

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS

Una etapa esencial en el proceso de estimación del riesgo en el transporte de materiales y residuos peligrosos es la obtención de frecuencias y probabilidades de los eventos no deseados. En este capítulo se describe de manera resumida las técnicas empleadas para la estimación de frecuencias y probabilidades de accidentes e incidentes, asimismo se describen los factores que contribuyen a que suceda un accidente, consideraciones para el análisis de los datos sobre accidentes e incidentes y un procedimiento para la estimación de la tasa de accidentes.

5.1 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA Y LA PROBABILIDAD DE ACCIDENTES E INCIDENTES

El proceso de evaluación del riesgo implica la estimación de las frecuencias, probabilidades y consecuencias de eventos no deseados. Dentro de las metodologías o técnicas para la estimación de frecuencias y probabilidades se encuentran (Abkowitz y Cheng, 1989):

- ◆ Registros históricos e inferencia estadística
- ◆ Árbol de fallas
- ◆ Árbol de eventos
- ◆ Modelación analítica y simulación
- ◆ Estimación subjetiva
- ◆ Análisis bayesiano

Sin embargo, debe considerarse que en algunos casos las técnicas anteriores no pueden combinarse entre sí o complementarse para la obtención de frecuencias y probabilidades.

5.1.1 Registros históricos e inferencia estadística

La frecuencia de accidentes e incidentes puede estimarse a partir de registros históricos, para esto es necesario que el número de accidentes e incidentes ocurridos sean referido a un periodo de exposición. Así, es posible establecer la frecuencia de un evento tope sin requerir de una detallada modelación de la frecuencia por medio de árbol de fallas o árbol de eventos. La frecuencia de un evento en el transporte de materiales y residuos peligrosos puede expresarse como el número de eventos esperados por unidad de distancia recorrida (evento/vehículo-kilómetro), también puede hacerse con respecto a una unidad de volumen y de distancia (evento/tonelada-kilómetro) (Abkowitz y Cheng, 1989).

La probabilidad no posee unidades y puede utilizarse para describir la posibilidad de que ocurra un evento durante un periodo específico de tiempo o la probabilidad condicional de que ocurra un evento dado que algún evento precursor ha sucedido. El concepto de probabilidad puede interpretarse de tres maneras diferentes. clásica (probabilística), frecuentista y subjetiva. El conocer la probabilidad exacta de un evento, como lo requeriría el método clásico, es muy difícil; una interpretación frecuentista es más práctica pero se requiere de un tamaño suficiente de la muestra (o población). Cada una de estas interpretaciones siguen las mismas reglas y axiomas, y pueden por lo tanto utilizarse juntas y aprovechar las fortalezas de cada una (U.S C G, 2000).

Tabla 5.1 Interpretaciones de la probabilidad

Interpretación	Descripción
Clásica	La probabilidad de un evento es la razón del número de resultados que presentan los atributos de un evento entre el número total de posibles eventos igualmente probables.
Frecuentista	La probabilidad de un evento está dado por el límite de su frecuencia relativa cuando el número de muestras aumenta.
Subjetiva	La probabilidad de un evento es una medida del grado de confianza que posee una persona en que suceda dicho evento.

Fuente U S Coast Guard, 2000

La técnica de análisis de frecuencias basado en registros histórico es apropiado cuando las causas de falla son muy diversas y difíciles de predecir, como es el de los incidentes en transportación. Asimismo para que una estimación de la frecuencia sea confiable, se requiere que los registros empleados sean suficientes en número, precisos y aplicables al proceso particular en análisis (Abkowitz y Cheng, 1989).

Para obtener la frecuencia de un evento basado en registros históricos se puede emplear un método formado por cinco pasos (AIChE, 1989):

Definición del contexto: En este paso se deben definir los objetivos, requisitos de la base de datos, definición del sistema (rutas, vehículos, tipos de materiales, etc.), identificación de peligros, tipos de accidentes, lista de incidentes, selección de incidentes a considerarse. Obteniéndose en este paso la lista específica de los accidentes e incidentes para las cuales se estimará la frecuencia.

Revisión de las fuentes de los datos: Las fuentes de datos pueden ser diversas, y deben analizarse para determinar que sean completas e independientes. El periodo de tiempo para la cual existen registros debe ser suficiente para proporcionar una muestra de tamaño significativo. Las frecuencias de incidentes derivadas de listas que contengan uno o dos incidentes de un tipo particular pueden ser muy inciertas. Cuando se utilizan varias fuentes de datos los incidentes duplicados deben eliminarse.

Revisión de la pertinencia de los datos: Cuando los registros históricos abarcan un periodo extenso de tiempo, las condiciones en que se desarrolla el proceso (transporte, tipo de vehículos) pudieran haber sido modificados por lo cual debe revisarse la descripción del accidente o incidente para descartar las fallas sin relevancia. Por ejemplo se debe decidir cuando se separan o no los datos para diferentes tipos de vehículos, o se descartan datos para vehículos no permitidos.

Cálculo de la frecuencia del evento: Cuando los datos han sido confirmados como apropiados para su aplicación y, los accidentes, incidentes y la exposición (kilómetros recorridos por la unidad) son consistentes, la frecuencia del evento puede ser calculada dividiendo el número de eventos entre la exposición. Cuando los datos no son totalmente apropiados (consistentes) puede emplearse un método alternativo como es el análisis por medio del árbol de fallas.

Validación de la frecuencia: Es posible comparar la frecuencia del evento con una población (vehículos) que no fue empleada para la estimación de la frecuencia. Esto permite revisar posibles errores o indicar algún error producto de un inadecuado tratamiento.

