



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL DEBIDO A LA  
EXPOSICIÓN DE BENCENO EN LA ATMÓSFERA DE TRES  
SITIOS DE LA ZONA SUROESTE DE LA CIUDAD DE  
MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A:**

**LUIS ANTONIO RODRÍGUEZ ANGELES**

**ASESORES: DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA  
DR. HUMBERTO BRAVO ÁLVAREZ**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

Evaluación del Riesgo Ambiental debido a la Exposición de  
Benzeno en la Atmósfera de tres sitios de la Zona Suroeste  
de la Ciudad de México.

que presenta el pasante: Luis Antonio Rodríguez Angeles  
con número de cuenta: 7532368-6 para obtener el título de:  
Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 29 de Noviembre de 2006.

PRESIDENTE	<u>Ing. Fernando Orozco Ferrera</u>	
VOCAL	<u>IQ. Margarita Castillo Agreda</u>	
SECRETARIO	<u>Dr. Rodolfo Sosa Echaverría</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>MC. Bernardo Francisco Torres</u>	

## DEDICATORIAS

*A mi esposa Araceli por darme su cariño y apoyo para poder concluir con este trabajo.*

*A mis hijos: Luis Antonio y José Christian que me dieron la motivación y ayuda para terminar lo que algún día empecé.*

*A la memoria de mi madre y abuelita que me dieron todo y gracias a ellas pude lograr todo lo que tengo*

## **RECONOCIMIENTOS**

Agradezco las facilidades que me proporcionaron en la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, para el desarrollo de la presente tesis, permitiéndome utilizar las bases de datos que sobre, Compuestos Orgánicos Volátiles, se habían generado en investigaciones anteriores.

Deseo expresar mi agradecimiento a los señores Drs. en Ingeniería RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA y HUMBERTO BRAVO ÁLVAREZ asesores de esta Tesis por su ayuda y orientación para la elaboración de la misma. Así mismo, deseo expresar mi agradecimiento a la M en I. Ema Bueno López responsable del Laboratorio de Análisis de COVs del Centro Nacional de Investigaciones y Capacitación Ambiental por los análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles de las campañas consideradas en este estudio, al Biol. Pablo Sánchez Álvarez por su participación en los muestreos de COVs, al Ing. Víctor Gutiérrez Avedoy y al Dr. Adrian Fernández Bremontz por las facilidades y autorización para la realización de los análisis de COVs en el CENICA como parte del proyecto de colaboración entre la SCA-CCA-CENICA sobre "Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles en México.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, por su apoyo al proyecto "Relaciones de Compuestos Orgánicos Volátiles como Indicadores de Estrategias para Reducir la contaminación Atmosférica" (Proyecto IN111707).

Al "Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica" (PAPIT). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo al proyecto "determinación de compuestos orgánicos Volátiles Tóxicos y sus reacciones en la atmósfera de la zona suroeste de la Ciudad de México.

Un agradecimiento especial a todos los sinodales, por su tiempo, observaciones y consejos que me ayudaron a enriquecer este trabajo.

# CONTENIDO

ABREVIATURAS .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABLAS .....	10
RESUMEN.....	11
META.....	13
OBJETIVOS .....	13
1 INTRODUCCIÓN .....	14
2 ANTECEDENTES .....	17
2.1 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZMCM .....	17
2.2 IMPORTANCIA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR COVs.....	19
2.3 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR COVs EN LA ZMCM.....	21
2.4 LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL GENERADA POR EL PARQUE AUTOMOTOR .....	23
3 EL BENCENO .....	28
3.1 INTRODUCCIÓN.....	28
3.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y FISICOQUÍMICAS .....	29
3.3 PROPIEDADES QUÍMICAS .....	30
3.4 PRODUCCIÓN DE BENCENO .....	32
3.5 CARACTERÍSTICAS DEL BENCENO COMO CONTAMINANTE.....	34
3.5.1 COMPORTAMIENTO EN EL MEDIO AMBIENTE .....	34
3.5.2 NIVELES DE TOXICIDAD DEL BENCENO .....	35
3.5.3 NIVELES PERMISIBLES DE BENCENO EN LA ATMÓSFERA .....	35
3.5.3.1 AMBIENTE LABORAL .....	35
3.5.3.2 AIRE AMBIENTE .....	36
3.5.4 EFECTOS DEL BENCENO EN LA SALUD.....	37
3.6 FUENTES DE EMISIÓN Y EXPOSICIÓN DE BENCENO.....	38
3.6.1 EL ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE LAS GASOLINAS .....	39
3.6.2 OTRAS ACTIVIDADES QUE GENERAN EXPOSICIÓN Y EMISIÓN DE BENCENO .....	42
4 EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL .....	44
4.1 INTRODUCCIÓN.....	44
4.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS .....	44
4.1.2 USOS DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS.....	45
4.1.3 METODOLOGÍA Y TÉCNICAS PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS.....	46
4.2 ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN .....	48
4.2.1 ESCENARIO DE EXPOSICIÓN.....	48
4.2.4 CUANTIFICACIÓN DE LA EXPOSICIÓN.....	53
4.3 CARACTERIZACIÓN DE RIESGOS.....	56
4.3.1 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN .....	57
4.3.2 EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD.....	62
4.3.3 SELECCIÓN DE ÍNDICES DE TOXICIDAD .....	64
4.3.4 ESTIMACIÓN DE RIESGOS .....	66
4.4 RESUMEN ESQUEMÁTICO DE UNA EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL .....	74
5. CONCENTRACIÓN DE BENCENO EN LA ATMÓSFERA Y EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL.....	77

<b>5.1 INFORMACIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MUESTREOS.</b>	<b>77</b>
<b>5.2 RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>79</b>
<b>5.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR INHALACIÓN DE BENCENO.</b>	<b>84</b>
<b>5.3.1 DETERMINACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR INHALACIÓN DE BENCENO EN UNIDAD HABITACIONAL (UH)</b>	<b>85</b>
<b>5.3.2 DETERMINACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR INHALACIÓN DE BENCENO EN GASOLINERA (G)</b>	<b>88</b>
<b>5.3.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR INHALACIÓN DE BENCENO EN CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA (CCA)</b>	<b>91</b>
<b>6 RESULTADOS</b>	<b>102</b>
<b>6.1 ESTIMACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL EN LAS GASOLINERAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO</b>	<b>110</b>
<b>6.2 ESTIMACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL CON BASE INFORMACIÓN DE LA EPA</b>	<b>111</b>
<b>7 MEDIDAS DE MITIGACIÓN</b>	<b>112</b>
<b>8 CONCLUSIONES</b>	<b>116</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>118</b>

## ABREVIATURAS

- 1.- ATSDR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry
- 2.- CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera
- 3.- CENICA: Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental
- 4.- CMPCCAVM: Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México
- 5.- COVs: Compuestos Orgánicos Volátiles
- 6.- CRETIB: Corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, y bioinfecciosidad
- 7.-  $D_A$ : Dosis Absorbida
- 8.- DdR: Dosis de riesgo potencial de referencia
- 9.- DDF: Departamento del Distrito Federal
- 10.- DDVP: Dosis Diaria Vitalicia Promedio
- 11.- Ds: Dosis Suministrada
- 12.- EMR: Exposición Máxima Razonable
- 13.- EPA: Environmental Protection Agency
- 14.-  $E_s$ : Exposición a la sustancia contaminante
- 15.-  $F_A$ : Factor de absorción
- 16.- G: Gasolinera, Estación de Servicio
- 17.- HCNM: Hidrocarburos no Metano
- 18.- HCT: Hidrocarburos Totales
- 19.- HEAST: Health Effects Assessment Summary Tables
- 20.- Hi Índice de peligro
- 21.- HPAs: Hidrocarburos policíclicos aromáticos
- 22.- IMP: Instituto Mexicano del Petróleo
- 23.- IRIS: Integrated Risk Information System
- 24.- NIOSH: Instituto Nacional para la Seguridad Profesional y Salud
- 25.- NNCA: Norma Nacional de Calidad del Aire
- 26.- NOx: Óxidos de nitrógeno
- 27.- OSHA: Occupational Safety and Health Administration.
- 28.- PEL: Limite de exposición permisible
- 29.- PICCA: Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica
- 30.- ppb: Partes por billón ( $10^{-3}$  ppm)
- 31.- ppm: Partes por millón.



- 32.- PROAIRE: Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000
- 33.- PST: Partículas suspendidas totales
- 34.- Ri: Riesgo potencial individual
- 35.- Rp: Riesgo potencial poblacional
- 36.- SEDESOL: Secretaria de Desarrollo Social
- 37.- SCA: Sección de Contaminación Ambiental
- 38.- TLV: Threshold Limit Value
- 39.- TWA: -Time Weighted Average
- 40.- UH: Unidad Habitacional
- 41.- ZMCM: Zona Metropolitana de la Ciudad de México

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Concepción actual del benceno.

Figura 3.2. Síntesis de la cadena productiva mediante la cual el petróleo crudo se transforma en benceno y otros productos.

Figura 3.3 Sistema de distribución de gasolinas.

Figura 4.1.- Relación entre la investigación y evaluación de riesgos ambientales.

Figura 4.2.- Componentes tradicionales de una evaluación de riesgo ambiental.

Figura 4.3.- Metodología para la determinación de la Evaluación de Riesgo Ambiental

Figura 6.1 Concentración de benceno en cada uno de los sitios de muestreo en ppb

Figura 6.2 Concentración de benceno en cada uno de los sitios de muestreo en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 6.3 Riesgo individual por exposición al benceno, por un tiempo de contacto de 70 años

Figura 6.4 Riesgo poblacional por exposición al benceno, expresado como casos en 70 años

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.- Producción de benceno (en millones de t/a).

Tabla 3.2.- Características de las gasolinas de la Ciudad de México.

Tabla 3.3.- Factores de emisión de COVs y Benceno en gasolineras.

Tabla 5.1.- Programa de muestreo Sosa

Tabla 5.2.- Programa de muestreo Bueno.

Tabla 5.3.- Resultados de concentración de benceno expresados como ppb de los muestreos instantáneos realizados por el Sosa y Bueno.

Tabla 5.4.- Temperatura ambiente promedio de los días de muestreo.

Tabla 5.5.- Resultados de concentración de benceno expresados en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de tres sitios de la ZMCM

Tabla 5.6.- Concentraciones promedio encontradas durante los muestreos

Tabla 6.1.- Resultados promedio de las concentraciones de benceno y de Evaluación de Riesgo Ambiental.

Tabla 6.2.- Tabla de resultados de UH, muestreos instantáneos Sosa

Tabla 6.3.- Tabla de resultados de G, muestreos instantáneos Sosa

Tabla 6.4.- Tabla de resultados de CCA, muestreos instantáneos Sosa

Tabla 6.5.- Tabla de resultados de CCA, muestreos compuestos Sosa

Tabla 6.6.- Tabla de resultados de CCA, muestreos compuestos Bueno

## RESUMEN

Con objeto de determinar el riesgo ambiental potencial por la presencia de benceno en la atmósfera en tres sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México y presentar algunas de las medidas de mitigación, se desarrolló la presente investigación, utilizando los valores de benceno encontrados en la investigación realizada en la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM y el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA), laboratorio en el cual se llevó a cabo el trabajo analítico.

Los sitios seleccionados para el estudio son tres, y se encuentran localizados en el área suroeste de la ZMCM. Estos sitios fueron: una estación de servicio (gasolinera), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) dentro de Ciudad Universitaria, y una unidad habitacional (Copilco-Universidad), todos ellos presentando diferente actividad y ubicados en la misma área.

Para la realización de la determinación del riesgo ambiental potencial por la presencia de benceno en la atmósfera en los tres sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México, se realizó una investigación bibliográfica con el fin de encontrar la metodología de evaluación de riesgo ambiental más adecuada.

Con base en la aplicación de la metodología para la Evaluación de Riesgos Ambientales para el caso de contaminación por benceno, en cada uno de los sitios de estudio, se observa que en los tres sitios la probabilidad de riesgo ambiental por contaminación de benceno inhalado son muy bajos, con lo que el número de casos probables es menor a uno en un período de 70 años. No obstante, en el caso de la gasolinera que fue donde se encontraron los niveles más altos de concentración de benceno, se requiere realizar estudios de exposición personal, para tomar las medidas preventivas y correctivas que permitan minimizar los posibles riesgos a la salud del personal que labora en el sitio de referencia.

A partir de los resultados, se propone evaluar la factibilidad de establecer en México una norma de calidad del aire para benceno, conociendo que al ser un compuesto cancerígeno, no se podría dar una absoluta seguridad de protección a la salud, por lo cual continuamente se tendría que ir haciendo cada vez más estricta dicha norma o nivel recomendado.

Al encontrar niveles de benceno por arriba de lo recomendado es necesario hacer énfasis en el control de emisiones por fuentes móviles, y en la recuperación de vapores en estaciones de servicio.

La disminución de las emisiones por evaporación en estaciones de servicio se ha venido dando de manera continua y progresiva en la ZMCM, existiendo por normatividad el uso de sistemas de control a nivel Fase I (consistente en la instalación de sistemas de recuperación de vapores en los tanques de almacenamiento de combustible de las estaciones de servicio), así como sistemas de control a nivel Fase II (adicionalmente a los sistemas Fase 1, incluyen sistemas de recuperación de vapores en las bombas de despacho de combustible). Sin embargo al presentarse niveles críticos de benceno, es necesario verificar la eficiencia en las condiciones de operación de dichos sistemas.

## **META**

Determinar el riesgo ambiental potencial por la presencia de benceno en la atmósfera en tres sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México y presentar algunas medidas de mitigación.

## **OBJETIVOS**

Recopilar y analizar la información de concentración de benceno en la atmósfera de tres sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México.

Recopilar la información necesaria sobre las metodologías de evaluación de riesgo ambiental.

Aplicar la metodología para determinar el riesgo ambiental por inhalación de benceno en los tres sitios de la zona suroeste de la Ciudad de México.

Proponer alternativas para la disminución del riesgo ambiental por benceno en las zonas estudiadas.

# 1 INTRODUCCIÓN

La importancia de un estudio sobre los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se fundamenta tanto por su reactividad como por su toxicidad, conforme a los siguientes aspectos.

Los COVs constituyen un factor esencial en la formación de ozono. Este último representa un problema prioritario en la ZMCM, ya que a pesar de los esfuerzos que se han venido dando para combatir la contaminación atmosférica por ozono, ésta no ha disminuido. Por el contrario, desde mediados de los años 80 los niveles de este contaminante se han elevado considerablemente hasta llegar a valores potencialmente dañinos a la salud.

El ozono, que es uno de los principales componentes del smog, puede causar problemas respiratorios serios como dificultad en la respiración y asma, y también puede reducir la resistencia a las infecciones. Químicamente, el ozono es muy reactivo y se combina prácticamente con cualquier material con el que se pone en contacto, incluso puede romper células y tejidos biológicos.

En los últimos diez años se han publicado un considerable número de artículos informando sobre los efectos en la salud causados por el ozono y otros oxidantes fotoquímicos a niveles muy cercanos a la norma actual de la calidad del aire (0.11 ppm promedio horario máximo, no más de una vez al año, en un período de tres años). Algunos de los estudios (Sosa 2001)<sup>38</sup> recientes en los que se expone a individuos por períodos de 1 a 2 horas indican que pueden presentarse decrementos en la función pulmonar en niños y adultos jóvenes cuando se exponen a concentraciones de 0.12 a 0.16 ppm, mientras llevan a cabo diferentes niveles de ejercicio.

Otros estudios sobre exposición prolongada (de hasta 7 horas) a concentraciones bajas de ozono en el intervalo de 0.08 a 0.12 ppm, indican que existe un decremento progresivo de la función pulmonar, así como un incremento en los síntomas respiratorios en situaciones de ejercicio moderado.<sup>12</sup>

La Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, señala que el Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica implica inversiones por más de 14 248 millones pesos, de los cuales hasta junio de 1994 se había ejercido el 54 %. Aunque dicha inversión no se ha enfocado del todo al problema del ozono, los logros obtenidos con respecto a este contaminante han sido mínimos, y en el peor de los casos estrategias tendientes a disminuir otros

contaminantes dieron como resultado un aumento en los niveles de ozono. Actualmente se tiene el "Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000" (PROAIRE), el cual reconoce el grave problema de contaminación atmosférica por ozono existente en la ZMCM, y señala que las acciones dirigidas a disminuir eficazmente los niveles de ozono se deben de enfocar a la reducción tanto de hidrocarburos reactivos como de NOx. Sin embargo, siendo algunos de los COVs tóxicos, su disminución es igualmente importante.

En la ZMVM, donde 85 por ciento de los días se rebasa la norma, el Proaire 2001-2006, que aún no se da a conocer oficialmente, tiene como nuevas medidas reducir el nivel para que se declaren las contingencias ambientales -ahora son 241 puntos Imeca- y para ello sólo se espera un estudio de la Secretaría de Salud, que definirá los niveles límite para proteger la salud de la población,

Gran parte de los COVs están identificados por sus características específicas como "contaminantes atmosféricos peligrosos". Por sí mismos, los hidrocarburos tienen poca reactividad fotoquímica en el aire, sin embargo, en presencia de luz ultravioleta y óxidos de nitrógeno reaccionan para formar oxidantes fotoquímicos, predominantemente ozono. Los dos grupos de hidrocarburos de mayor importancia en relación a la contaminación atmosférica son los hidrocarburos aromáticos y los hidrocarburos oxigenados. Hidrocarburos aromáticos. En este grupo cabe destacar el benceno y los hidrocarburos policíclicos aromáticos.

El benceno es un compuesto clasificado por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer como carcinógeno del Grupo 1, lo que significa que existe suficiente evidencia científica para probar una relación positiva entre la exposición al tóxico y el desarrollo del cáncer. Mas específicamente, se ha encontrado que los trabajadores expuestos al benceno tienen una mayor probabilidad de desarrollar leucemia aguda que la población en general. Asimismo, se sabe que el benceno tiene efectos hematológicos, inmunológicos y sobre el sistema nervioso central (Bravo et al 199)<sup>6</sup>.

En estudios de exposición realizados en Los Ángeles <sup>31</sup> se encontró que la principal fuente de benceno en la atmósfera son las emisiones de los vehículos automotores (82%), así como las pérdidas evaporativas de hidrocarburos durante el manejo, distribución, almacenamiento y abastecimiento de gasolina. A pesar de que el contenido de benceno en la gasolina en México es relativamente bajo (menos del 2%), debido a su toxicidad y al alto consumo de combustible en el Área Metropolitana, es necesario establecer estaciones de medición y realizar estudios de exposición para poder llevar a cabo un análisis de riesgo que indique el porcentaje de la población que se encuentra expuesta a niveles elevados de este hidrocarburo.



Con base en la necesidad de determinar el riesgo ambiental potencial del benceno en la atmósfera de tres sitios de la ZMCM, presente por el consumo de gasolina, así como presentar una serie de medidas de mitigación se desarrolla el presente trabajo de tesis.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 La contaminación atmosférica en la ZMCM

El problema de la contaminación atmosférica en la ZMCM se hizo evidente a partir de la década de los sesentas y ha alcanzado en la actualidad dimensiones considerables.

No obstante, cabe mencionar que desde los años setenta se han venido dando algunas acciones para atender este problema. En 1978, el Departamento del Distrito Federal, en coordinación con la extinta Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, llevó a cabo la Primera Reunión de Expertos, invitando a especialistas de diversos países, a fin de evaluar los programas y acciones que debían llevarse a cabo para controlar el problema del deterioro atmosférico originado por oxidantes fotoquímicos y otros contaminantes.

En 1979, en una reunión del gabinete presidencial organizada por el Jefe del Ejecutivo Federal, se firma el acuerdo que establece el Programa Coordinado para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México 1979-1982.

Años más tarde, en 1986, debido a los altos valores de ozono que se presentaron en la ZMCM, la recién creada Subsecretaría de Ecología propone a través de un Acuerdo Presidencial, las Veintiún Medidas para Controlar la Contaminación en el Valle de México, mismas que meses después se ven ampliadas en el Programa Cien Acciones Necesarias en Ecología de alcance nacional y cubriendo además otros problemas ambientales.

Para 1989, de nueva cuenta se logra la participación de expertos mexicanos y extranjeros y se presenta a la opinión pública el Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México, contando con un apoyo económico sustancial de diversas agencias internacionales.

Desde 1987 a la fecha se rebasó la norma de calidad del aire para ozono en un promedio de 330 días al año. Además los datos más recientes denotan una tendencia a rebasar la norma anual de partículas, tanto como partículas suspendidas totales (PST) como fracción respirable (PM10).

Para hacer frente a este problema, en marzo de 1996 se presentó a la opinión pública, el Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995-2000. Preparado por la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Este programa es uno más de los que a través de las últimas dos décadas ha establecido el Gobierno Federal conjuntamente con las autoridades locales. En dicho programa se reconoce un incremento dramático en el comportamiento de las concentraciones máximas diarias de ozono a partir de 1986. Se puede señalar que no ha cumplido con las expectativas creadas puesto que a la fecha no se ha logrado el control efectivo en el principal problema de contaminación atmosférica del área: elevadas concentraciones de ozono con alta frecuencia y duración, partículas suspendidas totales y partículas fracción respirable.

A pesar de que se han realizado esfuerzos y de que se han destinado numerosos recursos para reducir el problema de la contaminación atmosférica en la ZMCM, es fácil demostrar que se ha tenido poco éxito a la fecha con respecto a ozono, debido entre otros factores a situaciones como las siguientes:

- a).- La falta de verdadera voluntad política para resolver los problemas de fondo donde la contaminación o el deterioro ambiental sólo es la consecuencia de problemas más graves por los que atraviesa nuestra ciudad.
- b).- Los recursos asignados para llevar a cabo las acciones propuestas han sido escasos, inoportunos y mal aplicados.
- c).- La carencia de evaluaciones técnicas serias y completas de las acciones propuestas, o a su instrumentación precipitada aún en contra de la opinión de especialistas, que en su momento se opusieron a ellas por considerarlas no científicamente fundamentadas.
- d).- La falta de seguimiento de cada una de las medidas.

