

# Análisis de riesgo ambiental y su aplicación al almacenamiento y manejo de cloro industrial

Adriana Liñán Montes,\* Cecilia Rodríguez de Barbarín,\*\* Juan Manuel Barbarín Castillo\*\*\*, Omar Huerta Granados\*\*\*

Los estudios de riesgo ambiental son instrumentos preventivos que la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA)<sup>1</sup> introduce con el fin de proteger y preservar el medio ambiente. Ellos deben efectuarse de manera previa en cualquier proyecto que represente un daño potencial para la población, sus bienes y el ambiente.

Sin embargo, en las últimas modificaciones a la LEGEEPA en el año de 1996, se establece que en las actividades industriales, comerciales o de servicios altamente peligrosas, deberán realizarse estudios de riesgo para identificar el nivel de riesgo que tienen sus instalaciones, así como el radio de afectación que pudieran cubrir en caso de ocurrir un accidente lamentable.

Por lo anterior es importante definir de manera precisa la magnitud y probabilidad de riesgo que poseen las industrias ya establecidas, con el propósito de controlar y mantener el riesgo dentro de niveles aceptables para la seguridad de la población y el medio ambiente, o si es posible disminuirlo.

En este trabajo se describe la ejecución en forma combinada de dos de los métodos más utilizados para la identificación y evaluación del riesgo, aplicándolos en el análisis de un cilindro de cloro (Cl<sub>2</sub>) gaseoso instalado en una planta de tratamiento de agua. También se lleva a cabo la simulación de los efectos y daños que ocasionaría al ambiente la descarga total del cloro contenido en el cilindro.

El trabajo se llevó a cabo en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, localizada en la zona metropolitana de Monterrey, Nuevo León. El objetivo de esta planta es abastecer a sus clientes del agua necesaria para la operación y desarrollo de diversas empresas industriales.

## Metodología del trabajo

Los objetivos del análisis de riesgo en esta planta de tratamiento de aguas residuales fueron a) identificar de manera sistemática los riesgos y problemas de operación que pudieran representar las instalaciones en que se ubica el tanque de cloro gaseoso y b) evaluar las posibles consecuencias ante la probabilidad de que ocurra una fuga o liberación del cloro gaseoso.

El proceso de evaluación de riesgo consta de 4 partes importantes:

1. Procedimientos preliminares, donde se presenta la descripción de las instalaciones en las que se encuentran el área de operación y el proceso de cloración, incluido el sistema de dosificación.
2. Descripción de los efectos físicos, químicos y toxicológicos del cloro gaseoso.
3. Evaluación del riesgo del proceso utilizando el método de Riesgos y Operatividad (Hazop), combinado con el método generalizado "What If", manejado a través de una matriz de riesgo en forma semicuantitativa.<sup>2</sup>
4. Análisis de las consecuencias potenciales en el lugar identificado como de peligro, utilizando un modelo atmosférico mediante la simulación de contaminación y riesgo para industrias (SCRI),<sup>3</sup> tomando como el peor escenario la liberación total del cloro gaseoso.

A continuación se describen las cuatro etapas del proceso de evaluación, pero cabe anticipar que en las últimas dos de ellas se presentan los resultados y

\* Facultad de Ciencias Químicas, UANL.

\*\* Instituto de Ingeniería Civil, UANL.

\*\*\* Industrias del Alkali, Villa de García, N.L.

la discusión sobre las mismas.

## Procedimientos preliminares

La descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales municipales, junto con la distribución de los diversos componentes de la planta, es fácil de encontrarse en la literatura.<sup>4,5</sup> Para este trabajo la atención fue dirigida hacia el sistema de distribución y dosificación del cloro gaseoso.

Así, como primer paso se elaboró un cuestionario que se aplicó, mediante entrevistas, al gerente de la planta, al supervisor y al operador del sistema de dosificación del cloro, a fin de identificar las situaciones de alto riesgo mediante el método generalizado "What If" y de Riesgos y Operatividad (HAZOP).

El diagrama de identificación de causas potenciales en el proceso para dosificar cloro, se presentan en la figura 1.