El uso de la inferencia estadística se basa en la condición de que existen suficientes datos para llevar a cabo un análisis objetivo. La inferencia estadística es común en los procedimientos para estimar el riesgo. La metodología asume que los incidentes en el sistema ocurren en forma independiente y con probabilidades constantes. De esta manera, el desempeño en el pasado puede extrapolarse para inferir una previsión del futuro. Sin embargo esta técnica presenta varios inconvenientes:

- ◆ Cuando se cuenta con un registro de los accidentes, a menudo no se tiene información para estimar el nivel de exposición (volumen transportado, distancia transportada)

- ◆ El tamaño de la base de accidentes puede ser inadecuada, al no existir un registro de datos de accidentes mantenido por un periodo de tiempo extenso, es así que la calidad del registro puede cuestionarse
- ◆ Por último, existe una dificultad en asumir que la distribución de accidentes es constante y que no se modifica con el tiempo o con el desarrollo de nuevas técnicas, medidas de mantenimiento, etcétera. Por lo tanto, cuando la estimación del riesgo depende únicamente de la inferencia estadística (o de cualquier otro método) es necesario identificar las incertidumbres en el proceso de estimación del riesgo para poder así incorporarlas dentro del proceso de decisión.

5.1.2 Árbol de fallas

El análisis de árbol de fallas permite estimar la frecuencia de un incidente peligroso a partir de un modelo sobre el mecanismo de falla de los componentes básicos de un sistema. El árbol de fallas se compone por variables binarias (el evento ocurre o no) relacionadas por funciones lógicas, esencialmente "y" y "o". En un árbol de fallas se identifica un evento tope a partir de un conjunto de eventos básicos, mediante los cuales se puede obtener la probabilidad del evento tope. En la aplicación del árbol de fallas se requiere que los eventos de interés sean desarrollados a través de todas las posibles secuencias a los eventos iniciadores. En el ejemplo de árbol de fallas ilustrado en la figura 5.1, el evento de interés es una falla que resulta potencialmente en muerte; la estructura lógica indica que esto sucederá si un accidente ocurre y tiene por resultado un derrame, incendio o explosión. La causa directa de un accidente puede ser resultado de uno de los factores identificados en la parte inferior del árbol de fallas (Abkowitz y Cheng, 1989; AIChE, 1989).

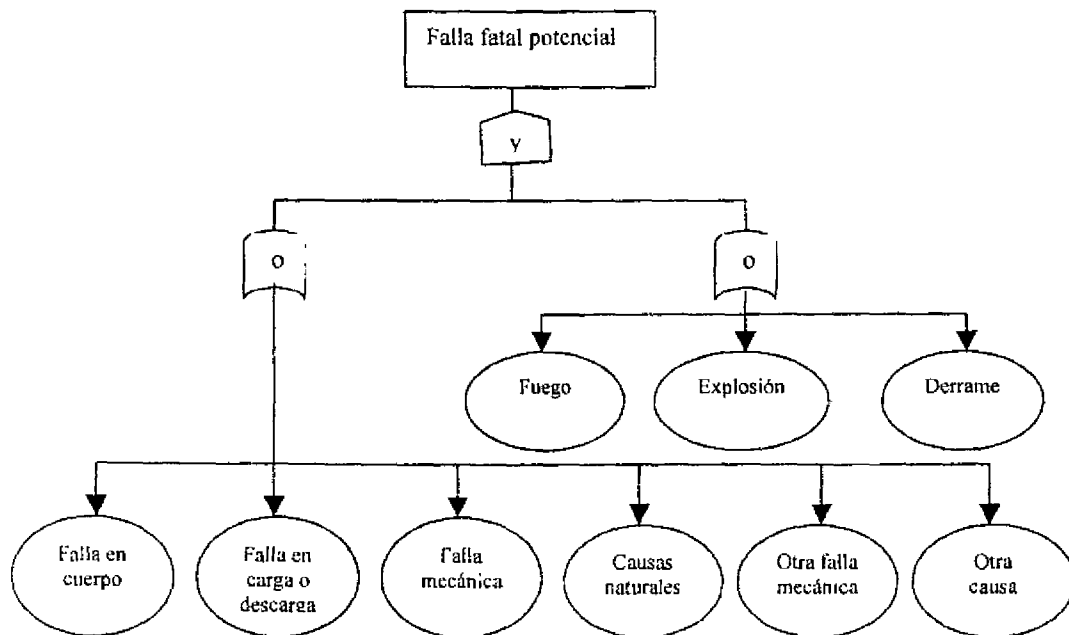


Figura 5.1 Árbol de fallas (Abkowitz y Cheng, 1989).

El árbol de fallas permite además de estimar las probabilidades de eventos iniciadores y eventos subsecuentes, el representar una secuencia de eventos compleja. Para elaborar un árbol de fallas se pueden seguir los siguientes pasos (AIChE, 1989):

Descripción del sistema: En este paso se busca comprender las causas de los eventos indeseables a través del conocimiento del funcionamiento del sistema (vehículo, contenedor, camino, etc.). En este paso se requiere revisar y disponer de información sobre: propiedades físicas y químicas del material transportado, especificaciones del vehículo y recipiente con material peligroso, operación del equipo, factor humano, factores ambientales, etcétera.

Identificación del peligro: Existen diferentes métodos para identificar los peligros que incluyen: análisis preliminar de peligros (PHA), ¿qué pasa si? (What if?), análisis de peligros y operatividad (Hazop), análisis de modos de falla y efectos (FMEA). Estos métodos proporcionan una lista de eventos tope.

Construcción del árbol de fallas: Normalmente el árbol de fallas se construye considerando el evento tope y, desarrollando las causas necesarias y suficientes para originarlo junto con sus relaciones lógicas (relaciones y, o). durante este proceso se deduce qué elemento origina un evento y continúa con el proceso deductivo hasta que se tenga un conjunto de eventos básicos, que al asignárseles una probabilidad permitan obtener la probabilidad correspondiente al evento tope.