A este respecto se podrían mencionar ejemplos como:

La disminución del contenido de plomo en la gasolina en 1986 y la sustitución del combustóleo en las dos plantas termoeléctricas de la ZMCM por gas natural, así como el cierre de las instalaciones de Loreto y Peña Pobre, medidas todas ellas enfocadas a reducir los niveles de óxidos de azufre, partículas y plomo, pero cuyo efecto colateral fue el incremento de las concentraciones de precursores de ozono. Dichos aspectos fueron advertidos antes de la instrumentación de las medidas cuyos resultados se han demostrado en estudios posteriores a la implantación de tales acciones.

El uso de gasolinas oxigenadas en vehículos sin convertidor catalítico que redujo sustancialmente la emisión de monóxido de carbono y de plomo, incrementando asimismo los niveles de contaminantes precursores de ozono.

El error de volver permanente una medida buena de carácter temporal (Un día sin auto) y el consecuente incremento de vehículos en circulación.

El cierre de una importante fuente de reductores atmosféricos como lo fue la Refinería 18 de Marzo, medida que como consecuencia modificó el comportamiento reactivo de la atmósfera de la ZMCM.

Se puede afirmar que en las acciones llevadas a cabo hasta el presente, no se ha considerado la complejidad de la química atmosférica de la ZMCM, por lo cual estas han dado como resultado un incremento neto de las concentraciones de ozono representando un serio problema de salud pública.

## **2.2 Importancia de la contaminación atmosférica por COVs**

Los diversos estudios sobre contaminación atmosférica se han enfocado en un principio a los denominados "contaminantes criterio" que son: partículas, bióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono y bióxido de nitrógeno. Lo anterior por estar presentes tales contaminantes en zonas urbanas, además de existir los estudios científicos al respecto que demuestran su relación concentración-efecto en la salud, denominados "criterios de calidad del aire".

Sin embargo en los últimos tiempos ha cobrado gran importancia e interés el estudio de contaminantes atmosférico peligroso y en especial de los compuestos tóxicos encontrándose dentro de éstos un gran número de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs).

La importancia del estudio de los COVs consiste, no solamente en el potencial de toxicidad que tiene cada compuesto dependiendo de sus características, sino además de su papel determinante como precursores de ozono.

No existe norma mexicana para establecer el límite tolerable a concentraciones de Hidrocarburos Totales (HCT) en el aire. El alto consumo de combustibles fósiles, su calidad y las condiciones meteorológicas que prevalecen en el Valle de México hacen suponer que los niveles de HCT rebasan las normas frecuentemente. En un informe de SEDUE presentado en 1988, se afirmó que se habían encontrado concentraciones de HCT de hasta 8 partes por millón (ppm), mientras la norma de EUA es de 0.24 ppm.

Esto quiere decir que las concentraciones de HCT encontradas en el Centro de la Ciudad de México estaban más de 30 veces por encima de la norma.

La fuente principal de los HCT es la quema de combustibles fósiles, por ello, áreas con gran circulación de automóviles, como el centro de la Ciudad, pueden presentar altas concentraciones de estos contaminantes. Los hidrocarburos están considerados como parte de los contaminantes atmosféricos más tóxicos. En especial, los hidrocarburos aromáticos como el benceno y el tolueno, tienen un reconocido potencial cancerígeno. De igual manera, los formaldehidos, compuestos orgánicos volátiles que forman parte de los HCT, un subproducto de la combustión, están considerados como un contaminante potencialmente cancerígeno. Existen estudios que vinculan el aumento de las concentraciones de formaldehidos en el Valle de México a la introducción del aditivo MTBE (metilterbutileter) a las gasolinas para oxigenarlas.(Castillejos 1992)<sup>10</sup>

Los COVs representan el grupo con un mayor número de contaminantes atmosféricos peligrosos (43%), encontrándose incluidos el benceno y el tolueno. Cabe mencionar que para el caso de los contaminantes atmosféricos, el término "peligroso" se refiere a su toxicidad, y no se deberá confundir con otras clasificaciones ambientales en donde este término es más amplio. Por ejemplo en el caso de residuos peligrosos, esta asignación se otorga por sus características CRETIB (Corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, y bioinfecciosidad).

Al benceno se le clasifica como de alto nivel de riesgo como compuesto cancerígeno, que de acuerdo con la información reportada por la EPA (EPA 1998)<sup>19</sup> la exposición a una concentración en el aire ambiente de benceno de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , durante un periodo de vida de 70 años, representa un riesgo ambiental equivalente a  $8.3 \times 10^{-6}$ .

En el Título II de la Ley de Aire Limpio de la EPA (Clean Air Act) correspondiente a Fuentes Móviles (Main 1998)<sup>30</sup> destaca el requerimiento a partir de 1995 del uso de gasolinas reformuladas, con menores niveles de benceno, en las nueve ciudades de los Estados Unidos con mayores problemas de contaminación atmosférica fotoquímica. Tales combustibles no deberán de contener más del 1% de benceno, 25% de aromáticos, y 15% o menos de contaminantes atmosféricos tóxicos y COVs.

El benceno es un compuesto poco reactivo, por lo cual el interés de su control radica más en su toxicidad que como precursor de ozono. Asimismo el benceno, o la relación de éste con otros compuestos, también son tomados en cuenta como indicador en la evaluación de estrategias ambientales como es el caso de la reformulación de gasolinas.

### 2.3 Contaminación atmosférica por COVs en la ZMCM

En México existen determinaciones de hidrocarburos totales por parte de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM desde los años 80; no obstante se señala la necesidad de llevar a cabo determinaciones sobre la acumulación de este tipo de compuestos. Asimismo se estimó una emisión de 1,080 toneladas de COVs diariamente en la ZMCM (Sosa 2001)<sup>38</sup>.

De 1991 a 1993 se llevaron a cabo algunas campañas de monitoreo de hidrocarburos como parte del Proyecto Global sobre la Calidad del Aire en la Ciudad de México, realizado por el IMP y el Laboratorio Nacional de Los Álamos.

La primera campaña consistió en el uso de tubos de muestreo para hidrocarburos y aldehídos, con análisis por cromatografía de gases y espectrometría de masas para el caso de los hidrocarburos, mientras que para los aldehídos se empleó cromatografía de líquidos de alta resolución. Por presentarse, en el caso de hidrocarburos, algunos problemas con las eficiencias de desorción de las columnas de cromatografía, los resultados solamente cubrieron el aspecto cualitativo, lográndose identificar alcanos desde el  $C_3H_8$  hasta el  $C_{12}H_{26}$ , compuestos aromáticos, alcoholes, cetonas y poliaromáticos. Los niveles de formaldehído encontrados para la Ciudad de México estuvieron muy por arriba de los niveles encontrados en Los Ángeles CA.

En marzo de 1992 se llevó a cabo en la Ciudad de México y como parte del Proyecto Global con el LNLA, un estudio para la especificación de hidrocarburos, en el cual participaron el Departamento del Distrito Federal (DDF), el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). En este estudio las muestras fueron colectadas en cánisters y los muestreos se tomaron en 6 sitios de la ZMCM. Se consideró un periodo de muestreo del 6 al 24 de marzo y de las 6 a las 9 de la mañana. El análisis de más de 200 hidrocarburos fue llevado a cabo en los laboratorios de la EPA en Estados Unidos mediante cromatografía de gases con detección por ionización de flama.

Entre los hallazgos más importantes se tiene que:

- a).- Los niveles de hidrocarburos no metano (HCNM) encontrados en la ZMCM son mayores que los valores detectados en Estados Unidos y otros países para sitios similares;
- b).- La relación promedio encontrada de COVs/NOx de 35 para la ZMCM, es el doble de las máximas reportadas en zonas urbanas de los Estados Unidos (considerando propano y butano).

c).- Se obtuvieron niveles elevados de propano y butano

d).- Los niveles encontrados de benceno representan un riesgo para la salud, por ser éste un compuesto cancerígeno.

Posteriormente el mismo IMP ha continuado con el estudio de COVs en la atmósfera de la ZMCM clasificándolos por su importancia dependiendo de los niveles en que se encuentran, así como por su potencial de reactividad.

Estudios recientes sobre la evaluación de los perfiles de las concentraciones de COVs debido a emisiones vehiculares en la ZMCM, han encontrado niveles promedio de benceno y tolueno de 1.8 y 4.3 ppb, respectivamente (Bravo et al 1999)<sup>6</sup>.

Los estudios sobre la determinación de COVs en la atmósfera de la ZMCM realizados por el IMP son pioneros en México y constituyen un gran esfuerzo para el conocimiento de dichos compuestos; sin embargo, en gran parte tales investigaciones son realizadas como contratistas de Petróleos Mexicanos y en el caso de generarse información que pudiera afectar sus intereses, ésta no es divulgada con la amplitud, forma y en el tiempo que se requieren para darle solución al problema de contaminación atmosférica que se pudieran detectar.

PEMEX ha realizado diversas acciones para mejorar los combustibles que se consumen en la ZMCM, como ha sido la reformulación de gasolinas y la disminución del contenido de azufre en el Diesel. Para el caso de gasolinas, desde 1992 se ha venido reduciendo paulatinamente el contenido de plomo, habiéndose logrado, en 1996, la presencia en el mercado de gasolina sin plomo (Magna), y para 1998 la eliminación de gasolina con plomo (Nova).

En el PROAIRE se menciona que al encontrarse la relación HC/NO<sub>x</sub> en la ZMCM entre 13 y 50 (considerando las concentraciones de propano y butano), las acciones dirigidas a disminuir eficazmente los niveles de ozono se deben enfocar a la reducción de NO<sub>x</sub>, sin embargo conviene recordar que siendo algunos de los COVs tóxicos, su disminución inmediata es igualmente importante. Anteriormente ya se había señalado la importancia de conocer esta relación para el caso específico de la ZMCM. Recientemente se sugirió mejorar el inventario de emisiones, ya que resultados preliminares indican que ciertas estimaciones de óxidos de nitrógeno pueden estar elevadas.

El benceno es un compuesto clasificado por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer como carcinógeno del Grupo 1, lo que significa que existe suficiente evidencia científica para probar una relación positiva entre la exposición al tóxico y el desarrollo de cáncer. Más específicamente, se ha

encontrado que los trabajadores expuestos al benceno tienen una mayor probabilidad de desarrollar leucemia aguda que la población en general. Asimismo se sabe que el benceno tiene efectos hematológicos, inmunológicos y sobre el sistema nervioso central.

En estudios de exposición realizados en Los Ángeles se encontró que la principal fuente de exposición al benceno es el cigarro (39%), y la principal fuente de benceno en la atmósfera son las emisiones de los vehículos automotores (82%), así como las pérdidas por evaporación de hidrocarburos durante el manejo, distribución, almacenamiento y abastecimiento de gasolina. A pesar de que el contenido de benceno en la gasolina en México es relativamente bajo (menos del 2%), debido a su toxicidad y alto consumo de combustible en la ZMCM, es necesario incrementar su medición y realizar estudios de exposición para poder llevar a cabo un análisis de riesgo que indique el porcentaje de la población que se encuentra expuesta a niveles inaceptables de este compuesto.

Con relación al marco normativo, a la fecha se han publicado cuatro Normas Oficiales Mexicanas para el control de COVs y una referente a las especificaciones de los combustibles. En lo referente a las normas para el control de emisiones, se tienen dos que involucran a las estaciones de servicio, y son las que a continuación se especifican:

NOM-092-ECOL-1995. Que regula la contaminación atmosférica y establece los requisitos, especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo ubicadas en el Valle de México.

NOM-093-ECOL-1995. Que establece el método de prueba para determinar la eficiencia de laboratorio de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y autoconsumo.

En México existen estudios <sup>13</sup> en donde se señala la importancia y necesidad de evaluar técnicamente toda estrategia tendiente a mejorar la calidad del aire, y sobre todo considerar sus efectos colaterales negativos. Tal es el caso del uso de gasolinas reformuladas en vehículos sin convertidor catalítico o en mal estado, así como la emisión de contaminantes atmosféricos tóxicos, tanto por el escape de vehículos como por evaporación.

## **2.4 La contaminación ambiental generada por el parque automotor**

En el mundo existen alrededor de 800 millones de vehículos (motos, autos, colectivos y camiones) para cerca de 5,500 millones de habitantes, y se prevé que en el año 2030 la cifra llegue a 1,000 millones,



para alarma de muchos. La contaminación ambiental generada por dicho parque automotor ha preocupado a las más diversas agrupaciones ecologistas, que han denunciado una y otra vez el impacto nocivo que tienen los combustibles sobre la salud humana y el medio ambiente: un auto emite de más de 1,000 gases generados por el uso de naftas que contienen componentes altamente tóxicos que, en algunos casos, son considerados cancerígenos (CM 1996)<sup>11</sup>

Por sus propiedades cancerígenas, el benceno es uno de los componentes de las naftas considerado como el más perjudicial para la salud. En los países más desarrollados se comenzó a limitar su contenido y para su reemplazo se buscaron otros compuestos menos nocivos para el medio ambiente que aportaran un octanaje similar. Esto es así desde comienzos de la década de los ochenta, ya que existe legislación internacional que prohíbe el uso de elementos tóxicos. La composición permitida del benceno en la gasolina es del 1% como máximo, a la vez que el uso de aromáticos bajó del 40 al 20%, mientras que el uso del plomo fue totalmente eliminado (Bravo et al 1999)<sup>6</sup>.

Actualmente todos los modelos de coches que se comercializan en México traen de fábrica un convertidor catalítico. Respecto a la leyenda "gasolina sin plomo" que aparece todavía en algunas estaciones de servicio, tiene como objetivo asegurarle al automovilista que está cargando un producto que no perjudicará su vehículo, por lo que se estima que la adición de compuestos de plomo a las naftas es algo que "ya ha pasado a la historia".

En su reemplazo se utilizan compuestos oxigenados, que son aditivos menos nocivos y le dan a la gasolina una calidad similar a la mezcla anterior. Se ha hecho una reformulación de la gasolina para disminuir los índices de contaminación sin perjudicar la calidad del combustible (Bravo et al 1999)<sup>6</sup>.

A finales de la década de los ochentas, Petróleos Mexicanos inició, en conjunto con las autoridades ambientales, un programa de mejoramiento de combustibles el cual en fechas recientes se ha hecho intensivo y permanente, con el objetivo primordial de coadyuvar en el mejoramiento y preservación de la calidad del aire en las zonas urbanas del país, en especial la ZMCM.

Los logros alcanzados a la fecha son significativos; las gasolinas que se consumen hoy día no tienen plomo y su octano es igual al de las gasolinas Regular y Premium norteamericanas. Desde hace más de diez años se aplican aditivos para controlar la formación de depósitos en los sistemas de admisión de combustible y a partir de 1996 se introdujeron especificaciones estrictas para limitar el contenido de olefinas, aromáticos y benceno.

Los compromisos adquiridos particularmente por Pemex Refinación para mejorar las gasolinas en la ZMCM se establecen claramente en el ProAire y se fundamentan principalmente en las tendencias internacionales sobre nuevas especificaciones para los países de vanguardia, así como en los estudios que se llevan cabo en el Laboratorio de Investigación en Emisiones y Ensayo de Motores del Instituto Mexicano del Petróleo para evaluar en forma integral el impacto de las nuevas propiedades de los combustibles en los automotores y sus emisiones, considerando las características particulares de la ZMCM y su parque vehicular automotor. En este sentido, desde 1995 se ha desarrollado un programa intenso de estudios para lanzar al mercado gasolinas reformuladas acordes con los requerimientos de los vehículos que circulan en la zona metropolitana y los avances tecnológicos de la industria automotriz.

Para dar respuesta a los compromisos antes señalados, el primero de octubre de 1996 salió a la venta una nueva gasolina reformulada denominada Pemex Magna, con especificaciones más estrictas que la anterior Magna Sin. Esta gasolina es actualmente la de mayor consumo en el país y la ZMCM y sustituyó en su totalidad desde 1998 a la gasolina Nova con plomo.

Con el mismo propósito de satisfacer los requerimientos y características de las gasolinas que demandan los automóviles de tecnología reciente, se incorporó al mercado de la ZMCM el 6 de diciembre de 1996 la gasolina sin plomo denominada Pemex Premium, con mayor índice de octano y características de composición similares a la Pemex Magna (IMP 2000)<sup>26</sup>.

A través de estudios en los laboratorios del IMP con flotillas de vehículos, se evaluaron exhaustivamente las gasolinas Pemex Magna y Pemex Premium, previa salida al mercado, y una vez que se encontraban disponibles en las Estaciones de Servicio, para determinar el comportamiento en los automotores y estimar el efecto al medio ambiente, evaluando además los beneficios al usuario que pudiesen obtenerse por su empleo (IMP 2000)<sup>26</sup>.

Durante las diversas fases del estudio (IMP 2000)<sup>26</sup> se evaluaron un total de 39 vehículos automotores de diferentes características tecnológicas, representativos de los vehículos con mayores ventas en México. En todos los casos se realizaron pruebas comparativas con las diferentes gasolinas, para determinar el comportamiento en las emisiones de los vehículos, utilizando el procedimiento nacional e internacional de muestreo y análisis denominado FTP-75, por sus siglas en inglés, que establece la EPA y las autoridades ambientales de nuestro país para este tipo de evaluaciones. Adicionalmente, los vehículos recorrieron entre 8,000 y 16,000 km., para determinar su desempeño, potencia, rendimiento de combustible y limpieza en los sistemas de admisión.

Por otra parte, debido a que la gasolina Pemex Magna es utilizada igualmente por los vehículos de modelos 1990 y anteriores, se llevaron a cabo pruebas en unidades de esas características, con la finalidad de determinar el impacto que tendría el uso de gasolinas sin plomo de alto índice de octano en vehículos desprovistos del sistema de control de emisiones. En este tipo de pruebas de laboratorio se determinan los tres gases contaminantes sujetos a regulación por su alta toxicidad, como son el monóxido de carbono, los hidrocarburos totales, productos de una combustión deficiente y los óxidos de nitrógeno formados, realizando para ello una prueba dinámica sobre un dinamómetro de piso durante 30 minutos y 18 km de recorrido simulado aproximadamente, donde auxiliados con un sistema de muestreo continuo de la totalidad de los gases emitidos por el escape, es posible cuantificar la masa de los contaminantes antes descritos en gramos por kilómetro recorrido.

Entre los resultados de estos estudios, es notorio que ambas gasolinas reformuladas presentan comportamientos similares en las emisiones de escape, debido a que sus características en contenidos de olefinas, aromáticos y oxigenados, así como volatilidad, son prácticamente iguales y la diferencia entre ellas está definida principalmente por el índice de octano. Sin embargo, los resultados también demuestran que la mayor aportación para reducir las emisiones se encuentra por el lado del mejoramiento en la tecnología de los vehículos, así como el adecuado mantenimiento de los mismos.

Debido a que el ozono es uno de los principales contaminantes en la Ciudad de México y su zona urbana y éste es producido principalmente por las reacciones de algunos hidrocarburos con los óxidos de nitrógeno en la atmósfera, en el Laboratorio de Emisiones también se estudia la repercusión que tiene el cambio en la composición de la gasolina sobre el tipo de hidrocarburos que se emiten por el escape. Para tal fin, en las muestras de gases de la prueba FTP-75, se identifican y cuantifican cada uno de los hidrocarburos presentes, mediante cromatografía de gases. Posteriormente, mediante el uso de índices de reactividad es posible estimar la contribución que tendrían las emisiones del sistema vehículo-combustible en la formación de ozono y su reactividad específica.

Este último parámetro es el que considera la EPA para establecer las mejoras en las gasolinas reformuladas. Por ello se define que para un combustible convencional (No reformulado) y un vehículo con tecnología de control de emisiones básico, la reactividad específica de referencia es 3.42 gramos de ozono formados por gramo de hidrocarburos emitidos, descontando el metano que es prácticamente inerte. En la medida que las gasolinas se reformulan, se busca producir menos hidrocarburos precursores de ozono y valores inferiores al antes citado (Leal 1992)<sup>29</sup>.

Adicionalmente a los análisis de las especies de hidrocarburos, también se lleva a cabo la cuantificación de compuestos clasificados como altamente tóxicos para el ser humano, que a excepción del benceno, no

se encuentran presentes en la gasolina, pero se forman por la presencia de precursores en ésta. En las pruebas realizadas se encontró que al utilizar la gasolina Pemex Premium, la cantidad de compuestos tóxicos totales emitidos por el escape (benceno, 1,3 butadieno, formaldehído y acetaldehído de acuerdo con EPA) resulta ser 18% menor que con la gasolina Pemex Magna, observándose las mayores reducciones en el benceno. En el caso de los vehículos anteriores a 1990 que utilizaron Pemex Magna en sustitución de Nova, los tóxicos totales se redujeron en 9 % al utilizar Pemex Magna, donde el cambio significativo se observó igualmente en el benceno (Leal 1992)<sup>29</sup>.

## 3 EL BENCENO

### 3.1 Introducción

Los compuestos aromáticos comprendían antiguamente un pequeño grupo de sustancias que poseían sabor y olor aromático y se obtenían a la vez de los ácidos esenciales, de los bálsamos, resinas, etc. Esta designación tuvo el mismo origen que el de tantas otras clasificaciones empíricas basadas en las características físicas, químicas y organolépticas, con la diferencia de que un estudio profundo de estos compuestos llevó a la conclusión de que el parecido entre ellos era más grande de lo que parecía a simple vista. Pronto se descubrió que muchas sustancias inodoras y otras de olor desagradable debían clasificarse entre los compuestos aromáticos por ser derivados del benceno y, por consiguiente, las propiedades de este hidrocarburo vinieron a ser atributo general de los compuestos aromáticos (Alcantara 1990)<sup>2</sup>.