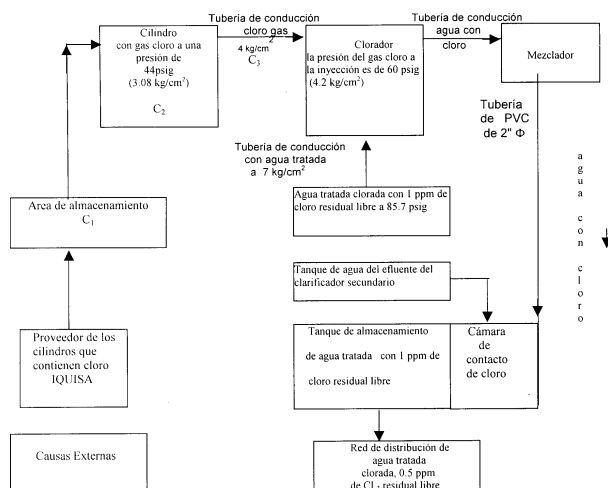


Fig. 1. Identificación de riesgos en el sistema de distribución del cloro gaseoso en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales.

## Descripción de los efectos físicos, químicos y toxicológicos del cloro gaseoso

El cloro existe como gas o líquido, es inflamable no explosivo, tiene un olor característico, es de color amarillo verdoso y es cerca de 2.5 veces más pesado que el aire. Si se libera del tanque o del sistema a la atmósfera, el cloro se mezclará y concentrará en los niveles más bajos del edificio o área donde ocu-

rra la fuga. Por otro lado, el cloro líquido es ámbar transparente alrededor de 1.5 veces más pesado que el agua.

El cloro gaseoso es principalmente un irritante respiratorio, pero puede causar también irritación de ojos a una concentración tan baja como 0.09 ppm (partes por millón). El límite de detección de cloro por el olfato humano es de 3.0 ppm, la cual es una concentración lo suficientemente baja que permite detectar con rapidez y oportunidad cualquier situación de peligro. A concentraciones del orden de 15 ppm, el cloro gaseoso puede causar irritación inmediata de la garganta.

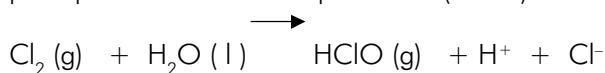
Las concentraciones de cloro gaseoso en el orden de 50 ppm son peligrosas y de 1000 ppm pueden incluso ser fatales en caso de exposición muy breve. Estos niveles exceden en el orden de 2.5 a 50 veces el valor guía establecido para planes de respuesta en caso de emergencia, que es de 20 ppm.<sup>10</sup>

Los síntomas ante la exposición, si una concentración suficiente de cloro gaseoso se encuentra presente en el ambiente, son: la irritación de las membranas mucosas, del sistema respiratorio en su conjunto, de la piel y, si la cantidad es mayor a 15 ppm, causará irritación de los ojos, garganta y hasta dificultad para respirar. Si el tiempo de exposición es prolongado pero con bajas concentraciones de cloro gaseoso, puede provocar una excitación general en la persona afectada, además de confusión mental, irritación de la garganta, copiosa salivación y estornudos.

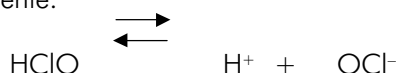
Los síntomas ante una exposición a altas concentraciones son: náuseas y vómito, seguidos por dificultades para respirar. En casos extremos la dificultad para respirar puede aumentar a tal punto que ocasiona la muerte por sofocación. La tabla 1 resume los síntomas y efectos del cloro gaseoso de acuerdo a su concentración.

Tabla 1. Efectos del cloro sobre la salud a diferentes concentraciones	
Concentración de cloro (ppm)	Efectos en la salud
0.09	Irritación de ojos
3.0	Se detecta por el olfato humano
15.0	Irritación inmediata de garganta.
50.0	Náuseas, vómito y dificultad para respirar.
100	Aumenta la dificultad para respirar hasta la sofocación y muerte.

El cloro gaseoso se hidroliza de manera casi completa para formar ácido hipocloroso (HClO):



El ácido hipocloroso se disocia en iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) e hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), según la reacción reversible siguiente:



El cloro provoca la disminución del pH del agua a causa de los iones hidrógeno que se producen en las reacciones anteriores, por lo que el pH del agua es un factor muy importante que sirve para determinar el grado con el que el ácido hipocloroso se disocia para producir hipoclorito.

