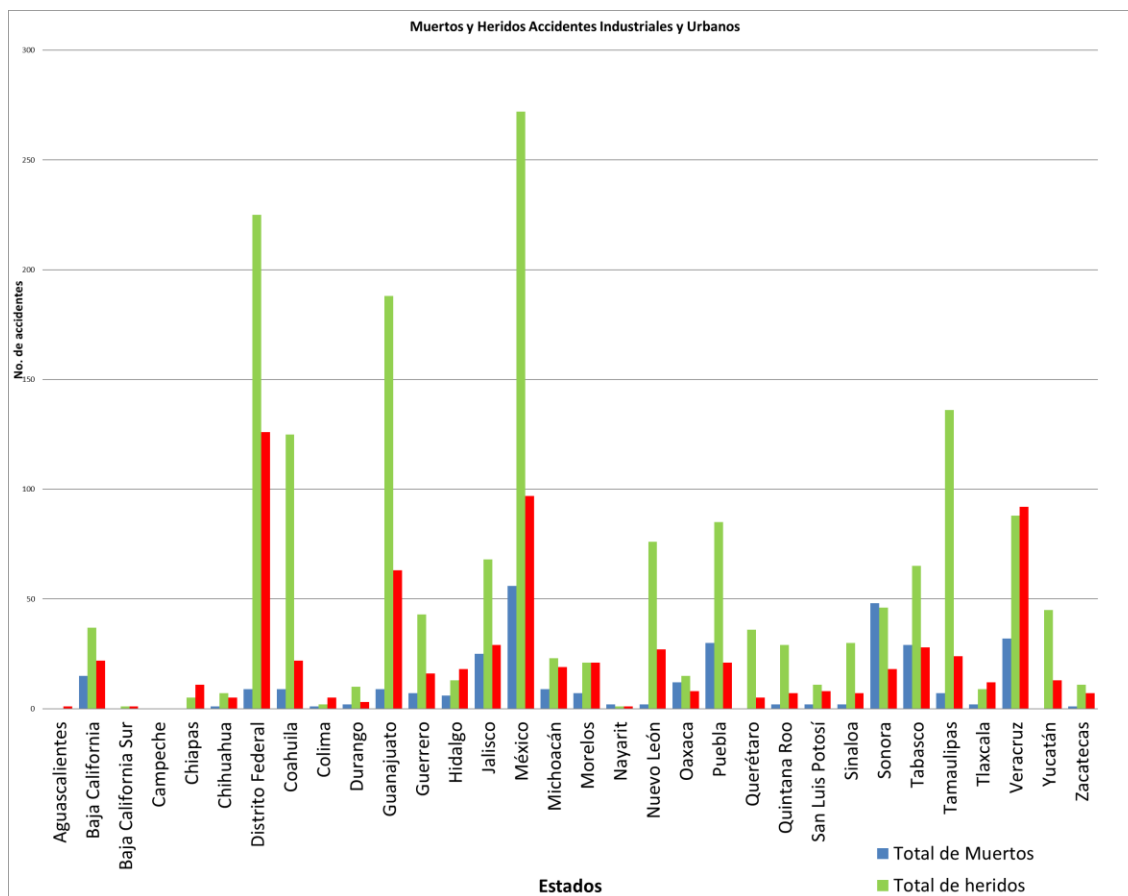


Figura 6. Concentrado de accidentes, número de muertos y número de heridos en el periodo 2005-2009

Aquellos estados que presentaron mayor número de accidentes durante esos cinco años fueron el Distrito Federal hoy CDMX con 126 accidentes, Estado de México con 96, Veracruz 92 y Guanajuato 63. El Estado de México y Sonora presentaron mayor número de muertos con 56 y 48 decesos, en cuanto a heridos el Estado de México resultó con mayor número de afectados con 272, Distrito Federal hoy CDMX 225 y Guanajuato con 188 lesionados (ver tabla 4 y figura 6). Los estados con menor número de accidentes fueron Campeche el cual no reportó ningún caso, Aguascalientes y Baja California Sur con un accidente en ambos estados en el periodo de cinco años.

Con lo anterior podemos determinar aquellos estados con mayor número de accidentes industriales y urbanos, lo cual apunta a que existe un riesgo mayor para dichos estados, se deben detectar aquellas posibles causas que influyen en la presencia de accidentes, así como las sustancias involucradas y el tipo de evento ocurrido en los estados con mayor incidencia de accidentes.

Del año 2005 al 2009, se cuantificaron 62 sustancias involucradas en los incidentes, considerando su naturaleza química, propiedades fisicoquímicas, incluso algunas

sustancias que no representan una cantidad apreciable en cuanto a su frecuencia, pero si forman parte de los compuestos altamente tóxicos o perjudiciales a la salud.

Las afectaciones debido a los accidentes industriales radican en la presencia de concentraciones humanas cercanas a las instalaciones donde se llevan a cabo actividades que manejan sustancias peligrosas, además como consecuencia de los accidentes ocurridos en las áreas industriales pueden afectarse agua, suelo, manto freático, dependiendo de la sustancia, a pesar de las medidas que tome la empresa y/o autoridades, para evitar o detener el avance del evento hacia otras áreas.

Las zonas urbanas presentan riesgo debido al grado de exposición a sustancias peligrosas y otros factores que pueden llegar a causar accidentes dentro de viviendas, comercios, bodegas, entre otras, como es la falla en las instalaciones eléctricas, instalaciones de gas LP y sustancias inflamables o tóxicas presentes en los hogares.

En cuanto al análisis de las principales sustancias involucradas en los accidentes, los resultados se muestran en la tabla 5 y en la figura 7 en ellas se presentan las sustancias así como su porcentaje a partir del total de accidentes, se puede observar que la pirotecnia representa el 24.2% del total de accidentes, seguida por gas LP con 12.4% de los eventos, sustancia desconocida 7.7%, y asfalto 5.5% otras sustancias representan el 47% del total de sustancias involucradas. Es decir, del total de 466 eventos la pirotecnia y el gas LP ocuparon el mayor número de incidentes con 113 y 58 eventos, mientras que sustancias como la turbosina y el acetileno sólo presentaron un evento para cada sustancia, ver figura 7. En los reportes de caso se presentaron accidentes con gas los cuales no pertenecen a las categorías anteriores como el gas grisú (hidruro de metilo o gas natural comprimido) Hoja de seguridad HDS-PEMEX-TRI-SAC-9 y NOM-018-STPS-2000, el cual también es definido como gas natural pero en este caso se presentó en una mina y no en su forma comercial u otros no especificados.

No todos los accidentes involucraron sustancias peligrosas, en el caso de los eventos catalogados como incendios.

Tabla 5. Sustancias involucradas y número de accidentes del 2005 al 2009.
Elaborado a partir de las sustancias detectadas en accidentes urbanos e industriales en un periodo de 5 años.

Accidentes por sustancia	
Sustancia	Total
pirotecnia y pólvora	113
gas LP	58
Amoniaco	30
Petróleo	30
gas natural	26
Gasolina	23
Gas	15
aceite	14
diésel	8
alcohol etílico	7
hidrocarburo	7
ácido clohídrico o muriático	6
solventes	6
cloro	5
hipoclorito de sodio	5
gas butano	4
combustóleo	4
asfalto	3
dióxido de carbono	3
polietileno	3
artefacto explosivo	3
combustible	3
etano	3
gasóleo	3
hexano	3
gas amargo	2
parafina	2
etileno	2
explosivo	2
ácido sulfúrico	2
metano	2
vapor	2
bentonita	1
nitrógeno	1
paratión metílico	1
monóxido de carbono	1
óxido de etileno	1
2-ethylhexanol	1
acetalcopolímero	1
ácido fosfórico	1
benceno	1
cloruro de furoilo	1
cloruro de fumarilo	1
dinamita	1
mercaptanato	1
residuos tóxicos	1
chapopote	1
desechos	1
ácido glutámico	1
carburo de calcio	1
Butano	1
gas cloro	1
poliuretano	1
Alfanatol	1
gas grisú	1
polipropileno	1
ácido nítrico	1
ácido sulfhídrico	1
Aerosol	1
formiato de sodio	1
nitrato de potasio	1
Turbosina	1
Acetileno	1
desconocida	36
Total	466

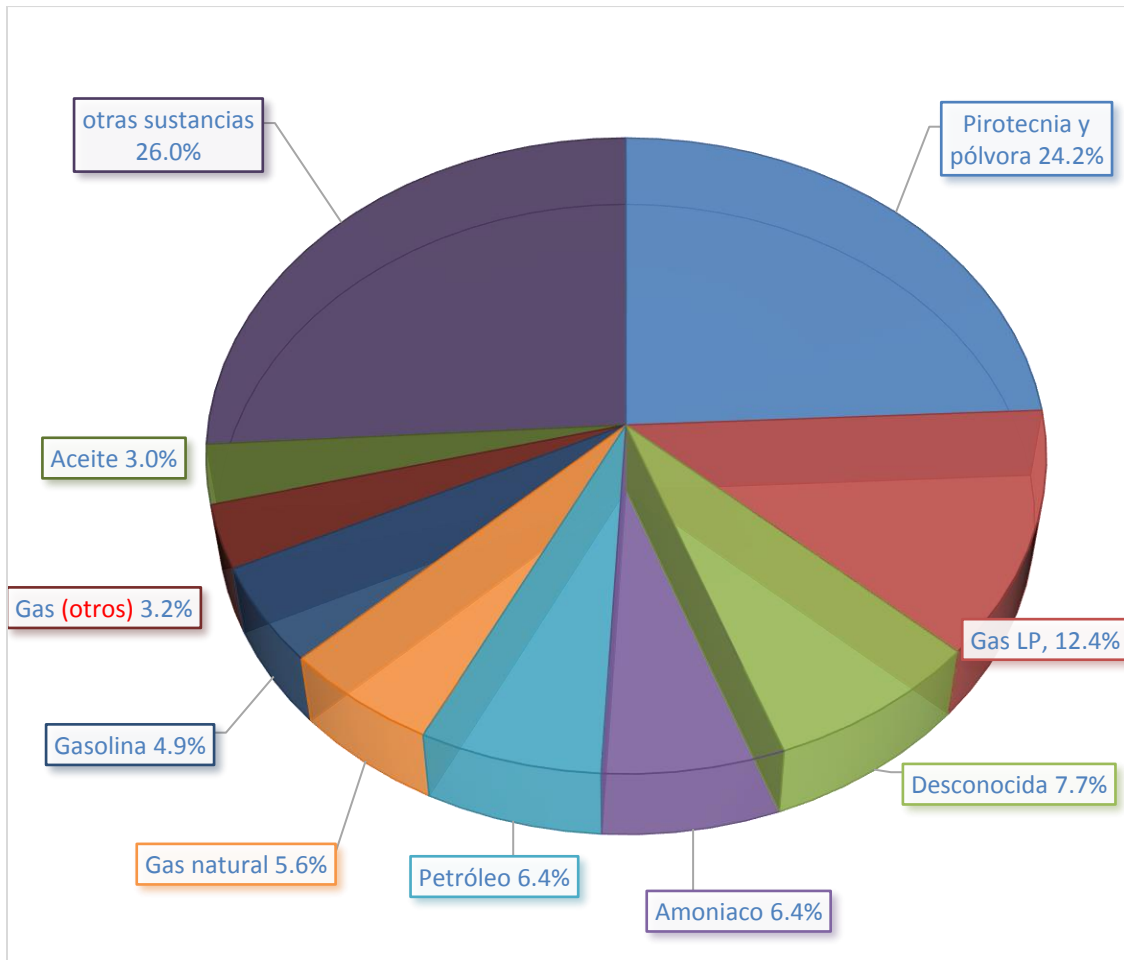


Figura 7. Análisis de sustancias que aparecen en mayor frecuencia (2005-2009)

En la figura 8 se presentan en orden de frecuencia de mayor a menor, las sustancias involucradas en accidentes de tipo industrial y urbano, alcohol etílico, amoniaco, otras sustancias, ácido muriático, las sustancias con mayor número de accidentes. En otras sustancias se colocaron aquellos eventos donde no se describía el tipo de sustancia involucrada.