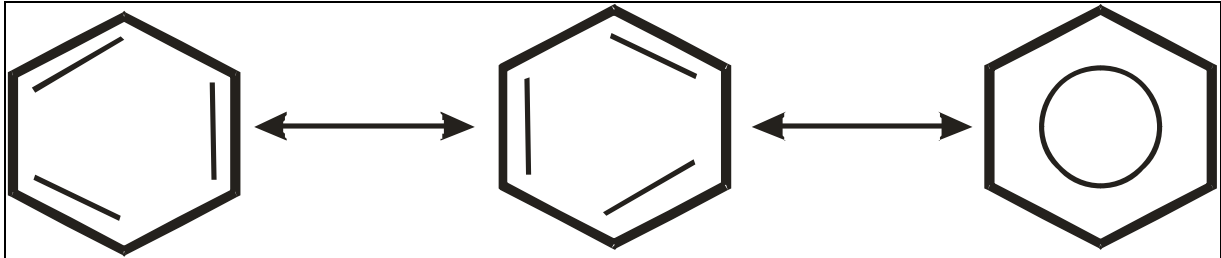
El benceno fue descubierto en 1825 por el científico inglés Michael Faraday (Alcantara 1990)<sup>2</sup>, como uno de los componentes de un aceite que recogió de las tuberías del gas del alumbrado. Su composición es  $C_6H_6$ , tiene un punto de fusión de 5 °C y un punto de ebullición de 80 °C.

Hoffmann,<sup>2</sup> en 1845, lo encontró en el alquitrán de hulla, que es todavía la fuente principal del benceno y sus derivados, una tonelada de carbón transformada en coque en un horno produce unos 7.6 litros de benceno. En la actualidad se obtienen del petróleo grandes cantidades de benceno, ya sea extrayéndolo directamente de ciertos tipos de petróleo en crudo o por tratamiento químico del mismo.

La estructura de la molécula de benceno es de gran importancia en la química orgánica. El primero en formular la teoría de la estructura de anillo de resonancia fue el químico alemán August Kekulé Von Stradonitz, en 1865<sup>2</sup> los electrones de los dobles enlaces no se hallan entre pares específicos de átomos de carbono, en realidad se encuentran deslocalizados alrededor de todos los átomos del ciclo. En la figura 3.1 se presenta la en forma esquemática la estructura molecular del benceno.

El análisis y la determinación del peso molecular demuestran que la fórmula molecular del benceno es  $C_6H_6$ , siendo el número de átomos de hidrógeno del benceno mucho menor que el hidrocarburo parafínico correspondiente, el hexano,  $C_6H_{14}$ , es de esperar que aquél dé reacciones de insaturación. Esto ocurre, por ejemplo, en las reacciones que siguen:

- a) El benceno adiciona halógenos hasta un máximo de seis átomos.  
 b) El benceno puede hidrogenarse catalíticamente a ciclohexano, pudiendo adicionar seis átomos de hidrógeno como máximo



**Figura 3.1.-** Concepción actual del benceno

### 3.2 Propiedades físicas y fisicoquímicas

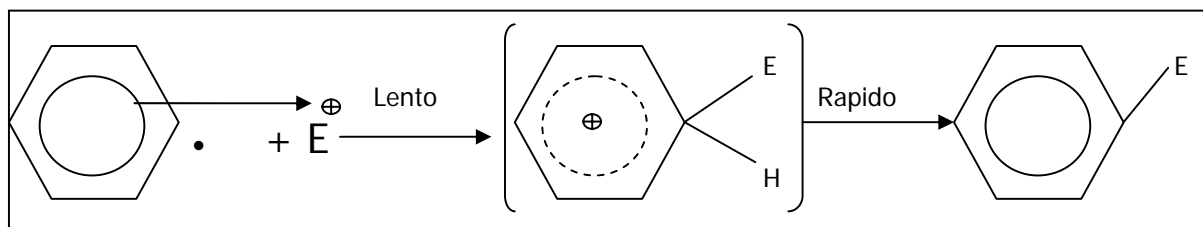
El benceno es un líquido incoloro, de olor característico, poco soluble en el agua, pero miscible en etanol, cloroformo, éter, bisulfuro de carbono, tetracloruro de carbono, ácido acético glacial, acetona y aceites. Disuelve el yodo, el fósforo, el azufre, el alcanfor, las sustancias grasas, el caucho, etc.

Peso molecular (g/gmol)	78
Punto de ebullición:	80.1°C
Punto de fusión:	5.5°C
Densidad (g/ml):	0.8789(20°C) 0.8736(25°C).
Índice de refracción (25 °C):	1.49792
Punto de inflamación en copa cerrada	-11 °C
Niveles de explosividad (% en volumen en el aire):	1.3- 7.9 %
Gravedad específica del vapor (aire = 1):	2.7
Presión de vapor (a 26 °C):	100 mm de Hg
Temperatura de autoignición:	555 °C
Tensión superficial (25 °C):	28.2 mN/m <sup>2</sup>
Viscosidad absoluta (25 °C):	0.601 cP
Temperatura crítica:	289.01 °C
Presión crítica:	48.35 atm
Volumen crítico:	259 ml/gmol
Calor de formación:	83.93kJ/gmol(gas) 49.08kJ/mol (líquido)

Calor de combustión:	3.2676 X 10 <sup>3</sup> kJ/gmol
Calor de fusión:	9.866 kJ/gmol
Calor de vaporización (25 °C):	33.899 kJ/gmol
Solubilidad: en agua	1.79g/L de agua (a 25 °C)

### 3.3 Propiedades Químicas

El tipo de reacción más común de los compuestos aromáticos es la sustitución electrofílica aromática; en la cual, un electrófilo (E<sup>+</sup>) reacciona con un sustrato aromático: primero, en una etapa establecida como lenta y en consecuencia determinante del proceso se forma un intermediario conocido como Wheland, ion arenium o complejo  $\sigma$  y en una segunda etapa (rápida) se elimina, comúnmente un átomo de hidrógeno, generándose el producto final correspondiente, como se aprecia en la Figura 3.2.



**Figura 3.2** Mecanismo de la sustitución electrofílica aromática

Al ser el benceno un sistema donador de electrones (una base de Lewis), las reacciones que comúnmente lleva a cabo las realiza con aceptores de electrones (ácidos de Lewis o electrófilos), pudiéndose introducir en el anillo aromático diferentes sustituyentes por esta vía. En la Tabla 3.1, se muestra de manera resumida el nombre del proceso, el electrófilo que interviene y las condiciones generales bajo las cuales se llevan a cabo diferentes transformaciones de este tipo de reacción.

**Tabla 3.1** Diferentes procesos de sustitución electrofílica aromática

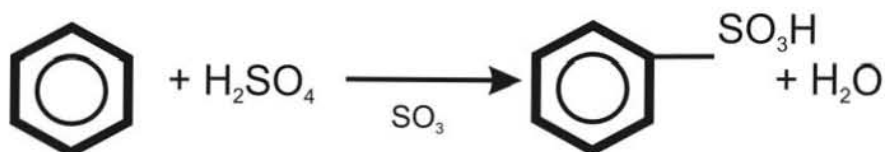
Proceso	E <sup>+</sup>	Condiciones
1) Nitración	<sup>+</sup> NO <sub>2</sub> (ion nitrenio)	Acuosas
2) Sulfonación	SO <sub>3</sub> (anhídrido sulfúrico)	Anhidras
3) Reacciones de Friedel & Crafts		
a) Alquilación	R <sup>+</sup>	Anhidras y la presencia de catalizadores: AlCl <sub>3</sub> , FeBr <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub> .
b) Halogenación	Br <sup>+</sup> , Cl <sup>+</sup> , I <sup>+</sup> , F <sup>+</sup>	

### Sulfonación

Cuando los hidrocarburos bencénicos se tratan con ácido sulfúrico fumante (ácido sulfúrico que contiene anhídrido sulfúrico)  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{SO}_3$ .

Se forman compuestos característicos que reciben el nombre de ácidos sulfónicos. En realidad, se cree que el agente activo es el  $\text{SO}_3$ .

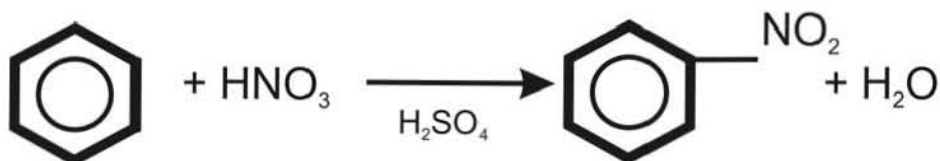
### Ácido bencen sulfónico



### Nitración

El ácido nítrico fumante o también una mezcla de ácidos nítrico y sulfúricos (mezcla sulfonítrica una parte de ácido nítrico y tres de sulfúrico), produce derivados nitrados, por sustitución. El ácido sulfúrico absorbe el agua producida en la nitración y así se evita la reacción inversa:

### Nitrobenceno



### Alquilación

El benceno reacciona con los haluros de alquilo, en presencia de cloruro de aluminio anhidro como catalizador, formando homólogos.

### Tolueno



### Halogenación

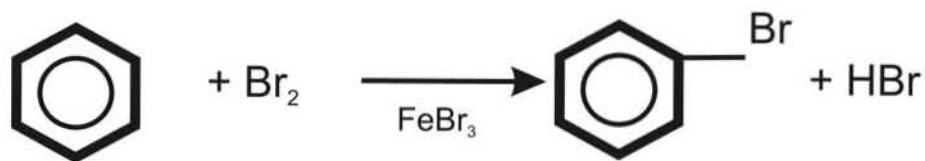
El cloro y el bromo dan derivados de sustitución que reciben el nombre de haluros de arilo.

### Clorobenceno





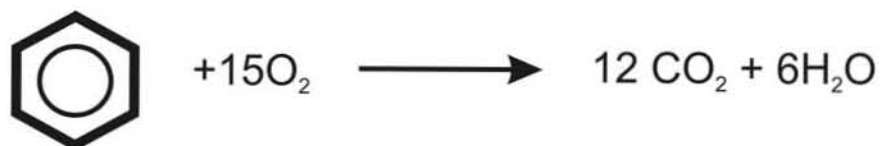
Bromobenceno



La halogenación está favorecida por la temperatura baja y algún catalizador, como el hierro o tricloruro de aluminio, que polariza al halógeno para que se produzca enérgicamente la reacción. Los catalizadores suelen ser sustancias que presentan deficiencia de electrones.

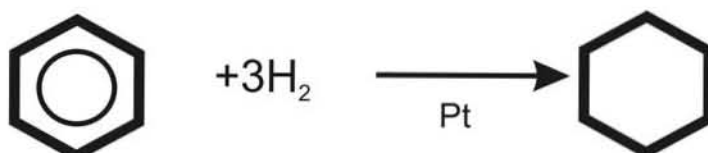
Combustión.

El benceno es inflamable y arde con llama fuliginosa, propiedad característica de la mayoría de los compuestos aromáticos y que se debe a su alto contenido en carbono.



Hidrogenación.

El núcleo bencénico, por catálisis, fija seis átomos de hidrógeno, formando el ciclohexano, manteniendo así la estructura de la cadena cerrada.



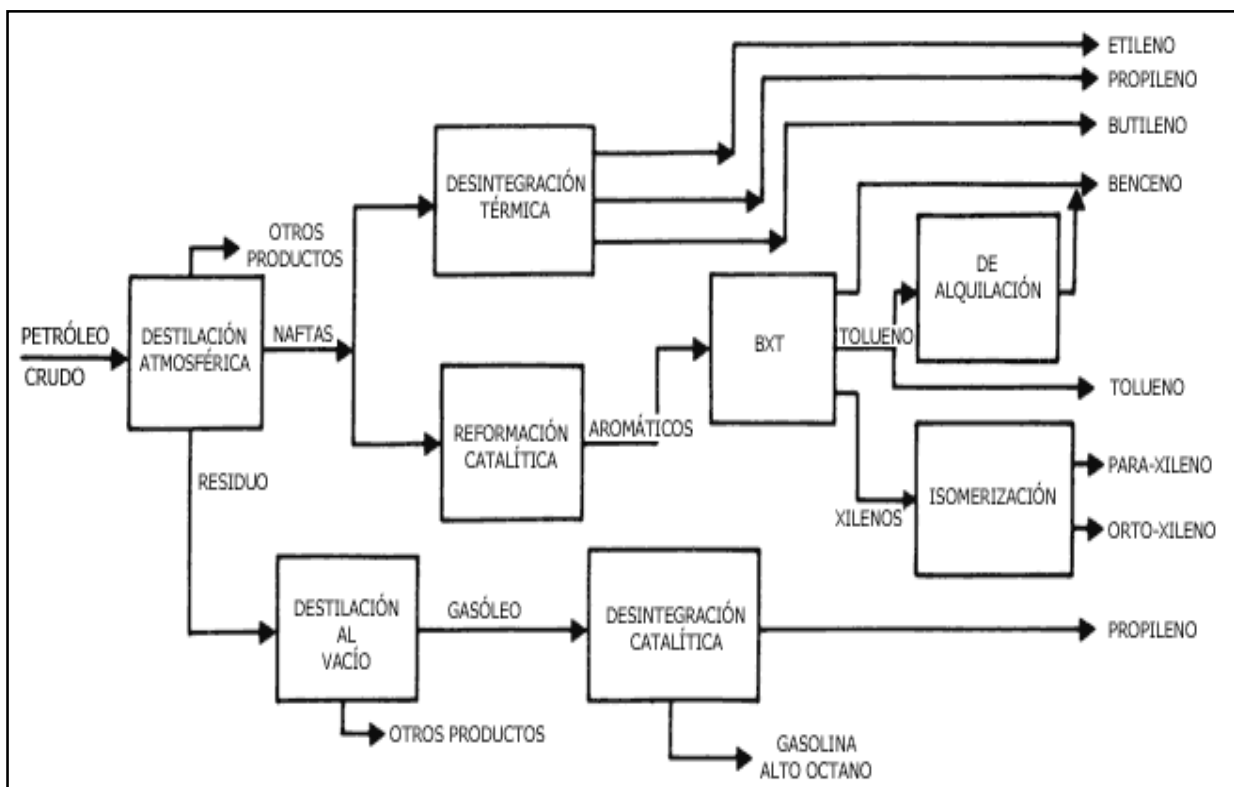
### 3.4 Producción de benceno

Hasta la Segunda Guerra Mundial, la mayor parte del benceno fue fabricado como un subproducto en la producción de coque en la industria de acero (Raymond 1990)<sup>37</sup>. Sin embargo, a principio de 1950, la demanda del benceno se incrementó, especialmente con la creciente industria del plástico, lo que originó la necesidad de iniciar la producción de benceno de cómo un producto derivado del petróleo. Hoy, la mayor producción de benceno proviene de la industria petroquímica, y solamente una fracción pequeña es producida como subproducto del proceso de carbón.

La mayor parte de los compuestos aromáticos del petróleo o de los producidos en la refinación se utilizan para aumentar el octanaje de las gasolinas. Sin embargo, en algunas refinерías se establecen procesos para la producción amplia de estos compuestos. Por ejemplo, en México existe un tren de aromáticos en La Cangrejera, Veracruz —por ahora el complejo petroquímico más importante de América Latina— y en la refinерía Lázaro Cárdenas de Minatitlán.

La Cangrejera consta de veinte plantas, siete de las cuales se dedican a la producción de aromáticos. Para empezar, una planta reformadora BTX (por benceno-tolueno-xileno) transforma una carga que sólo contiene de 5 a 10% de aromáticos en un efluente con 42 a 47%, una notable muestra de transformación química catalítica. En segundo término vienen las plantas fraccionadora y extractora de aromáticos. El principio de éstas es la destilación, en la Figura 3.2 se presenta en forma esquemática el proceso de producción del benceno.

Por lo general, como las reacciones de aromatización se llevan a cabo a una temperatura moderada a la que no se presentan tantas rupturas de enlaces, la proporción de benceno que se obtiene muchas veces no es mayor de 10%. Como la demanda del mercado es mayor, en La Cangrejera existe una última planta, llamada hidrodealquiladora de tolueno, en la que parte del tolueno se transforma en benceno.



**Figura 3.2.** Síntesis de la cadena productiva mediante la cual el petróleo crudo se transforma en benceno y otros productos.

### **3.5 Características del benceno como contaminante**

El benceno es un hidrocarburo aromático que por sus características genotóxicas se considera un contaminante atmosférico de particular interés por su presencia en las emisiones de tipo vehicular, al formar parte de las gasolinas y al originarse en el proceso de combustión de las mismas. Por otra parte, está presente en algunas actividades laborales al constituir la materia prima para la obtención de otros productos como: etilbenceno, estireno, cumeno, resinas, ácido adípico, nylon, etc.; y por estar contenido en el petróleo crudo. En el ámbito laboral es donde se ha constatado sus características carcinogénicas, demostrándose su potencial leucémico. La gravedad de los efectos del benceno ha motivado la preocupación de las autoridades responsables de la calidad del aire, estando incluido en la relación de los contaminantes principales del medio ambiente atmosférico

#### **3.5.1 Comportamiento en el medio ambiente**

En el agua:

Es muy volátil: el tiempo medio de evaporación oscila entre 2.7 y 5 h (4.8 h en un cuerpo de agua de 1 metro de profundidad, a 25°C).

En el aire:

El benceno es un moderado generador de smog (baja reactividad). Reacciona rápidamente con radicales oxhidrilos, de cuya concentración depende su permanencia en la atmósfera, la que oscila entre unas horas y varios días. El efecto de lavado, al ser arrastrado por las precipitaciones, sólo lo elimina transitoriamente de la atmósfera, puesto que vuelve a evaporarse rápidamente de las superficies en que se deposita, ya sean éstas acuáticas o terrestres.

En el suelo:

Debido a su extrema volatilidad, los estratos superiores del suelo pierden considerables cantidades de esta sustancia, la que va a la atmósfera; en estratos más profundos del suelo, el benceno es relativamente móvil y puede infiltrarse, arrastrado por el agua, hasta las capas subterráneas; se acumula también en los lodos de clarificación.

Productos de la descomposición:

En la atmósfera se produce la descomposición principalmente por fototransformación indirecta; no hay fotólisis con longitudes de onda > 290 nm. El tiempo de vida media en la tropósfera oscila entre 7 y 22 días, con un valor medio de 13 días. En la tropósfera inferior (hasta aproximadamente 1-2 km de altura)

los valores promedio para el tiempo de vida media del benceno oscilan entre 3 y 10 días (Fromme 1995)<sup>25</sup>

En los cuerpos de agua superficiales y subterráneos y en el suelo, la descomposición se produce fundamentalmente por biodegradación (la aeróbica es más rápida que la anaeróbica). Los metabolitos microbianos son: 1,2-dihidroxi-1,2-dihidro benceno, pirocatecol. Los metabolitos en los mamíferos son: fenoles y compuestos relacionados (p.ej.: hidroquinona, pirocatecol). 33% de la descomposición aeróbica se cumple en las instalaciones de clarificación, en 12 horas; la descomposición aeróbica es escasa en comparación con su volatilización. La descomposición térmica se produce a 600 °C en fase vapor; es poco probable que se produzca hidrólisis en condiciones normales.

### 3.5.2 Niveles de toxicidad del benceno

LD <sub>50</sub> (oral en ratas):	3.8 ml /kg; 3306 mg/kg
LC <sub>50</sub> (inhulado en ratas):	10000 ppm/7 h
LCLo (inhulado en humanos):	2000 ppm/5 min
LDLo (oral en humanos):	50 mg/kg
Niveles de irritación a piel de conejos:	15 mg/24 h, leve; 500 mg/24 h, moderada.
Niveles de irritación a ojos de conejos:	88 mg, moderada; 2 mg/24 h, severa.

### 3.5.3 Niveles permisibles de benceno en la atmósfera

#### 3.5.3.1 Ambiente laboral

Al conocerse desde hace muchos años la toxicidad del benceno, se requirió establecer niveles máximos permisibles de este contaminante en ambiente laboral.

En México se encuentra vigente la Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1994, relativa a las condiciones de seguridad donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. Para el caso del benceno se tiene una concentración máxima en el aire, ponderada en el tiempo (8 horas) de 20 mg/m<sup>3</sup> (10 ppm), y una concentración máxima en el aire para exposición de corto tiempo de 25 ppm.

De acuerdo con la Secretaria de Salud Norma Oficial Mexicana NOM-047-SSA1-1993 los límites biológicos de exposición industrial para el Benceno, no deben de exceder el valor de:

Fenoles totales en orina al final del turno de trabajo de 50 mg de fenoles /g creatinina

Así mismo, la Secretaría de Salud, clasifica al benceno como: Cancerígeno potencial para el ser humano.

En los Estados Unidos el valor límite permisible (TLV-TWA: Threshold Limit Value-Time Weighted Average) para un período de 8 horas era de: 100 ppm de benceno en 1946; 50 ppm en 1947; 35 ppm en 1948; 10 ppm en 1977; 1 ppm en 1988; y en 1990 se recomendó disminuir este nivel a 0.1 ppm.

En 1987, la OSHA instituyó un PEL (límite de exposición permisible) para el benceno de 1 ppm, para una jornada laboral de 8-horas y un límite de la exposición a corto plazo de 5 ppm. Estos límites legales están basados en estudios que demuestran la evidencia de riesgo a la salud de los trabajadores expuestos al benceno.

El riesgo de la exposición a 1 ppm para una vida laboral se ha estimado como 5 muertes por leucemia por cada 1,000 empleados expuestos. (Esta estimación no asume ningún umbral para los efectos carcinogénicos de benceno.)