Examen cualitativo de la estructura: Una vez que el árbol está construido se le puede examinar cualitativamente para comprender el mecanismo de falla. Este examen proporciona información sobre los posibles modos de falla (combinación de eventos que conducen al evento tope). A este proceso se le conoce como análisis del conjunto de cortes mínimos (minimal cut set analysis). De esta manera la efectividad de las protecciones (salvaguardas) la importancia cualitativa de varios subeventos y la susceptibilidad de modos de falla comunes se destacan.

Evaluación cualitativa del árbol de fallas: De acuerdo a la estructura del árbol de fallas y estimando o conociendo la frecuencia de cada evento básico y de los eventos no desarrollados es posible calcular la frecuencia del evento tope.

5.1.3 Árbol de eventos

El árbol de eventos es un modelo lógico gráfico que identifica y cuantifica los posibles resultados que siguen a un evento iniciador. El árbol de eventos proporciona una cobertura sistemática de la secuencia temporal de la propagación del evento. Los árboles de fallas se usan a menudo para modelar las ramificaciones a partir de un nodo del árbol de eventos. Existe una diferencia del término evento iniciador entre su aplicación en el análisis de árbol de fallas y el árbol de eventos; en el primero se pueden tener muchos eventos iniciadores que conducen a un evento tope sencillo, pero un árbol de eventos tendrá solo un evento iniciador que conduzca a varios posibles resultados (Abkowitz y Cheng, 1989; AIChE, 1989).

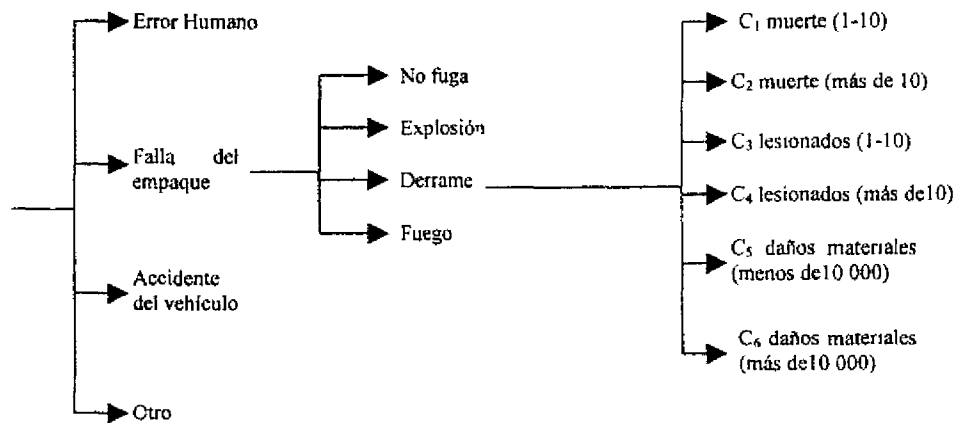


Figura 5.2 Árbol de eventos (Abkowitz y Cheng, 1989).

El árbol de eventos además de poder estimar las probabilidades de eventos iniciadores y eventos subsecuentes, puede emplearse para determinar los posibles impactos de un evento.

La construcción de un árbol de eventos es secuencial y como en el análisis del árbol de fallas es de arriba a abajo. La secuencia lógica de pasos para un árbol de eventos es la siguiente (AIChE, 1989)

Identificación del evento iniciador: El evento iniciador es en la mayoría de los casos un evento de falla que corresponde a la liberación del material; este evento de falla puede identificarse por alguno de los métodos para la identificación de peligros. La frecuencia de este incidente puede estimarse por medio de registros históricos o análisis de árbol de fallas.

Identificación de funciones de seguridad, factores que promueven el peligro y definición de resultados: Una función de seguridad es un dispositivo, acción o barrera que puede interrumpir la secuencia de un evento iniciador hacia un resultado peligroso; ejemplo de funciones de seguridad son sistemas de seguridad automáticas, alarmas, etcétera. Un factor promotor del peligro puede cambiar el resultado final de un incidente (por ejemplo modificar una dispersión segura de material en la atmósfera a un incendio o una explosión de nube de vapor). Un encabezado puede utilizarse para señalar la función de seguridad o un factor promotor de peligro; esto es, las ramas de un árbol poseen valores de si y no, y el encabezado estará determinando de que se trata. La definición de resultados de un incidente es el determinar cual es el resultado final de la secuencia: BLEVE, explosión de nube de vapor no confinada, fuego instantáneo, dispersión segura, etcétera.

Construcción del árbol de eventos: El árbol de eventos representa gráficamente la progresión cronológica de un incidente, para cada encabezado o nodo, dos o más alternativas pueden analizarse hasta que un resultado final se obtenga para cada nodo. Los encabezados deben indicarse en la parte superior de la hoja, sobre la rama apropiada de un árbol de eventos. Comenzando con el eventos iniciador, muchos analistas etiquetan cada encabezado con una letra, así cada secuencia de eventos puede especificarse como una combinación de letras.

Clasificación de resultados: El objetivo de construir un árbol de eventos es identificar los eventos posibles más importantes. Cuando lo que interesa es estimar el riesgo de muerte solo los resultados que llevan a esto necesitan desarrollarse. Diferentes resultados de incidentes desarrollados a través de las ramas de un árbol de evento pueden ser iguales. Por lo tanto los resultados finales de un árbol de eventos pueden clasificarse y agruparse de acuerdo al tipo de modelo de consecuencias que se emplee para el análisis.

Estimación de probabilidades de cada rama del árbol de eventos: Cada encabezado en el árbol de eventos, diferente del evento iniciador, corresponde a la probabilidad condicional de algún resultado si el evento precedente ha ocurrido. La probabilidad asociada a cada una de las opciones que tiene un encabezado, pueden ser binarias o múltiples pero deben sumar 1.0. La fuente de la probabilidad condicional pueden ser registros históricos, datos ambientales, datos de confiabilidad del equipo, datos sobre confiabilidad humana, datos a opinión de expertos, etcétera.