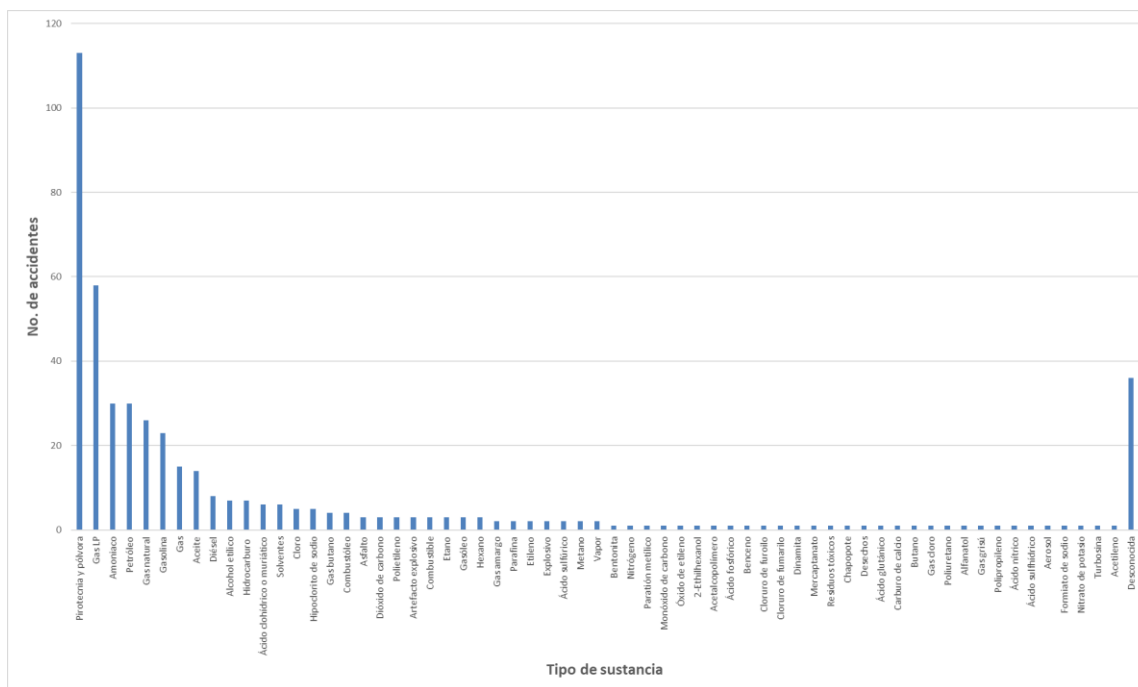


Figura 8. Sustancias presentes en accidentes industriales y urbanos en el periodo de 5 años.

8.1.2. Incendios urbanos

También se llevó a cabo un análisis específico para los incendios urbanos ya que son los eventos que se presentan con mayor frecuencia. La figura 9 presenta los lugares donde se han presentado el mayor número de estos. Entre los que se encuentran; viviendas, comercios, basurero o relleno sanitario y mercados entre otros. Los incendios representan una tercera parte del total de accidentes en cinco años en el caso de los accidentes de tipo industrial, y cerca de la mitad en los de tipo urbano (ver tabla 2 y 3). El mayor número de accidentes por incendios se reportó en viviendas (49 eventos), comercios (35 eventos) y basureros o rellenos sanitarios (23 eventos), aquellos accidentes reportados en; bodega, gasolinera, unidad de reparto y mufa, fueron considerados dentro de otra categoría con 60 accidentes reportados durante el periodo de 5 años.

Las plazas comerciales y guarderías son las de menor frecuencia de accidentes presentar, con 4 y 2 accidentes durante el periodo. Aunque no es causa de alivio, ya que representan un riesgo con fuertes repercusiones al ser afectadas instalaciones de conglomeración de personas, así como las guarderías por el potencial de pérdidas humanas a tempranas edades.

En la figura 10 se observa la clasificación de las causas de los incendios urbanos, siendo el origen desconocido la causa reportada con mayor frecuencia 165 eventos, seguido de corto circuito con 36 eventos, error humano 19 eventos, fuga de gas con

7 eventos, y “otros” con 5 eventos reportados; en esta categoría están el clima, quema de basura, incendio en cercanías, veladora, pirotecnia, por lo que podemos inferir que las instalaciones eléctricas presentan una fuente persistente que puede provocar incendios, ya que no podemos deducir ni confirmar las causas desconocidas, debido a la información disponible en los reportes.

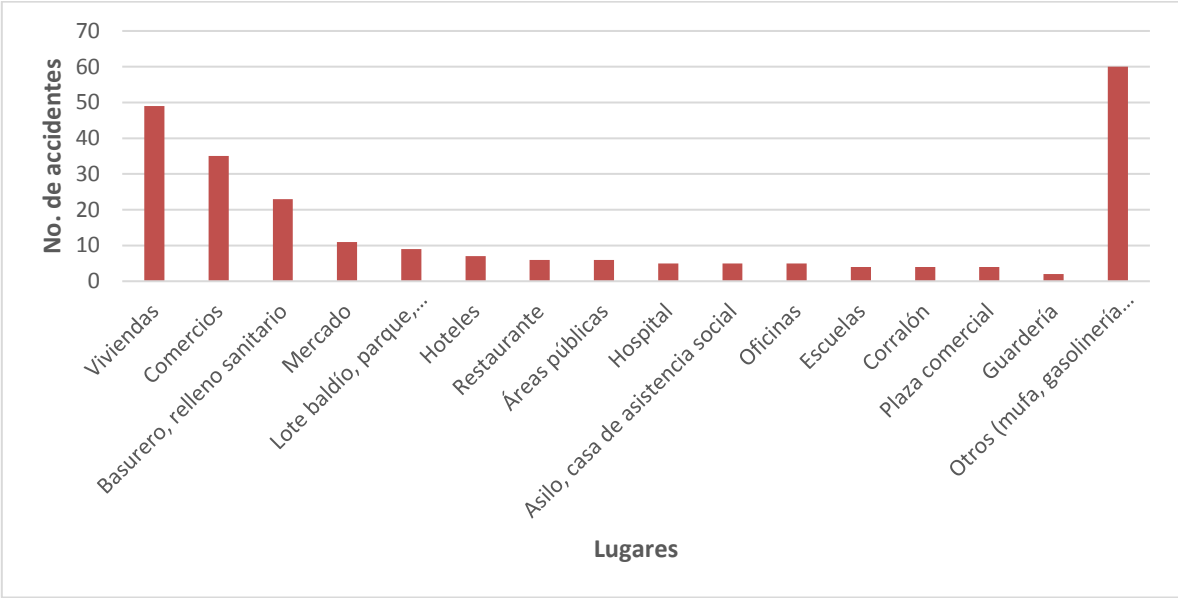


Figura 9. Lugares donde se presentan los incendios urbanos

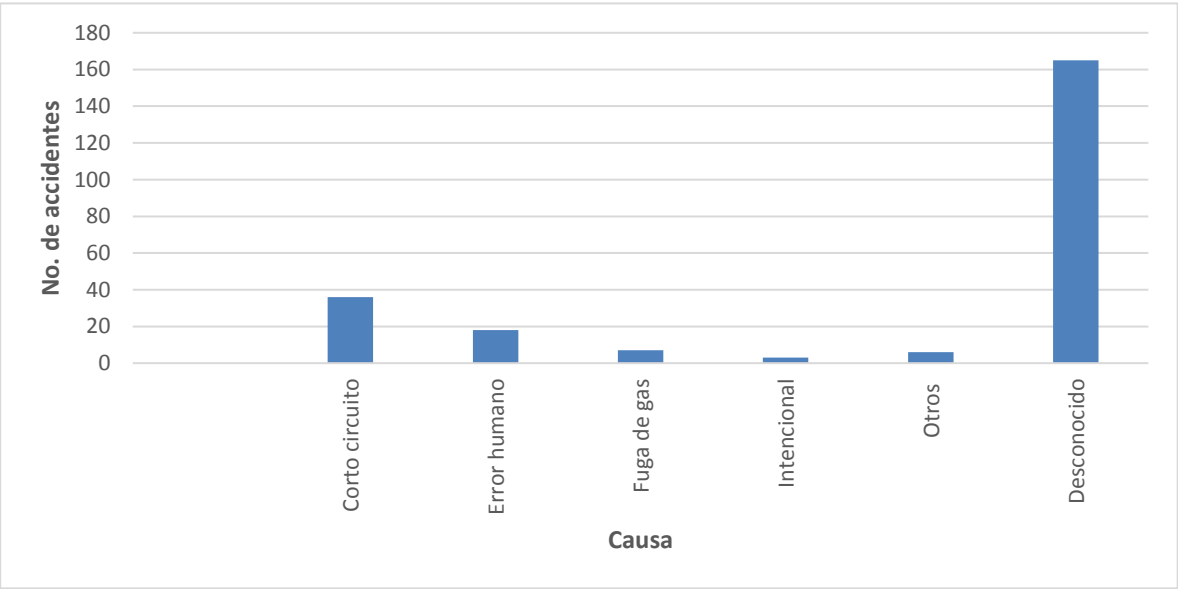


Figura 10. Causas de incendios urbanos periodo 2005-2009.

También se analizaron los “materiales” presentes en los accidentes industriales y urbanos. En la figura 11 se observa que la madera y el menaje de casa son los materiales involucrados con mayor frecuencia en accidentes junto con “otros productos” que no caben dentro de otra categoría entre los cuales destacan: madera, menaje de casa, mercancía, basura, tela y algodón y equipos. La categoría de otros productos ocupó un segundo lugar con mayor número de accidentes, esto debido a que la presencia de otros materiales no era tan frecuente como en las demás categorías.

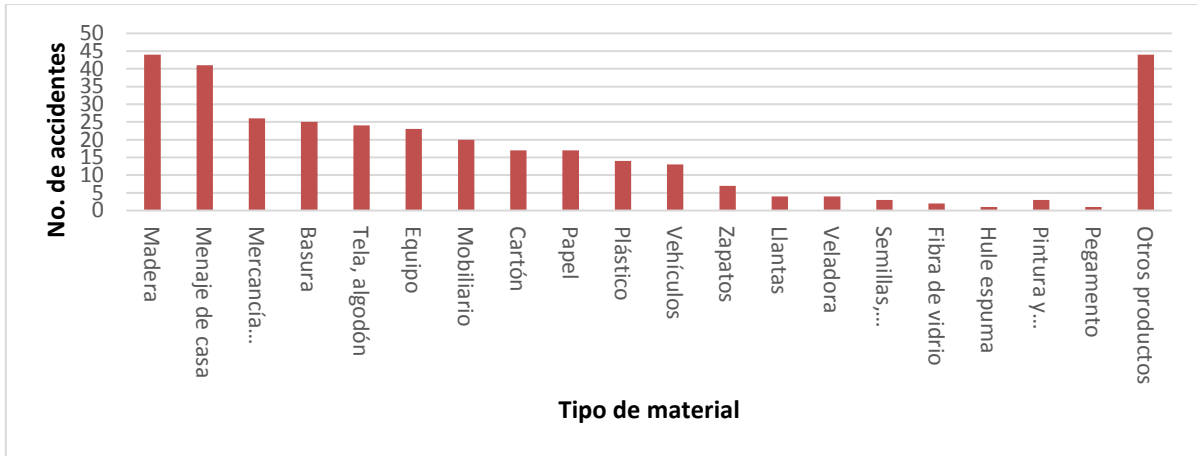


Figura 11. Materiales involucrados en accidentes industriales y urbanos período 2005 a 2009.

8.2.1. Accidentes en el transporte

Los accidentes que involucran sustancias peligrosas durante el transporte (período 2005-2009), han mostrado una mayor incidencia en aquellos estados con refinamiento de petróleo. Así mismo, las sustancias derivadas de los hidrocarburos están presentes en el mayor número de accidentes, pero no son las únicas involucradas en accidentes carreteros, hay que añadir otras sustancias tales como ácido sulfúrico, acetatos, ácidos, amoníaco y azufre.

En la figura 12, se presenta el número de accidentes ocurridos por año durante el transporte terrestre de sustancias peligrosas, en la cual se observa que el año 2009 presentó el mayor número de accidentes en el estado de Sonora con mayor incidencia tanto para el año 2009 como para los cuatro años anteriores. Cabe mencionar que estados como Aguascalientes sólo presentaron un incidente para el 2018.

