

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

El objetivo del análisis de consecuencias es cuantificar el impacto negativo de un evento. Las consecuencias generalmente se miden en términos del número probable de muertos, aunque también es posible expresarlas en función del número de lesionados o de daños a la propiedad. Normalmente se consideran tres tipos de efectos: radiación térmica, ondas de sobrepresión por explosión y exposición a sustancias tóxicas

Existe una gran variedad de modelos que se utilizan en el análisis de consecuencias. Los modelos de fuente se utilizan para predecir la tasa de descarga, la evaporación instantánea de una sustancia, la cantidad de aerosol formado y la cantidad de sustancia evaporada. Los modelos de nube de vapor se utilizan para medir de dispersión en la dirección del viento, tomando en consideración las condiciones meteorológicas y la densidad del vapor. Los modelos de impacto permiten predecir las zonas de afectación debidas a fuego y explosión. Los modelos para gas tóxico se usan para predecir la respuesta humana debida a la exposición a un gas tóxico. Otros modelos se utilizan para predecir los efectos en humanos a la exposición a fuego y ondas de sobrepresión (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989).

Las consecuencias de los eventos pueden estimarse de una manera cuantitativa o cualitativa, o en ambas. Los procedimientos cualitativos a menudo utilizan categorías relativas como son: severo, moderado o insignificante, dependiendo de la severidad del incidente; a menudo las categorías cualitativas se establecen a partir de una consecuencia esperada (ejemplo 1 ó 5 lesionados). Procedimientos cuantitativos estiman el nivel esperado de severidad en términos del número de muertos, heridos, etcétera. Los procedimientos semicuantitativos a menudo usan un índice numérico para expresar las consecuencias relativas de un evento (AIChE, 1989; Theodore *et al.*, 1989)

El análisis de consecuencias debe contemplar como mínimo:

- ◆ La cantidad de sustancia liberada
- ◆ Los procesos físicos y mecanismos de dispersión por los cuales una sustancia puede alcanzar y afectar a las personas próximas al lugar de la fuga y dañar al ambiente.
- ◆ La cantidad de sustancia, radiación u ondas de sobrepresión que pueda alcanzar a las personas y al ambiente.
- ◆ Los efectos esperados de la liberación de sustancias.

En este capítulo se describen los diferentes modelos empleados para el análisis de consecuencias.

#### 4.1 MODELOS DE FUENTE

Los modelos de fuente se utilizan para definir cuantitativamente el escenario producto de la liberación de los materiales por medio de la estimación de las tasas de descarga y la evaporación de un derrame líquido. La mayoría de los incidentes con materiales peligrosos inician con una liberación del material con características tóxicas o inflamables. Esta liberación puede ser producto de la ruptura o fractura de los recipientes, válvula de venteo o válvula abierta. El material fugado puede estar en estado gaseoso, líquido, en dos fases, etcétera. El establecer la fase en la que se encuentra el material liberado es importante ya que afecta la estimación del flujo para el tamaño del orificio considerado. La fase en que se encuentra la descarga depende del escenario en que se da la liberación y ésta puede determinarse de acuerdo al diagrama de fases del material y del comportamiento de la sustancia en el diagrama durante el tiempo que dure la liberación. El punto inicial dentro del diagrama de fases está dado por las condiciones en que se encuentra el material antes de la liberación, el punto final dentro del diagrama puede estimarse de acuerdo a las condiciones en que se efectúa la liberación. La presión final a la que se encontrará el material liberado será la presión atmosférica. El

proceso de liberación se considera normalmente adiabático y con este criterio se determina la temperatura y composición a la presión atmosférica. Cuando existe un cambio de fase, un flujo bifásico debe considerarse. Un líquido puro se evaporara a la temperatura de ebullición, en cambio una mezcla lo hará en un rango de temperaturas (AIChE, 1989; AIChE, 1995; AIChE, 1996).

En los modelos de fuente o descarga lo primero que se debe determinar es la dimensión del orificio de fuga; para así estimar el tiempo de duración y el comportamiento en el flujo de descarga.

Los modelos de emisión de fuente requieren de una información inicial o básica para poderlos utilizar. Los datos iniciales sobre las características de la fuente son los siguientes (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

*Propiedades físicas y químicas del material.* Es indispensable conocer la composición química del líquido y/o gas liberado, y establecer las propiedades; dentro de éstas se incluyen al peso molecular, densidad, difusibilidad, conductividad y punto de ebullición. Las propiedades dependientes de la temperatura como son presión de vapor, capacidad calorífica, calor de vaporización y tensión superficial, también pueden determinarse. Cuando el material liberado es una mezcla, las propiedades de cada componente deben determinarse.

*Geometría del recipiente.* La tasa de liberación está relacionada con la geometría de la fuente, esto incluye a las dimensiones del tanque y las características del orificio de fuga. Estos parámetros permiten estimar la cantidad liberada y el tipo de fuga (instantánea o continua). Asimismo la posición relativa del orificio con respecto al nivel del líquido (y su volatilidad) determinará cuando una liberación es exclusivamente gaseosa o, de gas y líquido.

*Características del suelo.* Las liberaciones de materiales en fase líquida o con características de gas denso que están en contacto con la superficie del terreno, intercambian calor, humedad e interaccionan con el suelo, por lo cual es importante conocer no solo las características topográficas sino también el calor específico del suelo, contenido de humedad y porosidad; de tal manera que sea posible evaluar la tasa de emisión por evaporación.

*Variación en el tiempo.* Las concentraciones máximas pronosticadas para un tiempo promedio,  $T_p$ , es probable que sean proporcionales a la tasa máxima de emisión para este periodo de tiempo; por lo que conocer como varía la tasa de emisión con respecto al tiempo es de utilidad. En algunos casos la tasa de emisión puede variar debido al cierre de alguna válvula u otro dispositivo; asimismo debe ponerse atención en que la tasa de flujo en recipientes presurizados o de líquidos decrece con respecto al tiempo.