Calidad de los resultados: La frecuencia de cada resultado de un incidente o accidente puede determinarse multiplicando la frecuencia del evento iniciador por la probabilidades condicionales a lo largo de la rama que conduce a un resultado final.

Comprobación de resultados: Al igual que con los árboles de fallas, el análisis del árbol de eventos pueden llevarnos a resultados incorrectos o inexactos, de tal manera que es importante hacer una comprobación de acuerdo al sentido común y con resultados de registros históricos.

5.1.4 Modelación analítica y simulación

La modelación analítica y la simulación para la estimación del riesgo expresan la operación de un sistema en términos de parámetros funcionales que representan a los componentes del sistema y a los factores

externos; las condiciones para las cuales los incidentes ocurren y las consecuencias se asocian con combinaciones específicas de los valores de estos parámetros. En el caso de los modelos de simulación los parámetros son estocásticos y los valores se representan por distribuciones de probabilidad, a menudo derivadas de datos empíricos (Abkowitz y Cheng, 1989).

Los modelos analíticos son más simples, por lo cual se aplican principalmente a los componentes de la metodología para la estimación del riesgo, como es el desarrollo de los modelos de ocurrencia de incidentes, que se representan comúnmente como un modelo de Poisson. Un acercamiento analítico típico asume que los derrames o liberaciones son eventos independientes que suceden de manera aleatoria con respecto a la distancia recorrida por la unidad de transporte. El número de derrames n que ocurre en una distancia recorrida L , es una variable aleatoria; si se cumple una premisa de independencia, entonces n está distribuida de acuerdo a la distribución de Poisson con un parámetro vL :

$$P(n) = \frac{(vL)^n}{n!} e^{-vL} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde v es el número promedio de derrames por unidad de distancia (kilómetro, milla, etcétera).

5.1.5 Estimación subjetiva

La estimación subjetiva la realizan expertos o grupos de expertos que poseen una familiaridad con el problema manejado y pueden extrapolar su experiencia y expresarlos en términos cualitativos o cuantitativos para incorporarlos al proceso de estimación de riesgo. Existen algunas publicaciones en las cuales se desarrolla la estimación subjetiva mediante índices, sin embargo la estimación cuantitativa de efectos cualitativos es un factor que debe considerarse con reserva (Abkowitz y Cheng, 1989).

5.1.6 Análisis bayesiano

El análisis bayesiano se basa en la aplicación del teorema de Bayes, este análisis permite el incorporar la probabilidad previa (del accidente o incidente) y la posterior (probabilidad condicional) para la obtención de probabilidades. Además, puede diseñarse para incorporar estimaciones subjetivas en la obtención de probabilidades previas, y entonces utilizar cualquier dato empírico existente para derivar posteriormente probabilidades condicionales (Abkowitz y Cheng, 1989).

5.2 FACTORES QUE CONTRIBUYEN A LOS ACCIDENTES

Los factores involucrados en la ocurrencia de accidentes en el transporte de materiales y residuos peligrosos pueden agruparse en: factores asociados con el vehículo, factores asociados con el camino o el ambiente, y los factores asociados con el conductor. La mayoría de los accidentes se inician por algún tipo de error humano, comúnmente una falta de atención o un mal juicio sobre las condiciones en que se realiza el transporte, de esta manera el comportamiento y desempeño del conductor se considera como la causa principal de los accidentes. Los factores relacionados con los camiones y su equipamiento como son las dimensiones del camión, peso, fallas mecánicas y operativas, desempeñan un papel de menor importancia, aunque son difíciles de separar o diferenciar en términos de las causas de accidentes (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997).

Claramente la interrelación entre los anteriores factores y su contribución a los accidentes no está definida con precisión, es por esto que en muchos de los registros sobre accidentes no se define cual de estos tres factores fue el factor determinante del accidente.

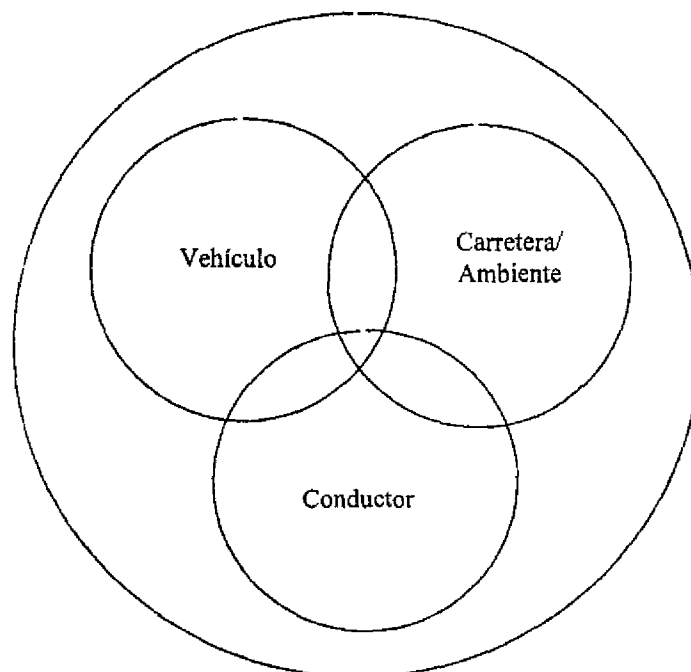


Figura 5.3 Factores que contribuyen a los accidentes (U.S.DOT, 1997)

5.2.1 Factores asociados con el vehículo

Dentro de las particularidades de los camiones y su equipamiento se incluyen características físicas, como son el número de remolques, la longitud del remolque, capacidad de carga, desempeño dinámico del vehículo bajo condiciones de carga variables, y otros sistemas mecánicos como son el sistema de frenos y las características del motor. La capacidad de frenado para las combinaciones de camiones es un elemento de especial importancia; esta capacidad relaciona una adecuada distancia para el frenado, con el mantenimiento en el control del vehículo y la estabilidad, y está influenciado por un variado número de factores que tienen que ver con la características y diseño del equipo. Lo anterior aunque enfocado al autotransporte puede aplicarse sin dificultad al transporte ferroviario (U.S. DOT, 1997).