El ácido hipocloroso, que es el agente desinfectante primario, predomina si el pH es menor a 7.5, siendo alrededor de 80 veces más eficaz que el ion hipoclorito, el cual predomina si el pH es mayor de 7.5. El HClO y  $\text{ClO}^-$  son comúnmente descritos juntos como "cloro libre disponible" en el sentido en que se utiliza para la desinfección.

Cuando se adiciona al agua, el cloro oxida a la materia orgánica e inorgánica por igual. Por lo que no todo el cloro que se agrega al agua da por resultado la producción de cloro libre disponible. La cantidad de cloro que reacciona con los compuestos inorgánicos ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_3$ ) y con las impurezas orgánicas se conoce como la demanda de cloro, siendo necesario satisfacerla para que se forme cloro libre disponible. La aplicación de cloro al agua hasta el punto en que hay cloro libre residual disponible se denomina cloración hasta el punto de cambio.<sup>6</sup>

### **Evaluación del riesgo del proceso utilizando el método de Riesgos y Operatividad (Hazop), combinado con el método generalizado "What-If" y midiéndolo con una Matriz de Riesgo en forma semicuantitativa**

El método generalizado "What If" se utilizó como técnica formal para la identificación de las situaciones de riesgo y sus consecuencias potenciales. Para ello se elaboró un cuestionario formulado en base a la descripción del proceso, siendo posteriormente llenado con las respuestas del gerente de la planta, el

supervisor y el operador del sistema de distribución de cloro, quienes respondieron durante entrevistas separadas.

El método de Análisis de Riesgos y Operatividad (Hazop)<sup>7</sup> complementa al método "What If", dándole estructura y orden para la revisión más rigurosa del proceso, logrando resultados con gran detalle y mayor resolución.

El proceso de cloración se analizó línea por línea y se identificaron posibles causas de riesgo. Se estudiaron "nodos" individuales en el proceso en base a alguna variable que pudiera ser observada o medida de manera explícita o al menos implícitamente. Entre las variables importantes se incluyeron:

- Presión de trabajo
- Diferencia de presiones en ramales o accesorios
- Flujo
- Concentración
- Reactividad
- Control e Instrumentación
- Equipo
- Operadores y personal de mantenimiento (con el fin de detectar errores).

Cada «nodo» fue estudiado mediante el método "What If", se identificaron posibles escenarios de escape del cloro que pudieran representar un peligro y ocasionar como consecuencia daños al personal de la planta, al equipo y al medio ambiente.

Para calcular el valor de riesgo ambiental se determinaron los valores de frecuencia y severidad de manera semicuantitativa, utilizando como base la Matriz de Riesgo de 3x3 que fue tomada de la Guía para la Preparación de un Programa Preventivo y Administración del Riesgo, la cual fue desarrollada por la oficina de Servicios de Emergencia del Estado de California, EUA.<sup>8</sup> En este trabajo se modificó la matriz de 3X3 a una matriz de 4X4 con el objetivo de manejar un intervalo de mayor amplitud que permitiera valorar en forma más gradual cada situación de riesgo identificada, como se describe esquemáticamente en la figura 2.

La matriz para medir el riesgo se forma con dos variables:

- A. Probabilidad de liberación de gases.
- B. Severidad de las consecuencias en caso de liberarse sustancias altamente peligrosas.

Al multiplicar estas dos variables se obtiene un

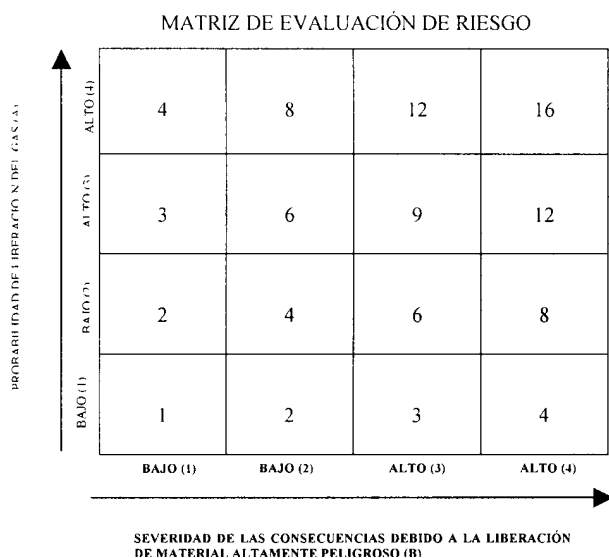


Fig. 2. Matriz de Riesgos 4x4.

valor que además de representar el riesgo permite determinar las situaciones de mayor severidad, al simular los efectos que ocasionaría la liberación del gas; así,

(A X B) = Valor de riesgo como factor de análisis de liberación.