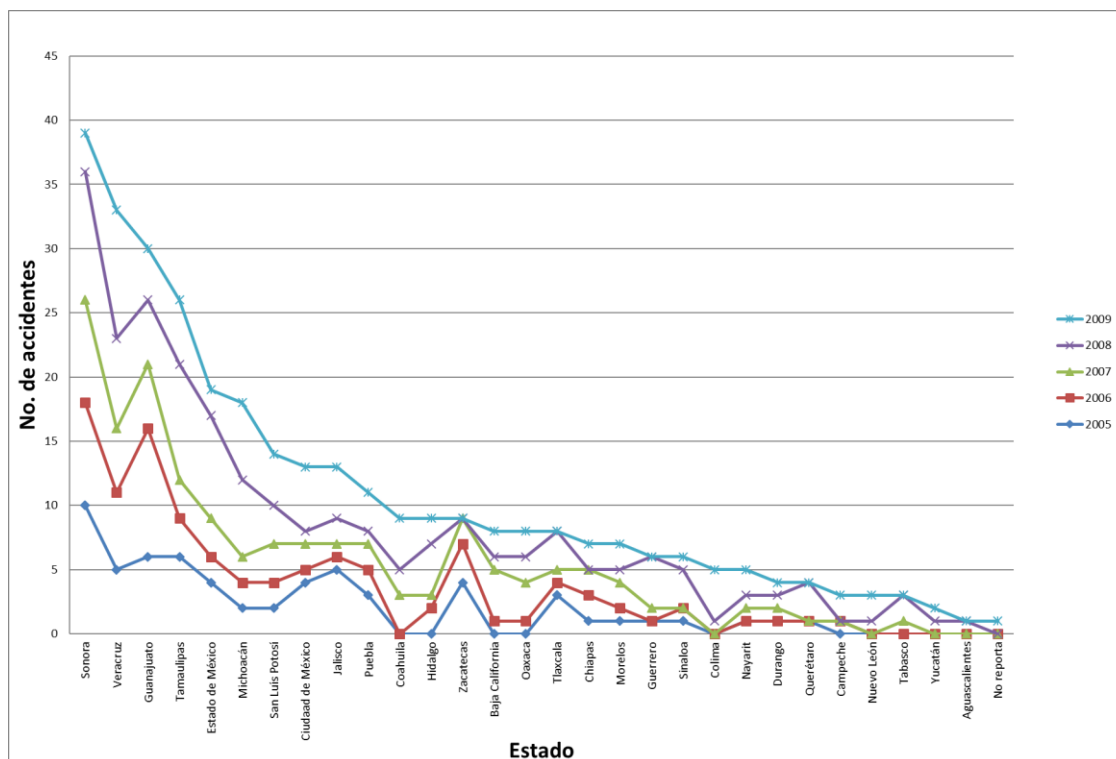


Figura 12. Accidentes por año durante el transporte terrestre de sustancias por entidad federativa.

En cinco años de accidentes reportados por el CENACOM los ocurridos durante el transporte terrestre fueron un total de 324, de los cuales más del 60% se catalogaron como derrame, de éstos solo algunos reportaron la cantidad de producto liberado, así como las áreas afectadas durante dicho evento, con ello podremos en estos casos proponer medidas para remediar sitios contaminados con sustancias que tengan características similares.

En las figuras 13 y 13.1 se observa el número de eventos, divididos de acuerdo con el tipo de accidentes ocurridos durante el transporte de sustancias peligrosas tanto el acumulado de los cinco años como por año, esto es derrames, incendios, fugas y explosiones con mayor incidencia de derrames con 200 eventos, incendios con 37 eventos, fugas con 33 eventos, explosiones con 22 eventos, explosión e incendios con 2 eventos, por último los accidentes sin evento por derrame de sustancias peligrosas fueron 22.

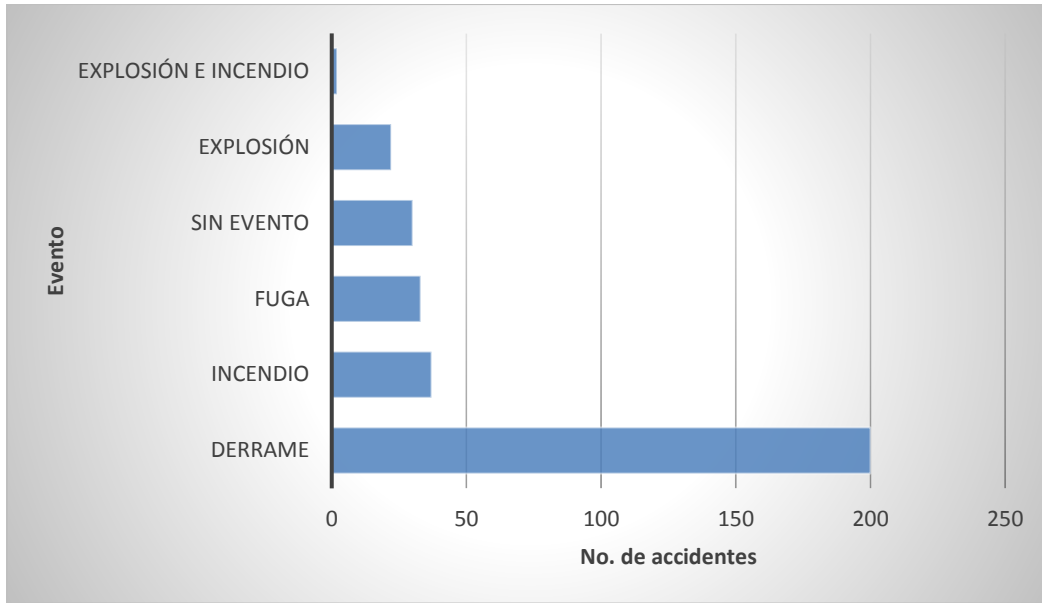


Figura 13. Tipo de eventos que se presentan en los accidentes ocurridos durante el transporte terrestre 2005–2009.

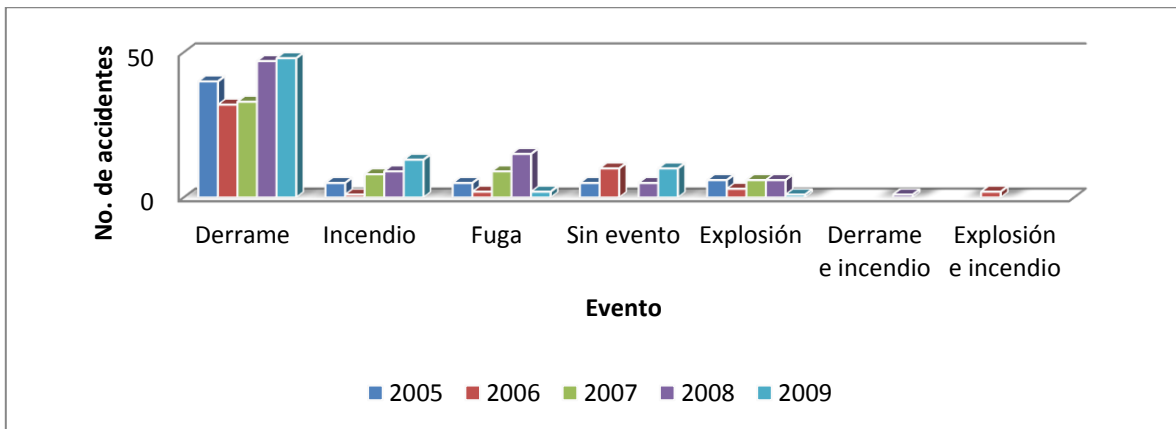


Figura 13.1. Número de accidentes clasificados por tipo de evento por año.

Los estados de Sonora con 39 eventos, Veracruz con 33 eventos y Guanajuato con 30 eventos, presentaron mayor número de accidentes durante el período de 5 años analizados. Ver figura 14.

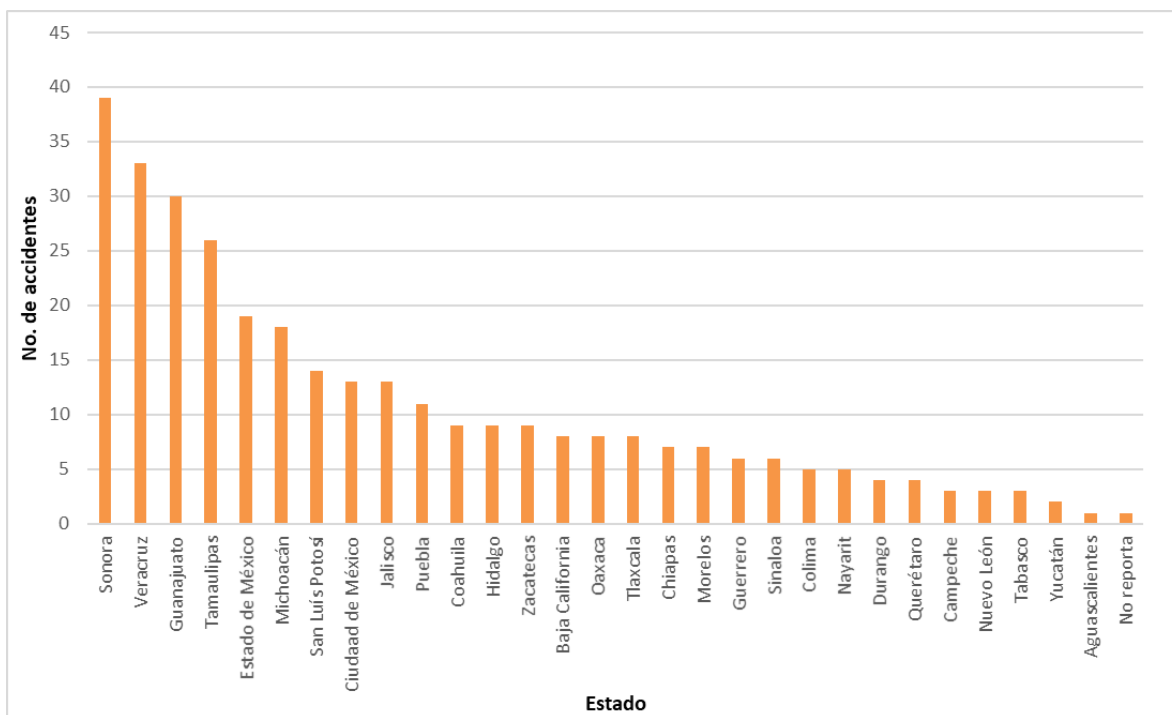


Figura 14. Total de accidentes en el transporte por entidad federativa en el periodo 2005-2009.

El análisis por tipo de vehículo involucrado en los accidentes reportados en el periodo de estudio se muestra en la figura 15, donde se aprecia que son los autotranques las unidades de transporte que registran el mayor número de accidentes.

La definición de autotranque incluye a camión-tanque, tractocamión con semirremolque destinado al transporte de líquidos, gases licuados o sólidos en suspensión. De acuerdo con la figura 15 los autotransportes de tipo autotranque han estado involucrados en la mayor parte de los accidentes con 213 eventos, seguido de los vehículos con doble semirremolque con 55 eventos y camión repartidor de cilindros de gas LP presentan menor incidencia en accidentes con 6 eventos. Mientras que aquellos eventos donde se involucraron algún otro tipo de vehículo o contenedor sumaron 50 eventos.

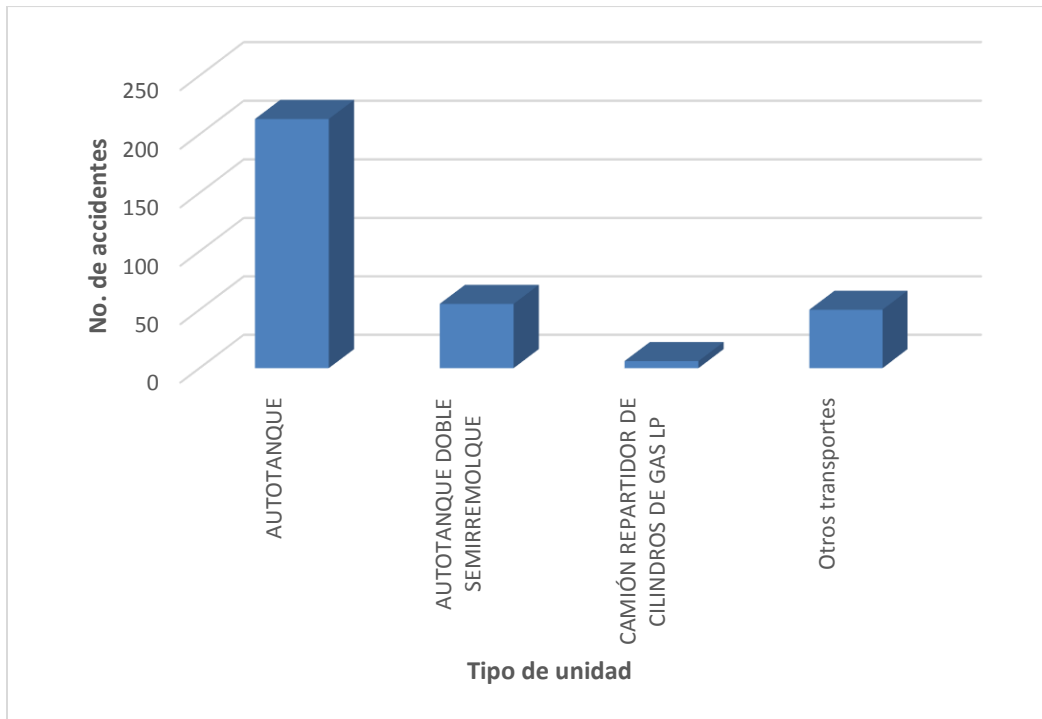


Figura 15. Accidentes acontecidos en el periodo 2005-2009 clasificados por tipo de unidad de transporte.