5.2.2 Factores asociados con el conductor

Dentro de los factores asociados con el desempeño del conductor se encuentran la habilidad, experiencia y estado físico (salud, fatiga); estos factores son críticos sin importar el tipo o tamaño del vehículo. Para el traslado o transporte seguro de materiales y residuos peligrosos, es el conductor el elemento más importante. La experiencia del conductor y su entrenamiento tienen un efecto directo en la tasa de accidentes; asimismo, la falta de experiencia es un factor de importancia significativa en la pérdida de control de los vehículos y el consecuente accidente (U.S. DOT, 1997).

5.2.3 Factores asociados con el camino o el ambiente

Los factores ambientales incluyen a las condiciones meteorológicas adversas, condiciones de visibilidad, tráfico, etcétera. Dentro de los factores del camino se incluyen a la clase de camino, condiciones de la carretera, estado de mantenimiento, presencia o ausencia de señalamientos, intersecciones, barreras,

etcétera. Por geometría del camino se entiende a las estructuras físicas donde operan los vehículos y que incluyen al tipo de carretera, número de carriles e intersecciones. Los vehículos de grandes dimensiones presentan dificultades adicionales en las intersecciones, rampas de entrada y salida, y con los elementos estructurales (o de diseño) de las carreteras ya que estas pueden no ser adecuadas para las dimensiones de los vehículos, sus pesos y configuraciones. Las interacciones entre el camión, la geometría del camino y la visibilidad se acentúa cuando el volumen de tráfico aumenta. Condiciones del tiempo como es la lluvia, la nieve y el hielo crean condiciones que dificultan la estabilidad y el control de los vehículos durante los cambios de dirección y frenado. La visibilidad es función de las condiciones del tiempo y de la hora, el atardecer, el amanecer y la noche incrementan la demanda de atención del conductor para tener un control adecuado del vehículo (U.S. DOT, 1997).

5.3 BASES DE DATOS SOBRE ACCIDENTES, INCIDENTES Y EXPOSICIÓN

Para el análisis de la base de datos sobre el transporte de materiales y residuos peligrosos se requiere hacer una distinción entre bases de datos sobre accidentes, incidentes y exposición. Las bases sobre accidentes contiene los reportes sobre accidentes de tráfico, donde cada reporte contiene o debe contener las características de un accidente en particular. Las bases de datos que interesan para el análisis de accidentes en el transporte de materiales y residuos peligrosos son aquellos que contienen datos sobre accidentes en camiones que transportan estos materiales de manera desagregada con respecto a otros tipos de accidentes (carga general, pasajeros) (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997).

Las bases de datos sobre accidentes se elaboran a partir de reportes y contienen las características de como sucedió una liberación no intencional de material peligroso. Los accidentes de mayor interés son aquellos que suceden en carreteras ya que los incidentes en las operaciones de carga y descarga de materiales en terminales y patios de maniobras no son relevantes en los análisis sobre transporte en carretera o para el análisis de rutas de transporte, aunque también pueden considerarse, analizarse e integrarse. Diferentes tipos de incidentes deben tomarse en cuenta incluyendo aquellas liberaciones de material resultado de:

- ◆ Accidentes de tráfico
- ◆ Fugas en válvulas o en el cuerpo del tanque
- ◆ Fuego o explosión

Los datos sobre accidentes e incidentes se utilizan para establecer la frecuencia con que un evento en particular ocurre. Asimismo, se requiere que estos datos correspondan (estén vinculados) con los datos sobre exposición, entendiéndose por exposición a una medida de las veces que suceden accidentes o incidentes, así como el número de envíos o traslados de materiales peligrosos, toneladas trasladadas de materiales peligrosos o de una manera más apropiada vehículos-kilómetro de materiales y/o residuos peligrosos trasladados. Así, una medida del riesgo como son las tasas de accidentes ocurridos por millón de vehículos-kilómetro, se obtienen a partir de los diferentes bases de datos; sin embargo, para obtener las tasas de accidentes para un tipo específico de camión establecida para una clase de camino se requiere que el conjunto de datos sobre accidentes y exposición esté debidamente seleccionado. Es de aclararse además que los incidentes pueden ocurrir sin que suceda un accidente (Harwood *et al.*, 1990, U S DOT, 1997).

Las bases de datos a utilizarse deben proporcionar la información suficiente para estimar: accidentes, incidentes, frecuencias o tasas de accidentes.

5.3.1 Datos sobre accidentes de tráfico

En las bases de datos sobre accidentes se deben identificar y discriminar los accidentes en los cuales estén involucrados camiones que transportan materiales y residuos peligrosos, cuando estos camiones debido al accidente han sufrido una pérdida de contención y liberación del material, y otros resultados de interés como son lesionados, muertes, costos, etcétera.

5.3.1.1 Frecuencia de accidentes

Para establecer la frecuencia de los accidentes deben separarse aquellos en los cuales estén involucrados los camiones que transportan materiales y residuos peligrosos, de aquellos vehículos que no transportan dichos materiales. Sin embargo, hay que considerar que los accidentes serán reportados de acuerdo a la severidad del accidente, así para los accidentes de mayor severidad serán reportados con mayor frecuencia que los accidentes de menor severidad. Lo anterior también aplica a los accidentes en los que ha existido una liberación de material, ya que su reporte ante las autoridades variará de acuerdo a la severidad del incidente y de la cantidad de material liberado, y por lo tanto el número de accidentes podrá subestimarse. Los accidentes pueden agruparse de acuerdo a diferentes categorías o características comunes (Harwood *et al.*, 1990; U.S. DOT, 1997):

Tipo de accidente

Los accidentes deben diferenciarse por tipos, de acuerdo tanto al número de vehículos involucrados, tipo de percance (volcadura, salida del camino, etc.) y si existe liberación de material.