La OSHA ha modificado estos valores y actualmente ha establecido un PEL de 0.5 ppm.

El Instituto Nacional para la Seguridad Profesional y Salud (NIOSH) recomienda como PEL un valor de 0.1 ppm para una jornada de 10-hora. En 1997, la Conferencia Americana de Higienistas Industriales sugirió realizar un cambio en la clasificación del benceno a compuesto cancerígeno A1 (es decir, compuesto carcinógeno humano confirmado).

En el Reino Unido se tiene como límite de exposición a corto plazo un valor de concentración de benceno de 30 mg/ m<sup>3</sup> (10 ppm).

En Suecia se tiene los siguientes valores: Períodos cortos: 30 mg/m<sup>3</sup> (10 ppm). Períodos largos: 16 mg/m<sup>3</sup> (5 ppm). Y se clasifica como carcinógeno humano.

### **3.5.3.2 Aire Ambiente**

El benceno, por ser genotóxico y cancerígeno, es considerado como un contaminante atmosférico muy peligroso. Por esta razón resulta imposible hablar de una concentración a la cual la población pudiera estar expuesta sin que esto representara riesgo alguno para su salud. Sin embargo algunos países han adoptado, para fines prácticos, un estándar de calidad del aire.

La EPA restringe las emisiones del benceno de las fuentes del punto específicas. Bajo sección 112 de la Ley de Aire Limpio, el benceno es señalado como un contaminante atmosférico de alto riesgo. La EPA no ha promulgado un nivel específico normal para el benceno en aire ambiente, pero ha impuesto una serie de restricciones diseñadas para bajar emisiones industriales de benceno hasta un 90% durante los próximos 20 años. Además, se han propuesto las regulaciones que controlarían las emisiones del benceno en su uso como solvente industrial. En las estaciones de gasolina, las reglas propuestas requerirían nuevo equipo que reduce las emisiones de la gasolina mientras los tanques de almacenamiento están llenos. En las Enmiendas de la Ley de Aire Limpio de 1990, se señala que con el uso de los oxigenadores químicos que se adicionan a los combustibles, se espera una reducción en las emisiones de hidrocarburos sin reaccionar. Con las acciones anteriormente señaladas, la EPA predice que con el programa de combustibles limpios se tendrá una disminución de benceno en el ambiente de alrededor del 33%.

De acuerdo con la enmienda a la Ley de Aire Limpio (CLEAN AIR ACT) de 1990 realizada en 1992 el riesgo a la salud que representa, la exposición a una concentración de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de benceno es de  $8.3 \times 10^{-6}$  casos en un periodo de 70 años (EPA)

En el Reino Unido y Japón se cuenta con un estándar de calidad del aire de 1 ppb como promedio anual.

#### **3.5.4 Efectos del benceno en la salud**

Efectos fisiológicos del benceno.- Primariamente afecta el sistema nervioso central (SNC) y el sistema hemático. Puede afectar al sistema inmune. La muerte debido a la exposición aguda del benceno se ha atribuido a asfixia, paro respiratorio, depresión del sistema nervioso central, o a la arritmia cardiaca. Los resultados patológicos en casos fatales han incluido la inflamación del tracto respiratorio, hemorragias del pulmón, la congestión del riñón, y el edema cerebral.

Efectos del sistema nervioso central.- A muy altas concentraciones, el benceno causa rápidamente depresión del SNC, que puede conducir a la muerte.

Los efectos hematológicos.- Las células de la sangre tales como los glóbulos rojos (eritrocitos), glóbulos blancos (leucocitos) y plaquetas (trombocitos) pueden ser adversamente afectadas por el benceno.

Anemia.

La anemia aplásica inducida por benceno es causada por la exposición crónica a niveles relativamente altos.

Leucemia.

El período para que se desarrolle la leucemia inducida por benceno es de 5 a 15 años después de la primera exposición y, en muchos casos, es precedida por anemia aplásica.

El departamento de salud y servicios humanos de Estados Unidos, la agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos (EPA), y la agencia internacional para la investigación sobre cáncer clasifican el benceno como agente carcinógeno humano.

La EPA estima que una exposición de benceno en el curso de la vida de  $4 \times 10^{-3}$  ppm en aire dará lugar a un 1 caso más de leucemia por cada 10.000 personas expuestas.

Varios informes relacionan la exposición del benceno a una variedad de tumores linfáticos incluyendo linfoma del no-Hodgkin y mieloma múltiple. Aunque esto es posible, no hay prueba científica de una relación causal.

La asociación entre la exposición al benceno y el desarrollo de tumores no hematológicos sigue siendo poco concluyente.

La información sobre la toxicidad reproductiva del benceno en seres humanos es pobre.

### **3.6 Fuentes de emisión y exposición de benceno**

El benceno se presenta en la naturaleza en cantidades exiguas y en bajas concentraciones. Es parte constitutiva del petróleo crudo (max. 0.4 g/l). El benceno se fabrica y procesa a nivel industrial como benceno puro. Normalmente se obtiene a partir del petróleo crudo. La gasolina común contiene entre 12 y 16 g/L de benceno y la gasolina especial (Premiun), hasta 24 g/L de benceno.

El benceno es usado extensamente; está considerado entre los 20 productos químicos de mayor volumen de producción en el mundo. Los derivados del benceno se emplean en la fabricación de plásticos, resinas, nylon y fibras sintéticas. También se usa benceno para hacer ciertos tipos de gomas, lubricantes, tinturas, detergentes, medicamentos y pesticidas entre otros.

Además de los vehículos a motor, también son fuentes de emisiones de esta sustancia las coquerías, los hogares de calderas e incineradores, las refinerías y la industria química así como los depósitos de combustible y las estaciones de servicio (gasolineras).

Las estimaciones de la producción mundial total varían. Se considera que asciende a más de 15 millones de toneladas de benceno puro y a unas 10 millones de toneladas en combustibles. A continuación se presentan algunos datos sobre la producción de benceno:

**Tabla 3.1.** - Producción de benceno (en millones de t/a)

China (2002)	2.130
USA (1994)	7.259
España (2000)	0.316
México (2004)	0.136

En México se cuenta con una capacidad instalada para la producción de benceno, en la zona de Coatzacoalcos, Ver., de 275,000 t/a (Leal 1992)<sup>29</sup>.

La emisiones de benceno a la atmósfera a nivel mundial se considera del orden de un 500 000 t/año, de las cuales:

Estados Unidos contribuye con alrededor de 110 000 - 224 000 t/año (de las cuales 40 000 - 80 000 t/a provienen de los combustibles).

La Comunidad Europea con 55 000-70 000 t/año (de las cuales 50 000 - 60 000 t/a provienen de los combustibles).

### **3.6.1 El almacenamiento y distribución de las gasolinas**

El almacenamiento y distribución de las gasolinas en la Ciudad de México constituye una de las principales fuentes de emisión de benceno

En 1994 había un parque vehicular de 3, 261,000 automóviles en el Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y se tenía una venta aproximada de 17. 7 millones de litros de gasolina por día.

En el año 1996 las emisiones de benceno debido al almacenamiento y distribución de combustible fueron 20,127 toneladas de un total de 1, 025,760 toneladas hidrocarburos emitidos en la ZMCM (CM 1996)<sup>11</sup>



La instalación de sistemas de recuperación de vapores en el área metropolitana de la Ciudad de México comenzó en 1992, con instalación de techos flotantes en los tanques de almacenamiento de combustible de las estaciones de servicio.

De 1994 a 1995 los primeros sistemas de recuperación de vapores se fueron implementados en algunas gasolineras. Durante 1996 a 1997 se inició la implementación de sistemas de recuperación más eficientes. Ya para octubre de 2000, el 90 por ciento de las gasolineras contaba con sistemas de recuperación de vapores de mayor eficiencia

Los niveles de benceno en la Ciudad de México han disminuido gradualmente durante los últimos años debido a varios programas implementados como son:

- a) Elaboración y comercialización de gasolinas con baja concentraciones de benceno, los que se encuentran por debajo de los niveles máximos, tanto de las normas nacionales, como intencionales (Tabla 3.2).
- b) Instalación de convertidores catalíticos en vehículos automotores.
- c) Renovación del parque vehicular.
- d) Instalación de sistemas recuperación en gasolineras consistentes en:
  - Sistemas de control Fase I (instalación de sistemas de recuperación de vapores en los tanques de almacenamiento de combustible de las estaciones de servicio).
  - Sistemas de control Fase II (adicionalmente a los sistemas de control Fase 1, incluyen sistemas de recuperación de vapores en las bombas de despacho de combustible).

**Tabla 3.2.-** Características de las gasolinas que se venden en México (IMP 2000)<sup>26</sup>

	AAMA <sup>a</sup>	NOM-086-ECOL-1994 <sup>b</sup>	PEMEX PREMIUM	PEMEX MAGNA
Oxígeno (%peso)	2.7 max	2.0 max	0.89	1.27
Octano	87	87	92.2	88.6
Presión de vapor (psi)	6.5 – 7.8	6.5 – 8.5	7.05	6.7
Contenido de azufre (% peso)	—	0.10 max	0.05	0.05
Benceno (%vol)	1.0 max.	2.0 max.	0.50	0.86
Aromáticos (%vol)	25	12.5 min	24.85	24.6
Olefinas (%vol)	9.2 – 11.9	—	4.86	6.2

a American Automobile Manufacturers Association

b Norma Oficial Mexicana

Sin embargo el número de estudios sobre la concentración de benceno y los efectos sobre su exposición son limitados, el sistema de monitoreo ambiental del Departamento del Distrito Federal (DDF) no determina hidrocarburos, y sólo se encuentran dos referentes disponibles de mediciones hechos con los niveles máximos reportados en aire ambiente en 1998 y en 1999, con valores que están en un rango de 20 a 30 microgramos por metro cúbico y 10 a 20 microgramos por metro cúbico respectivamente <sup>16</sup>

Una de las mayores inquietudes relacionada con la exposición a vapores de gasolina se dio al presentarse el desarrollo de cáncer en ratas y ratones. Estos animales fueron expuestos a vapores de gasolina durante dos años y tuvieron un incremento significativo en el número de tumores. Aunque diversos estudios se han realizado en animales, algunas investigaciones demuestran el efecto cancerígeno de la gasolina en humanos. Por ejemplo, se ha encontrado que la exposición a vapores de gasolina genera una mayor probabilidad de padecer cáncer renal <sup>31</sup>.

### **3.6.1.1 Sistema de Distribución de Gasolina**

Un sistema de distribución de gasolina típico puede tener cientos o miles de fuentes individuales de emisión, y es importante que todas estas fuentes sean contabilizadas en un sistema de inventario. Al tratar el sistema de distribución como un todo, en general, es más fácil garantizar que todas las fuentes posibles están incluidas.

La Figura 3.3 presenta un sistema de distribución de gasolina hipotético con un número manejable de elementos. Este sistema simplificado contiene una terminal a granel y estaciones de gasolina, las pipas transportan la gasolina entre la terminal y las estaciones de servicio.

Las estaciones de servicio o gasolineras presentan emisiones de COVs durante su operación, las cuales se localizan en dos áreas: el llenado del tanque de almacenamiento subterráneo (Etapa I), y la bomba de suministro de combustible a los vehículos (Etapa II). La primera fuente importante es el llenado de los tanques subterráneos de almacenamiento. La gasolina se transporta comúnmente a las estaciones de servicio mediante pipas o carros tanque de 30,000 litros. Las emisiones de COVs se generan cuando los vapores de gasolina en el tanque de almacenamiento se desplazan a la atmósfera por la gasolina que está siendo cargada al tanque. Como en otras pérdidas durante la carga, las emisiones durante el llenado del tanque dependen de distintas variables, que incluyen el método y velocidad de llenado, la configuración del tanque, así como la temperatura, presión de vapor y composición de la gasolina, y por supuesto el equipo de control de vapores en esta operación.

Una segunda fuente de emisiones evaporativas en las gasolineras es la respiración del tanque de almacenamiento subterráneo. Este tipo de pérdidas ocurre diariamente y son atribuibles a la evaporación de la gasolina y cambios en la presión atmosférica y temperatura. La frecuencia con la cual la gasolina se comercializa y se retira del tanque permitiendo la entrada de aire para favorecer la evaporación, tiene además un efecto aditivo sobre la cantidad de emisiones a la atmósfera.

Dentro de los COVs se tiene al benceno, por lo que se puede generalizar que las fuentes de emisión de este contaminante corresponden a las arriba mencionadas (Tabla 3.3).

**Tabla 3.3** Factores de emisión de COVs y benceno en gasolineras (IMP 2000)<sup>26</sup>.

Fuentes de emisión	Emisión de COVs mg/L	Emisión de benceno mg/L
<b>Llenado de los tanques de almacenamiento</b>		
Llenado sumergido	880	7.90
Llenado mediante rocío	1380	12.40
Llenado sumergido balanceado	40	0.40
Respiración del tanques subterráneos y vaciado	120	1.10
<b>Total</b>	<b>2,420</b>	<b>21.80</b>
<b>Operación de suministro de combustible</b>		
Pérdidas por desplazamiento sin control	1320	11.90
Pérdidas por desplazamiento con control	132	1.20
Derrame	80	0.76
<b>Total</b>	<b>1,532</b>	<b>13.86</b>

Las emisiones totales de benceno en gasolineras se describen a continuación:

Llenado del tanque subterráneo	21.8 mg/L
Operación del suministro de combustible	13.86 mg/L

### 3.6.2 Otras actividades que generan exposición y emisión de benceno

A continuación se presenta una lista de otras actividades donde se puede producir la exposición al benceno.

- Actividades de producción, envasado, transporte y utilización del benceno y los productos que lo contienen (incluyendo el tolueno y el xileno que lo contienen como impureza),

- Producción, extracción y del benceno y los productos que lo contienen.
- Empleo del benceno y lo productos que lo contienen en síntesis química orgánica.
- Empleo del benceno como solvente de resinas naturales y sintéticas:
- Fabricación y uso de barnices, esmaltes, lacas adhesivos y productos de limpieza;
- Fabricación de cuero sintético;
- Producción y uso de soluciones de caucho natural o sintético que contienen benceno;
- Toda otra operación de dilución, extracción, impregnación, aglomeración, concentración, decapado, que utilice benceno y otros compuestos que lo contienen

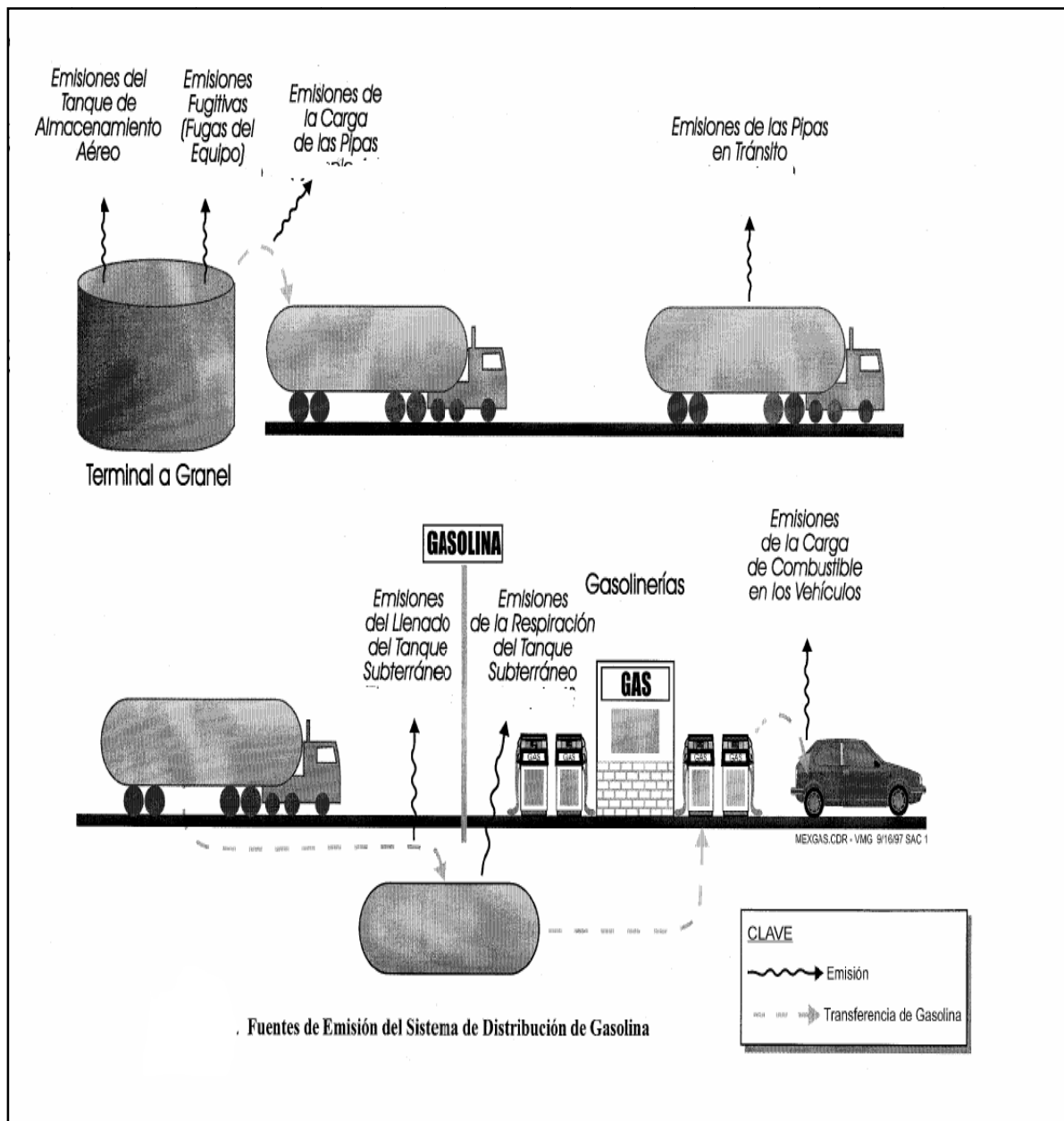


Figura 3.1 Sistema de distribución de gasolinas (IMP 2000)<sup>26</sup>

## 4 EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL

### 4.1 Introducción

La evaluación de riesgos es una disciplina relativamente nueva con raíces antiguas. Como campo del conocimiento se organizó en las últimas tres décadas y su auge se debe a que varios países han aprobado leyes para proteger, tanto a la salud humana como a la biota, de los peligros que puede acarrear la exposición a sustancias peligrosas presentes en el medio ambiente con base en la prevención y reducción de riesgos.

La evaluación de riesgos es una técnica multidisciplinaria que utiliza conceptos desarrollados en varias ciencias en las que se incluyen a la toxicología, epidemiología, ingeniería, psicología, higiene industrial, seguridad ocupacional, seguridad industrial, evaluación del impacto ambiental, etc. (Peña 2001)<sup>35</sup>

El análisis de riesgos sirve para:

- Identificar y evaluar los problemas ambientales y de salud producidos por la realización de actividades peligrosas y el manejo de sustancias tóxicas.
- Comparar tecnologías nuevas y tradicionales que se usan en la determinación de la efectividad de los diferentes controles y técnicas de mitigación diseñadas para reducir riesgos.
- Localizar las instalaciones potencialmente peligrosas.
- Seleccionar las prioridades entre las posibles alternativas de acción para establecer secuencias de ejecución de acciones correctivas y/o de elaboración de reglamentos ambientales.

#### 4.1.1 Conceptos Básicos

A continuación se definen los términos riesgo y peligro. El término "peligro" define en forma cualitativa la capacidad de una sustancia de producir efectos adversos en los organismos, y el término "riesgo" describe cuantitativamente la probabilidad de que, en una situación dada, una sustancia peligrosa produzca un daño.

Se dice que una persona se puso en "riesgo" cuando está "expuesta" a un "peligro" y la magnitud del riesgo es una función de la peligrosidad de la sustancia y de la magnitud de la exposición.

$$Riesgo = f ( Exposición, Peligro )$$

Para que exista un riesgo es necesario que se esté expuesto a una sustancia y que esta exposición represente un peligro para la salud. Se necesitan tanto el peligro como la exposición, si alguno de ellos es igual a cero entonces no hay riesgo.

La toxicidad es una medida del peligro inherente de la sustancia, en la que se dice que riesgo es la posibilidad de sufrir un daño por la exposición a un peligro. Peligro se define como la fuente del riesgo y se refiere a una sustancia o a una acción que puede causar daño.

Evaluación de riesgos se refiere a la técnica para determinar la naturaleza y magnitud del riesgo.

En el manejo y administración de los riesgos se diseña la respuesta de control, reducción o eliminación de riesgos utilizando la información producida por la evaluación y el análisis, en el contexto de los recursos técnicos, valores sociales, económicos y políticos.

La diferencia entre evaluación y manejo de riesgos no es muy clara. La controversia se centra en el grado en el cual la evaluación se puede mantener libre de los juicios y valores que típicamente corresponden a las decisiones de manejo.

Las percepciones de los riesgos son factores importantes que influyen tanto en la evaluación como en el manejo. Los riesgos se perciben en forma diferente, dependiendo de quiénes son los afectados, qué tan probable es que los daños se produzcan, las características de los daños, tal cómo qué tan catastróficos son, qué tan acostumbrada está la población a ese tipo de daño, qué tan grande es la fracción de la población afectada, cómo se afecta a los individuos en forma personal y si éstos han aceptado en forma voluntaria enfrentar los riesgos. Las percepciones de los riesgos están influenciadas por los beneficios que se obtienen de enfrentar tales riesgos (EPA 1992)<sup>20</sup>.

#### **4.1.2 Usos de la evaluación de riesgos**

Las técnicas de evaluación se pueden aplicar a varias situaciones de riesgo para la salud y el medio ambiente, incluyendo:

- La introducción o el descubrimiento de una sustancia en el ambiente.
- La exposición ocupacional a una sustancia o radiación.
- Contaminación del aire, tanto en espacios interiores como en el ambiente exterior.
- Disposición de residuos peligrosos.
- Presencia de sustancias peligrosas en la cadena alimenticia.