El volumen de la sustancia o material transportado corresponde al 80 o 90% de la capacidad de los contenedores en que se transportan las sustancias, debido a que no se llenan al 100% de la capacidad del contenedor, en otros casos el contenedor se encontraba vacío, pero se presentaba el derrame del combustible presente en el tanque del vehículo, algunos accidentes no especificaban la capacidad del contenedor, pero sí la cantidad de sustancia derramada o viceversa. Asimismo, las cantidades liberadas durante los accidentes variaban, ya sea desde un “goteo” hasta la pérdida total del producto.

En la figura 16 se presentan las capacidades (volumen/litros) de los vehículos involucrados en accidentes y los porcentajes que representan, cabe mencionar que los valores mostrados en la figura no representan el total de los vehículos presentes en accidentes de transporte terrestre, solamente aquellos transportes de acuerdo con su capacidad (litros) en total 101 eventos, y sólo se tomaron en cuenta aquellos que transportaban sustancias en estado líquido o gas, algunos eran transportados en forma sólida estos no se tomaron en cuenta para la figura 14. Los vehículos con mayor cantidad de accidentes acumulado de cinco años fueron aquellos con capacidad de 40,000 a 45,000 de sustancia con 29.70%, aquellos que presentaron menor porcentaje de accidentes fueron aquellos vehículos de 5,000 a 10,000 litros y 70,000 a 82,000 litros de capacidad, que representan poco menos del 2% de los transportes representados en la figura 16.

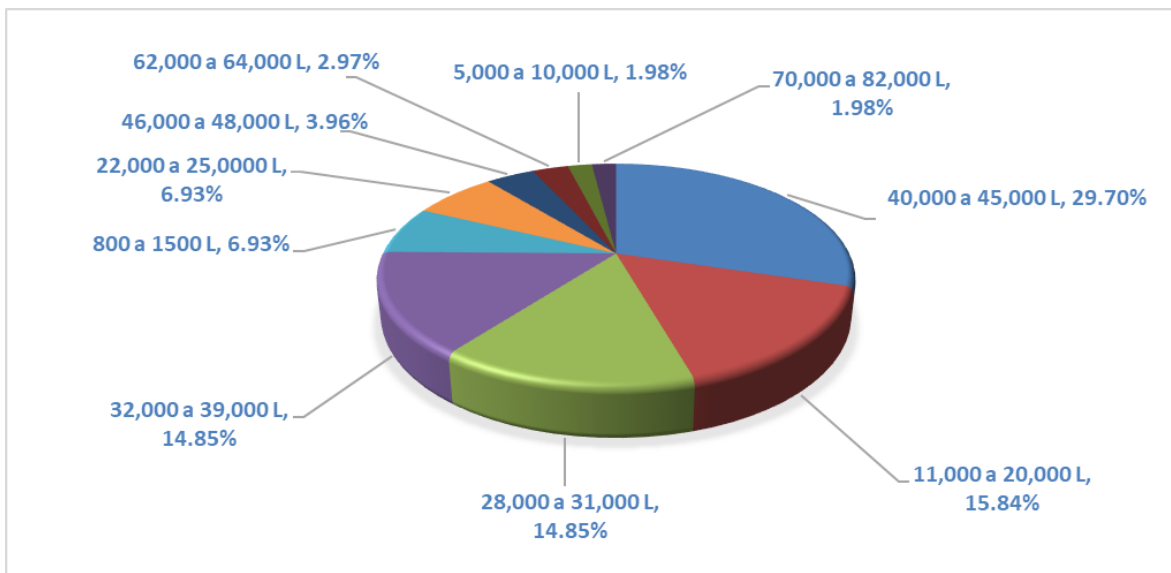


Figura 16. Vehículos involucrados en accidentes de acuerdo con su capacidad (L) y porcentaje del total de accidentes.

De acuerdo con la tabla 6, las causas por las que se derivaron los accidentes de transporte se clasificaron en: conductor, desconocidas, vehículo y camino (carretera o vías). Siendo el conductor, el factor de causa con mayor frecuencia en accidentes, seguido por fallas en el vehículo (se quedó sin frenos o falla mecánica), negligencia (venta ilegal de producto, falta de capacitación, reparaciones deficientes) y por último el estado del camión o vías (baches, estado de la carretera, falta de mantenimiento, entre otras). En total se registraron 324 eventos relacionados con sustancias peligrosas involucradas en transporte.

Tabla 6. Causas de los accidentes durante el transporte de sustancias peligrosas (2005-2009).

Causas/año	2005	2006	2007	2008	2009	Total
Desconocida	46	38	44	62	59	249
Vehículo	4	2	3	3	1	13
Conductor	11	9	9	18	13	60
Camino (vías o carreteras)	-	1	-	-	1	2
Total	61	50	56	83	74	324

8.2.2. Sustancias involucradas en accidentes de transporte

Se puede observar en la tabla 7, que se clasificaron 21 sustancias presentes en accidentes durante el transporte en un período de 5 años, siendo la gasolina con 66 accidentes la sustancia involucrada en el mayor número de eventos, seguida por el gas LP, combustóleo, diésel y ácido sulfúrico. Otras sustancias como ácidos, alcohol, benceno y sustancias relacionadas con la pirotecnia, aunque en menor frecuencia que en los accidentes industriales y urbanos siguen estando involucradas en accidentes de transporte. Mientras que en otras sustancias se colocaron aquellas sustancias se presentaron sólo una vez con 40 eventos y sustancias desconocidas con ocho eventos.

De acuerdo con lo reportado, aquellos accidentes que causaron contaminación (71 casos) han afectado: carpeta asfáltica, terracería, arroyo, tierra de cultivo. Siendo alcohol, gasolina, combustóleo, ácidos, amoníaco, entre otras sustancias, las de mayor presencia.

Se registraron en total 45 sustancias diferentes involucradas en los accidentes ocurridos durante el periodo 2005-2009 representadas en la tabla 7 y 8. En algunos casos se transportaban dos sustancias diferentes. Algunas sustancias se clasificaron dentro de otras opciones debido a que no se presentaba en más de una ocasión. Para el análisis de sustancias por sus características de peligrosidad se clasificaron de acuerdo con su grado de reacción; líquidos inflamables con 17 sustancias, gases inflamables con 6 sustancias, corrosivos con 4 sustancias, tóxicos con 12 sustancias, explosivos con una sustancia y otros con cinco sustancias, con 45 sustancias diferentes. Ver tabla 8, donde se muestra un total de 328 accidentes.

Con respecto a las tablas 7 y 8 los datos muestran discrepancia ya que en la tabla 7 se clasificaron 21 sustancias diferentes a diferencia de la tabla 8 donde se clasificaron 45 sustancias, esto debido a que en la tabla 8 se clasificaron aquellas sustancias con mayor número de accidentes, mientras que aquellas que presentaron menos de 2 accidentes se clasificaron en "otras sustancias", mientras que la tabla 8 se presenta el total de las sustancias clasificadas de acuerdo con sus características de peligrosidad, es decir cada sustancia se clasificó de acuerdo a si estas presentan riesgos; líquidos inflamables, gases inflamables; corrosivos, tóxicos, explosivos y por último "otros".

De acuerdo con Markowski A.S., Siuta D. (2017), se describen Escenarios representativos de accidentes para cargas líquidas transportadas en tanques en donde el HAZID es una herramienta estadística para determinar las probabilidades de sufrir un accidente de acuerdo con los riesgos que puedan presentarse durante el transporte y almacenaje de las sustancias como son; presión del tanque, fisuras, falla en alguna válvula, sabotaje entre otras.

Tabla 7. Sustancias presentes en accidentes durante su transporte terrestre. Elaborado a partir de la detección de las sustancias involucradas con mayor frecuencia durante el transporte terrestre.

Acumulado de sustancias implicadas en accidentes de transporte 2005-2009		
Sustancia	No. de accidentes	%
Gasolina	66	20.12
Gas Lp	47	14.33
Combustóleo	41	12.50
Diésel	29	8.84
Ácido sulfúrico	18	5.49
Turbosina	17	5.18
Ácidos	10	3.05
Amoniaco	8	2.44
Azufre	6	1.83
Alcoholes	5	1.52
Acetatos	3	0.91
Acrilato de etilo	3	0.91
Ciclohexano	3	0.91
Estireno	3	0.91
Étanol	3	0.91
Pirotecnia	2	0.61
Xileno	2	0.61
Otras sustancias	40	12.20
Nitrato	3	0.91
Sosa cáustica	6	1.83
Combustibles	5	1.52
se desconoce	8	2.44
total	328	100

Tabla 8. Clasificación de las sustancias involucradas de acuerdo con sus características de peligrosidad

Clasificación de las sustancias involucradas en transporte, de acuerdo con sus características de peligrosidad	
Líquidos inflamables	17
Gases inflamables	6
Corrosivos	4
Tóxicos	12
Explosivos	1
Otros	5
Total	45

Tomado de: los elementos de comunicación por tipo de peligros físicos y para salud NOM-018-STPS-2015.

Es importante clasificar las sustancias; en principio de acuerdo con su naturaleza orgánica e inorgánica, si las sustancias corresponden a volátiles o semi volátiles, así como tomar en cuenta las sustancias que representan riesgos a la salud de acuerdo con sus hojas de seguridad y el COATEA (Centro de Orientación para Atención de Emergencias), el cual proporciona servicios técnicos en atención a:

- Propiedades, manejo y compatibilidad de las sustancias químicas
- Hojas de Seguridad (HDS)
- Efectos a la salud de las sustancias químicas y primeros auxilios.
- Destino y comportamiento de las sustancias en el medio ambiente
- Estrategias de control de fugas, derrames, incendios y explosiones de sustancias químicas.
- Equipo de protección personal.

A continuación, se menciona la clasificación de las técnicas para restaurar un sitio contaminado, así como aquéllas que funcionan mejor para cada tipo de sustancias en función de su reactividad, volatilidad y composición química. Tomado de la liga: <https://www.gob.mx/profepa/acciones-y-programas/coatea-operacion>

8.3. Medidas de restauración

Existen métodos estandarizados para tratar el suelo contaminado, ya sea en el sitio donde se encuentra (in-situ), off-site que involucra la extracción del suelo o sistema contaminado para llevarlo a una instalación u otro lugar para tratarlo y después regresarlo a su sitio de origen y on-site que consiste en retirar el suelo contaminado y colocarlo en un área preparada para tratarlo o llevarla a un área de almacenamiento temporal para acondicionar el sitio original para tratar ahí mismo o trasladar el suelo a una planta móvil llevada al sitio para darle tratamiento.

Por su naturaleza química la mayoría de las sustancias pueden someterse a diferentes tratamientos, antes debe contarse con información referente al sitio, superficie del área contaminada, así como la cantidad vertida, para ello se generó un análisis de acuerdo a cada accidente en transporte clasificándolo por: día, fecha, lugar (estado y municipio), sustancia que se transportaba, tipo de transporte, capacidad, cantidad transportada, de presentarse los casos, las cantidades y lugares donde fue liberada la sustancia, si contaminó cuerpos de agua, zonas de cultivo, cinta asfáltica.

Con base en la información recopilada y ordenada en estadísticas no es conveniente diseñar un plan de restauración para cada sustancia, ya que no todos los accidentes cuentan con información que pueda apoyar una futura hipótesis para la limpieza de un sitio contaminado, sólo aquellos accidentes en que se tiene registrado el tipo de contaminante, si hubo contaminación del sitio y área contaminada pueden ser sometidos a un plan específico de tratamiento.

Para proponer técnicas de restauración se seleccionaron las siguientes sustancias: Combustóleo, gasolina, diésel, turbosina y ácido sulfúrico, debido a su presencia en gran parte de los accidentes industriales, urbanos y de transporte, además se tomó en cuenta al paratión metílico la cual no fue frecuente (sólo se presentó un incidente), pero debido a su toxicidad y persistencia en el ambiente se proponen medidas que reduzcan los niveles de contaminación por la sustancia, ya sea reduciéndola, estabilizándolos (sistemas acuáticos y manto freático) o en el mejor de los casos convertirlo a un compuesto que pueda ser utilizado como fuente de carbono para los organismos como es el caso del suelo. Permitiendo el desarrollo natural de los sistemas biológicos.

De acuerdo con la naturaleza fisicoquímica en el anexo 1 se proponen técnicas de tratamientos fisicoquímicas de acuerdo con la clasificación de cada sustancia peligrosa.

Como parte de esta tesis sólo se ocuparon algunos datos, esto debido a que la información referente a los accidentes con sustancias peligrosas obtenida a partir de los reportes de casos relevantes generados por el Centro Nacional de Comunicación y Operación (CENACOM) no cuenta con los datos sobre el accidente necesarios para determinar el tipo de afectación que provocaron (vegetación,

geomorfología, agua, población, entre otros) pero sí con datos referentes a cantidades y áreas afectadas.