Configuración de camiones

Es recomendable que las bases de datos sobre accidentes incluyan la configuración de los vehículos accidentados, ya que esto es útil para el análisis de la distribución de accidentes.

Consecuencias de accidentes

En las bases de datos se debe incluir las consecuencias de cada accidente, diferenciando para cada uno de ellos si estos fueron originados por una liberación de material o debido a un accidente de tráfico. Se debe tener cuidado al incluir las consecuencias de accidentes de todo tipo de camiones y todo tipo de material transportado

5.3.2 Datos sobre incidentes

Para el análisis de incidentes se requiere considerar la información existente, para lo cual es necesario integrarla, y tener de ésta manera una base lo más extensa posible. Además es necesario hacer una distinción entre incidentes que ocurren durante el traslado de los materiales y, aquellos que ocurren en terminales y durante las operaciones de carga y descarga.

5.3.2.1 Frecuencia de incidentes

Para estimar la frecuencia de los incidentes es posible hacer una distinción entre los incidentes que ocurren en el interior de las carreteras y en sus derechos de vía, y los ocurridos fuera de las carreteras. Los incidentes que ocurren en un camino o carretera pueden agruparse de la siguiente manera (Harwood *et al.*, 1990; Saccomanno *et al.*, 1989)

- ◆ Incidentes causados por accidentes de tráfico
- ◆ Incidentes ocasionados por movimientos en la carga (en el vehículo en movimiento)
- ◆ Incidentes debido a falla en el recipiente y sus dispositivos

Los incidentes que ocurren fuera de la carretera pueden agruparse en:

- ◆ Incidentes en operaciones de carga o descarga
- ◆ Incidentes debido a la manipulación de los materiales
- ◆ Incidentes debido a un accidente de tráfico (por ejemplo: vehículo estacionado y colisión con otro vehículo)

Estas causas de incidentes pueden clasificarse de acuerdo a la severidad del accidente (consecuencias).

- ◆ Muerte
- ◆ Muerte o lesiones
- ◆ Muerte o lesiones o fuga de material tóxico
- ◆ Muerte o lesiones o explosión
- ◆ Muerte o lesiones o explosión o incendio
- ◆ Pérdida económica

5.4 Procedimiento para la estimación del volumen de tráfico y tasa de accidentes

El requisito indispensable para la evaluación del riesgo a lo largo de una trayectoria (ruta) por la cual se transportan materiales y/o residuos peligrosos, es contar con las frecuencias relativas de los accidentes; éstas deberán ser confiables para determinar las probabilidades de los diferentes eventos dado que sucedió un accidente. En la estimación de las tasas de accidentes de camiones debe considerarse el efecto que sobre la frecuencia ocasionan el tipo de camino y el tipo de área (urbana o rural), por lo tanto en el cálculo de tasas de accidentes de camiones que puedan utilizarse como valores típicos (utilizables a falta de valores para un caso particular) debe ponerse énfasis en incluir y determinar los efectos del tipo de camino y tipo de área. Para el análisis de los accidentes y el cálculo de la tasa de accidentes de camiones se requiere información sobre (Harwood *et al.*, 1990):

- ◆ Geometría del camino
- ◆ Volumen de tráfico
- ◆ Registro de accidentes

Es posible hacer una separación de los incidentes en el transporte de acuerdo al material involucrado, considerando las clasificaciones existentes para materiales y residuos peligrosos; de esta manera se obtiene una distribución de los incidentes de acuerdo a la clase de material liberado. Asimismo, los datos sobre consecuencias de incidentes deben contemplar a las muertes, lesionados y otros parámetros considerados producto de la liberación de materiales y residuos peligrosos; en estos registros se debe excluir o desagregar aquellas muertes, lesiones u otras consecuencias atribuibles a accidentes de tránsito y no a incidentes con materiales peligrosos (Harwood *et al.*, 1990).

En la información sobre la geometría del camino es necesario definir las características de los segmentos (o tramos) que lo constituyen, a los cuales el volumen de tráfico y los datos sobre accidentes deberán asignarse. Las características sobre geometría del camino determinados para cada segmento deben integrar como mínimo:

- ◆ Número de carriles
- ◆ Estructura de los carriles: dividido o no dividido
- ◆ Control de acceso: de cuota o libre
- ◆ Dirección: un sentido o doble sentido
- ◆ Tipo de área: rural o urbana

Los registros sobre tráfico de vehículos se utilizan en el análisis de frecuencias para obtener el promedio anual de tráfico diario, el volumen promedio diario de camiones y el porcentaje de camiones con respecto al tráfico. Estos volúmenes de tráfico de camiones deben ser asignados o referidos a los segmentos carreteros correspondientes al igual que los datos correspondientes sobre la geometría del segmento y los datos sobre accidentes. Es de tomarse en cuenta que los registros sobre tráfico incluyen normalmente a todo tipo de vehículos (automóviles, autobuses, carga general, etc.) por lo que es necesario que estos datos se depuren para separar únicamente a los camiones y sus combinaciones (tractor-trailer) que transportan materiales y residuos peligrosos, asimismo, esto se debe realizar con los registros de accidentes. De esta manera los registros sobre volúmenes de tráfico y de accidentes para camiones serán un subconjunto de los registros del tráfico de vehículos y de los registros sobre accidentes. Sin embargo, hay que considerar que es

poco posible que existan datos suficientes para asignar valores de tráfico para todas las carreteras o vías de comunicación, principalmente las localizadas en ciudades y que no son jurisdicción federal.

La determinación sobre volúmenes de tráfico y accidentes de camiones puede realizarse mediante un procedimiento de cinco etapas y una etapa adicional de análisis de datos. En el procedimiento la principal función es relacionar el volumen apropiado correspondiente al tráfico de camiones y los datos sobre accidentes para cada uno de los segmentos de camino, de acuerdo a la clase de camino. Donde la combinación de tipo de geometría de camino y tipo de área se le denominará clase de camino (o carretera). A continuación se describen las etapas que integran el procedimiento (Harwood *et al.*, 1990).