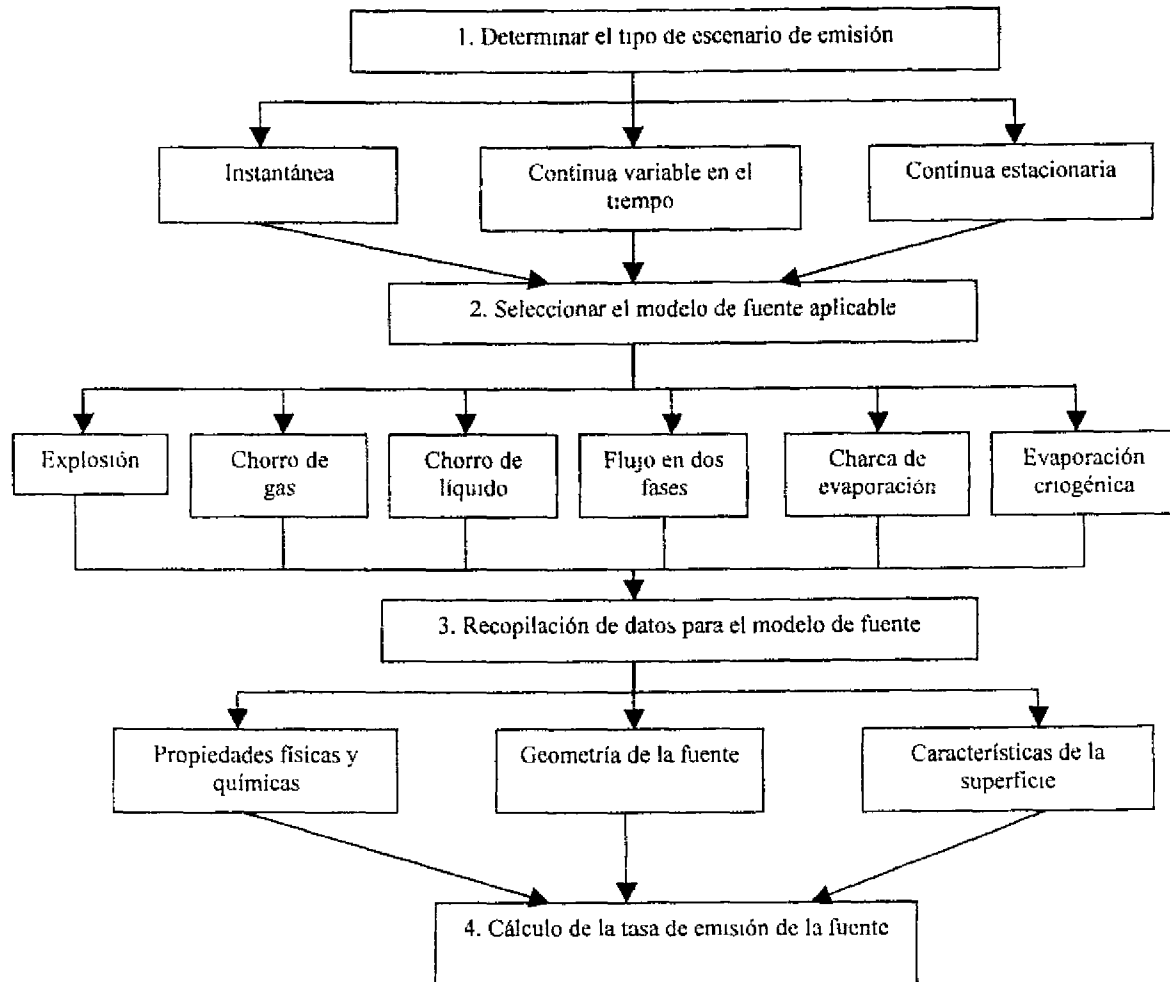
*Presencia de gas y aerosol en el chorro de salida.* La presencia en el momento de la fuga de gases y aerosoles debe establecerse. Además, los líquidos que no se evaporan de manera instantánea pueden no estar en forma de aerosol y formar una charca en el suelo.

La simulación del comportamiento en la fuente debido a una liberación accidental de materiales peligrosos es tal vez la operación más crítica para una adecuada estimación de las concentraciones viento abajo. Las unidades utilizadas para definir la tasa de emisión son unidades de masa por tiempo (por ejemplo kg/s), también puede utilizarse unidades de masa por superficie por tiempo para la evaporación de un charco; así como expresar la emisión en unidades de masa (kg) cuando se considera que la liberación es instantánea.

Las liberaciones accidentales de materiales peligrosos pueden ser de diferentes tipos, por ejemplo gas o líquido, liberación instantánea o continua, material refrigerado o presurizado, en suelo, en agua, etcétera; en muchos casos pueden ser una combinación de los anteriores. Para la estimación de la tasa de emisión se requieren de manera simplificada los siguientes pasos (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ Determinar la dependencia con respecto al tiempo de la emisión
- ◆ Seleccionar el modelo a aplicar de acuerdo al tipo de fenómeno: evaporación en charca, flujo en dos fases, etcétera.

- ◆ Determinar los datos necesarios sobre propiedades físicas, químicas, de geometría de la fuente y sobre la superficie del terreno donde se localiza la fuga, requeridos por el modelo seleccionado
- ◆ Estimar la tasa de emisión.



**Figura 4.1 Estimación de tasa de emisión (AICHE, 1994)**

Las liberaciones accidentales pueden agruparse en tres clases de acuerdo a su duración: instantáneas, continuas con variaciones con respecto al tiempo, continuas estacionarias o casi invariables con respecto al tiempo. El conocer que tipo de fenómeno se presenta permite seleccionar entre las diferentes técnicas de modelación y en la estimación de tasas de liberación. La selección del modelo de emisión depende del tipo de escenario en el que sucede la liberación, del material liberado y de sus propiedades. Los incidentes en tanques normalmente involucran liberaciones de tipo continuo con variación en el tiempo que pueden requerir de modelos de emisión para chorro de gas, chorro de líquido o para emisión en dos fases. La evaporación en charcas de líquidos comúnmente presentan emisiones continuas que varían con el tiempo, debido a la variación temporal en los balances de masa y calor entre la superficie y el material en la charca. Para tasas de evaporación pequeñas y un área de la charca aproximadamente constante, un modelo para evaporación de charca líquida de tipo continuo estacionario puede ser el apropiado (AICHE, 1989; AICHE, 1996).

Cada tipo de modelo de emisión requiere de información de entrada para poder estimar la tasa de emisión, las cuales pueden agruparse en tres clases: propiedades físicas y químicas, geometría de la fuente y características del terreno.

#### **4.1.1 Liberaciones de tipo chorro de gas**

Las liberaciones de tipo chorro de gas son ocasionadas por pequeños orificios en, por ejemplo recipientes con gas a presión, o cuando este orificio se localiza en el espacio que contiene vapor de un recipiente con un líquido volátil a presión. En este tipo de liberación puede esperarse que presente inicialmente una elevada tasa de emisión y ésta disminuya a medida que la presión en el recipiente disminuya. Cuando la liberación es producto de un orificio pequeño el gas es liberado a una velocidad próxima o igual a la velocidad del sonido; cuando esta velocidad se alcanza se le denomina flujo crítico. Las ecuaciones para determinar la tasa de emisión de liberaciones tipo chorro de gas ideal son conocidas, asimismo la ecuación que define la ocurrencia de un flujo crítico para un gas ideal cuando es liberado a través de un orificio pequeño. También se han desarrollado ecuaciones para calcular la tasa de emisión cuando: un gas presenta un flujo crítico en condiciones isoentropicas, cuando la presión en el recipiente ha disminuido de tal manera que existe un flujo subcrítico, así como cuando la presión en el recipiente disminuye con respecto al tiempo y la liberación del material ocurre de manera isotérmica o adiabática. Para un orificio en el espacio con vapor en un recipiente con líquido presurizado o criogénico, el gas liberado se suministra continuamente por la evaporación del líquido en el tanque, y puede modelarse considerando condiciones isoentropicas (AIChE, 1996).

#### **4.1.2 Liberaciones tipo chorro de líquido**

En una liberación de material debida a un orificio localizado en la parte que contiene líquido en un recipiente con líquido criogénico o presurizado, el chorro líquido es impulsado hacia el exterior del recipiente y dependiendo del punto de ebullición del material, una fracción del líquido desalojado puede evaporarse de manera instantánea. Es lógico esperar que la tasa de liberación en forma de chorro líquido puro en un recipiente dependa de la presión en el interior de éste y de la columna de líquido en el orificio; en este caso la ecuación utilizada para calcular el flujo a través de un orificio está basada en las ecuaciones de Bernoulli y Torricelli (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

#### **4.1.3 Liberaciones tipo chorro de dos fases**

La tasa de emisión cuando se presenta un chorro en dos fases se encuentra ubicada entre la de un gas y la de un líquido. Cuando un material se libera una fracción líquida que puede evaporarse instantáneamente, y esto dependerá del punto normal de ebullición. La evaporación instantánea es normalmente significativa en líquidos presurizados que presentan puntos de ebullición por abajo de la temperatura ambiente. Asimismo, una manera de determinar la cantidad de material evaporado instantáneamente, es considerar que el proceso de evaporación es tan rápido que puede considerarse adiabático, por lo cual el calor de evaporación es proporcionado por la entalpía del líquido liberado. En mezclas de dos o más sustancias el proceso de evaporación instantánea es más complicado y requiere que se realicen iteraciones y conocer el comportamiento de la mezcla en equilibrio entre las fases vapor-líquido (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