- Instalaciones que manejan o producen sustancias tóxicas
- El análisis de riesgos también se puede aplicar a muy diferentes situaciones, por ejemplo, el riesgo asociado al uso de un producto farmacéutico o tratamiento médico, a la construcción de obras tales como presas y puentes etc.

#### **4.1.3 Metodología y Técnicas para la evaluación de riesgos**

La evaluación de riesgos usa una serie de técnicas que se aplican cuando las respuestas no son obvias y la información es ambigua e incierta. Se utilizan las herramientas de la ciencia, la ingeniería y la estadística para analizar la información relacionada con los riesgos, para estimar y evaluar la probabilidad y magnitud del riesgo ambiental y a la salud.

La evaluación de riesgos no proporciona una fórmula para tratar la problemática de riesgos. No resuelve las complicadas negociaciones políticas y sociales que se tienen que hacer en la toma de decisiones sobre riesgos. Lo que sí mejora es la capacidad de los científicos y tomadores de decisiones en la identificación, evaluación, control y reducción de riesgos asociados con actividades del hombre. El proceso de evaluación de riesgos consta de cuatro fases interrelacionadas, cada una con ciertos métodos y técnicas.

##### **4.1.3.1 Identificación del Peligro**

La identificación del peligro es el primer paso en cualquier estudio de evaluación de riesgo. El propósito de identificar un posible peligro de una sustancia cancerígena, se basa en la identificación cualitativa de cómo la exposición a una sustancia puede producir una respuesta cancerígena en el organismo.

El primer paso es determinar si la exposición a una sustancia química puede ser potencialmente cancerígena, para lo cual se tiene que recurrir a la toxicología, la cual hace uso de estudios epidemiológicos, estudios "in vivo" en modelos animales, pruebas realizadas in vitro utilizando cultivo de células y de tejidos, así como el análisis de dichos estudios (EPA 1992)<sup>20</sup>.

##### **4.1.3.2 Evaluación de riesgos**

Esta fase tiene como meta estimar la severidad y probabilidad de que se produzca un daño para la salud humana y el ambiente por una actividad o exposición a una sustancia que bajo ciertas circunstancias, es

probable que pueda causar daño a la salud humana o al ambiente. Se usan cuatro técnicas; aunque distintas, están muy relacionadas: evaluación de la fuente/mecanismo de emisión, evaluación de la exposición, evaluación de dosis/respuesta y caracterización del riesgo.

#### **4.1.3.3 Determinación del grado de riesgo**

La fase involucra juicios y negociaciones para resolver la cuestión de qué nivel de riesgo es tolerable. Se cuenta con varias técnicas para contestar esta pregunta, incluyendo el análisis de la percepción del riesgo, el análisis de costo/beneficio y análisis de decisiones. Como en el caso de la evaluación de riesgos, estas técnicas proporcionan un mejor conocimiento del fenómeno pero también involucran incertidumbres. Sin embargo, de todas maneras la decisión de considerar un riesgo como aceptable genera controversia. Se tiene que negociar, formar consenso y usar otros medios para ampliar el involucramiento en el proceso de declarar un riesgo como aceptable.

#### **4.1.3.4 Comunicación de riesgos**

En esta fase los actores involucrados transfieren o intercambian información acerca de los niveles de riesgos para la salud o el ambiente, la importancia de esos riesgos, tipos de decisiones, acciones o políticas con que se cuenta para controlar o manejar los riesgos. El principal canal para la comunicación de riesgos son los medios de comunicación, los cuales han sido criticados por exagerar los riesgos y poner más énfasis en los dramas que en los datos científicos. Los problemas en la comunicación provienen de lo numeroso que son las fuentes de información, causando frustración tanto a los comunicadores de riesgos como a los grupos que se pretende sean los receptores de la información.

El análisis de riesgos tiene sus virtudes y sus debilidades. Entenderlas puede ayudar a los tomadores de decisiones en la búsqueda del mejor uso posible de la información y de las suposiciones y juicios de experiencia involucrados en el tratamiento de los riesgos para la salud y el ambiente.

A continuación se presenta la metodología para hacer la evaluación de riesgos y la determinación del grado de riesgo. Los métodos descritos son los utilizados por la EPA para caracterizar los riesgos de la salud humana en sitios contaminados con sustancias peligrosas.



## **4.2 Estimación de la exposición**

Los tóxicos que interesan son aquellos que tienen probabilidad de llegar a estar en contacto con poblaciones humanas, en cualquier lugar que éstas se encuentren. Se estudian los desplazamientos de los tóxicos en el medio ambiente, desde el punto en que se emiten hasta el lugar en que contactan las poblaciones. Como se mencionó anteriormente, a este desplazamiento se le conoce como ruta de exposición.

La corroboración de que en un sitio están ocurriendo exposiciones efectivas es la determinación del tóxico, o sus manifestaciones, en los organismos expuestos y la presencia del tóxico en el punto de contacto entre los medios ambientales y las poblaciones de interés. En esta sección se describe la selección de las rutas relevantes de exposición, y el cálculo de la dosis suministrada por cada ruta. Se tratarán también los aspectos relacionados con el tiempo de exposición en función de su duración y frecuencia.

### **4.2.1 Escenario de exposición**

Al área física que comprende el lugar donde se derraman o emiten los tóxicos al ambiente, donde se transportan y donde las poblaciones entran en contacto con los medios contaminados recibe el nombre de escenario de exposición.

El estudio del escenario consta de dos partes fundamentales; la descripción del sitio y la descripción de las poblaciones que es probable que sufran la exposición. Las características del sitio y de las poblaciones que interesan serán aquellas que son útiles para estimar las exposiciones.

#### **4.2.1.1 Descripción del sitio**

El sitio se describe en función de las variables que puedan tener influencia sobre la movilidad de los tóxicos y los niveles de contaminación. Las variables físicas y químicas que se evalúan son las que se utilizan para alimentar los modelos de transporte y destino y estimar las dosis suministradas.

Las características químicas importantes son: la identificación y cuantificación de las sustancias que se saben o se sospecha que son tóxicas para los humanos, que se encuentren en uno o más medios de los

que integran el sitio o que pueden salir del mismo. Los datos se obtienen experimentalmente en trabajo de campo, analizando los distintos medios con los que puede entrar en contacto la población. A esta actividad se le denomina "Muestreo o Monitoreo Ambiental."(EPA 1995)<sup>21</sup>.

La recopilación de información y el muestreo se deben de planear para que al principio del trabajo se generen datos que permitan desarrollar una comprensión general del sitio, y así poder dirigir los esfuerzos subsiguientes para obtener sólo los datos que sirvan para tener la información necesaria. En esta forma se minimizará la recolección de datos innecesarios y se maximizará la calidad de los datos obtenidos.

#### **4.2.1.2 Descripción de las poblaciones**

En la descripción de las poblaciones se consideran los asentamientos humanos dentro del sitio y sus cercanías.

Como en el caso de la descripción del sitio, las poblaciones se describen especificando aquellas características que influyen en la exposición y sus consecuencias.

Estas características son las siguientes:

- Localización relativa al sitio
- Presencia de subpoblaciones sensibles
- Patrones de actividad

Localización. En lo referente a la localización de los asentamientos humanos, la información más importante es su posición relativa con respecto a la fuente de contaminación. Hay mayores probabilidades de estar expuesto a los tóxicos si el lugar de trabajo o residencia está localizado cerca de la fuente.

Actividades humanas.-Las exposiciones están asociadas a los patrones de actividad de los individuos en el escenario y éstos, a su vez están determinados por el tipo de uso del suelo en el escenario de exposición.

Así pues, para caracterizar las exposiciones es necesario primero identificar los usos del terreno en el escenario de exposición.

Para el propósito de evaluación de riesgos los usos del suelo se clasifican en:

- Residencial,
- Comercial/industrial/agropecuario y
- Recreativo

La clasificación del uso del suelo sirve para caracterizar el patrón de actividades y su efecto sobre la intensidad, frecuencia y duración de las exposiciones. Lo que se pretende lograr es lo siguiente:

Determinar el porcentaje del tiempo que los individuos pasan dentro del escenario de exposición.

Si el sitio es comercial o industrial es razonable esperar que la población tenga un período de exposición de 8 horas diarias.

Si el sitio es residencial entonces se puede asumir una exposición de 24 horas al día.

La selección más conservadora de tipo de uso del suelo que se le puede asignar a un sitio, cuando se justifique, es el uso residencial, ya que da lugar a exposiciones más prolongadas.

#### **4.2.2 Ruta de exposición**

La trayectoria que sigue un tóxico desde la fuente de emisión hasta el contacto con las poblaciones previamente seleccionadas como potencialmente expuestas, incluyendo la vía de ingreso del tóxico a los organismos expuestos, como ya se especificó, se denomina ruta de exposición.

Una ruta está completa si durante la liberación de una sustancia desde una fuente, existe un escenario de exposición donde pueda ocurrir un contacto y una vía de exposición, con algunos individuos de alguna población.

##### **4.2.2.1 Descripción de la ruta de exposición**

A continuación se describen cada uno de los elementos que integran una ruta de exposición típica completa.

Fuente. Las características fundamentales de la fuente son su localización y los mecanismos de emisión. Se localiza y describe utilizando los datos de muestreo y la información preliminar que se tenga acerca del sitio. Un medio contaminado puede ser a su vez fuente de contaminación para otro medio. Por ejemplo; una zona del subsuelo contaminada por un derrame previo puede ser la fuente de contaminación de un acuífero subterráneo.

Transporte y destino. Después de que la sustancia ha sido liberada, e puede pasar lo siguiente:

- Acumularse en uno o más medios incluyendo el de recepción.
- Transportarse por una corriente de agua, disuelto o suspendido en algún sedimento, o por el viento, en estado gaseoso o en forma de partículas.

- Transformarse físicamente (volatilización, precipitación), químicamente (fotólisis, hidrólisis, oxidación, reducción, etc.) o biológicamente (biodegradación).

Para estudiar la distribución de una sustancia en el ambiente, es necesario conocer sus propiedades físicas y químicas, así como su estructura molecular. Las propiedades químicas y físicas las cuales son de importancia en la evaluación de una sustancia potencialmente cancerígena incluyen, su solubilidad, estabilidad, reactividad y sensibilidad al pH. Esas propiedades son de interés debido a que afectan un gran número de factores de riesgo (absorción en el organismo) y las del medio y/o medios en los que se desplaza, tales como aire, agua, suelo.

Con los modelos se puede estudiar la cinética de los tóxicos en cualquier lugar de la ruta, especialmente se pueden estimar las variaciones de la concentración del tóxico en el punto de contacto, cuando no se disponga de datos completos de muestreo ambiental en este lugar.

Punto de exposición. Cualquier contacto potencial entre los pobladores con un medio contaminado es un punto de exposición. Son más importantes los puntos de exposición dónde el nivel de concentración sea el más alto y dónde la población expuesta se clasifique como de interés especial por pertenecer a un grupo sensible.

Vías de exposición. El último elemento de la ruta de exposición es la vía de exposición, que es el mecanismo por medio del cual el tóxico entra al organismo. En el caso de exposiciones ambientales las vías de exposición son ingestión, inhalación y contacto cutáneo. La selección de cuáles vías se debe de estudiar, depende de los medios en los que se encuentre el tóxico en el punto de contacto. Si se encuentra en el agua potable, en los alimentos o en el suelo la vía de exposición será la ingestión, si se encuentra en el aire, sea como gas, vapor o partículas suspendidas, el ingreso será por la vía respiratoria (inhalación) y si se encuentra en el agua o aire ambiente que entra en contacto con la piel, el ingreso será por vía cutánea.

El equipo de protección personal tiene por propósito evitar que exista una vía de exposición aunque se presente un punto de contacto. Por ejemplo el uso de guantes, máscaras y botas son barreras que impiden el ingreso del tóxico al organismo expuesto.

#### **4.2.2.2 Identificación de las rutas significativas**

Sólo se consideran como significativas y merecen ser evaluadas las rutas completas de exposición que produzcan exposiciones efectivas, es decir que el tóxico además de llegar a hacer contacto con un individuo, encuentra la forma de ingresar al interior del organismo.

Los datos de muestreo biológico y/o biomarcadores en la población supuestamente expuesta que indiquen que hay acumulación de alguna sustancia o efectos relacionados con alguna sustancia, en miembros de la población considerada, es una información muy valiosa para identificar una ruta como significativa. Esta información indica que han existido exposiciones efectivas, puesto que se identifica la presencia del tóxico o sus manifestaciones dentro de los organismos expuestos. Los resultados positivos de los análisis de fluidos biológicos indican cuáles rutas son significativas, pero los datos negativos en individuos de una población no se pueden usar para concluir que una ruta está incompleta. No siempre se analizan todas las rutas completas.

Se pueden considerar como justificaciones válidas para eliminar el análisis de una ruta completa las siguientes:

- La exposición resultante es mucho menor por esta ruta que por otra que involucra el mismo medio y el mismo punto de contacto
- La magnitud de exposición potencial es baja o es muy poco probable que se dé la exposición y no son altos los riesgos asociados con la exposición.

En algunas ocasiones no se pueden cuantificar las exposiciones en rutas completas por falta de datos. Es posible que los datos de muestreo no sean suficientes para estimar las características de las fuentes, las concentraciones ambientales o las dosis suministradas. En estos casos se puede recurrir al uso de modelos para complementar la información disponible; pero al usar modelos en lugar de datos se incrementa la incertidumbre. Si no se tienen datos suficientes para validar el modelo, entonces puede ser que no se justifique el análisis cuantitativo de la ruta.

#### **4.2.3 Tiempo de exposición**

Para el propósito de toxicología ambiental las exposiciones se clasifican de acuerdo a la magnitud del período de exposición en:

- Exposiciones crónicas.- Son las exposiciones que duran entre 10% y el 100% del período de vida. Para el caso del ser humano se considera de entre 7 y 70 años
- Exposiciones subcrónicas.- Son exposiciones de corta duración, menores que el 10% del período vital
- Exposiciones agudas.- Son exposiciones de un día o menos y que suceden en un solo evento

El período transcurrido entre el evento de exposición y las observaciones en el organismo expuesto es una variable muy importante de considerar especialmente en el caso de exposiciones intermitentes.

#### 4.2.4 Cuantificación de la exposición

El estudio de la ruta de exposición tiene por objeto llegar a determinar la cantidad de sustancia tóxica que entre en contacto con un organismo durante el período de exposición y poder estimar las exposiciones futuras.

La cuantificación de la exposición consiste en determinar la magnitud, frecuencia y duración de las exposiciones de los individuos miembros de la población por cada una de las rutas significativas. Si la exposición ocurre durante un determinado período, la exposición total se divide entre el tiempo de ocurrencia para calcular la tasa de exposición promedio por unidad de tiempo y frecuentemente esta tasa promedio de exposición se expresa por unidad de masa corporal. A esta exposición normalizada se le denomina Dosis Suministrada ( $D_s$ ).

Hay tres categorías de variables que se usan para calcular este valor y son: una variable relacionada con la sustancia (concentración de exposición); las variables que describen la población expuesta (tasa de contacto, frecuencia y duración de la exposición, peso corporal) y una variable determinada por el proceso de evaluación (el tiempo promedio de exposición) (EPA 1995)<sup>21</sup>.

Cada una de estas variables puede tomar valores dentro de determinados intervalos y se seleccionan los valores cuya combinación resulte en una estimación de la Exposición Máxima Razonable (EMR). La estimación de un valor "razonable" no siempre está basada totalmente en información cuantitativa sino también en la experiencia y juicio profesional.

##### 4.2.4.1 Cálculo de la dosis suministrada

La Dosis Suministrada ( $D_s$ ) se calcula para todas las sustancias en el punto de contacto de todas las rutas seleccionadas como significativas.

Se expresa en términos de la cantidad de la sustancia (mg) en contacto con el cuerpo por unidad de masa corporal (kg) por unidad de tiempo (día).

Primeramente se determina la Exposición a la sustancia contaminante ( $E_s$ )

$$E_s = (C \times F \times T \times D)$$

Donde:

C = Concentración promedio durante el período de exposición.

T = Taza de contacto

F = Frecuencia de exposición

D = Duración

Posteriormente, la  $D_s$  se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$D_s = \frac{E_s}{M}$$

Donde:

M = Masa corporal

Para calcular la Dosis Absorbida ( $D_A$ ) se multiplica la  $D_s$  por el Factor de Absorción ( $F_A$ ).

Concentraciones de exposición. La concentración de exposición C se calcula con base en los datos de muestreo ambiental. El término C es el valor del límite superior de confianza, percentil 95, del promedio aritmético de las concentraciones que se presentan durante el período de exposición. Aunque este valor puede ser menor que la concentración máxima encontrada, se considera razonable ya que es poco probable que se presente la concentración máxima durante un período prolongado (EPA 1991)<sup>18</sup>.

Si no se cuenta con mediciones directas de la concentración en el punto de contacto entonces se hacen estimaciones de estos valores usando los modelos de destino y transporte.

Tasa de contacto. Representa la cantidad de medio contaminado contactado por unidad de tiempo o por evento. Si se dispone de datos estadísticos de tasas de contacto se debe de seleccionar el límite superior de confianza percentil 90 o 95 del promedio. Si no se cuenta con información estadística, entonces se debe de seleccionar, por experiencia, un valor similar al del percentil 95. Por ejemplo; la tasa de contacto para tóxicos en el agua potable es de 2 litros por día, en el caso del aire ambiente se considera un valor de volumen de aire inhalado por una persona por día de 20 metros cúbicos (Brockband et al 2003)<sup>7</sup>.

En algunas ocasiones se introducen más términos en la ecuación para calcular esta cantidad. Por ejemplo en el contacto cutáneo con sustancias químicas disueltas o suspendidas en agua, la tasa de contacto se estima combinando la información del área corporal expuesta, la permeabilidad de la piel a ese compuesto y el tiempo de exposición.

Frecuencia y duración de la exposición. Estas dos variables se utilizan para calcular el tiempo total de exposición. Los valores que pueden tomar dependen del sitio, sin embargo es muy difícil que existan estadísticas sobre un sitio en particular.

En algunas ocasiones se pueden obtener valores estadísticos nacionales. Se debe de seleccionar un valor conservador para el tiempo de exposición. Por ejemplo; en algunos casos se pueden utilizar períodos de 30 años para el caso de residentes (valor esperado del tiempo de residencia en un lugar) y en otros casos, es más conveniente usar 70 años (expectativa de vida). Las frecuencias de exposición y las duraciones de las exposiciones deben de ser consistentes con las tasas de contacto seleccionadas. Si se usa una tasa de contacto basada en observaciones de largo plazo, por ejemplo, en el caso de contar con la tasa del consumo anual de pescado, entonces se deben de calcular la tasa de contacto y la frecuencia de exposición expresada en días y en días<sup>-1</sup> (365 días = 1 año).

Masa corporal. Para niños se utiliza como valor de la masa corporal el valor estándar encontrado en las Tablas de "peso para la edad". La exposición vitalicia se estima por un promedio ponderado por tiempo de exposiciones estimadas para todos los grupos. Cuando los contactos son, más o menos, constantes durante el período de por vida, como la ingesta de agua o por aire ambiente, se puede utilizar el valor de peso promedio de la población o utilizar un valor de 70 kg, como la masa corporal.

Tiempo promedio de exposición. El tiempo promedio de exposición depende del tipo de efecto tóxico que se esté evaluando. Cuando se evalúan exposiciones de largo plazo a tóxicos no-cancerígenos las dosis se calculan promediando niveles del contaminante durante el período de exposición.

Para cancerígenos, las dosis se calculan promediando la dosis total acumulada durante el período de vida ( $D_A$ ) y se le llaman Dosis Diaria Vitalicia Promedio (DDVP). Esta diferencia se basa en la opinión científica actual de que los mecanismos de acción son diferentes. Se supone que el efecto de la exposición a un cancerígeno es básicamente el mismo si se tiene una exposición a una alta concentración por corto tiempo a que se tenga una exposición a baja concentración por un período prolongado. Esta suposición es menos justificable cuando las exposiciones son intensas y poco frecuentes, especialmente si la sustancia es un cancerígeno que ha mostrado que sus efectos dependen de la dosis y de la tasa.

Para obtener el valor de DDVP, se divide el valor de  $D_A$  entre el tiempo de expectativa de vida. Incertidumbres.

Las principales fuentes de incertidumbre en el cálculo de la  $D_A$  son:

- La variabilidad en los datos analíticos
- El uso de modelos para estimar algunas variables
- El uso de valores supuestos para algunos parámetros.

La estimación del efecto de las incertidumbres en el cálculo de las  $D_S$  es un aspecto muy importante en la evaluación de riesgos, ya que indica el nivel de confiabilidad que se tiene en la evaluación de la exposición y pueden influir significativamente en la toma de decisión.



### 4.3 Caracterización de riesgos

La caracterización de los riesgos a la salud pública en un sitio contaminado consiste en determinar si es tolerable el nivel de riesgo sin que se produzcan daños asociados a la exposición a los tóxicos presentes en el sitio.

Para hacer lo anterior se evalúan las exposiciones que sufren los pobladores, lo cual, consiste en:

- Hacer la selección de las poblaciones que se consideran en riesgo y de los tóxicos capaces de producir esos riesgos, identificando las condiciones de exposición
- Cuantificar las exposiciones que tienen lugar, estimando las dosis suministradas/absorbidas

Por otro lado se evalúa la peligrosidad de los tóxicos presentes, lo cual consiste en:

- Obtener los índices de toxicidad, que estén basados en información confiable, para todos los tóxicos que se seleccionaron en la evaluación de la exposición, y sean aplicables a las condiciones presentes en el sitio
- Calificar la calidad de la información obtenida

En la mayoría de los sitios contaminados, los individuos están expuestos a varios tóxicos al mismo tiempo y cada uno de los tóxicos puede llegar a estar en contacto con las poblaciones por más de una ruta. En esta sección se revisará cómo se integran ambos conocimientos para la evaluación de riesgos por exposición a sustancias tóxicas, tanto si se trata de exposiciones a una sola sustancia por una ruta, como de exposiciones múltiples.