En la tabla 9 se presenta la descripción de algunos casos relevantes para diferentes incidentes, así como la sustancia involucrada, cantidad liberada y tipo de evento y lugar. Es necesario conocer los fenómenos de transporte asociados al contaminante en el sitio para poder determinar y tomar una decisión sobre el método de remediación más adecuado, modelar correctamente y entender el transporte en la zona no saturada porque determina las condiciones fronteras para el desarrollo de plumas de contaminación en el agua subterránea y define las estrategias de remediación.

Saturación: cuando todo el espacio poroso se encuentra ocupado por agua. La tensión es inferior a 0.3 bares y el agua está sujeta por la fuerza de gravedad.

Punto de Marchitez Permanente (PMP): contenido de agua en el suelo en el cual una planta es incapaz de extraer agua y se marchita sin poder recuperarse al reestablecer el contenido de humedad. El agua está retenida en delgadas películas y con mucha fuerza alrededor de las partículas de suelo, asociada a una tensión de 15 bares (15296 cm de H₂O).

La zona no saturada es la fuente de los problemas en la zona saturada:

- La lluvia arrastra contaminantes hacia acuíferos
- Ocurre la volatilización de contaminantes orgánicos con presión de vapor

Curva característica de un suelo, esta curva describe la capacidad del suelo de almacenar y liberar agua, y corresponde a la relación entre el contenido volumétrico de agua presente en el suelo y la succión presente a la matriz de suelo. Espinoza C., 2005. Ver figura de anexo 6.

Pueden existir cuatro fases en la zona no saturada:

- Contaminantes adsorbidos en el suelo
- Contaminantes acuosos disueltos en la humedad del suelo
- Contaminantes en fase gaseosa (González, sin año).
- Contaminantes en fase disuelta (Herrera R.F. 2017).

Mediante fórmulas como las que se muestran en el anexo 5, se puede determinar el tamaño de la pluma de contaminación, así como su dispersión y biodegradación debido a que dichas fórmulas toman en cuenta aspectos como la porosidad del

suelo, permeabilidad, conductividad hidráulica, transporte de contaminantes en una, dos y tres dimensiones. Asimismo, es necesario conocer las fases descritas anteriormente, en la zona saturada ya que estas, ayudan a indicar si el destino del contaminante permanecerá inerte o se transportará a través del sistema que conforma el suelo, de ser así el tipo de transformación que podría tener o si es necesario establecer en que punto se requiere de incorporar alguna medida de restauración, barrera física, o alguna técnica de remediación ya sea química, biológica o híbrida.

Tabla 9. Descripción de accidentes relevantes durante el transporte

Sustancia y fecha	Lugar del evento	Tipo de evento	Cantidad liberada y causa del accidente
Combustóleo 11/12/2006	-Laguna "Ensueño" y "Arrollo Coralillo" (utilizado para cría de truchas). Alto Lucero, Veracruz.	Derrame	-15,000 litros. Causa del accidente: Desconocida
Combustóleo 28/F02/2009	-Ojo de agua a un costado de la carretera (1 herido). Tonalá, Jalisco.	Derrame	-60% de 45000 litros que transportaba un autotanque y 15000 litros. Causa del accidente: desconocida
Gasolina 09/09/2005	-Arroyo (1 herido). Tuxpan, Jalisco	Derrame	- No, reporta, capacidad del autotanque 20,000 litros. Causa del accidente: desconocida
Gasolina 13/08/2008	-Terreno de cultivo Cultivo (200 metros). Morelia, Michoacán.	Derrame	-Aproximadamente 16,000 litros. Causa del accidente: desconocida
Diésel 08/07/2008	-Cerca del río. Nacozari, Sonora	Derrame	- No reporta, transportaba 42,000 litros. Causa del accidente: desconocida
Diésel 31/10/2008	-Cinta asfáltica (2 heridos). Piedras Negras, Coahuila.	Derrame	- Aproximadamente 1,200 litros. Causa del accidente: desconocida.
Turbosina 08/07/2005	-Arroyo "Aguacate". Agua Dulce, Veracruz.	Derrame	-75% de 35,000 litros. Causa del accidente: desconocida
Turbosina 30/01/2006	-Cuneta y área verde (1 herido). Irapuato, Guanajuato.	Derrame	-42,000 litros. Causa del accidente: desconocida
Ácido sulfúrico 10/04/2006	-Carretera y arroyo "El Jucaros" (1 herido). Nacozari, Sonora.	Derrame	-21,000 litros. Causa del accidente: desconocida
Ácido sulfúrico 30/06/2007	-Río "El comandante" -Arroyo afluente del río Sonora. Hermosillo, Sonora.	Derrame	-25,000 litros -De 8,000 a 1,000 litros. Causa del accidente: desconocida

Tabla 10. Información de las Sustancias Peligrosas (Datos de Seguridad)





Sustancia	Daños a la salud	Daños al ambiente	Tipo de sustancia
Combustóleo	<p>Toxicidad aguda por ingestión categoría 4. Peligro por aspiración Categoría 1. Irritación cutánea categoría 2. Toxicidad por inhalación categoría 4. Mutagenicidad en células germinales categoría 1B. Carcinogenicidad categoría 1B. Toxicidad para la reproducción categoría 2. Toxicidad específica de órganos diana (exposiciones repetidas) categoría 2. Indicación de peligro: H302, H304, H315, H332, H340, H350, H361, H373. Hoja de seguridad PEMEX 2019. Hoja de datos de seguridad Combustóleo.</p> <p>Ver anexo 7 </p>	<p>“Esta sustancia no se descompone a temperatura ambiente. Su combustión genera Monóxido de Carbono, Bióxido de Carbono y otros gases asfixiantes, irritantes y corrosivos.” Tomado de PEMEX. Hoja de seguridad.</p>	<p>También conocido como combustóleo pesado, líquido inflamable categoría 4. Se considera sustancia carcinógena en piel para animales. Salud: 0; Inflamabilidad: 2; Reactividad: 0 Riesgo Específico: ND.</p>
Gasolina	<p>La combustión de esta sustancia genera monóxido de carbono y bióxido de carbono. No se descompone a temperatura ambiente.</p> <p>Ingestión: -Inflamación y ardor, irritación de la mucosa de la garganta, esófago y estómago</p> <p>Inhalación: Concentraciones elevadas de vapores causan irritación a ojos, nariz, garganta, bronquios y pulmones</p> <p>Riesgo de asfixia (entrando en estado de coma e incluso muerte)</p> <p>Contacto con piel: Irritación y resequedad</p> <p>Contacto con ojos: Irritación, quemadura de córnea.</p> <p>Ver anexo 7 </p> <p>Indicación de peligro: H304, H340, H350. Hoja de datos de seguridad gasolina.</p>	<p>No se descompone a temperatura ambiente. Su combustión genera Monóxido de Carbono, Bióxido de Carbono y otros gases asfixiantes, irritantes y corrosivos.</p>	<p>Líquido inflamable clase 3. Con una composición de 35% de aromáticos, 15% olefinas, 2.0% benceno y 2.7 % de oxígeno. Es insoluble en agua, con presión de vapor a 37.8 °C (kPa) es de 54.0-79.0 (7.8-11.5 lb/pulg²) lo cual hace favorable su tratamiento por el método Airlift y su inmiscibilidad favorece su separación. Su temperatura de ignición es de aproximadamente 250°C. PEMEX. Salud: 1; Inflamabilidad:3; Reactividad: 0 Riesgo Específico: NA.</p>
Diésel	<p>Carcinogenicidad, categoría 2. Hoja de datos de seguridad Diésel.</p> <p>Ver anexo 7. </p>	<p>Incendios. Material anti chispa para remoción de contaminante.</p>	<p>Pertenece a la clase 2 (líquido inflamable) como líquido inflamable, es insoluble en agua, los vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire, viajando hacia una fuente de ignición y regresar al punto de origen con flama.</p> <p>Salud: 0; Inflamabilidad:2; Reactividad: 0 Riesgo Específico: ND.</p>
Turbosina	<p>Esta sustancia es estable, evitar contacto con fuentes de ignición y oxidantes fuertes como óxidos, ácido nítrico y percloratos. No se descompone a temperatura ambiente. Su combustión genera Monóxido de Carbono, bióxido de carbono y otros gases asfixiantes, irritantes y corrosivos. Peligro por aspiración, categoría 1. Hoja de seguridad Turbosina.</p> <p>Ver anexo 7. </p>	<p>Puede incendiarse fácilmente a temperatura normal, sus vapores son más pesados que el aire por lo que se dispersarán por el suelo y se concentrarán en las zonas bajas. Los vapores de turbosina acumulados y no controlados que alcancen una fuente de ignición, pueden provocar una explosión.</p>	<p>Materiales como un trapo o similares impregnados con turbosina pueden sufrir combustión espontánea. Aquellos recipientes que se han ocupado para el almacenamiento de dicho producto pueden contener algún residuo del mismo por lo cual no deben presurizarse, calentarse, cortarse, soldarse o exponerse a flamas u otras fuentes de ignición.</p> <p>Salud: 0; Inflamabilidad:2; Reactividad: 0 Riesgo Específico: N.</p>
ácido sulfúrico	<p>Produce irritación, quemaduras, dificultad respiratoria, en altas concentraciones de vapor puede ocasionar la muerte. Si se ingiere produce quemaduras severas, perforación del estómago. Durante la ingestión o el vómito se pueden broncoaspirar cantidades de ácido afectando a los pulmones y ocasionar la muerte. La exposición constante a este ácido en bajas concentraciones provoca dermatitis y en concentraciones altas causa erosión dental y trastornos respiratorios.</p>	<p>En el agua el producto se disuelve, produciendo disminución en la viscosidad, facilitando su difusión en cuerpos de agua. A pH 6 y pH menor a 5, aumenta la concentración de iones calcio (provenientes de rocas y suelos). Reaccionando con el calcio y magnesio presentes para producir sulfatos. En el suelo el producto puede disolver algunos minerales como calcio y magnesio, deteriorando las características de estos.</p>	<p>De acuerdo con la hoja de seguridad correspondiente para el ácido sulfúrico se le clasifica como corrosivo, en daño a la salud la NFPA lo considera en 3 (muy peligroso) Inflamabilidad 0 (no inflamable) y reactividad 2 (inestable ante un cambio químico violento). www.gtm.net. Inflamabilidad: 0 (No se quema), Salud: 3 (Extremadamente peligroso), Reactividad (Cambio químico violento), Especial: Corrosivo. Tomado de: http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/ácido_sulfurico.pdf</p>

Tabla 11. Propuesta de remediación de suelos contaminados

Sustancia	Propiedades de la sustancia	Cantidad Derramada (mil litros)	Propuesta de remediación
Combustóleo	fracción pesada	15	Biopilas (Anexo 2, tabla 1 y 2)
Gasolina	fracción ligera	20	Bioventing (Anexo 2, tabla 1 y 2)
Diésel	fracción media	42	Landfarming (Anexo 2, tabla 1 y 2)
Turbosina	aromáticos Policíclicos	42	Reactor biológico tipo airlif
Ácido sulfúrico	corrosivo	25	Reactor biológico tipo airlif

Como se mencionó anteriormente la eficacia de cada tratamiento biológico depende de la composición molecular del compuesto, así como de su concentración ya que dependiendo de la sustancia química involucrada cada tratamiento tendrá un límite para remover o eliminar la contaminación presente en el sitio, si hay cantidades de 50 g/kg de contaminante, técnicas como landfarming y biopilas son eficaces hasta un 90%.

Los suelos con pH mayor o menor a 7 u 8 deben ser ajustados ya sea utilizando arcillas o sulfato de aluminio, con el fin de favorecer el crecimiento microbiano.

8.3.1. Biopilas

Biorremediación. Cualquier proceso que utilice microorganismos, plantas o las enzimas derivadas de éstos para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural, transforma compuestos inorgánicos en el suelo, lodos, sólidos y manto freático, a través de procesos in situ o ex situ.

Biopilas. Es una técnica de biorremediación que se utiliza para la descontaminación de suelos con compuestos orgánicos persistentes en baja concentración. Las biopilas se airean de manera pasiva o activa y se adicionan nutrientes en caso de requerirlo (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.), todo lo cual servirá para incrementar la degradación de los contaminantes. Las biopilas deben cubrirse con plástico para evitar el transporte de los contaminantes, así como la evaporación y volatilización de los hidrocarburos.

Extracción de vapores. Remueve los contaminantes volátiles que se encuentran en los subsuelos contaminados. Se inyecta aire en la zona vadosa a través de pozos para volatizar los hidrocarburos que se encuentran en fase disuelta, fase líquida o en fase absorbida, moviéndolos hacia el pozo de extracción. Los vapores extraídos son tratados en la superficie. Tomado de Industria Petrolera Mexicana 03/01/2019 <http://www.industriapetroleramexicana.com/tag/biopilas/>

8.3.1.1. Características del suelo para aplicar la técnica de biopilas

Densidad microbiana: El suelo normalmente contiene un gran número de microorganismos que incluyen bacterias, hongos, protozoos y actinomicetos. En suelos bien drenados estos organismos son generalmente aeróbicos. De ellos las bacterias son los más numerosos y activos particularmente con bajos niveles de oxígeno. La densidad microbiana en suelos varía generalmente entre 10^4 y 10^7 CFU/g de suelo.