#### **4.1.4 Charcas de líquido**

En los casos de liberaciones en forma de chorro de gas, chorro líquido o en dos fases pueden describirse como liberaciones continuas variables en el tiempo, donde esta variación es normalmente una disminución en el flujo. Este tipo de liberaciones resultado de un orificio en un tanque o tubería puede resultar en la formación de una charca de líquido, de la cual se busca estimar la cantidad que se evapora. Un incremento en el área de la charca aumenta la tasa de emisión de manera aproximadamente lineal, así el aumento en función del tiempo en las dimensiones de la charca aumentará la emisión. Se han desarrollado

ecuaciones para estimar el aumento en las dimensiones de la charca formada en función del tiempo para suelo y agua, las cuales pueden emplearse en la estimación de la tasa de emisión (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Cuando sucede un incidente con material criogénico (por ejemplo: cloro), en donde el material presenta un punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente, el líquido puede escurrir rápidamente a la tierra o superficie y formar una charca de líquido a baja temperatura, los vapores emitidos resultan en una nube de gas denso y frío que pende o cubre la charca. La tasa de evaporación de un líquido criogénico depende casi por completo del balance de calor de la charca. Cualquier cantidad de calor que se transmita a la charca se utilizará para la evaporación del material, y la tasa de evaporación dependerá de la tasa de transferencia de calor y del calor de evaporación del líquido (AIChE, 1996).

Para charcas de líquidos que presentan un punto de ebullición superior a la temperatura del ambiente, la tasa de evaporación puede estar controlada por variables meteorológicas (como la velocidad del viento) o por difusión en la capa líquida. En ambos casos, la temperatura del líquido es una variable importante para determinar la tasa de evaporación de líquidos que no están en ebullición. De esta manera el balance de calor es importante en este caso como lo es para el caso de charcas con líquido en ebullición (AIChE, 1996).

En el balance de calor de una charca la fuente primaria e inicial de calor proporcionado es el suelo, la convección del aire, la energía solar incidente, la pérdida de calor por evaporación, y la transferencia por radiación del aire complementan el balance en la charca de líquido. Ya que la masa líquida varía con el tiempo las ecuaciones que expresan el balance de energía deben expresarse con exactitud para determinar los cambios en la temperatura y la tasa de evaporación. Las ecuaciones empleadas para expresar la transferencia de calor para conducción, convección, radiación solar y radiación, se basan en las ecuaciones y consideraciones conocidas de la transferencia de calor. Normalmente los modelos empleados para derrames asumen que la temperatura en la charca es uniforme de manera vertical, lo cual no es completamente apropiado para charcas grandes y profundas (AIChE, 1996).

Para derrames de líquidos criogénicos la fuente primaria de calor para la evaporación es la conducción a través del suelo. La temperatura de esta charca disminuye rápidamente y permanece cercana al punto de ebullición, y la posterior evaporación del líquido depende del calor por conducción. En este proceso es posible que se forme hielo en el suelo del fondo de la charca debido a la humedad, lo que disminuiría la conducción del calor y por lo tanto la tasa de evaporación (AIChE, 1996).

En el caso de derrames de líquidos que presentan una temperatura de ebullición superior a la ambiente la charca formada en el suelo se evaporará lentamente a una tasa que dependerá de la presión de vapor del líquido, la superficie de la charca y de las condiciones atmosféricas. En este caso en que la evaporación es lenta la mayoría de los modelos de simulación asumen que la evaporación está limitada por la transferencia de masa entre la fase líquida y la gaseosa. En la fase inicial para derrames grandes o para charcas de líquido relativamente profundas, la difusión a través del líquido puede ser el factor limitante en compuestos que posean una presión de vapor relativamente alta. Para compuestos muy volátiles y una capa de líquido gruesa o viscosa, la tasa de evaporación puede estar limitada por la rapidez con la cual el líquido se difunda hacia la capa superficial de la charca (AIChE 1996).

Para charcas con líquidos formados por más de un componente, las ecuaciones básicas empleadas para determinar la tasa de evaporación para un componente son aplicadas modificándolas para incorporar a los diferentes componentes de acuerdo a su fracción mol (AIChE, 1996).

Las condiciones en que se da una liberación a semejanza de las condiciones meteorológicas pueden ser muy variables y deben conocerse lo mejor posible para un adecuado aprovechamiento de los modelos. Es así que cualquier imprecisión en la estimación de la fuente de emisión influye en las subsiguientes estimaciones de la evaporación y dispersión en el aire del material. Existen tres causas básicas de imprecisiones en la estimación de la fuente (AIChE, 1996):

- ◆ Errores en la definición sobre el tipo de fuente
- ◆ Imprecisiones en la estimación de los parámetros de entrada de acuerdo al modelo empleado.
- ◆ La imprecisión inherente al propio modelo.

Al jerarquizar las técnicas para la estimación de las emisiones iniciando por las que poseen un grado de precisión mayor se tiene (AIChE, 1996):

- ◆ Chorro de líquido.
- ◆ Chorro de gas.
- ◆ Evaporación en charca de líquido (un solo componente)
- ◆ Derrame de líquido criogénico.
- ◆ Evaporación de charca de líquido (más de un componente).
- ◆ Dos fases (un solo componente).
- ◆ Dos fases (más de un componente).

#### 4.2 MODELOS DE DISPERSIÓN

Los modelos de dispersión tratan los aspectos de transporte y dispersión de un material una vez que se ha liberado a la atmósfera. En estos modelos se estima uno o más de los siguientes valores (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ Distancias para niveles de concentración a nivel del suelo
- ◆ Contornos o áreas donde se presentan diferentes concentraciones de interés
- ◆ Masa de material inflamable dentro de ciertas concentraciones de interés

En estos modelos las concentraciones están definidas para un tiempo promedio. Existen tres tipos de comportamiento de las nubes de material y tres modalidades de acuerdo al tiempo de liberación.

**Tabla 4.1 Tipos de nubes debidas a liberación de materiales a la atmósfera**

Comportamiento de la nube	Duración de la liberación
Gas neutralmente flotante	Liberación instantánea (puff)
Gas positivamente flotante	Liberación continua (pluma)
Gas denso	Liberación continua variable con el tiempo

Los modelos de dispersión gaussiana describen de manera aproximada el comportamiento de una nube de vapor (material) a diferentes distancias viento abajo del punto de liberación. En el estudio del comportamiento de las liberaciones continuas (plumas) e instantáneas (puffs) de materiales se han empleado los modelos gaussianos. Los gases densos presentan un comportamiento combinado de gas denso y dispersión gaussiana con una elevación de la pluma al inicio debido al *momentum*, seguido por un curvamiento de la pluma y caída debido a los efectos de la densidad del gas (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Las condiciones meteorológicas en el momento de la liberación tienen una influencia determinante en la extensión de la dispersión. De las condiciones meteorológicas los factores principales son la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica. La velocidad del viento puede ocasionar una dilución de los vapores; y una condición estable (estabilidad atmosférica) provoca un menor mezclado. La velocidad del viento y la estabilidad atmosférica pueden obtenerse de registros meteorológicos, cuando no se tiene información sobre la estabilidad puede utilizarse la tabla de Pasquill que permite establecerla a partir de una estimación de la intensidad solar y de la velocidad del viento. Cuando no se tienen datos meteorológicos de un sitio, se utilizan típicamente para la evaluación de la dispersión una estabilidad D y una velocidad de 5 m/s que corresponde a un día soleado, y una estabilidad F con velocidad del viento de 2 m/s para una noche tranquila. La velocidad del viento varía en magnitud y dirección debido a la topografía del terreno; además los datos proporcionados por estaciones meteorológicas normalmente reportan la velocidad a una altura de 10 metros por lo cual debe de corregirse de acuerdo a la altura de la fuente (AIChE, 1996).