Los riesgos asociados a la exposición de sustancias no-cancerígenas, se evalúan por separado de los riesgos por exposición a cancerígenos. Las metodologías para evaluar estos dos modos de toxicidad química son diferentes.

Para caracterizar efectos no-cancerígenos, las comparaciones se hacen entre las dosis de exposición estimadas para cada una de las sustancias y sus dosis de referencia y al cociente de estas dos cantidades (exposición /dosis de referencia), que se le conoce como Cociente de Peligro.

Los efectos cancerígenos o sea la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer por exposición vitalicia a una sustancia, se estima a partir de las dosis de exposición estimadas y la información sobre la probabilidad específica de desarrollar cáncer (riesgo de cáncer por unidad de dosis o factor de pendiente), para la sustancia de interés. Al producto del valor de la exposición por el factor de pendiente se le llama: Riesgo de Cáncer.

Una evaluación de riesgos no se puede considerar completa, a menos que las estimaciones numéricas del riesgo se califiquen, a la luz de las suposiciones más importantes que se hicieron para llegar a los resultados obtenidos y el análisis de las incertidumbres que se introdujeron en los resultados como producto de esas suposiciones.

#### **4.3.1 Evaluación de la exposición**

En la sección 4.2 se presentó cómo se transportan los tóxicos en el ambiente desde la fuente de emisión y cómo parte de esos tóxicos liberados llegan en estado activo a contactar a algunos miembros de las poblaciones en uno o más escenarios, y cómo se determina qué rutas son significativas. Se vio también, cómo se define y calcula la dosis que reciben los individuos expuestos. Se mencionó varias veces que los modelos matemáticos que normalmente se utilizan en estos cálculos pueden representar simplificaciones de la realidad. Frecuentemente no se tiene información propia del sitio y/o de la población que se está estudiando y, que en ese caso se tienen que asignar valores a los parámetros de los modelos, basándose en estadísticas nacionales o con base en la experiencia de los encargados de hacer la evaluación de riesgos.

La presentación de toda esta información numérica y cualitativa acompañada de los juicios de valor sobre las suposiciones hechas en el proceso de obtenerla es lo que denominamos evaluación de la exposición. Esta es la información que se necesita para hacer la evaluación de riesgos.

La información del estudio de exposición que se necesita es la siguiente:

- Concentraciones químicas de todas las sustancias tóxicas en el punto de exposición.
- Frecuencia y duración de las exposiciones.
- Clasificación de las exposiciones observadas de acuerdo al período de exposición (crónicas, subcrónicas y agudas) y la vía de exposición (oral, inhalación y cutánea).
- Características de la población expuesta.
- Características del sitio.
- Descripción de las rutas de exposición significativas.
- Dosis Suministradas y/o Absorbidas de cada sustancia por cada ruta significativa, por cada vía y por cada período de exposición.
- Relación de las rutas completas que se clasificaron como no significativas y porqué.
- Posible efecto de las exposiciones que no se están evaluando.

- Lista de las rutas de exposición que pueden contribuir a la exposición de los mismos individuos en forma simultánea.
- Valores utilizados para los parámetros de exposición y fuentes de información
- Identificación y caracterización de las incertidumbres

#### **4.3.1.1 Calificación de la información**

En la sección 4.2 se trató cómo se estiman los valores numéricos de la Dosis Suministrada ( $D_s$ ), en esta sección se presenta cómo se evalúa dicha información. Las  $D_s$  que se calculen son tan válidas como la calidad de los datos usados, la validez de las suposiciones que se hicieron y lo apropiado de los modelos que se usaron. La desviación de la idealidad de cualquiera de estos factores introduce incertidumbres en los resultados. Es necesario estimar el impacto de estas incertidumbres.

La evaluación de la exposición involucra la toma de varias decisiones que influyen substancialmente en la calidad de los resultados. Los aspectos más importantes son:

- Definición del escenario físico. Las decisiones que se toman en este paso están basadas en la información que se tenga sobre el área y en la experiencia del evaluador de riesgos. En primer lugar se tiene que asignar la categoría de uso actual y potencial del suelo, con base en la información recabada por observación directa del sitio y en los servicios de información gubernamental sobre planes de desarrollo, reglamentación del uso del suelo y zonificación. Las dosis estimadas son diferentes, dependiendo de si el sitio es residencial, si se va convertir en residencial dentro de un plazo de 10 años o si es o se va a convertir en comercial/industrial/agropecuaria, etc. Las exposiciones probables son de muy distinta duración y frecuencia. En segundo lugar, con base en la información de muestreo ambiental y el conocimiento que se tenga sobre la peligrosidad de los tóxicos ambientales detectados, se tiene que seleccionar la lista de sustancias de interés y las rutas de exposición significativas que existen realmente. Con base en estudio de campo, usando modelos de transporte y destino se seleccionan las rutas que se puedan esperar para el futuro.
- Selección de los valores de los parámetros de exposición. Lo ideal es obtener información específica en el sitio, sin embargo muy frecuentemente no se hace y se usan valores estándar para muchos de los parámetros que se usan en la estimación de la dosis. Por ejemplo; se fijan valores para tasas de contacto como ingesta diaria de agua, consumo diario de pescado, etc., o para longitud de los períodos de exposición por duración promedio en un determinado domicilio o en un trabajo, etc.

#### 4.3.1.2 Evaluación de las incertidumbres

La evaluación de las incertidumbres es un aspecto muy importante en la evaluación de riesgos. Algunas de las fuentes de incertidumbre se pueden cuantificar, a las otras se les da un tratamiento cualitativo, pero siempre se analizan. Es conveniente conocer las posibilidades de que las incertidumbres se magnifiquen a lo largo del proceso de evaluación.

Identificación. Las incertidumbres más importantes son las siguientes:

- La calidad de los datos de muestreo. Por ejemplo; si los datos de concentración de un determinado tóxico en el suelo no provienen de muestras representativas.
- La calidad de la información que se consultó para asignar categoría del uso actual del suelo y para hacer la estimación de las probabilidades de cambio del uso del suelo.
- La eliminación de sustancias de la lista de tóxicos a considerar en el estudio.
- La eliminación de rutas de exposición completas.

Se debe de revisar esta información para confirmar o revocar las decisiones que se hayan tomado antes. Los errores que se cometan en estos aspectos pueden llegar a invalidar los resultados del análisis de riesgos.

Otras fuentes importantes de incertidumbre son las inherentes a la evaluación de la exposición de los individuos a todas las sustancias. Estas incertidumbres son introducidas por:

- Los datos de muestreo
- Los modelos usados para estimar concentraciones de exposición, en la ausencia de datos experimentales.
- La selección de niveles de los parámetros de insumos que no estén basados en datos experimentales. Las distintas suposiciones pueden tener efectos diferentes en los resultados. Es necesario identificar las suposiciones claves, indicando el orden de magnitud de la sobrestimación o subestimación del riesgo.

Si no se dispone de datos de campo para validar un modelo, se puede hacer un análisis de sensibilidad limitado, para indicar la magnitud de la incertidumbre asociada al uso de ese modelo.

Es conveniente identificar cuáles de estos parámetros tienen más influencia en los resultados y los efectos sobre los resultados del hecho que se hayan dado valores estándar a los parámetros de exposición y de transporte. Lo anterior se determina por análisis de sensibilidad o por opinión de

expertos. En el análisis de sensibilidad se calculan los riesgos dando diferentes valores a los parámetros y observando su efecto sobre los resultados.

Análisis. Idealmente se debería hacer un seguimiento a lo largo de todo el proceso de evaluación de riesgo de cada una de las incertidumbres asociadas al cálculo de las exposiciones y así, caracterizar sus efectos sobre los resultados finales. A continuación se describen algunas formas de cómo evaluar las incertidumbres en forma cuantitativa, semicuantitativa y cualitativa.

Método Cuantitativo.- El método cuantitativo se puede aplicar cuando los modelos son sencillos y se conocen bien los valores de los parámetros de entrada. En este caso, el primer paso será la caracterización de las distribuciones de probabilidades de los valores de las variables y, el segundo será el estudio de la propagación de las incertidumbres de los valores de las variables, a través del proceso de cálculo, usando métodos analíticos (series de Taylor de primer orden) o por métodos numéricos (simulación Montecarlo) (Peña 2001)<sup>35</sup>.

Los métodos analíticos son posibles cuando se trata de pocas variables con distribuciones conocidas y de funciones lineales. En los casos más complejos se usan los métodos numéricos. Los análisis de primer orden, con series de Taylor, están basados en la suposición de que la varianza total de la variable de salida del modelo, es una función de las varianzas de las variables individuales de entrada al modelo y que la sensibilidad de la variable de salida es una función de las variables de entrada. La sensibilidad de la variable de salida se define como la primera derivada de la función o modelo. La derivada se puede generar en forma analítica o numérica.

En la simulación de Montecarlo se estima una distribución de exposiciones o riesgos por medio de la resolución repetitiva de las ecuaciones del modelo. Se necesita definir la distribución de probabilidades para cada variable del modelo. De la distribución de riesgos que resulta, se puede seleccionar un determinado percentil (por ejemplo el 95 en el caso de distribución de exposiciones).

Las técnicas cuantitativas requieren de la definición de las distribuciones de todas las variables de entrada y de la covarianza que existen entre ellas. El valor de estos métodos disminuye rápidamente si no se conocen bien las distribuciones de una o más variables y, si se tienen que suponer los valores y las distribuciones de algunos de los parámetros. Las técnicas cuantitativas se vuelven más difíciles de documentar y revisar, a medida que aumenta el número de variables en el modelo.

El llevar a cabo el análisis cuantitativo de las incertidumbres a veces lleva a una falsa percepción de confiabilidad en los resultados. Aún en los análisis más completos no se puede estar seguro de que se tomaron en cuenta todas las fuentes de incertidumbre y que se tomaron en cuenta todas las covarianzas.

Métodos Semicuantitativos.- Con frecuencia la información disponible es insuficiente para describir la distribución de valores de las variables, pero sí se pueden conocer los intervalos dentro de los cuales toman valores los parámetros. En esta situación se pueden hacer estudios de sensibilidad de la variable de salida, determinar cuáles variables tienen más influencia en los resultados y calcular los intervalos dentro de los cuales puede tomar valores la variable de salida. Se calcula el intervalo de la variable de salida del modelo (exposición) que resulte de suponer las combinaciones de valores extremos o medios de los parámetros de entrada.

La caracterización de las incertidumbres por medio de este método, se puede hacer presentando los intervalos de las exposiciones o riesgos calculados en el análisis de sensibilidad y, por la descripción de las limitaciones en los datos que se usaron para estimar intervalos plausibles de las variables de entrada del modelo.

Método cualitativo.- En la mayoría de los casos este es el método más adecuado para presentar el análisis de incertidumbres. Se describe en forma cuantitativa o cualitativa la incertidumbre de cada parámetro y se indica simplemente la influencia posible de estas incertidumbres en la estimación final del riesgo con base en el conocimiento que se tenga de cada modelo.

En seguida se hace un resumen de la información y las incertidumbres que pueden estar asociadas a esas informaciones, que es conveniente tener a la mano cuando se está haciendo este tipo de análisis:

Lista de los parámetros de evaluación de la exposición tales como: velocidad de infiltración, duración de la exposición, factores de bioconcentración, peso corporal, etc. Lista de los valores usados para cada parámetro y la razón para seleccionar ese valor. Distribución de valores de cada parámetro sean estos medidos o supuestos, considerando, si es posible, los siguientes: intervalo total, tipo de distribución, media (geométrica o aritmética), desviación estándar y percentiles específicos (mediana, percentil 95). Incertidumbre en valores estadísticos usados en la evaluación de riesgos (por ejemplo, el error estándar de la media) o la falta de datos y calificadores.

Dirección y magnitud potencial de las desviaciones en las estimaciones de riesgos introducidas por las suposiciones hechas y por la falta de datos.

Las curvas de nivel de riesgo que se calculan con base en las exposiciones modeladas, son útiles para visualizar el posible efecto de los niveles de contaminación actuales o futuros sobre las comunidades que viven cerca o en el sitio.

### **4.3.2 Evaluación de la toxicidad**

Evaluación de la toxicidad, es la selección de los valores adecuados de los parámetros que miden la peligrosidad de las sustancias tóxicas presentes en el sitio, acompañados por la calificación de la calidad de esa información. El parámetro que se usa en evaluación de riesgos es el índice de toxicidad.

#### **4.3.2.1 Información sobre toxicidad**

La información sobre toxicidad es crítica en el proceso de evaluación de riesgos; sin embargo, la cantidad de datos sobre toxicidad es muy limitada y no es fácil estimarla. La derivación e interpretación de los índices de toxicidad requiere de experiencia.

La EPA acumula información sobre la potencialidad de que un determinado compuesto sea un tóxico (cancerígeno o no-cancerígeno). Puede provenir de estudios epidemiológicos controlados, estudios clínicos, estudios fármaco-toxicológicos con animales experimentales, así como, información de apoyo proveniente de estudios in vitro y estudios comparativos entre estructura y actividad.

Los resultados de los estudios epidemiológicos bien diseñados y conducidos que muestran una correlación positiva entre un agente y una enfermedad, presentan la evidencia más convincente de que el compuesto es un tóxico para humanos. Las bases de datos sobre toxicidad contienen muy poca información de efectos tóxicos observados en humanos, porque normalmente las exposiciones no son intencionales y por lo tanto no son estudios controlados.

Si no se cuenta con información proveniente de estudios con humanos, lo que se hace es inferir el potencial de una sustancia para producir efectos adversos en el hombre, a partir de información obtenida con mamíferos experimentales (ratas, ratones, conejos, cuyos, perros o monos).

Hay ocasiones en que las observaciones con animales son de relevancia incierta para humanos. Se considera más probable que un agente tendrá efectos adversos en el hombre, si éstos se observan en diversos experimentos con animales de diferente especie, cepa, en ambos sexos, y por diferentes rutas de exposición. Se le da más credibilidad a los resultados, si se tiene información proveniente de estudios de metabolismo comparado, que demuestren que la sustancia experimenta.

La EPA está estudiando la adopción de nuevos lineamientos para hacer la evaluación de riesgos de cáncer en sitios contaminados. La metodología actual está basada en los conocimientos que existían hace más de 10 años, está modificándose para dar mayor peso a los estudios de genotoxicidad, reflejando el incremento en la confianza que se tiene en el resultado de estos estudios, después del desarrollo, durante esta década que han experimentado las distintas técnicas de laboratorio.

El primer paso en la evaluación de la toxicidad es obtener la información sobre los daños que pueden producir los tóxicos presentes en el sitio. Se obtiene la información sobre la evidencia de que el compuesto es cancerígeno humano o tóxico para el desarrollo, así como los índices que corresponden a los distintos modos de acción de la sustancia correspondientes a los distintos períodos de exposición y vías de exposición.

La mayoría de los índices de toxicidad publicados se calcularon con base en los niveles de efectos críticos observados experimentalmente, en donde se midieron las dosis suministradas y no las dosis absorbidas. Cuando se obtienen valores calculados usando dosis absorbidas, es necesario transformarlos a valores equivalentes en dosis suministradas.

La EPA ha hecho el trabajo de analizar la información toxicológica de buena calidad que existe y la ha acumulado en varias Tablas electrónicas para consulta en línea o en publicaciones periódicas. Estas Tablas constituyen las mejores fuentes de información sobre índices de toxicidad disponible. Las más importantes son:

Sistema IRIS (Integrated Risk Information System). Es una base de datos que contiene información actualizada sobre toxicidad y la normatividad para el uso de numerosas sustancias. Sólo está disponible para consulta en línea y se puede acceder desde la página electrónica de la EPA.

IRIS contiene los valores verificados de las DdR (Dosis de Referencia), de los Riesgos y especifica el nivel de incertidumbre usados en la derivación de DdR. La base de datos consiste de una colección de archivos que se van actualizando a medida que la información científica se revisa. Se tiene un archivo por cada sustancia. Se agregan nuevos archivos a medida que la información va estando disponible. Hasta 1998, se cuenta con archivos para más de 500 sustancias.

Los archivos contienen la siguiente información cuantitativa arreglada en las siguientes categorías:

- DdR crónicas para vía oral e inhalada
- Unidades de Riesgo para exposición crónica por vía oral o por inhalación
- Resúmenes de la normatividad que aplica la EPA



- Datos suplementarios sobre peligros agudos para la salud, así como información fisicoquímica sobre los estudios toxicológicos hechos con la sustancia.

Tablas HEAST. Las Tablas HEAST (Health Effects Assessment Summary Tables) contienen información sobre DdR, así como otros datos de toxicidad de algunas sustancias. Tienen información bibliográfica sobre estudios de toxicidad. Estas Tablas son de gran utilidad cuando la información que se necesita no se encuentra en IRIS. Las Tablas se publican trimestralmente (EPA 1994) <sup>22</sup>.

Otros Documentos. Cuando no se encuentra información, en las fuentes arriba mencionadas, sobre la toxicidad de la sustancia de interés, se pueden consultar otras publicaciones que contienen información general, tales como los documentos que especifican criterios de calidad de agua potable y pureza del aire.

La ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) publica una serie de documentos que se llaman Perfiles Toxicológicos. Estos documentos contienen información general sobre toxicidad y niveles de exposición asociados con letalidad, cáncer, genotoxicidad, neurotoxicidad, toxicidad para el desarrollo y la reproducción, inmunotoxicidad y toxicidad sistémica (hepática, renal, respiratoria, cardiovascular, gastrointestinal, hematológica, músculo-esquelética y dermo/ocular). Los Perfiles contienen información sobre los efectos tóxicos observados en el hombre y en los animales, por ruta de exposición y duración (aguda, intermedia, crónica). Los perfiles también incluyen capítulos sobre propiedades fisicoquímicas y métodos analíticos.

Los Perfiles Toxicológicos de ATSDR son adecuados para obtener información en forma rápida de los efectos adicionales a la salud que puedan ocurrir por exposiciones de mayor nivel que los que producen los efectos críticos.

Es conveniente hacer notar que ATSDR y EPA definen en forma diferente algunas de las variables que entran en el cálculo de los índices de toxicidad. Es necesario tener cuidado al mezclar los datos provenientes de estas dos fuentes de información (EPA 1991) <sup>18</sup>.

#### **4.3.3 Selección de índices de toxicidad**

Después de que se ha recolectado la información de toxicidad para los compuestos en cuestión, el siguiente paso es identificar los índices de toxicidad que se van a usar para estimar los efectos asociados

con las exposiciones específicas que se desean evaluar. En primer lugar, con base en la información generada sobre exposiciones, se seleccionan:

Los Factores acumulativos para los cancerígenos,

Las DdR para respuestas a no-cancerígenos y tóxicos para el desarrollo.

Se seleccionan los índices de acuerdo a las condiciones que se presentan en el sitio:

Períodos de exposición (crónicos, subcrónicos o agudos)

Vías de exposición (oral, inhalación y cutánea).

DdR para Efectos No-cancerígenos

Se usan:

- Las DdR crónicas para períodos de exposición mayores de 7 años,
- Las DdR subcrónicas para exposiciones de 2 semanas a 7 años

Las DdR de desarrollo se deben utilizar para exposiciones únicas y para exposiciones de muy corta duración (1 día).

Para algunas sustancias y para algunas exposiciones se pueden usar más de una DdR. Debido a que algunos cancerígenos también presentan efectos no-cancerígenos, es conveniente localizar las DdR para estos compuestos. Las DdR para cancerígenos están derivadas para efectos no-cancerígenos y no se debe de suponer que se está logrando protección contra los riesgos cancerígenos.

#### **4.3.3.1 Factores acumulativos para efectos cancerígenos**

En este paso de la evaluación de la toxicidad se identifican los índices apropiados para evaluar los riesgos de cancerígenos asociados con las exposiciones evaluadas. Primero, con base en los resultados de la evaluación de la exposición, se identifican las rutas de exposición a los cancerígenos potenciales. Se obtienen los factores acumulativos para los agentes identificados usando las jerarquías de fuentes presentadas anteriormente. Se deben encontrar todos los agentes clasificados como cancerígenos humanos comprobados y probables que se hayan encontrado en el sitio.

#### **4.3.3.2 Información contenida en la evaluación de la toxicidad**

La evaluación de la toxicidad debe de contener la siguiente información:

- Factores acumulativos para todos los cancerígenos
- Clasificación por peso de la evidencia de todos los cancerígenos

- Tipo de cáncer producidos · DdR crónicas, subcrónicas o de corta duración para todas las sustancias, incluyendo los cancerígenos
- Especificar si los índices de toxicidad están calculados con base en las dosis suministradas o absorbidas

El análisis se hace con base en los siguientes factores:

- Peligros cualitativos (o sea potencialidad de toxicidad para humanos)
- Derivación de los índices de toxicidad
- Información con humanos y animales
- Duración del estudio (uso de datos crónicos para estimar DdR subcrónicas) y consideraciones especiales
- Cálculo de riesgos de cáncer para exposiciones vitalicias sobre la base de exposiciones de más corta duración.

#### **4.3.4 Estimación de riesgos**

Como se mencionó antes, el riesgo se calcula por separado para cancerígenos y no cancerígenos. Para este último caso se calculan los Cocientes de Peligro dividiendo el valor de la dosis suministrada por cada ruta entre el valor de la dosis de referencia. Se deben seleccionar las DdR para los mismos períodos y vías de exposición que se usaron en la estimación de las dosis suministradas/absorbidas. La dosis suministrada para el cálculo de riesgos de cáncer se debe estimar para exposiciones por todo el período de vida (70 años).