Para que una biopila sea efectiva, el conteo en placa de heterótrofos debe ser de 103 CFU/g de suelo o más.

pH: Para el crecimiento bacteriano el pH adecuado debe estar entre 6 y 8 siendo 7 el valor óptimo. En caso de que el suelo a tratar no se encuentre en dicho rango será necesario ajustar el pH al iniciar la biopila y luego programar el monitoreo de dicho parámetro.

Contenido de humedad: Los microorganismos del suelo necesitan condiciones apropiadas para el crecimiento. Una excesiva humedad en el suelo restringe el movimiento del aire a través del subsuelo, reduciendo la disponibilidad de oxígeno. El rango ideal de humedad del suelo se encuentra entre el 40 y el 85% de la capacidad de retención de agua, es decir entre el 12 y el 30% en peso.

Temperatura: El crecimiento microbiano es función de la temperatura. El rango en el cual se produce la biodegradación de hidrocarburos está comprendido entre 10 y 45°C. Los valores que se encuentren por debajo o por encima de este rango no permiten un adecuado desarrollo bacteriano por lo cual requieren ajustes. Por ejemplo, para temperaturas inferiores a 10°C será necesario inyectar aire caliente además de trabajar en estructuras tipo invernadero, si la temperatura excede los 45°C será necesario inyectar aire frío.

8.3.1.2. Características de los contaminantes para aplicar biopilas

Volatilidad: Es necesario tener en cuenta la volatilidad de los contaminantes propuestos para tratar en una biopila. Por ejemplo, la nafta tiene una fracción significativa de compuestos volátiles, no así los lubricantes. Los productos del petróleo generalmente contienen más de cien elementos diferentes con distintos rangos de volatilidad. Si la proporción de volátiles es importante se debe operar aspirando aire, esto permite enviar los gases extraídos a un sistema de tratamiento físico-químico o físico-químico-biológico.

Estructura química: la estructura química del contaminante permite determinar el nivel de degradación esperado. Compuestos alifáticos y aromáticos de bajo peso molecular (menos de 9 átomos de carbono) son fácilmente degradables mientras que la biodegradabilidad disminuye a medida que aumenta el número de átomos de carbono o de anillos. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la estructura química a

la hora de estimar tiempos de remediación, y la operación y monitoreo deben basarse en el constituyente que represente la etapa limitante.

Concentración: Para emplear la técnica de biopilas, en general la concentración de hidrocarburo total en suelo no debe exceder las 50,000 ppm y los metales pesados deben estar por debajo de las 2500 ppm, en caso de que estos requerimientos no se cumplan se debe diluir el contaminante hasta obtener los niveles deseados.

8.3.2. Reactor biológico tipo airlift

El tratamiento microbiológico de suelos, sedimentos y otros sólidos contaminados con hidrocarburos en la forma usual de aplicación lleva varios meses y los resultados muestran un decrecimiento asintótico del contaminante degradable. En casi todos los casos estudiados descritos en la literatura puede ser observado un remanente del contaminante después del tratamiento. La razón de este fenómeno no resulta clara hasta el momento, equilibrios de sorsión-desorsión o la distribución no homogénea en la materia sólida, pueden ser los responsables de este comportamiento. Trabajos recientes analizan individualmente los tres tipos de limitación mencionados: degradabilidad, difusividad y desortividad.

Algunos trabajos sugieren que la difusión desde los agregados es el mecanismo limitante en la degradación de hidrocarburos. Experimentos realizados con reactores tipo slurry para estudiar la biodegradabilidad del hexadecano y diesel oil muestran que la concentración residual de hidrocarburo después del tratamiento no es causada por incapacidad de los microorganismos presentes para degradar dichos substratos o por la formación de sustancias inhibitoras del desarrollo microbiano, ya que bajo otras condiciones de desarrollo mineralizan completamente el contaminante (Ercoli E.C.).

Los suelos contaminados poseen una distribución no uniforme de contaminante según la granulometría de este y el contenido de materia orgánica. En los suelos biorremediados ocurre un fenómeno similar. La alternativa de usar reactores biológicos para realizar un tratamiento intensivo se encuentra seriamente limitada por los costos que implica mover grandes volúmenes de suelo. Una propuesta, consiste en tratar solamente la parte altamente contaminada, o sea la fracción de partículas más finas, en un biorreactor aireado neumáticamente. Se ha planteado, que en un sistema de depuración intensiva es posible lograr altas velocidades de transferencia de masa, fases homogéneas y condiciones controladas de desarrollo microbiano lo cual permite una descontaminación más profunda.

Martínez, *et al.*, 2015 proponen para la restauración de un sitio contaminado con combustóleo un tren de tratamiento químico-biológico el cual utiliza la bioaugmentación como método biológico que utiliza bacterias y hongos (*Aspergillus*) especializados con el fin de transformar o remover compuestos orgánicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. El suelo es pretratado con una solución al 0.5% de lauril sulfato de amonio, con una relación 3:1 v/v de agua:suelo, con agitación suave durante 8 horas a 20 °C. Posteriormente se inocula el suelo con

solución de esporas de *Aspergillus* spp. Los resultados indican la reducción del combustóleo a cantidades dentro de los límites máximos permisibles (6266 ppm \pm 879) para la Norma Oficial Mexicana NOM-138.SEMARNAT/SSA1-2012 en un periodo de 60 días. Este tipo de tratamiento es off-site, ya que el pretratamiento requiere de una centrifugación o agitación del suelo adicionado con la solución de lauril sulfato de amonio.

8.3.3. Fitorremediación

Proceso donde se emplean diferentes plantas con capacidad para acumular contaminantes (como metales) y estimular los microorganismos de la rizósfera para degradar los contaminantes (Almarío F., 2014). Esta técnica se caracteriza por el uso de plantas que mediante sus procesos naturales como respiración, transpiración y fotosíntesis. Utilizada en la remediación de sitios contaminados donde se emplean diferente vegetación con capacidad para acumular, oxidar, reducir, inmovilizar y estimular al contaminante para que éste pueda ser utilizado por los microorganismos u otras plantas vasculares como fuente de carbono u otro compuesto que sea necesario que los microorganismos de la rizosfera realicen su proceso metabólico para degradar los contaminantes.

Debido a que el manejo de microorganismos para tratamientos que manejan residuos peligrosos es delicado, se requiere un “tren de tratamiento” con el fin de garantizar la supervivencia y el desarrollo radicular, foliar de las plantas, ya que en la medida que éstas ganan biomasa se puede garantizar que el contaminante es degradado o usado como fuente de carbono orgánico necesario para el crecimiento de las plantas. Independiente del tipo de tratamiento sea in-situ o ex-situ, se recomienda el uso de organismos nativos u originarios del sitio.

9. Conclusiones

Derivado de la información proporcionada por el CENACOM, fue posible llevar a cabo un análisis para conocer el número de accidentes tanto urbano/industriales como de transporte, que involucraron sustancias químicas peligrosas. aquellos estados que presentaron mayor número de accidentes durante esos cinco años fueron el Distrito Federal hoy CDMX, Estado de México, Veracruz y Guanajuato. siendo los incendios, para el caso de los accidentes urbanos e industriales, los que se presentaron con mayor frecuencia en el periodo de 2005 a 2009.

El uso de pólvora y los artificios pirotécnicos ocuparon el primer lugar en el número de accidentes urbanos/industriales, ocurridos tanto en polvorines como en fiestas patronales. Cabe mencionar que por ser una actividad peligrosa en todos sus niveles de manipulación desde la fabricación, hasta su uso final (quema de pirotecnia) se deben tener leyes, normas y reglamentos que obliguen a fabricantes En el caso de la “Iniciativa con proyecto de decreto que crea la Ley Federal de Pirotecnia” con número de registro: 339/102/01, establece las acciones de seguridad que deberán tomarse para la fabricación, transporte, establecimiento de los lugares de fabricación y venta de manera aislada, que la Secretaría de la

Defensa Nacional será la encargada de otorgar licencias para el establecimiento de locales para fabricar, almacenar y comprar y/o vender. Que la venta de artificios pirotécnicos al público será mediante una clasificación, de los cuáles sólo los de clase 1 podrán ser vendidos en establecimientos comerciales no especializados, el montaje y quema de artificios pirotécnicos en fiestas patronales será realizada por técnicos especialistas.

Los Estados de Sonora, Veracruz y Guanajuato, presentaron mayor número de accidentes en transporte reportados por el CENACOM para el periodo 2005-2009. La gasolina es la sustancia involucrada en el mayor número de accidentes seguido del gas LP, accidentes ocurridos durante el transporte, de sustancias y materiales peligrosos.

Existe un avance notable en cuestión de prevención de desastres, el crecimiento económico ha generado un aumento en la producción y manejo de sustancias peligrosas, así como el crecimiento poblacional manifestado en el aumento de las áreas urbanas que conlleva un aumento en el riesgo, por lo que deben planearse estrategias en materia de prevención de desastres utilizando información estadística, clasificación de peligros, ordenamientos territoriales. el cual se debe reducir con las mejoras en la planeación (ordenamientos territoriales).

Los incendios, al ser los eventos con mayor incidencia en accidentes industriales y urbanos, representan los de mayor peligro ya que las causas son diversas pero la que generalmente los ocasiona son instalaciones eléctricas no adecuadas. Aunque la mayor parte de las causas de los accidentes se consideraron de origen desconocido debido a que en los reportes de caso no se describía esta.

En los cinco años de análisis (2005 a 2009, las técnicas de restauración seleccionadas en aquellos sistemas (agua y suelo) que han sido contaminados por accidentes donde estén involucradas sustancias químicas peligrosas, son preferentemente técnicas físicas y biológicas.

Las sustancias como el ácido sulfúrico son aún más complejas de tratar ya que un cambio en el pH cambia la estructura química de un suelo y de los sistemas acuáticos, debido a que la transferencia de iones altera la alcalinidad, dureza, capacidad de carga, parámetros que son esenciales para las determinaciones físicas y químicas del estado de los suelos y sistemas hidrológicos.

La mayor parte de las sustancias peligrosas liberadas durante accidentes industriales urbanos fue el gas LP, al igual que en transporte, por lo que los procesos biológicos resultan adecuados para su degradación mediante los mecanismos de transporte, el problema es el tiempo que tarda esta atenuación natural y la afectación que puede presentarse a los pobladores en lo que la degradación ocurre.

Es importante determinar el área en la cual se esparció el contaminante, incluso si alcanzó algún cuerpo de agua, lo cual permite establecer medidas para contener y dar tratamiento al sistema afectado.

Conocer la naturaleza fisicoquímica de cada sustancia, así como su clasificación de acuerdo con su peligrosidad, con el fin de disminuir el riesgo de un accidente, prevenirlo, disminuir su nivel o radio de afectación, evitar pérdidas humanas y deterioro de los servicios ambientales (agua, aire, suelos para cultivo).

Derivado del análisis de los accidentes presentados durante el periodo de 2005 a 2009, podemos inferir que las acciones que cada estado ha implementado para la prevención de los accidentes que ocurren en áreas industriales y urbanas con sustancias peligrosas, no han sido suficientes.

Las leyes y normas mexicanas son una guía que determina las obligaciones y responsabilidades que tienen los diferentes niveles de gobierno y particulares, de prevenir y remediar los daños al ambiente, así como evitar el contacto directo de la población con los factores de riesgo que representan las sustancias peligrosas.

10. Perspectivas

Se espera que este trabajo sirva como base teórica para fundamentar y elaborar herramientas que puedan incorporarse dentro de los planes de desarrollo urbano y rural; nacionales, regionales y locales, e integrarse al atlas nacional de riesgo, al unirse con la información generada en años posteriores al periodo analizado.

Asimismo, los resultados de este trabajo servirán para que todos los cuerpos de bomberos, las unidades estatales y municipales de protección civil, se capaciten, en materia de atención de accidentes con sustancias químicas peligrosas y cuenten con el equipo de protección personal necesario para atender emergencias con las sustancias que se encuentran involucradas en el mayor número de accidentes que se han presentado en sus localidades.