#### 4.2.1 Modelos para plumas de gases neutralmente o positivamente flotantes

Los modelos aplicados para la simulación de la dispersión de gases neutralmente o positivamente flotantes, así como los modelos aplicados a liberaciones instantáneas se utilizan para predecir la concentración de materiales inflamables o tóxicos en intervalos de tiempo. Estos modelos están basados en los conceptos de la dispersión gaussiana, en los cuales la difusión en la atmósfera es un proceso de mezclado aleatorio que sigue el comportamiento en los ejes horizontal y vertical de una distribución gaussiana. Estos modelos pueden aplicarse a liberaciones pequeñas de gas denso en la cual la fase densa en el proceso de dispersión es relativamente menor comparada con la fase neutralmente flotante; normalmente no se aplican estos modelos a liberaciones mayores de gas denso (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Las ecuaciones utilizadas en los modelos de dispersión gaussiana incluyen coeficientes de dispersión en los ejes horizontal y vertical, los cuales poseen diferentes valores cuando la modelación se aplica a plumas continuas o liberaciones instantáneas (puff). Los modelos de dispersión proporcionan como resultados concentraciones de acuerdo al tiempo para localizaciones viento abajo del lugar de la liberación. En nubes de material tóxico o inflamable puede obtenerse para una concentración determinada una isopleta, que normalmente tiene forma elíptica. Los resultados comúnmente se limitan a una distancia de la fuente de 100 metros a 10 km. Para los modelos de liberación instantánea existe solo una concentración para cada punto en un tiempo determinado (AIChE, 1996).

#### 4.2.2 Modelos para dispersión de gas denso

La diferencia en la forma de dispersión de una nube de gas denso con respecto a otras es que la nube de gas denso en su trayectoria presenta una curvatura hacia abajo o hundimiento, una vez que el momentum deja de dominar el movimiento de la nube y la densidad del gas con respecto a la del aire obliga a este comportamiento. El mecanismo de dispersión de un gas denso difiere notablemente del que presenta una nube neutralmente flotante, esto se debe principalmente a una mayor densidad del gas con respecto a la densidad del aire. Las diferencias en el mecanismo de dispersión incluyen (AIChE, 1994; AIChE, 1996):

- ◆ Aceleración inicial y dilución
- ◆ Dominio de una flotabilidad negativa
- ◆ Dominio de la turbulencia ambiental

Existen varios tipos de modelos para simular la dispersión de un gas denso cuando la fuente de emisión está elevada con respecto al nivel del suelo; en los incidentes que ocurren en el transporte terrestre la fuente está próxima al suelo y por lo tanto los modelos empleados para fuentes elevadas no resultan satisfactorios. Cuando se analizan liberaciones a nivel del suelo de un gas denso, el número de Richardson es un criterio que se utiliza en ocasiones; este número representa la energía potencial debido al exceso de densidad dentro de la nube densa y la energía cinética debida a la turbulencia del ambiente. Si el número de Richardson es menor a 50 (sugerido por experimentos en laboratorio), el movimiento de la nube está dominado por la turbulencia del ambiente y el efecto del gas denso posee poca importancia. Para decidir cuando un gas denso debe considerarse como una liberación continua o instantánea es necesario comparar la duración de la liberación,  $T_d$ , con el tiempo necesario para viajar de la fuente a la posición del receptor,  $x/u$ . Si se supone que la velocidad del viento es constante, entonces cuando  $T_d$  es mayor a  $x/u$  la nube es considerada continua; cuando  $T_d$  es menor a  $x/u$  la nube es considerada instantánea; cuando estos valores son aproximadamente iguales es recomendable tratar la liberación de las dos maneras (AIChE 1996).

En muchos accidentes, especialmente cuando la liberación es de un material presurizado, la nube de vapor se libera en forma de chorro con un significativo *momentum* inicial, en contraste existen otras liberaciones las cuales se localizan cercanas al nivel del suelo y poseen un bajo *momentum*. Cuando el momentum es alto la trayectoria inicial de la nube es dominada por la velocidad del chorro, lo cual debe ser tomada en cuenta en la simulación y utilizar modelos en donde el *momentum* es dominante. En liberaciones donde esta característica es baja no pueden utilizarse los modelos anteriores y deberán emplearse otros como

es el conocido por modelo de caja y considerar la formación de aerosoles para determinar cual modelo puede ser el más apropiado (AIChE, 1996).

Cuando se realiza la simulación de una liberación es normal identificar los peores escenarios probables que tienen gran influencia en las estrategias de mitigación y control. El peor caso se define con respecto a la máxima concentración a nivel del suelo para los receptores. Para liberaciones continuas cercanas al nivel del suelo de gases (por ejemplo para gases neutralmente flotantes) o gases densos en los cuales no existe una etapa de hundimiento de la pluma de emisión, el peor caso está asociado con condiciones estables y velocidades de viento pequeñas, para la cual la dispersión y dilución son menores. Para una liberación instantánea o de corta duración de un gas denso cercana al suelo las condiciones para el peor caso son posiblemente las asociadas con velocidades de viento moderadas. En liberaciones de corta duración en los cuales los vientos son ligeros, existe un retardo en la advección en dirección viento abajo, por el contrario cuando los vientos son intensos, la nube de gas denso no se extiende lateralmente en las proximidades de la fuente pero la advección se da viento abajo con menor dilución (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

### 4.3 MODELOS PARA EXPLOSIÓN E INCENDIO

Como resultado de una liberación de material se pueden tener gases inflamables o líquidos los cuales podrían incendiarse o hacer explosión. Un incidente con materiales peligrosos puede tener como resultado (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)
- ◆ Explosión por expansión de líquido en ebullición (BLEVE)
- ◆ Explosión
- ◆ Explosión confinada
- ◆ Bola de fuego (fireball)
- ◆ Charca de fuego (poolfire)
- ◆ Fuego tipo chorro (jet fire)
- ◆ Fuego instantáneo (flash fire)

Las explosiones de nube de vapor no confinada pueden definirse como explosión en exteriores, que producen un daño debido a ondas de sobrepresión. Las condiciones necesarias para que suceda una explosión de nube de vapor son:

- ◆ El material liberado debe ser inflamable y en condiciones apropiadas de temperatura y presión
- ◆ Previamente a la ignición la nube debe tener un tamaño suficiente
- ◆ Una porción suficiente de la nube debe estar dentro del rango de inflamabilidad del material
- ◆ La velocidad de propagación de la flama en la nube debe ser la apropiada.

El mecanismo para la propagación de la flama en una mezcla de combustible y aire está determinado por la conducción y difusión molecular del calor. El calor se produce en la zona de reacción debido a una reacción química; el calor se transmite principalmente por conducción y por difusión molecular. La difusión molecular es un proceso relativamente lento, la propagación de la flama de forma laminar es lenta, sin embargo la velocidad de propagación aumenta debido a la turbulencia y a las inestabilidades en la combustión. En una mezcla que presenta alta turbulencia la combustión tiene lugar en una zona extensa en la cual los productos de combustión y la mezcla que no ha reaccionado está intensamente mezclada. Asimismo, las altas velocidades de propagación están relacionadas con una alta turbulencia. Existen dos modalidades de combustión: la deflagración y la detonación, las cuales difieren en sus mecanismos de propagación. En una deflagración la reacción de combustión se propaga debido a un transporte difusivo molecular del calor y a un mezclado turbulento de reactantes y productos de combustión. En una detonación la reacción se propaga por una fuerte onda de choque que comprime a la mezcla más allá de la temperatura de autoignición. En la deflagración las tasas de propagación en el material sin reaccionar es menor a la velocidad del sonido, en la



detonación las velocidades de propagación son superiores a la velocidad del sonido (AIChE, 1989; AIChE, 1994; AIChE, 1996).