##### **4.3.4.1 Prueba de consistencia y validez**

Los números que se comparen en la estimación de riesgos, además de ser válidos, deben ser consistentes entre sí. Es necesario probar la validez de las suposiciones claves más comunes que se hicieron en los estudios de exposición y de toxicidad para cada tóxico y ruta de exposición evaluada. Estas suposiciones incluyen los períodos promedio de exposición, la vía de exposición y los ajustes de la absorción. El principio básico, en este caso, es asegurarse que las estimaciones de exposición correspondan tan cercanamente como sea posible con las suposiciones utilizadas en el desarrollo de los índices de toxicidad.

Períodos promedio de exposición. Si los índices de toxicidad están basados en exposiciones vitalicias, entonces la evaluación de la exposición deberá estar expresada en los mismos términos. Para estimar riesgos de cáncer se deben usar el promedio de exposiciones vitalicias, y si se tienen exposiciones más cortas, éstas deben expresarse en equivalentes de exposiciones vitalicias. Para evaluar efectos no-cancerígenos para exposiciones no vitalicias, no se deben comparar DdR crónicas con exposiciones de más corta duración. En su lugar se deben usar DdR subcrónica o para exposiciones cortas.

Las exposiciones usadas en los estudios de toxicidad deben ser semejantes a las evaluadas en el sitio para que la estimación del riesgo proteja adecuadamente la salud humana, particularmente en los efectos subcrónicos y de corta duración. Si no se cuenta con datos de toxicidad para exposiciones de corta duración, se pueden utilizar las DdR crónicas como un valor inicial. Si la relación de la dosis de exposición de corta duración a la DdR crónica es menor a la unidad, entonces hay muy pocas probabilidades de que se presenten efectos adversos.

Vía de exposición. Se debe confirmar que los índices de toxicidad para cada ruta de exposición sean consistentes con la vía de ingreso del tóxico ambiental (o sea oral con oral, inhalación con inhalación, etc.). Cuando las sustancias tienen efecto en el sistema de ingreso, no es posible extrapolar los índices de toxicidad de una vía a otra.

Por ejemplo; un índice de toxicidad basado en la aparición de tumores localizados en los pulmones, que resultan solamente de la inhalación de la sustancia, no será apropiado para estimar el riesgo cuando en el sitio sólo se observa una exposición cutánea. En la actualidad, sólo se considera (por la EPA) como apropiado que se extrapolen a exposición dérmica, índices desarrollados con exposiciones orales. No se recomienda que se extrapolen índices derivados por exposición por inhalación para usarse en evaluación de riesgos por exposición oral, aunque en algunas ocasiones sí se hace (EPA 1992)<sup>20</sup>.

Las DdR de inhalación obtenidas en IRIS, normalmente estarán expresadas como concentraciones en el aire ambiente ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y no como dosis administradas ( $\text{mg}/\text{kg}\times\text{día}$ ). Será necesario transformar las unidades para que sean las mismas unidades en las que se calculen las dosis suministradas estimadas en la evaluación de la exposición. Se tiene que multiplicar la DdRi por volumen de aire inhalado por una persona por día expresado en metros cúbicos, y dividir por el peso promedio considerado para la población en estudio, expresado en kilogramos (Peña 2001)<sup>35</sup>.

Ajustes a la absorción. Debe de corroborarse que las exposiciones y los índices de toxicidad estén ambos expresados como dosis suministradas o como dosis absorbidas. Con la excepción de las exposiciones

dérmicas, los índices en las Tablas de la EPA están referidos a las dosis suministradas. En el caso de las exposiciones cutáneas los índices se calculan con las dosis absorbidas.

Los ajustes que hay que hacer para transformar de un tipo de dosis a la otra, dependen de la información de toxicidad disponible. La evaluación de exposición por exposición cutánea está expresada como los miligramos de la sustancia absorbida por kg. de peso corporal por día. Es necesario derivar un índice de toxicidad basado en dosis absorbidas. Hay algunas sustancias como el tetracloruro de etilo (TCE), para las cuales los índices de toxicidad están basados en dosis absorbidas. En este caso las exposiciones se tendrán que modificar para que reflejen dosis absorbidas.

En algunas ocasiones, es conveniente, corregir por diferencias entre las eficiencias de absorción por medio de exposición por ejemplo; alimentos, suelos o agua por vía oral y agua o partículas por inhalación, aunque no siempre se recomienda hacerlo. Los valores de DdR para ingestión (vía oral) publicados, normalmente suponen ingestión en solución acuosa, aunque en muchas ocasiones los experimentos usaron aceite de maíz como vehículo. Lo cual proporciona un factor de incertidumbre adicional

#### **4.3.5 Riesgos por sustancias individuales**

Para cancerígenos, los riesgos se estiman como el incremento en la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer durante su período vital como resultado de la dosis suministrada por la exposición a un agente cancerígeno. O sea que lo que se calcula es el incremento del riesgo de desarrollar cáncer.

La ecuación para el cálculo de riesgo de cáncer que se presenta más abajo estima el incremento del riesgo de un individuo de contraer cáncer por exposición a benceno.

El modelo de simple sumatoria de riesgos es adecuado para riesgos ambientales. Las suposiciones que se hacen son:

- que las dosis de cada una de las sustancias es pequeña.
- que hay independencia de acción para benceno, o sea que; no hay efectos químicos sinérgicos o antagónicos. Cuando los riesgos totales son menores de 0.1, la diferencia que se calcula con esta suposición es despreciable con respecto a los efectos que se estimarían usando modelos más estrictos.

Si alguna de estas suposiciones no se cumplen entonces tendremos sobrestimaciones o subestimaciones del riesgo real por la exposición múltiple. Así pues, se calcula el riesgo total de cáncer para cada ruta

sumando los riesgos presentados por cada sustancia. El riesgo de cáncer que resulte se debe expresar con sólo una cifra significativa.

El Riesgo potencial individual (Ri) convierte directamente la cantidad de contaminante diario estimado que se requieren para que un individuo desarrolle cáncer. Debido a que las dosis a las que se exponen los individuos en el medio ambiente son generalmente muy pequeñas comparadas con las que se utilizan en experimentos con animales, se supone que la relación dosis-respuesta es lineal (la parte de dosis bajas en la curva dosis-respuesta obtenida por extrapolación a dosis cero). Bajo esta suposición el Riesgo Potencial individual es una constante y el riesgo será directamente proporcional a la dosis.

Riesgo potencial individual (Ri) = DDVP x DdR.

Donde: Riesgo es la probabilidad adimensional de que un individuo desarrolle cáncer, DDVP es la Dosis absorbida diaria promediado durante 70 años en mg/(kg x día)

DdR es la Dosificación de Referencia o la Dosis de Riesgo Potencial y tiene las unidades de (1/(mg/(kg día))).

Debido a que los valores de DdR son a menudo el límite superior de confianza al percentil 95 de la probabilidad de respuesta basada en datos de experimentación con animales, el riesgo de cáncer estimado será generalmente una estimación alta. Esto significa que se tiene confianza del que el riesgo real no excederá el riesgo estimado por este modelo y que lo más probable es que sea menor al que se predijo.

El incremento en el riesgo de cáncer que es permisible depende de la legislación de un país. El valor que se considera socialmente aceptable en los Estados Unidos es de una probabilidad de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$  y el nivel para cada sustancia es especificada por EPA (EPA 1995)<sup>20</sup>.

El valor de DdR para el benceno por vía inhalada es de  $2.90 \text{ E-}02$  (1/(mg/(kg día))) (EPA 1998)<sup>19</sup>.

El cálculo de riesgo total descrito le da el mismo peso a los cancerígenos independiente de su clasificación como A, B o C.

Nota: El sistema de clasificación de la EPA para sustancias con base en su potencial cancerígeno se clasifica en cinco grupos:

Grupo A.- Sustancia cancerígena humana: Se clasifica en este grupo cuando existe suficiente evidencia de estudios entre la exposición a dicho agente y desarrollo de cánceres en el hombre.

Grupo B.- Sustancia probable cancerígena humana: Se clasifican en este grupo a las sustancia con limitada evidencia de desarrollo de cánceres en el hombre o con suficiente evidencia de cánceres en animales de estudio.

Grupo C.- Sustancia posiblemente cancerígena: se clasifican en este grupo cuando existe una evidencia limitada de desarrollo de cánceres en animales de estudio y no se tiene evidencia de estudios con humanos.

Grupo D.- No clasificable como cancerígeno humano: Se clasifican en este grupo cuando no se tiene evidencia de estudios que prueben el desarrollo de cánceres tanto en humanos como en animales.

Grupo E.- Evidencia de no cancerígeno humano: Se clasifican en este grupo cuando se han realizado estudios en por lo menos dos diferentes especies animales o pruebas de un estudio epidemiológico y no se han encontrado efectos cancerígenos bajo ninguna circunstancia.

La medición usada para describir el potencial de que ocurra una toxicidad de un compuesto no-cancerígeno en un individuo, no está expresada como la probabilidad de que un individuo sufra un efecto adverso. En su lugar el potencial de efectos no-cancerígenos se evalúa comparando el nivel de exposición especificado durante un determinado período (por ejemplo el período vital) con una dosis de referencia derivada para un período similar de exposición. Esta relación de exposiciones a tóxicos se le denomina Cociente de Peligro y se define así:

$$\text{Cociente de Peligro} = D_s/DdR$$

Donde:

$D_s$  = Nivel de Exposición (o insumo o dosis suministrada)

$DdR$  = Dosis de Referencia

$D_s$  y  $DdR$  deben de estar expresadas en las mismas unidades y representar el mismo período de exposición y la misma vía de exposición.

Este cociente supone que hay un nivel de exposición ( $DdR$ ) abajo del cual es poco probable que se presente un efecto adverso, aún en poblaciones sensibles. Si los niveles de exposición exceden el valor mencionado, entonces existe el peligro de que potencialmente se presenten efectos no-cancerígenos. En general entre mayor sea el valor del cociente mayor será la probabilidad de que se presente un efecto. El valor del cociente no debe de interpretarse como una probabilidad de que se presente un efecto adverso. La curva dosis-respuesta no es lineal así que no hay proporcionalidad directa a valores muy superiores a la  $DdR$ . Las exposiciones crónicas (7años o más) como las que experimentan los usuarios de servicios de agua potable y los residentes de la zona de afectación son importantes siempre, las subcrónicas (2 semanas a 7 años) como las que experimentan estudiantes de secundaria que van sólo tres años a una escuela localizada en el sitio, son frecuentemente de interés. Las exposiciones de corta duración sólo son importantes si hay tóxicos presentes en la zona de afectación.

### Riesgos agregados de varias sustancias

Los riesgos de cáncer y los coeficientes de peligro que se calculan por la exposición a una mezcla de varias sustancias, al sumar los riesgos por la exposición a cada sustancia individual, puede resultar en una subestimación del riesgo de exponerse a todas en forma simultánea.

El cálculo de riesgos por exposición a mezclas, se hace suponiendo que los efectos son aditivos a menos que se tenga información específica sobre las mezclas que se presentan en el sitio y normalmente no se cuenta con esa información.

El modelaje del movimiento de mezclas en el ambiente es difícil, dado que es probable que los diferentes componentes de la mezcla se comporten en forma diferente y, la mezcla vaya cambiando de composición a medida que se mueve a lo largo de la ruta de exposición. El hecho de que se desprecien los efectos de potenciación o de antagonismo entre los tóxicos presentes en la mezcla, incrementa las incertidumbres sobre la validez de los resultados.

Para evaluar el potencial total de efectos no-cancerígenos producidos por la exposición simultánea a más de una sustancia, se ha desarrollado el cálculo del Índice de Peligro (HI).

Se tienen las siguientes suposiciones:

- que se pueden producir efectos adversos para la salud por la exposición a una mezcla de varias sustancias, aunque la concentración de cada una de ellas esté por abajo de los niveles de tolerancia.
- la magnitud del efecto adverso será la suma de los cocientes de peligro obtenidos dividiendo los niveles de exposición  $D_s$  por su respectivo DdR.

El Índice de Peligro (HI) es igual a la sumatoria de los Cocientes de Peligro. Las  $D_s$  y las DdR deben representar los mismos períodos de exposición (crónicas, subcrónicas o de corta duración).

$$HI = (D_{s1}/DdR_1) + (D_{s2}/DdR_2) + (D_{s3}/DdR_3) + \dots$$

Cuando la sumatoria es mayor que la unidad se interpreta como que existe el peligro de que se presenten efectos adversos.

Si la  $D_s$  de cualquiera de los componentes de la mezcla excede su DdR hará que el Índice sea mayor que uno, sin embargo el Índice puede llegar a uno, aún si la  $D_s$  de ninguno de los componentes de la mezcla por sí sola excede su DdR.



Esta forma de calcular el efecto de mezclas tiene varias limitaciones:

- Como ya se mencionó antes, el nivel de peligro no se incrementa linealmente a medida que se acerca o se excede la DdR
- Se usan indistintamente valores de las dosis de referencia que podrían no ser compatibles por: a) provenir de estudios que tengan niveles de precisión y exactitud diferentes b) que incluyan diferentes ajustes por factores de incertidumbre y de modificación, por extrapolación de animales a humanos, de un período de exposición a otro c) no estar basadas en la misma severidad de efectos d) estar basadas en efectos críticos que pueden tener significación toxicológica distinta.

La suposición de aditividad de las dosis se aplica más estrictamente para compuestos que inducen el mismo efecto y que tienen el mismo mecanismo de acción. Cuando no es así el cálculo de Índices de Peligro resulta en un valor sobre estimado.

El Riesgo de Exposición de la Población (Rp) nos permite conocer, con base en los Ri el número de casos que se pueden presentar, en el periodo de vida determinado de algún efecto tóxico debido a la exposición al contaminante de estudio.

El Riesgo de Exposición de la Población (Rp) se expresa como número de casos en el período de estudio y se calcula de la siguiente forma:

Riesgo de Exposición de la Población (Rp) = Ri x No de individuos expuesto.

Donde: Riesgo es la probabilidad adimensional de que un individuo desarrolle cáncer.

No de individuos expuestos: Corresponde al total de la población expuesta al contaminante en el periodo de estudio.

#### **4.3.6 Interpretación de los resultados**

Esta sección indica cómo se deben presentar e interpretar los resultados de la caracterización de riesgos. Los resultados de la evaluación de riesgos, no se deben tomar como una cuantificación absoluta del riesgo. La importancia de los riesgos de cáncer y de los índices de peligro estimados, se encuentra al resaltar las fuentes potenciales de riesgo en el sitio, de tal manera que se pueda tratar con ellos, en forma efectiva, en el proceso de restauración ambiental.

La evaluación de riesgos debe especificar la magnitud y clase de riesgos que se presentan en el sitio, dentro del contexto de las incertidumbres inherentes al proceso de estimación de los riesgos y, sirve de base para diseñar el programa de administración o manejo de los riesgos.

El contenido de la discusión se presenta a continuación: (Peña 2001)<sup>35</sup>.

Contenido de la discusión de resultados

- Confianza de que se identificaron todos los contaminantes claves y discusión de las concentraciones de los contaminantes, comparadas con los intervalos de concentraciones normales en el ambiente.
- Una descripción de los distintos tipos de riesgos de cáncer y otros riesgos para la salud presentes en el sitio, distinguiendo entre aquellos que se sabe se presentan en humanos y los que se suponen pueden presentarse con base en estudios realizados con animales.
- Nivel de confianza en la información cuantitativa sobre toxicidad que se usó en la estimación de riesgos.
- Presentación de la información sobre toxicidad de las sustancias que se detectaron en el sitio, pero que no fueron incluidas en la estimación cuantitativa de los riesgos.
- Nivel de confianza en las estimaciones de las exposiciones para las rutas claves y las suposiciones que se hicieron con respecto a los parámetros de exposición.
- Los factores más importantes que determinan los riesgos en el sitio (sustancias, combinaciones de sustancias, rutas, combinaciones de rutas).
- Los factores más importantes que disminuyen la confiabilidad de los resultados y el significado de estas incertidumbres.
- Características de la población expuesta y comparación con estudios de salud que se pudieran haber hecho en el sitio.
- Si la población potencialmente expuesta es grande, entonces se deben de enfatizar estos números, para que se le dé la prioridad adecuada a la limpieza del sitio. Es conveniente revisar qué tan probable es que una población de tamaño grande esté toda expuesta a la EMR en forma consistente.

Es conveniente presentar la información de riesgos en forma tal que sea fácil de visualizar la información importante.

A los textos se les puede agregar una Tabla que resuma toda la información sobre Riesgos de Cáncer y sobre Índices de Peligro para todas las rutas y usos del suelo, para todas las sustancias consideradas en la caracterización cuantitativa de riesgos e incluir gráficas de barras que permitan al lector identificar de inmediato las rutas que más contribuyen a la exposición en el cálculo del Índice Total de Peligro, así como textos para identificar las sustancias que determinan los índices de peligro para cada ruta.

Se pueden presentar gráficas que hagan más clara la visualización de los impactos de las diferentes suposiciones e incertidumbres sobre las estimaciones finales de los riesgos de cáncer y los índices de peligro.

#### 4.4 Resumen esquemático de una Evaluación de Riesgo Ambiental

En los diagramas que se presentan a continuación, se presentan de manera sencilla y esquemática los pasos a seguir para la realización de una Evaluación de Riesgo Ambiental.

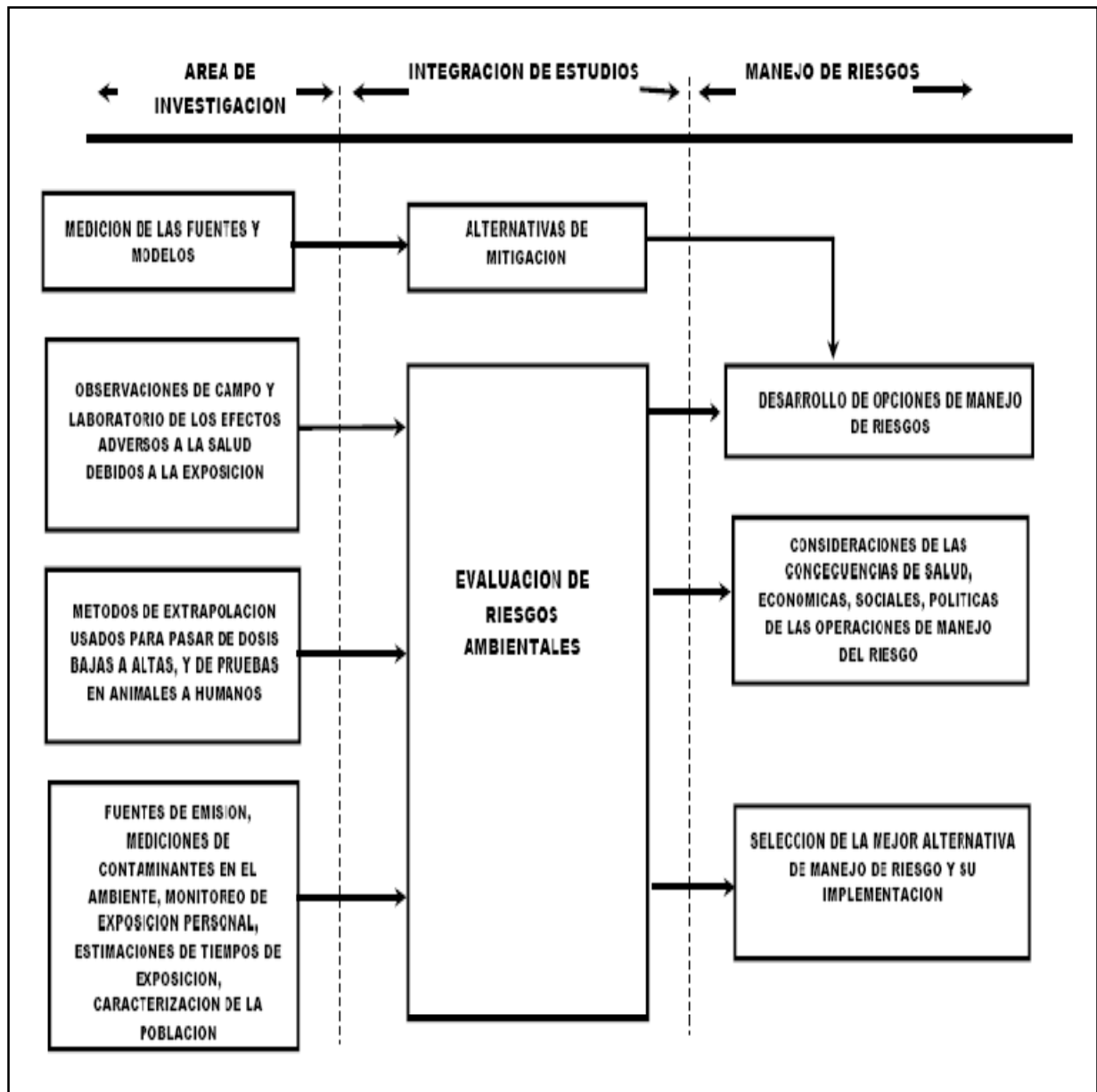


Figura 4.1.- Relación entre la investigación y evaluación de riesgos ambientales (Albert 1990)<sup>1</sup>.