Referencias

- Alegría M.Y., Ruiz A.A.J., Zárate R.J., Sotelo N.P.X., Beltrán V.M., Velasco P.M., 2015. Restauración de un suelo contaminado con hidrocarburos por un tren de Tratamiento Químico-Biológico. 2º Congreso Nacional AMICA. P.p. 4. Recuperado de <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/118.pdf>.
- Almario, M.F., Mojica G. P., Cuéllar S., Medina C., Mejía, C., Abril 2014. BOLETÍN TECNOLÓGICO Biorremediación de sitios contaminados. Industria y Comercio SUPERINTENDENCIA. P.p. 34.
- Álvarez F.B., Ahumada G.G., Mejía R.A.L., Rivera H.M.I., Sancillo R.M.J., Soto G.C.A., Valdez S. D.B., 2009. ¿Corrupción e impunidad? La explosión de 1999 en Celaya, Gto. Universidad Pedagógica Nacional Unidad 112, Celaya Guanajuato. P.p. 94,
- Arcos, S.M.E., Izcapa, T.C. 2003. Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México. Dirección de Investigación. Subdirección de Riesgos Químicos. CENAPRED. P.p. 280. Tomado de http://centro.paot.org.mx/documentos/cenapred/sustancias_quimicas.pdf Arcos
- S.M.E., Fernández V.G., Ibarra D. C.M., Izcapa T.C., 1997. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS. P.p.1, 43.
- Bestrastém B. M., Turmo S. E., sin año. NTP 293: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España. P.p. 3-4. Recuperado de: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_293.pdf
- Blanco, R.J.L.2006. INGRESO A LA SOCIEDAD DEL RIESGO Y A LA IMPUNIDAD DE LOS DELITOS AMBIENTALES: A 15 AÑOS DEL ACCIDENTE DE ANAVERSA EN CORDOVA. P.p.4-5.
- Coordinación Nacional de Protección Civil México, Atlas Nacional de Riesgos mayo-2014 http://www.files.cenapred.gob.mx/es/convencion2014/CENAPRED_ANR_CNPC.pdf
- Cuéntame inegi.2017. Extensión de México. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>
- Diario Oficial de la Federación. 2016. Acuerdo por el que se emite la guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos.
- Ercoli Eduardo C.1998. Tratamientos Biológicos. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/remediacion/tema11.pdf>

- Espinoza C.C. 2006 TEMA 6 FLUJO EN MEDIOS POROSOS NO SATURADOS. UNIVERSIDAD DE CHILE. P.p.1,5. Recuperado de:
file:///C:/Users/barsa/Documents/OMAR/PERSONAL/Tesis/Referencias/Aún%20o%20consultados/Tema06_Flujo_No_Saturado.pdf
- Excelsior en la Historia: San Juanico, a 30 años del infierno. Arturo Páramo. 15 de noviembre de 2014
<http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/11/15/992495>
- Fernández V.G., Arcos S.M.A. 1994. TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS POR PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS. Distrito Federal, México.
- FAO Recuperado de <http://www.fao.org/3/W1604S/w1604s04.htm>
- García, B.M.L., González, R.S.M., Rodríguez, B. J.R. 1995. Los peligros industriales en la Zona Metropolitana de Guadalajara.p.p.1-2
- González G.L., Sin año, Transporte de contaminantes, Alternativas Tecnológicas para el tratamiento de suelos, Ideteq, CONACYT, Recuperado de:
<http://www.cideteq.mx/attachments/article/170/3.Transporte%20de%20masa.pdf>
- Grupo Transmerquim. Hoja de datos seguridad ácido sulfúrico. Recuperado de:
<http://www.gtm.net/images/industrial/a/ACIDO%20SULFURICO.pdf>
- Hernández, A. J., Pastor, J. 2008. LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE ESCOSISTEMAS DEGRADADOS: MARCOS CONCEPTUALES Y METODOLOGÍAS PARA LA ACCIÓN. Contaminación de suelos. Tecnologías de recuperación. Ministerio de ciencia e innovación. Centro de Investigaciones, Medioambientales y Tecnológicas. p.p 69
- Herrera R.F. 2017. Artículo Técnico Caracterización y descontaminación de suelos y aguas subterráneas. División de suelos de TÜV SÜD. Recuperado de
<https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/197743-Characterizacion-y-descontaminacion-de-suelos-y-aguas-subterranas.html>
- Hoja de datos de seguridad Combustóleo pesado. HDS-PEMEX TRI-SAC-3. Recuperado de:
<http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SAC%20Combustóleo%20pesado%20v2.pdf>
- Hoja de datos de seguridad Gasolinas Premium y Pemex Magna. HDS-PEMEX-TRI-SAC-7. Recuperado de:
[http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SAC%20Gasolinas%20\(Premium%20y%20Magna\)%20TRI-7.pdf](http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SAC%20Gasolinas%20(Premium%20y%20Magna)%20TRI-7.pdf)

Hoja de datos de seguridad Diésel. HDS-PEMEX-TRI-SAC-12. Recuperado de:
<http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SAC%20Diesel%20TRI-12.pdf>

Hoja de datos de seguridad Turbosina. HDS.PEMEX-TRI-SAC-6. Recuperado de:
<http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SAC%20Turbosina%20TRI%206.pdf>

Ingreso a la sociedad del riesgo y a la impunidad de los delitos ambientales: a 15 años del accidente de Anaversa en Cordova, José Luis Blanco Rosas, 2006
<http://www.lavida.org.mx/sites/default/files/archivos-contenidos/JL%20Blanco%20Anaversa%2015%20a%20C3%B1os.pdf>

Instituto Mexiquense de la Pirotecnia (IMEPI). Recuperado de:
<http://imepi.edomex.gob.mx/sites/imepi.edomex.gob.mx/files/files/Tripticos/02TRIPTICO%20QUIMICA%20Y%20METALES%202016.pdf>

Instituto Nacional de Geografía (INEGI).2014. Sistema de Información Geográfica.
Recuperado de
<http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf>

Izcapa, T. C. 2001 Lineamientos generales para la evaluación de sitios contaminados y propuesta de acciones para su restauración. Coordinación de Investigación, CENAPRED., Número de páginas 137

Jaramillo D.F. 2002.Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Medellín. Recuperado de:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf>

Jiménez B. J.E., Análisis de la Problemática de las Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles en un Centro de Refino. Número de páginas 3. Recuperado de:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20066/fichero/Documento+completo%252FAnexo+I.pdf>

La Jornada. Directora general: Carmen Lira Sade. Director Fundador: Carlos Payan Verver. Suplemento mensual director: Iván Restrepo. Edición: Laura Angulo. 4 de abril de 2011. Anaversa, a 20 años de un crimen impune.
<http://www.jornada.unam.mx/2011/04/04/eco-c.html>

Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli A., Bonvicini ,S., Molag ,M., Cozzani, V., 2017. HazMat transportation risk assesment: A revivitation in the perpective of the Viareggio LPG accident. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 49, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.08.009>.

Ley General de Protección Civil, últimas reformas publicadas DOF 23-06-2017
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC_230617.pdf

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1988. Última reforma :05-06-2018. Recuperado de:
http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1133/1/ley_general_del_equilibrio_ecologico_y_la_proteccion_al_ambiente.pdf

Markowski A.S., Siuta D. (2017). Selection of representative accident scenarios for major industrial accidents. ELSEVIER, 213, 90-924. Páginas 27

Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente. Dioxinas y Furanos (PCDD+PCDF). Recuperado de: <http://www.prtr-es.es/Dioxinas-y-Furanos-PCDDPCDF,15634,11,2007.html>

Morgan D.P., M.D., Ph.D. 1989. DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO DE LOS ENVENENAMIENTOS POR PLAGUICIDAS. Cuarta Edición. Washington, D.C. United States of America: Editorial Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

Morales Coria Irene. 2005. Explosiones del Sector Reforma, en Guadalajara. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales. Recuperado de: <http://132.248.9.34/pd2005/0601551/0601551.pdf>

Nolasco, T.A.D., 2009. Emisiones e inmisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en Tenerife, Islas Canarias. Universidad de la Laguna. Recuperado de: <ftp://tesis.bbt.kull.es/ccppytec/cp318.pdf>

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-ECOL-1993.22/10/1993/. Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Núm.35 pp.4. Recuperado de :
http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Mexico/MX_NOM-052-ECOL-1993.pdf

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-138.SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. P.p . Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5313544&fecha=10/09/2013

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-018-STPS-2000, Sistema para la identificación y Comunicación de peligros y Riesgos por Sustancias Químicas Peligrosas en los Centros de Trabajo.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-018-STPS-2015, Sistema armonizado para la identificación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5411121&fecha=09/10/2015

- Organización Mundial de la Salud. Octubre de 2016. Las dioxinas y sus efectos en la salud humana. Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs225/es/>
- Ortíz, B.O., Ize L.I. y Gavilán G.A., 2003. La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos. Gaceta Ecológica, núm 69, pp.83-92. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906906.pdf>
- Ortiz, B. I., Sanz G. J., Dorado, V.M., Villar F.S., 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Universidad de Alcalá.
- Páez B. R. 2000. Aplicación de bioensayos de toxicidad aguda para evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo (tesis para obtener el título de : Bióloga). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- PEMEX. Subdirección de auditoría industrial y protección ambiental. Hoja de seguridad, diésel. PEMEX. P.p. 7. Recuperado de: http://dicomex.mx/wp-content/uploads/2016/09/Pemex_Diesel_Hoja_de_Seguridad_PR-301-04.pdf
- PEMEX. Hoja de Datos de Seguridad combustóleo.P.p.22. Recuperado de: <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SA C%20Combust%C3%B3leo.pdf>
- PEMEX. Hoja de Datos de Seguridad Gas Natural HDS-PEMEX-TRI-SAC-9. Núm. Versión 1.1, NOM-018-STPS-2015 DOF 09.10.2015. Recuperado de: <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/gas/HDS%20SAC%20 Gas%20Natural%20TRI-9%20v1.1.pdf>
- PEMEX. Hoja de datos de seguridad Premium. 2012. P.p.12. Recuperado de: <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDSS-105%20Pemex%20Premium.pdf>
- Primer listado de actividades altamente riesgosas. Recuperado de <http://www.spabc.gob.mx/wp-content/uploads/2016/08/Acuerdo-por-el-que-se-expide-el-primer-listado-de-actividades-altamente-riesgosas.pdf>
- Proceso. 18 enero, 2002. Recuperado de <http://www.proceso.com.mx/239392/la-explosion-en-guadalajara>
- ¿Qué son los COP?. Centro Nacional de Referencia sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Recuperado de: <http://www.cnrco.es/gc/informate/que-son-los-cop/>
- Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-18682>

Sitios contaminados- SEMARNAT. Recuperado de:

http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServletfe05.html

Santos R.G.C. 2010. Análisis del riesgo individual: caso de explosión de un ducto de gas natural. Tesis de posgrado. Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de abril de 1993 modificada en el DOF 20/11/2012. Número de páginas 37.

Secretaría de Gobernación., Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2004. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. P.p 19-22

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. 2015. Informe de actividades 2015. México. P.p 32

Segundo Listado de actividades altamente riesgosas. Recuperado de:

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4664066&fecha=04/05/1992

Sistema Nacional de Protección Civil. CENAPRED. 2006. Guía Práctica sobre Riesgos Químicos. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos., Subdirección de Riesgos Químicos. P.p 5, 34

Smith, Jr. J.E. y Helmick J., (Ed.). 1993. GUÍAS PARA EL TRATAMIENTO Y LA DISPOSICIÓN DE PEQUEÑAS CANTIDADES DE DESECHOS DE PLAGUICIDAS. Metepec Edo. De México, México: Editorial Panamerican Health Organization.

Vincent, M.J., Bernstein, J.A., Basketter, D., Kakind, J.S., Dorson, G.S., Maier, A., 2017.

Chemical-induced asthma and the role of clinical, toxicological, exposure and epidemiological research in regulatory and hazard characterization approaches.

Regulatory Toxicology and Pharmacology . P.p. 90, 126-132.

<https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2017.08.018>.

Volke, S. T. y Velasco, Trejo J.A., 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). Pp. 12

Anexos

Anexo 1. EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS FISICOQUÍMICOS PARA DIFERENTES RESIDUOS PELIGROSOS

Procesos de tratamiento	Residuos Corrosivos	Solventes halogenados	Solventes no Halogenados	Residuos Orgánicos Clorados	Otros Residuos orgánicos	PCB	Soluciones con metales pesados	Residuos Reactivos	Suelos contaminados	Residuos de cianuro	Residuos con compuestos químicos orgánicos
Precipitación química 1	X						X				
Neutralización 2	X										X
Hidrólisis 3								X			
Fotólisis 1				X							
Oxidación /reducción química 1							X			X	X
Deshalogenación 1		X		X		X			X		
Ozonación 1,4		*	X	*	X			X		X	
Intercambio iónico 2	X						X				X

Nota:* Ozono/Radiación ultravioleta y H₂O₂

Anexo 2. Principales tratamientos de recuperación de suelo y aplicaciones (elaborado a partir de Ortiz, B. I., et al., 2007).