Una nube de vapor inflamable puede, de acuerdo a la condiciones en que se encuentra la mezcla en el momento de la ignición, ocasionar una charca de fuego, un fuego tipo chorro, fuego instantáneo o una bola de fuego. Cuando sucede lo anterior el calor es transmitido a los alrededores por convección y radiación térmica. Para describir la radiación del fuego se emplean dos métodos principalmente (AIChE, 1994):

*Modelo de fuente puntual* En este modelo se considera que una fracción del calor de combustión se emite como radiación en todas direcciones. El modelo se asume que la superficie del receptor dirigida hacia la fuente de radiación recibe el máximo flujo de radiación. La fracción de energía debida a la combustión, que es emitida como radiación térmica depende del combustible y de las dimensiones de la flama, asimismo la tasa de combustión depende de la liberación. Se han obtenido medidas de la fracción de energía emitida para diferentes materiales y tipos de resultados (charca de fuego, bola de fuego, etc.). Sin embargo, los modelos de fuente puntual son imprecisos para receptores próximos a la fuente (AIChE, 1996).

*Modelo de flama sólida.* Este modelo considera que el fuego puede representarse como un cuerpo sólido de contorno geométrico simple y que toda la radiación térmica la emite la superficie. Para evitar que el volumen del fuego sea subestimado, la geometría del fuego y del cuerpo receptor, así como las posiciones relativas se debe considerar, ya que una porción del fuego puede ser obstruida por el cuerpo receptor. Lo anterior se incluye en la determinación de la radiación incidente al considerar un factor de visibilidad que depende de los contornos de la fuente, del receptor y de la distancia entre estos. En este modelo se requiere calcular el poder emisor, que es el poder o potencia total de radiación que abandona la superficie del fuego por unidad de área y por unidad de tiempo; la emisividad se calcula determinando la absorción de la radiación de los productos de combustión en las flamas y la longitud de onda de la radiación, así como de la transmisividad que es la absorción de la radiación por el medio presente entre el emisor y el receptor (AIChE, 1996).

#### 4.3.1 Modelos basados en la detonación de TNT

Estos modelos se basan en relacionar un peso equivalente de TNT con los patrones de daños provocados por una explosión de nube de vapor. Los modelos basados en la explosión de TNT tienen como propósito el cuantificar el potencial poder explosivo de un material y establecer los efectos dañinos potenciales para una determinada cantidad de material. En estos modelos la energía de combustión disponible en la nube de vapor se convierte en un peso equivalente de TNT; así, cuando se conoce el peso equivalente de TNT las características de la detonación, expresada como onda de sobrepresión, puede obtenerse para diferentes distancias del lugar de la explosión. La equivalencia de TNT para un material puede interpretarse como un factor de conversión que expresa la eficiencia del proceso de conversión de la energía química (calor de combustión) en energía mecánica (explosión). Para una detonación estequiométrica de una mezcla aire-hidrocarburo la eficiencia máxima teórica de la conversión del calor de combustión es de aproximadamente 40%. Para la mayoría de los incidentes de explosión de nube de vapor las equivalencias de TNT se ha deducido que han estado en un intervalo de 1 a 10%, basadas en el calor de combustión de la cantidad total de material liberado. Aparentemente solo una parte de la energía de combustión disponible está involucrada en una combustión explosiva (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

Los modelos basados en el equivalente de TNT para la predicción de explosiones de nube de vapor se han desarrollado ampliamente, entre las diferencias existentes destacan (AIChE, 1994; AIChE, 1996):

*La fracción de material combustible:* existen diferentes valores para la fracción de material combustible que debe considerarse en los cálculos: cantidad total liberada, cantidad evaporada instantáneamente y la cantidad evaporada instantáneamente modificada por un factor de atomización.

*El valor del equivalente de TNT:* pueden emplearse valores basados en promedios deducidos de la observación de accidentes mayores; o un valor seguro o conservativo

*Los datos utilizados sobre la explosión de TNT:* se ha observado que existe una dispersión significativa en los datos obtenidos para diferentes experimentos, por lo cual esto debe considerarse.

*La energía de la explosión de TNT:* los valores comúnmente utilizados se encuentran en un rango de 1800 a 2000 BTU/lb (4.19 a 4.65 MJ/kg).

### 4.3.2 Modelos no basados en la detonación de TNT

Las ondas de choque proporcionadas por el modelo de explosión de TNT no corresponden adecuadamente con las observadas en la explosión de un gas, por lo cual se han desarrollado otros modelos que buscan una determinación más satisfactoria de las características de las ondas de choque. Estos métodos buscan una mejor interpretación de las explosiones de gases no incluidos en los métodos de TNT equivalente, e incluyen el que la fuente de las ondas de sobrepresión no es un punto, y que la fuerza de estas ondas varía de acuerdo a la extensión de la fuente de las ondas (AIChE, 1994).

El modelo de TNT considera a la nube de vapor que explota como un todo, el concepto de multienergía define a la explosión de una nube de vapor como un número de subexplosiones que corresponden con varias fuentes de ondas de choque en la nube. El método de multienergía considera que los efectos de las ondas están determinados por el tamaño y naturaleza de las regiones dentro de la nube parcialmente confinada u obstaculizadas; este modelo divide la nube de vapor en volúmenes de acuerdo al grado de obstrucción y/o confinamiento, a los cuales se les asigna un índice de fuerza (intensidad) que varía de 1 a 10; el valor de 1 representa a una explosión débil y el valor de 10 a una detonación. Estos volúmenes confinados y/o obstaculizados serán las fuentes mayores de ondas de choque. Las partes no confinadas o no obstaculizadas no contribuirán significativamente a las ondas de choque. Cada volumen en que se ha dividido la nube se modela como una carga de aire-combustible hemisférica y estequiométrica, y se le asigna una fuerza (intensidad) de explosión. El trazo de gráficas que representan los niveles de sobrepresión y duración de la explosión como función de la distancia y de la fuerza de la explosión permiten predecir los efectos de las ondas de choque (AIChE, 1996).

Existen otros modelos como son los que incluyen el método de Baker-Strehlow o el desarrollado por el Comité para la Prevención de Desastres (incluido en el Yellow Book, publicado en 1979) que se basan en resultados experimentales y ofrecen interpretaciones de como se desarrollan las ondas de choque (AIChE, 1996).

El método de Baker-Strehlow para modelar una explosión de nube de vapor utiliza datos numéricos y experimentales relacionando la estructura de las ondas de choque generadas con la velocidad constante y la propagación en la aceleración de las flamas en una geometría esférica. Los datos se expresan como gráficas de sobrepresión e impulso positivo como función de la energía y de la distancia al centro de la nube. La aplicación de este método requiere se estime la velocidad máxima alcanzada por la flama y la energía equivalente de la explosión. La velocidad máxima alcanzada por la flama es una función del confinamiento, los obstáculos, la reactividad del combustible y la intensidad de la ignición. La energía explosiva liberada por cada porción de la nube que contribuye a la onda de choque se puede calcular por diferentes métodos que son (AIChE, 1996):

- ◆ Estimar el volumen de cada región congestionada, multiplicando la masa de combustible en esa región y tratando cada región congestionada dentro de la porción inflamable de la nube como una fuente separada de ondas de choque.
- ◆ Estimar la cantidad total del material liberado en un periodo de tiempo razonable y multiplicar por el calor de combustión y un factor de eficiencia.
- ◆ Estimar la cantidad de material dentro de los límites de inflamabilidad (generalmente por medio de modelos de dispersión) y multiplicarlo por el calor de combustión.

Cuando se ha calculado la energía se debe multiplicar por un factor de reflexión del suelo; este factor es normalmente 2 para nube de vapor que está en contacto con el suelo, si la liberación es elevada la nube no se dispersa a nivel del suelo y se debe seleccionar un factor entre 1 y 2 (AIChE, 1996).