Los valores de probabilidad de liberación de alguna sustancia altamente peligrosa (A) y la severidad de las consecuencias (B) se representan para varios niveles mediante los valores dados en el si-

Nivel	Probabilidad de escape o fuga (A)	Severidad de las consecuencias debido a la fuga de sustancias altamente peligrosas (B)
Bajo	1	1
Bajo	2	2
Alto	3	3
Alto	4	4

guiente cuadro:

El criterio aplicado para los intervalos de los valores es el siguiente:

Probabilidad de escape o fuga (A):

- 1 (Bajo). Se espera que ocurra una vez durante la vida de la planta.
- 2 (Bajo). Entre 5 - 10 años de estar operando la planta.
- 3 (Alto). Entre 1 - 5 años de estar operando la planta.
- 4 (Alto). Entre 0 - 1 año de estar instalada la planta.

Severidad de las consecuencias (B):

1 (Bajo). Que resulta en problemas operacionales o daños sencillos, sin daños a la propiedad o a la salud de los trabajadores.

2 (Bajo). Que resulta en problemas operacionales con interrupción del trabajo, con irritación o molestias al trabajador debido a las emisiones de cloro gaseoso, con pérdidas de la propiedad menores a \$100 000 pesos.

3 (Alto). Que resulta en daños múltiples, con interrupción operacional significativa o con pérdidas en las propiedades entre \$100 000 y \$1 000 000 pesos, con daños a la salud del trabajador, se presentan los síntomas de náuseas y sofocación.

4 (Alto). Que resulta en muertes o pérdidas debido a la cantidad de gas inhalado, ocurre afectación al medio ambiente y daños a la propiedad, o producción, mayores que \$1 000 000 pesos.

### Identificación de las situaciones de mayor riesgo

Al ordenar los factores de riesgo en orden decreciente se identificaron cuatro situaciones con el mayor grado de riesgo potencial, según se muestra en la tabla II.

El peor de los escenarios se podría presentar cuando la conexión del niple sufriera fractura si el tanque fuese golpeado durante la operación de transferencia y manipulación. Con este escenario en mente se aplicó el modelo de dispersión de un gas liberado en forma masiva e instantánea al ambiente.

El análisis de consecuencias potenciales, en el lugar de riesgo identificado, se realizó utilizando un modelo atmosférico, mediante la simulación de contaminación y riesgo para industrias (SCRI), tomando como el peor escenario la liberación total del gas cloro.<sup>3</sup>

El modelo utilizado sirvió para determinar la distancia a la cual las concentraciones de cloro, que se

Situación	Factor de riesgo
1) Si el tanque de almacenamiento se rompiera, o si la conexión del niple se fractura, ocurrirá la descarga completa del cloro al ambiente (F1 en la Fig.1)	4
2) Si se presentan problemas de corrosión en el tanque se observará la emisión de cloro gaseoso con alta presión hacia el ambiente (3 en la Fig.1)	4
3) Si el cilindro de cloro gaseoso presentara fugas en el momento de su instalación (F1 en la Fig.1)	4
4) Si la tubería de suministro de cloro se rompiera (F2 en la Fig. 1)	4

libera en el peor de los escenarios, pudieran caer al valor estándar aceptado por norma como no peligroso para la salud (ERPG-3)<sup>9</sup> en base a consideraciones tomadas en el terreno urbano.

### Análisis de las consecuencias potenciales

Suponiendo que en el peor de los casos ocurriera la fuga total de cloro gaseoso, se encontró que a una distancia de 360 metros de la fuente de emisión la concentración calculada fue de 30 ppm, que es el valor al cual la población puede tener daños inmediatos a su vida y salud (IDLH). El tiempo que tarda la nube en recorrer esa distancia es de 2 minutos y 59 segundos.