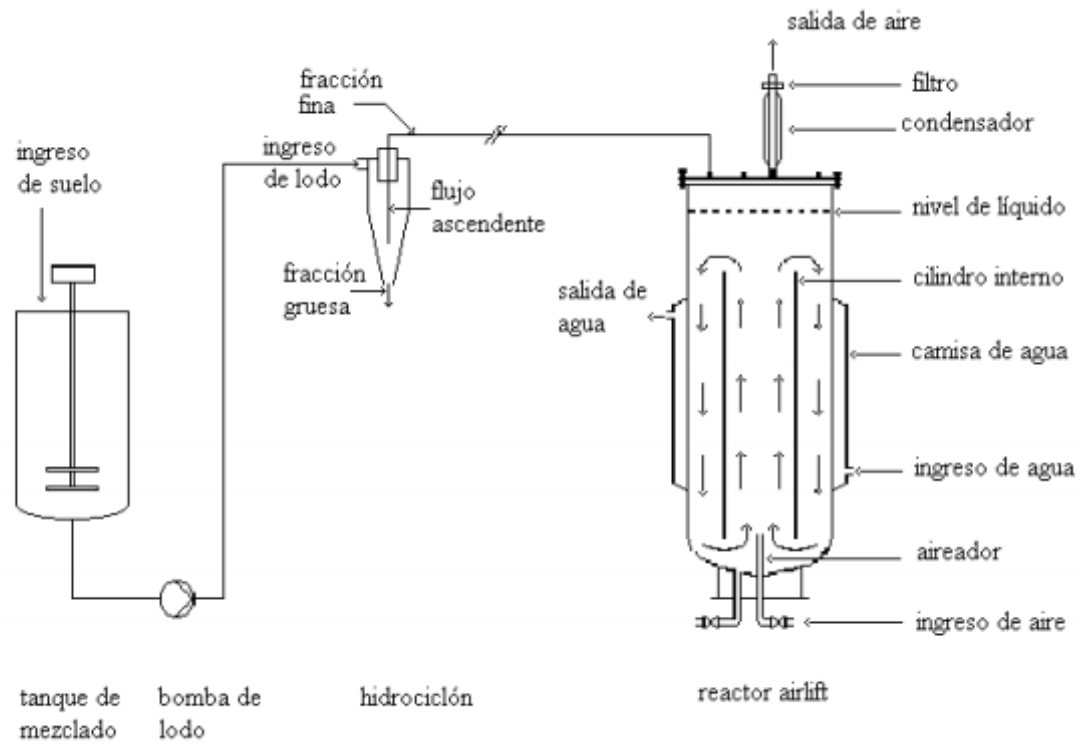
Tratamiento	Tipo de contaminantes tratados
Extracción	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, combustibles, metales PCBs, hidrocarburos aromáticos policíclicos, disolventes halogenados y clorados, entre otros.
Lavado	Compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos derivados del petróleo, cianuros y metales
Flushing	Todo tipo de contaminantes especialmente inorgánicos
Electrocinética	Especialmente metales solubles o complejados
Adición de enmiendas	Fundamentalmente sales y metales
Barreras permeables activas	Contaminantes orgánicos biodegradables, metales, nitratos, sulfatos
Inyección de aire comprimido	Solventes clorados, sustancias volátiles y semivolátiles ligeras como xileno, benceno, tolueno, tetracloruro de carbono, tricloroetano, cloruro de metilo
Pozos de recirculación	Tricloroetileno, derivados del petróleo, compuestos orgánicos no halogenados, semivolátiles, pesticidas y compuestos inorgánicos
Oxidación ultravioleta	Amplio espectro de contaminantes orgánicos y explosivos (hidrocarburos del petróleo, hidrocarburos clorados, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles, éteres, pesticidas, dioxinas, PCBs, TNT, RDX y HMX)
Biodegradación asistida	Amplio espectro de contaminantes orgánicos biodegradables
Biotransformación de metales	Metales
Fitorrecuperación	Metales, plaguicidas, solventes, explosivos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, crudo
Bioventing	Hidrocarburos del petróleo de peso mediano, explosivos (DDT, DNT)
Landfarming	Fundamentalmente hidrocarburos del petróleo de peso mediano
Biopilas	Derivados del petróleo, compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y plaguicidas
Compostaje	Explosivos (TNT, RDX y HMX), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo, clorofenoles y plaguicidas
Lodos biológicos	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados, explosivos, hidrocarburos del petróleo, petroquímicos, solventes y plaguicidas
Incineración	Explosivos, hidrocarburos clorados, PCBs y dioxinas
Desorción térmica	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles, algunos compuestos orgánicos semivolátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs, plaguicidas y metales volátiles
Extracción multifase	Compuestos orgánicos volátiles, en disolución y compuestos orgánicos no acuosos en fase libre
Atenuación natural	Compuestos BTEX (benceno, tolueno, etil benceno y xileno), hidrocarburos clorados, algunos plaguicidas y compuestos inorgánicos
Barreras verticales	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras horizontales	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras de suelo seco	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Sellado profundo	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Barreras hidráulicas	Contaminantes orgánicos e inorgánicos
Estabilización físicoquímica	Fundamentalmente compuestos inorgánicos como metales pesados, limitada eficacia para contaminantes orgánicos y plaguicidas
Inyección de solidificantes	Fundamentalmente compuestos inorgánicos, eficacia mucho menor para compuestos orgánicos semivolátiles y plaguicidas
Vitrificación	Contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros) y algunos orgánicos

Anexo 3. Clasificación de hidrocarburos de acuerdo con su fracción. Hidrocarburos aromáticos policíclicos o polinucleares (HAP), BTEX: B, benceno; T, tolueno; E, etilbenceno; X, xilenos (suma de isómeros orto-, meta y para-).

PRODUCTO CONTAMINANTE	HIDROCARBUROS				
	FRACCIÓN PESADA	FRACCIÓN MEDIA	HAP	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezcla de productos desconocidos derivados del petróleo	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X
Combustóleo	X		X		
Parafinas	X		X		
Petrolatos	X		X		
Aceites derivados del petróleo	X		X		
Gasóleo		X	X		
Diésel		X	X		
Turbosina		X	X		
Queroseno		X	X		
Creosota		X	X		
Gas avión				X	X
Gasol vente				X	X
Gasolinas				X	X
Gas nafta				X	X

Tomado de NOM-138.SEMARNAT/SSA1-2012

Anexo 4. Reactor biológico tipo airlif.



Ercoli Eduardo C., 1998. Tratamientos Biológicos P.16

Anexo 5. FÓRMULAS PARA CALCULAR EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTE

Ley de Darcy

$$V_x \frac{\Delta h}{\Delta x} \rightarrow V_x = -K_x \frac{dh}{dx}$$

Velocidad real a la que se mueve el agua en el acuífero es:

$$u_x = \frac{v_x}{n} \text{ o } \frac{v_x}{n_c}$$

Conductividad hidráulica:

$$K = \frac{Cd^2pg}{\mu} = \frac{kpg}{\mu}$$

Ecuación Hazen

$$K = ad_{10}^2$$

Ecuación Kpzeny-Carmen

$$K = \frac{n^3}{(1-n^2)} \left(\frac{d_m^2}{180} \right) \left(\frac{pg}{\mu} \right)$$

Ecuación unidimensional

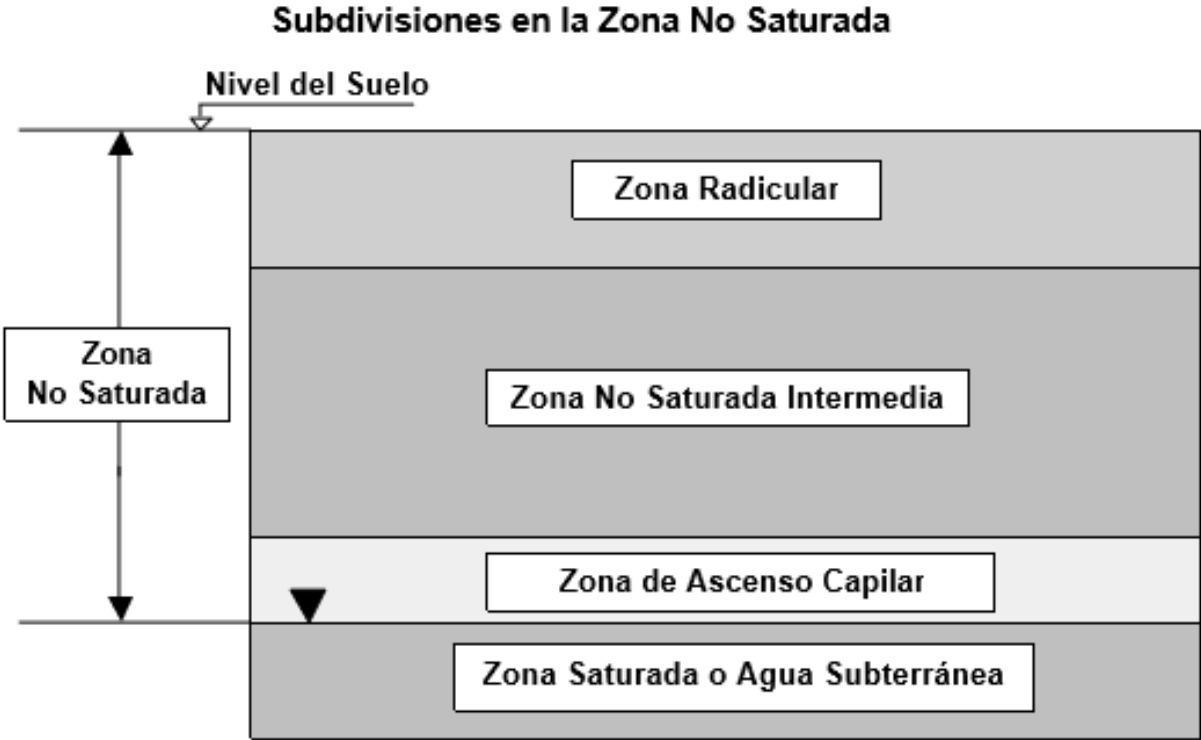
$$C = \frac{C_0}{Z} \exp \left[\frac{(u_x - v)x}{2D_x} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2\sqrt{D_x Rt}} \right] + \frac{C_0}{Z} \exp \left[\frac{(u_x - v)x}{2D_x} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2\sqrt{D_x Rt}} \right]$$

$$v = u_x(1 + 4kD_x/u_x^2)^{1/2}$$

R= Retardo









K=cte de 1^{er} orden

Anexo 6. Subdivisiones en la Zona No Saturada.



Espinoza C.C. 2005.

Anexo 7. Pictogramas de Identificación de Peligros Físicos y de la Salud

Pictograma de Peligros Físicos y Para la Salud		
 <ul style="list-style-type: none"> • Gases comburentes • Líquidos comburentes (categorías 1 al 3) • Sólidos comburentes (categorías 1 al 3) 	 <ul style="list-style-type: none"> • Gases inflamables (categoría 1) • Aerosoles (categoría 1 y 2) • Líquidos inflamables 1 al 3) • Sólidos inflamables (categorías 1 y 2) • Sustancias y mezclas que reaccionan espontáneamente (tipos B al F) • Líquidos pirofóricos (categoría 1) • Sólidos pirofóricos (categoría 1) • Sustancias y mezclas que experimentan calentamiento espontáneo (categorías 1 y 2) • Sustancias y mezclas que en contacto con el agua, desprenden gases inflamables (categorías 1 al 3) • Peróxidos orgánicos (tipos B al F) 	 <ul style="list-style-type: none"> • Explosivos (inestable y divisiones 1.1 al 1.4) • Sustancias y mezclas que reaccionan espontáneamente (tipo A y B) • Peróxidos orgánicos (tipo A y B)
 <ul style="list-style-type: none"> • Gases a presión (comprimido, licuado, licuado refrigerado y disuelto) 	 <p>Sustancias y mezclas corrosivas para los metales (categoría 1)</p>	
Pictogramas de Peligros para la Salud		
 <ul style="list-style-type: none"> • Toxicidad aguda por ingestión, (categorías 1 al 3) • Toxicidad aguda por vía cutánea (categoría 4) • Toxicidad aguda por inhalación, (categorías 1 al 3) 	 <ul style="list-style-type: none"> • Corrosión/Irritación cutáneas (categoría 1) • Lesiones oculares graves/Irritación ocular (categoría 1) 	 <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilización respiratoria (categorías 1, 1A* y 1B*) • Mutagenicidad en células geminales (categorías 1 [tanto 1* como 1B] y 2) • Carcinogenicidad (categorías 1 [tanto 1A como 1B] y 2) • Toxicidad para la reproducción (categorías 1 [tanto 1A como 1B] y 2)

NOM-018-STPS-2000, Sistema para la identificación y Comunicación de peligros y Riesgos por Sustancias Químicas Peligrosas en los Centros de Trabajo.