### 4.3.3 Explosión por expansión de vapor de líquido en ebullición (BLEVE) y bola de fuego

Un BLEVE es una liberación súbita a la atmósfera de una gran masa de líquido presurizado sobrecalentado. La causa que origina al BLEVE es normalmente una flama externa que incide sobre la pared del recipiente abajo del nivel del líquido, debilitando la pared y provocando la ruptura del recipiente. Un BLEVE ocurre por cualquier mecanismo que resulte en la ruptura de un recipiente que permite al líquido sobrecalentado el evaporarse instantáneamente, incrementando su volumen en aproximadamente 200 veces, ocasionando una onda de choque y la proyección de fragmentos del recipiente. Si el líquido liberado es inflamable puede resultar una bola de fuego, fuego instantáneo (flash fire) o una explosión de nube de vapor. En los incidentes que involucran un BLEVE, ya sea que el material sea inflamable o no, los efectos de la presión y la proyección de fragmentos deben determinarse. Los efectos debidos a la presión son comúnmente limitados, pero debe considerarse el efecto dominó que puede provocar en recipientes adyacentes. Existen diferentes teorías que buscan explicar el mecanismo de las BLEVE's, sin embargo, no existe una que explique por completo el fenómeno, la teoría más aceptada es la de Reid que se basa en el comportamiento de líquidos sobrecalentados. En los incidentes que tienen como resultado un BLEVE se debe determinar: las ondas de sobrepresión, proyección de fragmentos, así como la intensidad de la radiación térmica (cuando se trata de materiales inflamables) (AIChE, 1994).

Existen diferentes modelos desarrollados para determinar el diámetro de la bola de fuego y la duración de la combustión, así como modelos para la radiación emitida, basados en conceptos teóricos y resultados experimentales.

La radiación de una bola de fuego puede establecerse de acuerdo al diámetro (como función del tiempo o de acuerdo a la cantidad original de combustible) y a la duración de la combustión. Asimismo diferentes autores han publicado ecuaciones empíricas para describir la duración de la combustión de una bola de fuego como función de la masa original del combustible. Los modelos presentados por Lihou y Maund, Roberts y otros autores consideran hipotéticamente una esfera premezclada de aire y combustible a temperatura ambiente. Para los modelos isotérmicos en los cuales se asume que la combustión se realiza a temperatura constante, la combustión está controlada por el suministro de aire el cual cesa después de un tiempo, este tiempo está relacionado empíricamente con la masa de gas inflamable en la esfera inicial de vapor. En este modelo para calcular la temperatura de la bola de fuego y el diámetro máximo se utilizan diferentes ecuaciones que proporcionan la tasa de incremento en el volumen de la esfera, la tasa de combustión, la temperatura de la bola de fuego, la duración de la combustión y la tasa de incremento en el diámetro. Es posible estimar la elevación que sufre una bola de fuego, sin embargo para el cálculo del peligro debido a la bola de fuego se supone que ésta es de forma esférica y que se encuentra a nivel del suelo, por lo cual este cálculo puede omitirse (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

Hasegawa y Sato indican que cuando la cantidad calculada de evaporación rápida (o instantánea) es igual al 36% o mayor, todo el material liberado contribuye a la formación de un BLEVE y eventualmente a una bola de fuego. Para porcentajes menores de evaporación, parte del combustible forma un BLEVE y el restante forma una charca. Se asume que cuando el porcentaje es menor al 36%, la cantidad calculada de material evaporado instantáneamente multiplicada por 3 es la que contribuye a un BLEVE. Para predicciones sobre el peligro debido a la bola de fuego, la cantidad de gas en el BLEVE puede considerarse como tres veces la cantidad de material evaporado instantáneamente hasta un máximo que no rebase el 100% del material combustible disponible (AIChE, 1994).

El principal peligro de las bolas de fuego es la radiación térmica ya que puede ocasionar incendios secundarios y provocar quemaduras severas en las personas expuestas. Los métodos para calcular la radiación para diferentes tipos de fuegos, incluidas las bolas de fuego, contemplados anteriormente se agrupan en dos tipos. modelo de fuente puntual y modelo de flama sólida. En el modelo de fuente puntual se calcula la fracción del calor de combustión que es irradiado en todas direcciones; este modelo no debe emplearse para calcular la radiación a la que están expuestas los receptores de manera parcial. El modelo de flama sólida es más realista que el anterior, este modelo considera las dimensiones de la bola de fuego, el poder emisor de la superficie de la bola de fuego, la atenuación debido a la atmósfera y un factor visual o factor de configuración geométrica. El factor visual se refiere a la fracción de radiación que choca directamente con la superficie

receptora, para esto se considera la orientación relativa del objeto con respecto a la bola de fuego y la distancia al centro de la misma (AIChE, 1994).

Las distancias para diferentes niveles de peligrosidad debidas a la radiación de un BLEVE-bola de fuego pueden obtenerse de acuerdo a diferentes estudios y publicaciones. Una ecuación útil para determinar la probabilidad de muerte debido a radiación térmica es la propuesta por Eisenberg y colaboradores en la cual la probabilidad es proporcional al producto de  $tI^{1/3}$ , donde  $I$  es la intensidad de la radiación y  $t$  es la duración de la radiación (AIChE, 1994).

Las ondas de choque producto de un BLEVE pueden producirse de tres maneras:

- ◆ El vapor presente por encima del líquido puede generar una onda de choque, como sucede con los recipientes llenos de gas.
- ◆ El líquido puede hervir por una depresurización, y si la ebullición es rápida resulta una onda de choque.
- ◆ Si el fluido es combustible y el BLEVE no es inducido por fuego exterior, una explosión de nube de vapor puede presentarse.

Existen diferentes métodos para calcular los valores de los parámetros de las ondas inducidas por la explosión de recipientes a presión y de BLEVES que las presentan. La selección del método apropiado dependerá de la fase en que se encuentra el material en el recipiente y de la distancia al receptor de la onda explosiva (AIChE, 1994).

Además de la onda de presión debido a una explosión, la anterior puede provocar fragmentos. Cuando un material altamente explosivo detona se produce un gran número de pequeños fragmentos a gran velocidad y de forma muy irregular, por el contrario cuando sucede un BLEVE produce pocos fragmento, de diferentes tamaños y menores velocidades iniciales. Las características de los fragmentos a utilizarse para la evaluación de consecuencias incluye el número, velocidad, geometría y trayectoria. Las investigaciones para la predicción de la velocidad de los fragmentos y su alcance se ha concentrado en situaciones idealizadas de recipientes con gas presurizado, aunque también se han considerado recipientes con gas no ideal presurizado y combinaciones de gas y líquido. Para la explosión en el interior de un recipiente la velocidad inicial de los proyectiles puede estimarse, por ejemplo, considerando que una fracción de la energía disponible se transfiere del fluido en expansión a los fragmentos. La energía disponible por la explosión en el interior de un recipiente debe dividirse entre el trabajo para propagar las grietas que causan la ruptura, la energía cinética de los fragmentos, la energía de la onda de choque, el calor en los productos y la energía plástica remanente en los fragmentos. Otro método para determinar la velocidad inicial de los fragmentos comprende un análisis paso por paso de la transferencia de *momentum* del fluido que escapa a través de las grietas en medio de los proyectiles y a los proyectiles mismos; en el caso de detonaciones, es posible una fragmentación severa en recipientes de material quebradizo, mientras que en aquellos de material más dúctil se obtendría un menor número de fragmentos (AIChE, 1994; AIChE, 1996).