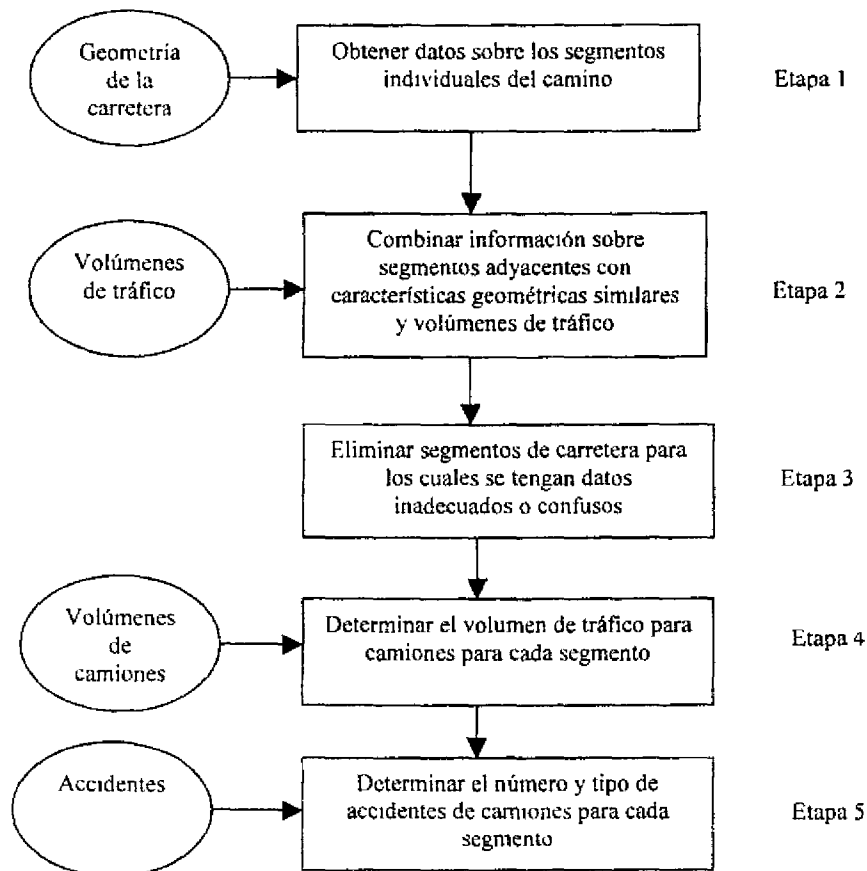


Figura 5.4 Procedimiento para determinar volúmenes de tráfico y accidentes de camiones (Harwood *et al.*, 1990)

Etapa 1

La primera etapa consiste en determinar la clase de camino a que pertenece cada segmento de la ruta considerada. Esto es, determinar el tipo de geometría y tipo de área que le corresponda a cada segmento del camino. Para determinar las clases de camino puede utilizarse la clasificación contenida en el apéndice del "Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal", en este documento solo se consideran vías de jurisdicción federal y la clasificación se basa en el tipo de geometría, consideraciones sobre uso y ubicación; sin embargo esta clasificación podrá modificarse incluyendo otros tipos de geometría y tipo de área correspondiente, como se muestra en la tabla 5.2 (Harwood *et al.*, 1990).

Tabla 5.2 Clasificación de caminos de acuerdo al tipo de geometría y tipo de área

Clase de camino Tipo de área ¹	Tipo de geometría	Nomenclatura ²
Rural	Carretera 4 carriles	A4
Urbana	Carretera 4 carriles	A4
Rural	Carretera 2 carriles	A2
Urbana	Carretera 2 carriles	A2
Rural	Carretera 4 carriles red privada	B4
Urbana	Carretera 4 carriles red privada	B4
Rural	Carretera 2 carriles red privada	B2
Urbana	Carretera 2 carriles red privada	B2
Rural	Carretera 2 carriles red secundaria	C
Urbana	Carretera 2 carriles red secundaria	C
Rural	Carretera 2 carriles red alimentadora	D
Urbana	Carretera 2 carriles red alimentadora	D
Urbana	Calle de un solo sentido (en ciudad) ³	

¹ Referencia al tipo de área no incluida en el "Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal".

² La nomenclatura fue tomada del "Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal", sin embargo en ésta no se hace diferenciación con respecto al tipo de área.

³ No considera en la clasificación incluida en el "Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal".

La nomenclatura incluida en la tabla anterior se incluye en el *Reglamento sobre pesos, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*; sin embargo, en dicho reglamento no se hace referencia al tipo de área por la cual el camino atraviesa, así es posible modificarla para que esta característica se considere e identificar con precisión la clase de camino que corresponde a cada segmento de la carretera. Además, pueden incluirse categorías adicionales para calles, avenidas, etcétera, localizadas en zonas urbanas no contempladas en el reglamento ya sea por no ser de jurisdicción federal u otra causa.

Etapa 2

Los segmentos de la carretera que presentan una longitud relativamente menor al promedio de las longitudes de los demás segmentos considerados, puede sumarse siempre y cuando los segmentos adyacentes sean de igual tipo de geometría, presenten otras similitudes y posean un volumen de tráfico promedio diario que por ejemplo, no difiera en 20%. Cuando esta operación se realice los volúmenes de tráfico promedio diario pueden combinarse de la siguiente manera (Harwood *et al.*, 1990).

$$VTPD = \frac{(VTPD_1)L_1 + (VTPD_2)L_2}{L_1 + L_2} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde:

VTPD: Volumen de tráfico promedio diario de los segmentos unificados, en vehículos/día

VTPDi: Volumen de tráfico promedio diario de cada segmento *s* considerado, para *i*=1,2 en vehículos/día.