El valor guía de planeación de respuesta para casos de emergencia (ERPG-3)<sup>9</sup> en fugas de cloro es de 20 ppm de concentración y se estimó tener este valor a una distancia de 420 m en un tiempo de 3 minutos y 29 segundos.

La concentración de 100 ppm, que puede provocar sofocación y muerte para un trabajador, se presentaría a una distancia de 220 m de la fuente de emisión en un tiempo de 1 minuto y 50 segundos.

Las condiciones que se utilizaron para la corrida de simulación fueron las siguientes:

Masa = 1 000 kg      Altura = 2 m  
Viento = 2 m/s      Radio del recipiente = 0.36m

Para el cálculo de la estabilidad se tomaron los siguientes parámetros: si la simulación se realiza con el percance ocurriendo de día o noche, con alta o

baja nubosidad y si se considera la radiación solar incidente, con los cuales se puede determinar la clase de estabilidad que le corresponde. Para estas corridas se utilizó la estabilidad E, haciendo la consideración de que la fuga o escape ocurre por la noche y se tiene nubosidad alta.

En la tabla III se presentan los resultados de las simulaciones que se realizaron para este trabajo:

Tabla III. Resultados de las simulaciones para la dispersión de cloro gaseoso liberado en forma masiva e instantánea		
Distancia (km)	Concentración (ppm)	Tiempo (h:m:s)
0.030	11190	0:0:12
0.100	707.54	0:0:50
0.150	265.11	0:1:15
0.190	150	0:1:34
0.220	102.37	0:01:50
0.360	30.0	0:02:59
0.420	20.0	0:03:29
1.0	2.29	0:08:20
1.5	0.77	0:12:30
2.0	0.373	0:16:40
7.0	0.020	0:58:20

La distancia determinada con el simulador para la cual se cumple el valor guía de respuesta en caso de emergencia (ERPG-3 = 20 ppm.), fue de 420 metros. La distancia para la cual se cumple el índice de daños inmediatos a la vida y la salud (IDLH = 30 ppm) fue de 360 metros.

### Conclusiones y recomendaciones

Los resultados presentados indican que cualquier persona que se encuentre a una distancia menor a 360 m puede resultar dañada o hasta poner en riesgo su vida. Por lo anterior se recomienda que las personas que laboran dentro de un radio de 420 metros sean capacitadas para responder en caso de fuga de cloro desde el cilindro. Deberán señalarse claramente las rutas de evacuación y deberá contarse con equipo adecuado para protección del personal. El detector de fugas de cloro, que ya se encuentra instalado en el área de dosificación del gas, es un dispositivo muy útil para alertar de manera inmediata de algún escape o fuga, lo que ayuda a que

el personal se proteja a tiempo y pueda ponerse en marcha oportunamente el plan de contingencia dentro de la planta.

La zona que se predice resultará más seriamente afectada será la que se encuentra hacia el suroeste (SW) del tanque de cloro, ello durante los meses de enero y febrero, pero durante marzo y abril la zona más seriamente afectada cambia hacia el Oeste-Noroeste (WNW). Lo anterior depende de la dominancia de los vientos, la cual es función de la estación del año, según el monitoreo diario horario promedio que se registró durante los meses de enero a junio de 1999 en la estación Noreste del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA).

Dentro de la planta, si los vientos vienen del ESE como ocurre la mayor parte del año, la zona más afectada será aquella en donde se encuentran los clarificadores secundarios, el tanque de almacenamiento y la casa de bombas. En la zona habitacional el área dañada abarcará a la parte más cercana de una colonia.

Si los vientos vienen del NE, la zona afectada será hacia el SW, donde se encuentran los clarificadores primarios, los reactores, la bomba de lodos de retorno, las oficinas generales y la caseta de vigilancia. En la zona habitacional el área dañada abarcará a la porción más cercana de una colonia.

Una recomendación que puede ayudar a disminuir el valor de riesgo que representa la instalación de un tanque de cloro gaseoso de 1 tonelada, sería el sustituirlo por cilindros de menor capacidad de almacenaje, con los cuales, en el peor escenario la cantidad de cloro fugado sería menor.