#### 4.3.4 Charcas de fuego

Las charcas de fuego son un resultado común de incendios en charcas producto de liberaciones de materiales líquidos, gases licuados y/o líquidos presurizados. Éstas tienen un efecto localizado y son de interés debido a posibles efectos dominó y en la determinación de zonas de seguridad. La modelación de charcas de fuego es una técnica bien desarrollada, estos modelos se integran de diferentes módulos que permiten calcular las características de interés, entre los que destacan (AIChE, 1996):

*Tasa de quemado:* las charcas de fuego con dimensiones mayores arden con una tasa vertical constante específica para cada material, existen ecuaciones desarrolladas para predecir la tasa de quemado, asimismo se dan valores de esta tasa que por ejemplo para hidrocarburos fluctúan en un intervalo de 0.05 kg/m<sup>2</sup> s (gasolina) a 0.12 kg/m<sup>2</sup> s (gas LP);. La tasa de quemado permite estimar el calor producido por unidad de área y estimar la duración del fuego.

*Dimensiones de la charca:* el tamaño de la charca lo determina tanto la cantidad liberada como las características del terreno. En la modelación normalmente se asume que ésta es circular y cuando tiene forma rectangular (debido a un confinamiento) se utiliza un diámetro equivalente.

*Altura de la flama:* Diversas observaciones indican que las charcas de fuego presentan una relación entre la altura de la flama y el radio, la más conocida es la de Thomas; existen además otras correlaciones que permiten conocer el efecto del viento. Algunos autores sugieren valores para la relación altura de la flama/diámetro de la charca de 2 ó 3.

*Inclinación de la flama:* Las flamas de las charcas incendiadas son afectadas por la velocidad del viento, provocando una inclinación de la flama, cuando la velocidad del viento es grande la base de la charca puede ser arrastrada viento abajo; esto afecta la radiación que reciben los receptores cercanos, el arrastre de la flama es un efecto que no se incluye en muchos modelos. Normalmente se asume que la flama es vertical y que el calor irradiado es igual en todas direcciones. Aunque en el análisis de riesgos pueden incluirse o no estos efectos, es importante que se considere la inclinación de la flama.

*Poder emisor superficial:* El poder emisor de una superficie o flujo de calor irradiado puede calcularse por medio de la ecuación de Stefan Boltzmann. Esta ecuación es muy sensible a la temperatura de la flama ya que la radiación varía con la temperatura que se expresa a la cuarta potencia; además el efecto oscurecedor del humo reduce la radiación total emitida por la flama. Otros métodos utilizan los flujos térmicos de las charcas incendiadas de varios materiales, o utilizan una fracción del calor irradiado de acuerdo al poder total de combustión; en ambos se considera la absorción de la energía irradiada debida al humo.

El poder emisor de una superficie por unidad de área puede estimarse usando el método de la fracción de radiación, de acuerdo a lo siguiente (AIChE, 1996):

- ◆ Calcular el poder total de combustión (basado en la tasa de quemado y en el área de la charca)
- ◆ Multiplicarlo por la fracción de irradiación para determinar la potencia total de radiación
- ◆ Determinar el área de la superficie de la flama
- ◆ Dividir la potencia de radiación por el área de la superficie de la flama

La fracción de irradiación normalmente se considera en un rango de 0.15 a 0.35

*Factor geométrico de visión:* La radiación térmica que recibe un objetivo está determinada por un factor geométrico de visión. Para establecer este factor existen varias ecuaciones en las que se consideran diferentes contornos de la superficie emisiva.

*Transmisividad atmosférica:* La transmisividad atmosférica es un factor importante que comúnmente se considera de 20 a 40% del flujo de calor que puede ser absorbido o disperso en la atmósfera en una distancia de 100 metros bajo condiciones típicas de la atmósfera.

#### 4.4 MODELOS DE EFECTOS

Los modelos de efectos se emplean para establecer las consecuencias de un incidente, las consecuencias que se analizarán dependen del propósito u objetivo del estudio. Como indicadores de las consecuencias en individuos puede emplearse la muerte o lesiones; en el caso de propiedades se pueden utilizar las pérdidas económicas. Para expresar el riesgo se utilizan medidas comunes para cada tipo de efecto. Un método para establecer las consecuencias resultado de un incidente es el modelo *de efecto directo*, el cual predice los efectos sobre las personas o estructuras basados en criterios predeterminados, por ejemplo se considera que una persona muere cuando se expone a determinada concentración de un gas tóxico. Esto se considera a pesar de que las consecuencias pueden representarse de una manera más realista como funciones de distribuciones de probabilidad. El utilizar funciones de distribución de probabilidad para establecer las consecuencias de un incidente es otro método posible (AIChE, 1989)

#### 4.4.1 Efectos de material tóxico

En la evaluación de las consecuencias de los efectos de un gas tóxico existen diferentes razones que dificultan una evaluación precisa en la respuesta de las personas a exposiciones agudas a gases tóxicos; en primer lugar se encuentra la diferente tolerancia que presentan las personas, en segundo lugar el que la severidad depende de la intensidad y duración de la exposición. En tercer lugar, para muchas sustancias no se ha determinado la respuesta que presentan las personas a su exposición. Como cuarta razón, muchos incidentes involucran liberaciones de más de una sustancia, y no existe una regla para determinar los efectos que esta sinergia, antagonismo o adición de efectos que se producen. Por último no existen protocolos para pruebas toxicológicas que permitan relacionar con exactitud los efectos sobre animales y los correspondientes a las personas.

Existen diferentes medidas para predecir la posibilidad de que una liberación de material peligroso que pueda resultar en muerte o en lesiones severas de personas expuestas, un ejemplo de estas medidas son las concentraciones inmediatamente peligrosas para la vida y la salud (IDLH siglas en inglés) Otra forma de establecer las consecuencias es mediante la utilización de una función de probabilidad (función Probit) que establece una relación entre la dosis y la respuesta, y permite cuantificar el número de muertes que son más probables de ocurrir dada una exposición. El método Probit puede utilizarse para aproximadamente 20 sustancias de las cuales existe suficiente información, esta información se basa en experimentos con animales, por lo cual existe una incertidumbre al aplicarse a personas. Los modelos Probit pueden emplearse para estimar las consecuencias debidas a la exposición para emisiones de tipo continuo o emisiones súbitas o instantáneas (puff). Los modelos de dispersión se utilizan para determinar contornos que especifiquen la concentración de un gas en función del tiempo, localización y distancia con respecto al punto de liberación. Una vez que se tiene determinada esta información se utilizan los modelos de efectos para establecer las consecuencias. Las zonas de afectación pueden determinarse de acuerdo a la concentración del gas y la duración de la exposición de tal manera que iguallen o rebasen un nivel establecido (por ejemplo el IDLH) (AIChE, 1989).

#### 4.4.2 Efectos térmicos

Existen dos maneras principales de estimar los efectos debidos a la radiación (AIChE, 1989; AIChE, 1996):

- ◆ El uso de tablas o gráficas elaboradas a partir de datos experimentales o de incidentes ocurridos.
- ◆ El uso de modelos teóricos basados en la fisiología de la respuesta de la piel a la radiación.

Los modelos de efectos térmicos estiman la probabilidad de muerte o lesiones a las personas, así como de daños a propiedades debido a la radiación emitida por la combustión de un material. Existen diferentes tablas y gráficas que relacionan la intensidad de la radiación con los efectos y el tiempo de exposición; además se han desarrollado modelos Probit para estimar los niveles de daño para una exposición o dosis determinada, sin embargo estos modelos se utilizan menos que los correspondientes para efectos tóxicos (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

Los modelos para la estimación de los efectos debidos a la radiación requieren en su mayoría el determinar los niveles de radiación y la duración de la exposición. Los niveles de radiación pueden obtenerse de los modelos para evaluación de consecuencias por fuego, la duración a partir de los modelos de consecuencias (por ejemplo para BLEVE) y por la estimación del tiempo necesario para extinguir el fuego. A partir de los anteriores parámetros se estima el nivel de daño para una exposición determinada. En lugares con una insolación elevada es necesario sumar la intensidad de la radiación solar a la estimada por los modelos de consecuencias para obtener la exposición total (AIChE, 1989; AIChE, 1996).