Li Longitud de cada segmento *s* considerado para *i*=1,2

Etapa 3

Los segmentos para los cuales los datos sobre volumen de tráfico y sobre accidentes en caminos no puedan obtenerse o que no ajusten dentro de las categorías para clase de carretera se deberán eliminar del análisis.

Etapa 4

Los volúmenes de tráfico de camiones se obtienen para los segmentos a partir de los registros sobre volúmenes de tráfico, estos datos se multiplica por la longitud del segmento y por 365 días para obtener el recorrido anual de camiones-kilómetro (vehículos-kilómetro) en cada segmento:

$$RAC_s = VPDC_s \times L_s \times 365 \quad s=1,2 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde:

RACs: Recorrido anual de los camiones en el segmento *s*, en vehículos-kilómetro

VPDCs: Volumen promedio diario de camiones por día en el segmento *s* en vehículos/día

Etapa 5

Del total de registros sobre accidentes se obtienen los datos sobre accidentes de camiones. Los accidentes de camiones se clasifican por año, severidad del accidente y tipo de accidente; la severidad del accidente se refiere a una clasificación previamente establecida, por ejemplo: accidente debido a colisión de uno o más vehículos, accidente sin colisión, etcétera. En esta etapa se determina la localización de cada accidente referido con respecto al kilómetro del camino donde sucede el accidente, severidad del accidente y tipo de camino; paso siguiente se suma el total de accidentes para cada segmento del camino de acuerdo al año y tipo de accidente. De esta manera se obtienen datos para cada segmento sobre: el volumen de camiones y accidentes de camiones ocurridos, para posteriormente realizar un análisis de los datos y calcular la tasa de accidentes y las probabilidades de fuga o liberación. En esta etapa el analista deberá considerar de acuerdo a la calidad de los registros existentes, si dentro del volumen de tráfico considera a los diferentes combinaciones de caminos y la posibilidad de hacer el análisis de manera integrada (todos los tipos de arreglos de camiones) o diferenciada (para diferentes tipos de arreglos de camiones).

Los registros de accidentes pueden agruparse de acuerdo al tipo de accidente para un periodo de tiempo, considerando lo siguiente (Harwood *et al.*, 1990):

- ◆ Clase de camino
- ◆ Tipo de área
- ◆ Tipo de geometría
- ◆ Accidentes para un solo vehículo sin colisión
 - Volcadura en camino
 - Volcadura fuera del camino
 - Salida del camino
 - Otro tipo
- ◆ Accidente para un solo vehículo con colisión
 - Colisión con vehículo estacionado
 - Colisión con vehículo en movimiento
 - Colisión con objeto fijo
 - Colisión con ferrocarril
 - Colisión con ganado
 - Otro tipo
- ◆ Accidente para más de un vehículo con colisión
 - Colisión con camión
 - Colisión con automóvil
 - Colisión con autobús
 - Otro tipo

Así del análisis por tipo de accidente se puede obtener la frecuencia y/o la probabilidad correspondiente.

Para el cálculo de las tasa de accidentes de camiones para cada clase de camino, se utilizarán las siguientes variables (Harwood *et al.*, 1990; Erkut y Verter, 1995):

- ◆ Clase de camino
- ◆ Tipo de área
- ◆ Tipo de geometría
- ◆ Longitud total recorrida por los camiones, en kilómetros
- ◆ Número de secciones o segmentos considerados
- ◆ Volumen promedio diario de camiones, en vehículos/día
- ◆ Número de accidentes ocurridos
- ◆ Distancia recorrida por los vehículos considerados, en vehículo-kilómetros

Las variables anteriores permitirán realizar el cálculo de la tasa de accidentes en camiones expresado como accidentes/vehículo-kilómetro. Asimismo se podrá apreciar el efecto de las dos variables principales relacionadas con el transporte de materiales y residuos peligrosos (tipo de camino y tipo de área) sobre la tasa de accidentes en camiones.

Existen además otras variables que afectan a las tasas de accidentes entre las que se incluyen: ancho de carril, rampas, peraltes, intersecciones, etcétera; las cuales pueden incorporarse para la obtención de las tasas de accidentes, sin embargo la inclusión de estas variables requerirá de registros más detallados, un proceso más laborioso y la utilidad del producto obtenido ha sido cuestionado por diferentes autores (Harwood *et al.*, 1989)

Puesto que la liberación de materiales peligrosos dado un accidente varía de acuerdo con los tipos de accidentes y éstos varían de acuerdo a las clases de camino, se pueden calcular a partir de los registros de accidentes, las probabilidades de liberación de materiales peligrosos de acuerdo al tipo de accidente para cada clase de camino.

Posterior a las etapas anteriormente descritas, se realiza un análisis de los datos para de esta manera obtener la tasa promedio de accidentes de camiones para cada clase de carretera; esta tasa se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente (Harwood *et al.*, 1990):

$$TPAC_j = \sum_s \frac{A_{sj}}{RAC_{sj}} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

TPAC_j: tasa promedio de accidentes de camiones para la clase de carretera *j*, en accidentes/vehículo-kilómetro.

As_j: número de accidentes por año en el segmento *s* correspondiente a un tipo de carretera *j*, en accidentes/año.

RAC_{sj}: recorrido anual de los camiones en el segmento *s* perteneciente a la clase de carretera *j*, en vehículo-kilómetro/año.

La ecuación anterior se aplica a todos los segmentos y todos las clases de carretera considerados, para los cuales se cuenta con volúmenes de tráfico y datos de accidentes suficientes.

La tasa promedio de accidentes en camiones determinada para las diferentes clases de caminos, se emplearán en la evaluación del riesgo debido al transporte; asimismo, pueden utilizarse en el análisis de rutas alternativas cuando no se tienen datos específicos para cada ruta en estudio. Las tasas promedio de accidentes puede emplearse con confianza siempre y cuando se hayan calculado considerando muestras de tamaño apropiado.