Otra recomendación es la elaboración un Plan de Contingencia para los que laboran en la planta, los vecinos y las autoridades civiles del lugar, en el cual se consideren entre otros los siguientes aspectos:

- a) Establecer un plan de acción claramente definido que ayude a eliminar la confusión durante el período de crisis.
- b) Establecer sistemas de alarma en línea directa con los bomberos u otros cuerpos de emergencia pública
- c) Identificar y señalar las rutas de evacuación en caso de emergencia.
- d) Capacitar al personal en el manejo del cloro y en el uso permanente del equipo adecuado de seguridad que se requiere para su protección.
- e) Instalar equipos para detectar la dirección de vien-

to, con el fin de identificar la ruta de la posible fuga.

## Resumen

Un estudio para determinar el nivel de riesgo planteado por la repentina fuga de un agente químico peligroso ha sido efectuado en una planta de tratamiento de aguas residuales localizada en la Zona Metropolitana de Monterrey. La planta utiliza un tanque de cloro gaseoso de una tonelada de capacidad y el nivel de riesgo de una posible liberación de este gas fue evaluado siguiendo un procedimiento basado en el método generalizado "What If" (¿Qué pasa si?) y el de Riesgos y Operatividad (Hazop), a fin de determinar posibles fallas operacionales y riesgos en la planta y sus alrededores. Una matriz 4X4 produjo indicadores para un análisis de riesgo semicuantitativo en caso de una fuga repentina del cloro gaseoso. Entre otras situaciones se encontró que a una distancia de 420 metros de la fuente de emisión, la concentración de cloro calculada fue de 20 ppm, valor al que no existe riesgo a la salud y vida de la población. El tiempo que toma la nube en recorrer esa distancia es de 3 minutos y 29 segundos.

**Palabras clave:** Riesgo, Análisis de riesgo, Administración de seguridad de procesos, Cloro, Fuga de cloro, Simulación de contaminación y riesgo, Daños a la salud.

## Abstract

A study to determine the level of risk posed by the sudden release of a hazardous chemical was carried out at a wastewater treatment plant in the metropolitan city of Monterrey. The plant uses a chlorine gas tank with a 1-ton capacity. The level of risk of a possible release of this gas was evaluated following a procedure based on the «What If?» and HAZOP methods, in order to determine possible operational failures and hazards in the plant and its surroundings. A 4x4 matrix gave indicators for a semiquantitative risk analysis in case of a sudden release of chlorine gas. Among other things it was found that at 420m from the source, the chlorine concentration fell to 20 ppm, a value which does not possess a threat to the life and health of the nearby population. Three minutes and 29 seconds was the time needed by the plume in order to move 420m

after the release of chlorine.

**Keywords:** Risk, Risk analysis, Safety Process Management, Chlorine, Release of hazardous chemicals, Simulation of contamination and risk, Immediate Damage to Life and Health (IDLH).

## Referencias

1. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Gaceta Ecológica (1989).
2. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, (1995). Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers.
3. Modelos Atmosféricos para la Simulación de Contaminación y Riesgos en Industrias. Manual de referencia versión 2,0. (1993). Sistemas Heurísticos, S.A. de C.V.
4. Reynolds, Tom D. and Richards, Paul A. (1996). Unit operations and Processes in environmental engineering, 2<sup>nd</sup>. Edition, p. 114-127. PWS Publishing Company.
5. Hammer, Mark J. and Hammer Jr, Mark J. (1996). Water and Waterworks Technology, Prentice Hall. International, Inc. Englewood Cliffs.
6. Henry, J. Glynn, Heinke, Gary W. (1999) Ingeniería Ambiental, Editorial Prentice Hall, México, p.405-406.
7. Kletz, Trevor A. Hazaop and Hazan . Notes on the identification and assessment of hazard, (1986). The Institution of Chemical Engineers, Rugby, England.
8. Guía para la Preparación de un Programa Preventivo y Administración del Riesgo (1989), Oficina de Servicios de Emergencia del Estado de California, USA.
9. Emergency Response Planning Guideline Committee, (1989), American Industrial Hygiene Association, (AIHA), Akron, OH.
10. Pocket Guide to Chemical Hazards, (1990). National Institute for Occupational Safety and Health, US Government Printing Office, Washington, D.C. 20402.