#### 4.4.3 Efectos de explosiones

Los modelos para efectos de explosiones se utilizan para predecir el impacto de las ondas de sobre presión, y de proyectiles en personas y objetos. La simulación de los efectos de una explosión está basada en

los modelos para explosión de TNT. En las explosiones de nube de vapor las características de la detonación difieren de las explosiones de TNT ya que las explosiones de nube de vapor son generalmente deflagraciones. La intensidad y forma de una onda debido a una súbita liberación de un fluido depende de diversos factores que incluyen el tipo de fluido liberado, la energía que produce la expansión, la tasa en que la energía se libera, la forma del recipiente, tipo de ruptura y las características de los alrededores. La duración de la sobrepresión es importante para determinar los efectos sobre estructuras. La fase de presión positiva de la onda puede abarcar de 10 a 100 metros para explosiones de nube de vapor confinada típica. Un mismo nivel de sobrepresión puede tener un efecto diferente dependiendo de la duración, si la duración de la detonación es menor que el tiempo de respuesta de las estructuras es posible que la estructura soporte aun altas sobrepresiones (AIChE, 1994).

Existe una ecuación Probit que relaciona el daño estructural con el pico de sobrepresión de acuerdo a su probabilidad, asimismo existe una relación para determinar la ruptura de vidrios con el pico de sobrepresión, ambas basadas en datos experimentales y de incidentes. Los efectos sobre las personas debidas a la sobrepresión depende del pico o máximo alcanzado, la tasa de elevación y de la duración de la fase positiva. El efecto del daño para un pico de sobrepresión dado es mayor si el levantamiento es rápido. El problema de determinar los efectos sobre las personas debido a una explosión es complejo, sin embargo existe una extensa literatura sobre los grados de daño asociados con diferentes efectos de la explosión. Utilizando algunos de estos datos Eisenberg desarrollara diferentes ecuaciones Probit para los efectos de una explosión. Así existen ecuaciones Probit para determinar el número de muertes probables debidas al pico de sobrepresión, para determinar la ruptura de tímpanos y que relacionan daños serios debido a proyectiles, particularmente cristales, debido al impulso explosivo; a partir de la primera se pueden desarrollar ecuaciones Probit para estimar la muerte y daños severos debido a la proyección o traslado del cuerpo de las personas debido a la onda de choque (AIChE, 1989; AIChE, 1994).

#### 4.5 ESCENARIOS

Las consecuencias de un incidente dependen de las condiciones de la liberación y de las condiciones particulares del sitio en el momento de la liberación. En el transporte de materiales peligrosos es necesario establecer los posibles escenarios que generaría una liberación accidental, a partir de éstos podrán estimarse las consecuencias potenciales. Los escenarios posibles pueden agruparse en (EPA, 1999):

- ◆ Escenario de liberación en el peor caso
- ◆ Escenarios alternativos

El escenario para el peor caso puede definirse como la liberación de la mayor cantidad de un material peligroso que resulta en la mayor distancia, a partir de la fuente, hasta un nivel de interés. De una manera general la distancia estará determinada para una nube de material tóxico, radiación térmica debido a un incendio o nivel de sobrepresión para una explosión desde el punto de origen de la fuga hasta un punto en que los efectos sobre las personas o instalaciones no sean serios (o de interés) de acuerdo a la exposición.

Los escenarios alternativos son aquellos que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia que el escenario del peor caso. Las características propuestas en la tabla siguiente para el escenario del peor caso es una combinación de condiciones que ocurren rara vez y que son poco probables que persistan un tiempo de duración largo, por lo que los escenarios alternativos contemplan condiciones más probables y menos conservadoras. Además, se debe contemplar que las incertidumbres debidas al modelo de simulación empleado pueden aumentar las distancias estimadas ya que las condiciones (estabilidad, velocidad del viento y rugosidad) no permanecerán constantes en segmentos de camino largos. Debido a que el escenario del peor caso, aunque probable, puede sobrestimar el valor de las distancias de afectación, pueden utilizarse preferentemente las distancias obtenidas en los escenarios alternativos para la planeación, preparación y atención de emergencias (EPA, 1999).

**Tabla 4.2 Parámetros de referencia para la determinación de escenarios en el análisis de consecuencias**

Escenario para el peor caso	Escenarios alternativos
<i>Niveles de interés</i>	
En sustancias inflamables el nivel de interés para determinar la zona de riesgo es 1 lb/pulg <sup>2</sup> en explosión de nube de vapor, y zona de amortiguamiento 0.5 lb/pulg <sup>2</sup> . Debido a radiación térmica el valor es 5 KW/m <sup>2</sup> o 1500 BTU/ft <sup>2</sup> h para zona de riesgo y zona de amortiguamiento de 1.4 KW/m <sup>2</sup> o 440 BTU/ft <sup>2</sup> h. Con sustancias tóxicas emplear el valor para inmediatamente peligroso a la vida y la salud (IDLH) para determinar la zona de riesgo y TLV <sub>15</sub> o TLV <sub>8</sub> para zona de amortiguamiento.	En sustancias inflamables el nivel de interés para determinar la zona de riesgo es: 1 lb/pulg <sup>2</sup> en explosión de nube de vapor y zona de amortiguamiento de 0.5 lb/pulg <sup>2</sup> . Debido a radiación térmica el valor es 5 KW/m <sup>2</sup> o 1500 BTU/ft <sup>2</sup> h para zona de riesgo y zona de amortiguamiento de 1.4 KW/m <sup>2</sup> o 440 BTU/ft <sup>2</sup> h. Con sustancias tóxicas emplear el valor para inmediatamente peligroso a la vida y la salud (IDLH) para determinar la zona de riesgo y TLV <sub>15</sub> o TLV <sub>8</sub> para zona de amortiguamiento.
<i>Estabilidad, Velocidad del viento</i>	
Estabilidad F y velocidad del viento de 15 m/s. Puede utilizarse otra velocidad del viento y estabilidad siempre y cuando se demuestre que los datos están de acuerdo a mediciones meteorológicas locales.	Estabilidad D y velocidad del viento de 3 m/s. Puede utilizarse otra velocidad del viento y estabilidad siempre y cuando se demuestre que los datos están de acuerdo a mediciones meteorológicas locales.
<i>Temperatura ambiente y humedad</i>	
Temperatura de 25 grados centígrados y 50% de humedad. Cuando se tienen registros confiables puede utilizarse la temperatura máxima diaria y la humedad promedio para el caso de nube tóxica.	Temperatura de 25 grados centígrados y 50% de humedad. Cuando se cuenta con registros meteorológicos locales puede utilizarse los valores correspondientes.
<i>Altura de la liberación</i>	
Nivel del suelo.	Nivel del suelo.
<i>Rugosidad de la superficie</i>	
Utilizar área urbana (terreno con obstáculos) o área rural (terreno plano) según corresponda.	Utilizar área urbana (terreno con obstáculos) o área rural (terreno plano) según corresponda.
<i>Gas denso o gas neutramente flotante</i>	
Determinar el comportamiento del gas de acuerdo a sus propiedades.	Determinar el comportamiento del gas de acuerdo a sus propiedades.
<i>Temperatura a que la sustancia es liberada</i>	
Para líquidos diferentes a gases licuados por refrigeración, considerar que la liberación ocurre a la temperatura máxima diaria de acuerdo a registros meteorológicos. Para gases licuados por refrigeración considerar el punto de ebullición.	Utilizar lo establecido para el peor caso o establecer la temperatura para el escenario establecido.

Fuente: Offsite consequence analysis guidance; EPA, 1999