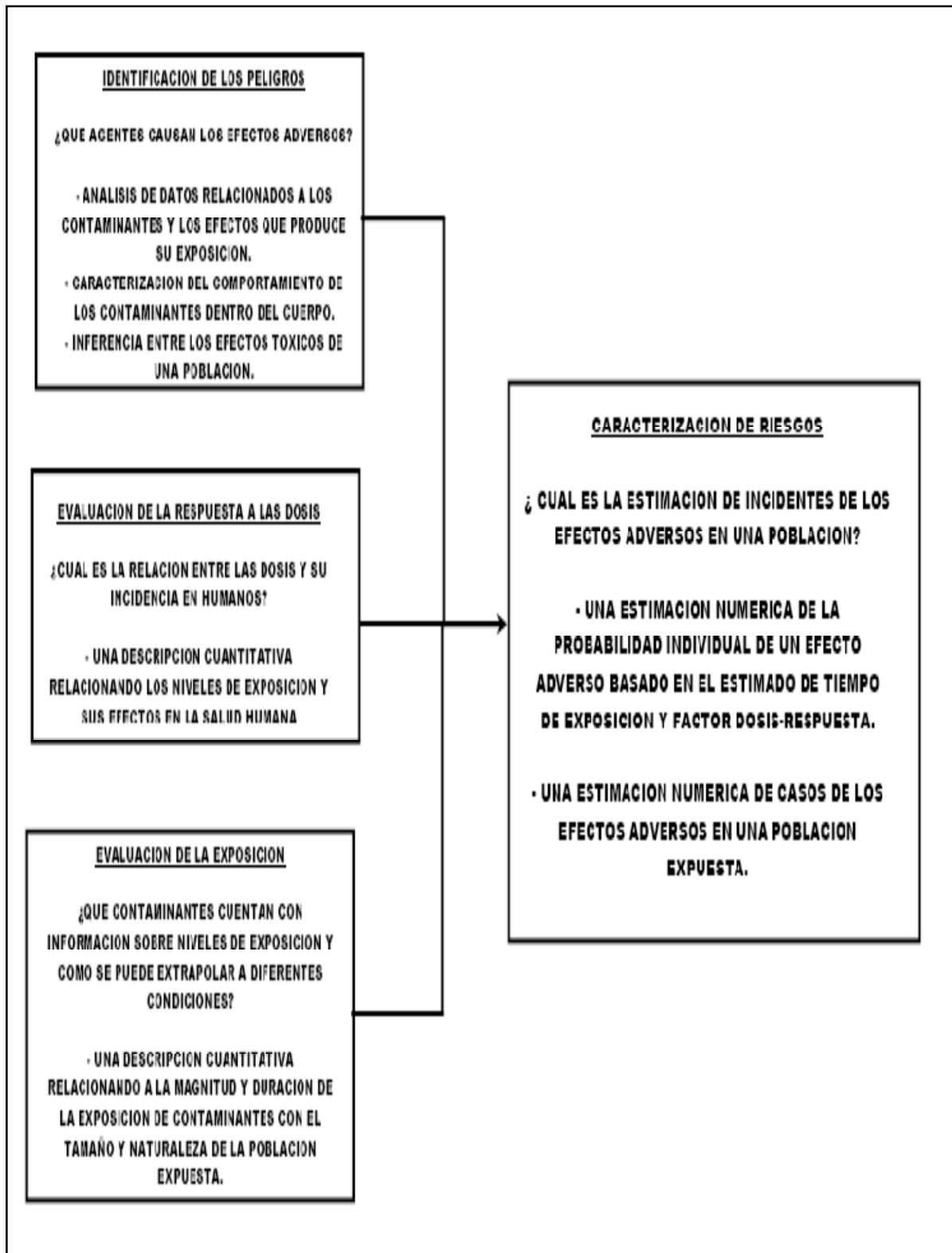


Figura 4.2.- Componentes tradicionales de una evaluación de riesgo ambiental (Albert 1990)<sup>1</sup>.

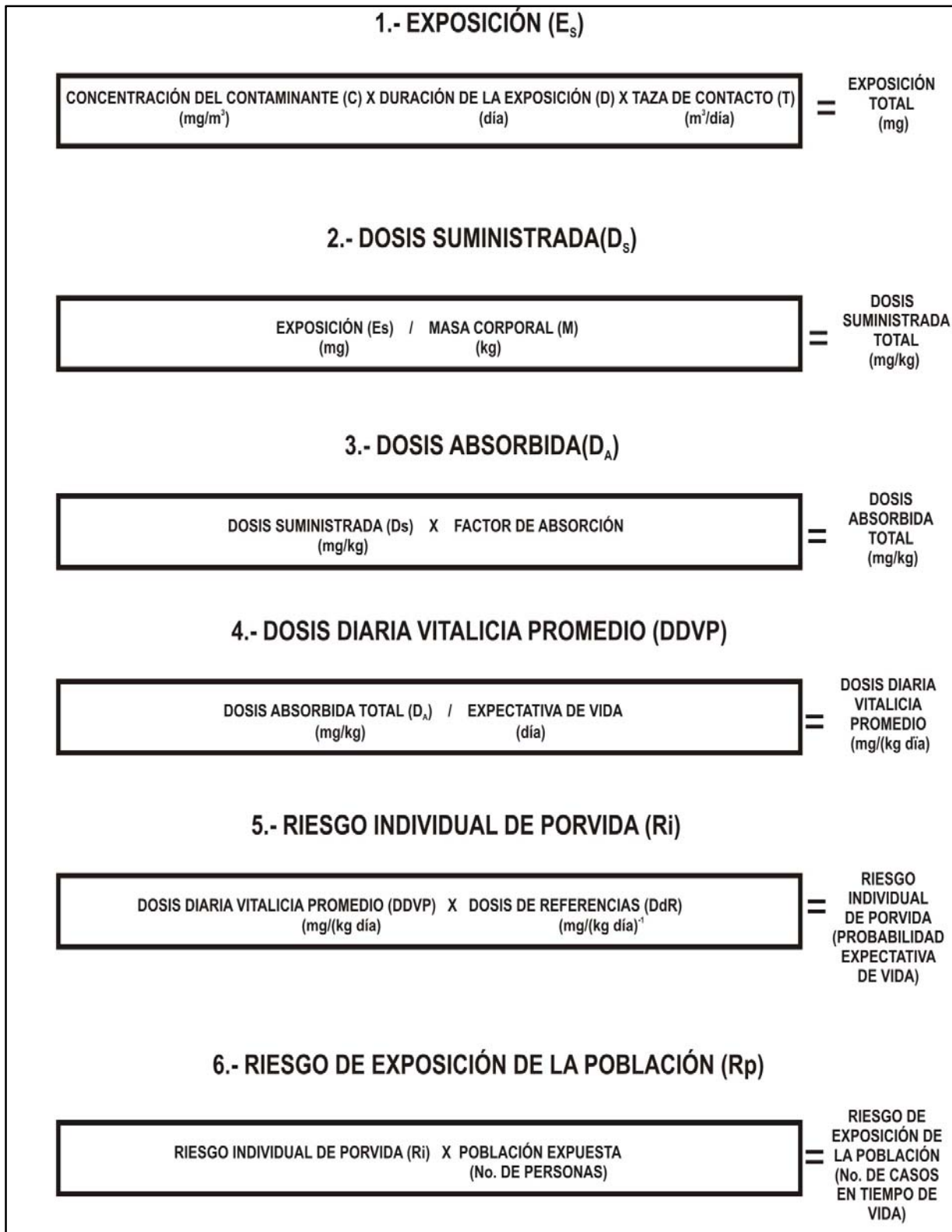


Figura 4.3.- Metodología para la determinación de la Evaluación de Riesgo Ambiental (Albert 1990)<sup>1</sup>.

## 5. CONCENTRACIÓN DE BENCENO EN LA ATMÓSFERA Y EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL

### 5.1 Información sobre las características de los muestreos.

La información de las concertaciones de benceno en el aire ambiente en tres sitios de la ZMCM, se obtuvieron del trabajo de investigación realizado por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>, de agosto del 99 a febrero del 2000 de en la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, y se complementaron con la información de concentración de benceno obtenida por Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup> del trabajo de investigación realizado de enero del 2003 a abril del 2004. Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup> realizó un total de 33 muestreos por sitio y en diferentes días de acuerdo al programa de muestreo presentado en la Tabla 5.1, cada día de muestreo comprendió una serie de muestreos instantáneos abarcando la gasolinera (G), la unidad habitacional (UH), y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). En este último sitio, además se realizó para cada serie un muestreo integrado de 24 horas.

**Tabla 5.1.-** Programa de muestreo Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>

Jueves	1 12 Ago 99 G (RyD) UH	8 23 Sep 99 G UH (RyD)		17 28 Sep 00 G(R) UH(R)	24 23 Nov 00 G (RyD) UH(R)	31 8 Feb 01 G (R) UH(RyD)
Miércoles	2 18 Ago 99 G UH (RyD)	9 29 Sep 99 G UH CCA (RyD)		18 4 Oct 00 G (RyD) UH(R) CCA (R)	25 6 Dic 00 G (R) UH (RyD)	32 14 Feb 01 G (R) UH(R)
Martes	3 24 Ago 99 G UH	10 5 Oct 99 G (RyD) UH		19 10 Oct 00 G (R) UH (RyD)	26 9 Ene 01 G (R) UH(R)	33 20 Feb 01 G (RyD) UH(R)
Lunes	4 30 Ago 99 G (RyD) UH	11 11 Oct 99 G UH (RyD)	13 10 Jul 00 G UH(RyD)	20 30 Oct 00 G (R) UH (R)	27 15 Ene 01 G (RyD) UH(R)	
Domingo	5 5 Sep 99 G UH(RyD)	12 14 Nov 99 G UH	14 20 Ago 00 G (R) UH(R)	21 5 Nov 00 G (RyD) UH(R)	28 21 Ene 01 G (R) UH(RyD)	
Sábado	6 11 Sep 99 G UH CCA (RyD)		15 9 Sep 00 G (RyD) UH(R) CCA (R)	22 11 Nov 00 G (R) UH (RyD) CCA	29 27 Ene 01 G (R) UH(R) CCA (RyD)	
Viernes	7 17 Sep 99 G (RyD) UH CCA		16 22 Sep 00 G UH (RyD) CCA (R)	23 17 Nov 00 G (R) UH(R) CCA (RyD)	30 2 Feb 01 G (RyD) UH(R) CCA (R)	

G:Gasolinera UH: Unidad Habitacional CCA: Centro de Ciencias de la Atmósfera R: Réplica D:Duplicado

Los muestreos realizados por Bueno<sup>8</sup> consistieron en una serie de muestreos integrados de 24 horas, realizados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, en la Tabla 5.2 se presentan las fechas correspondientes a los días de los muestreos.

**Tabla 5.2.-** Programa de muestreo por Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>.

No de muestreo	Fecha	No de muestreo	Fecha
1	01 Jun 2003	29	06 Feb 2004
2	07 Jun 2003	30	12 Feb 2004
3	13 Jun 2003	31	16 Mar 2004
4	19 Jun 2003	32	29 Mar 2004
5	25 Jun 2003	33	17 Abr 2004
6	01 Jul 2003		
7	07 Jul 2003		
8	13 Jul 2003		
9	19 Jul 2003		
10	25 Jul 2003		
11	31 Jul 2003		
12	06 Ago 2003		
13	12 Ago 2003		
14	18 Ago 2003		
15	24 Ago 2003		
16	29 Ago 2003		
17	04 Sep 2003		
18	10 Sep 2003		
19	23 Sep 2003		
20	29 Sep 2003		
21	05 Oct 2003		
22	25 Oct 2003		
23	31 Oct 2003		
24	04 Dic 2003		
25	10 Dic 2003		
26	13 Ene 2004		
27	19 Ene 2004		
28	01 Feb 2004		

## 5.2 Resultados obtenidos

En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de las concentraciones de benceno obtenidos en los muestreos para cada uno de los sitios de estudio, obtenidos por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup> y Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>.

Las concentraciones de benceno encontradas en la atmósfera para los sitios CCA y UH representan niveles similares en comparación con los encontrados en otras ciudades del mundo. Sin embargo los valores encontrados en la gasolinera si están muy elevados, existiendo un alto riesgo para las personas que trabajan en este lugar (despachadores) y en menor medida para las personas que acuden a cargar combustible. Es importante señalar que en otras ciudades los niveles de control en las estaciones de servicio son estrictos, y en algunos casos ya son automatizadas, es decir no hay despachadores, o solamente hay personal encargado cuya exposición a COVs es mínima.

Las concentraciones de benceno resultantes de los muestreos instantáneos, que se presentan en la Tabla 5.3, aparece un solo dato por serie y sitio de muestreo, que en el caso de presentarse réplica y/o duplicado, el resultado presentado corresponde al promedio de éstos.

Los resultados de concentración de benceno se encuentran expresados como ppb en volumen, esto equivale a un  $\mu\text{L}$  de benceno por  $\text{m}^3$  de aire. Con base en lo expuesto en el capítulo 4, para la determinación del Riesgo Ambiental, es necesario determinar la concentración de benceno expresada como  $\mu\text{g}$  de benceno por  $\text{m}^3$  aire.

Para determinar la concentración de benceno en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se utilizó la ecuación de gases ideales:

$$PV = nRT$$

Donde:

P= Presión atmosférica.

V= Volumen del gas.

T= Temperatura ambiente.

R= Constante universal de los gases

n = Numero de moles del gas= $\Rightarrow m/P_M$

m = Masa de gas.

$P_M$  = Peso molecular del gas.

Despejando m nos queda:

$$m = \frac{P_M \times P \times V}{R \times T}$$



Para nuestro caso:

$P =$  Presión atmosférica de la ZMCM = 585 mmHg.

$P_M = 78$  mg/mgmol

$R = 82$  ( $\mu\text{L atm}$ )/(mgmol K)

La temperatura se tomará con base en la temperatura ambiente promedio del día correspondiente a la toma de la muestra. En la Tabla 5.4, se presenta la temperatura ambiente para cada día de muestreo.

Con la información de la temperatura ambiente y los datos de concentración de benceno expresados como ppb, (ver Tabla 5.2), calculamos la concentración de benceno expresada como  $\mu\text{g benceno}/\text{m}^3$ . A continuación presentamos como ejemplo del cálculo de la concentración correspondiente al primer dato del muestreo instantáneo de la UH (2.42 ppb)

$$P = 585 \text{ mm Hg} \times \frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ mm Hg}} = 0.770 \text{ atm}$$

$$1 \text{ ppb} = 1 \frac{\mu\text{L}}{\text{m}^3}$$

$$m = \frac{78 \text{ mg}/\text{mgmol} \times 0.770 \text{ atm} \times 2.42 \mu\text{L}}{82 \text{ atm} * \text{mL}/\text{mgmol} * K \times 286 \text{ K}} \times 1000 \mu\text{g} = 6.195 \mu\text{g}$$

Se observa que una concentración de benceno 2.42 ppb de benceno equivale a 6.195  $\mu\text{g}$  de benceno/ $\text{m}^3$ .

Aplicando la misma conversión para cada uno de los valores de concentración de benceno se elaboró la Tabla 5.5.

Los resultados promedio de las concentraciones de benceno encontradas en los sitios de muestreo se presentan en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.3.-** Resultados de la concentración de benceno expresados como ppb, encontrados en los muestreos realizados por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup> y Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>

No de Muestra	DATOS ENCONTRADOS POR SOSA (Sosa 2001) <sup>38</sup>				DATOS ENCONTRADOS POR BUENO (Bueno 2005) <sup>8</sup>
	UH <sup>1</sup>	G <sup>1</sup>	CCA <sup>1</sup>	CCA <sup>2</sup>	CCA <sup>2</sup>
1	2.420	6.494	1.495	1.004	1.428
2	2.047	6.375	2.294	1.065	2.147
3	3.045	7.785	3.022	1.960	1.909
4	2.446	9.151	3.158	1.970	1.953
5	1.976	14.002	2.860	0.718	1.247
6	3.573	4.116	1.981	0.320	0.691
7	0.775	2.598	0.410		0.460
8	2.283	2.770	1.529		0.449
9	1.014	27.589	1.538		0.582
10	3.294	26.590	3.510		0.286
11	3.109	75.974	5.643		0.725
12	2.305	17.702	4.233		1.247
13	1.462	12.619	1.525	1.470	2.072
14	0.776	9.757	0.766	0.541	2.143
15	2.228	41.567	1.668	0.907	1.576
16	3.245	1.648	1.434	0.498	1.192
17	3.059	12.329	2.136	0.491	2.976
18	4.284	5.091	3.759	0.535	2.627
19	2.317	22.060	2.164		2.635
20	3.193	4.304	3.017	1.444	3.935
21	2.043	1.720	1.778	0.753	0.725
22	6.297	4.513	1.923	2.561	1.247
23	5.033	6.001	4.689	1.863	2.072
24	1.338	14.174	1.704	1.301	2.143
25	1.509	1.285	0.979	0.569	1.576
26	5.033	68.635	4.127	2.881	1.192
27	11.637	61.594	5.678	4.324	2.976
28	5.186	91.255	4.915	2.117	2.627
29	9.222	141.647	5.782	2.014	2.635
30	4.454	18.648	4.201	4.510	3.935
31	12.577	28.791	10.337	4.512	1.868
32	5.273	76.839	4.948	2.049	1.908
33	2.691	26.635	2.848	1.419	1.436
PROMEDIO	3.671	25.826	3.092	1.684	1.776

<sup>1</sup>. Muestreos instantáneos

<sup>2</sup> Muestreos integrados de 24 horas

**Tabla 5.4** Temperatura ambiente promedio de los días de muestreo

No de Muestra	MUESTREOS REALIZADOS POR SOSA (Sosa 2001) <sup>38</sup>	MUESTREOS REALIZADOS POR BUENO (Bueno 2005) <sup>8</sup>
	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)
1	286	291
2	286	292
3	286	294
4	286	289
5	286	290
6	282	293
7	285	291
8	283	293
9	286	294
10	285	294
11	285	295
12	280	293
13	285	291
14	286	292
15	286	291
16	286	291
17	285	291
18	284	291
19	283	292
20	283	292
21	283	291
22	283	291
23	284	290
24	282	289
25	279	289
26	282	289
27	280	290
28	278	290
29	278	290
30	281	287
31	281	292
32	282	289
33	283	290

**Tabla 5.5.-** Resultados de concentración de benceno expresados en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de tres sitios de la ZMCM

No de Muestra	DATOS ENCONTRADOS POR SOSA (Sosa 2001) <sup>38</sup>				DATOS ENCONTRADOS POR BUENO (Buena 2005) <sup>8</sup>
	UH <sup>1</sup>	GAS <sup>1</sup>	CCA <sup>1</sup>	CCA <sup>2</sup>	CCA <sup>2</sup>
1	6.195	16.626	3.827	2.570	3.591
2	5.241	16.321	5.873	2.727	5.385
3	7.796	19.931	7.737	5.018	4.758
4	6.262	23.427	8.085	5.043	4.940
5	5.059	35.847	7.322	1.838	3.152
6	9.277	10.686	5.143	0.831	1.729
7	1.991	6.676	1.053		1.157
8	5.907	7.166	3.956		1.121
9	2.596	70.631	3.937		1.449
10	8.463	68.311	9.017		0.712
11	7.987	195.184	14.497		1.799
12	6.027	46.291	11.069		3.115
13	3.756	32.420	3.918	3.777	5.218
14	1.987	24.980	1.961	1.385	5.371
15	5.704	106.416	4.270	2.322	3.962
16	8.308	4.220	3.671	1.275	2.998
17	7.859	31.674	5.488	1.261	7.482
18	11.045	13.125	9.691	1.379	6.602
19	5.995	57.074	5.599		6.608
20	8.261	11.136	7.806	3.736	9.862
21	5.286	4.449	4.600	1.948	1.823
22	16.292	11.675	4.975	6.626	3.136
23	12.976	15.471	12.089	4.803	5.229
24	3.474	36.802	4.424	3.378	5.427
25	3.960	3.371	2.569	1.493	3.991
26	13.068	178.205	10.715	7.480	3.018
27	30.430	161.065	14.848	11.307	7.510
28	13.659	240.345	12.945	5.576	6.627
29	24.289	373.066	15.228	5.304	6.659
30	11.606	48.590	10.946	11.751	10.034
31	32.771	75.019	26.935	11.757	4.678
32	13.691	199.505	12.847	5.320	4.828
33	6.962	68.912	7.368	3.671	3.624
PROMEDIO	9.520	67.110	8.012	4.368	4.473

<sup>1</sup> Muestras instantáneas

<sup>2</sup> Muestras integradas de 24 horas

**Tabla 5.6.-** Concentraciones promedio encontradas durante los muestreos

Sitios de muestreo	Benceno (ppb)	Benceno ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
UH <sup>1</sup> (2001)	3.671	9.520
GAS <sup>1</sup> (2001)	25.826	67.110
CCA <sup>1</sup> (2001)	3.092	8.012
CCA <sup>2</sup> (2001)	1.684	4.368
CCA <sup>2</sup> (2005)	1.776	4.473

<sup>1</sup>. Muestreos instantáneos

<sup>2</sup> Muestreos integrados de 24 horas

### 5.3 Determinación del riesgo ambiental por inhalación de benceno

Con base en los resultados de concentración de benceno presentados en 5.2 y aplicando la metodología propuesta en 4.2, se realizará la determinación del riesgo ambiental para cada una de las tres zonas seleccionadas.

Para determinar la cantidad de benceno absorbida de por vida (mg), debemos considerar el tiempo de contacto, el cual varía de acuerdo con el sitio de estudio, para cada caso se determinará el tiempo de contacto. Para la determinación de la dosis inhalada individual total, para el periodo de vida se tomaron las siguientes consideraciones:

- En el caso de sitio: Unidad Habitacional (UH), se consideró la concentración promedio de benceno determinada en dicho sitio para todo el tiempo de exposición, durante todo el tiempo total de esperanza de vida.
- En el caso de los sitios: Gasolinera (G) y Centro de Ciencia de la Atmósfera (CCA), por tratarse de lugares donde la población únicamente se encuentra en periodos laborales, se consideró la concentración de cada uno de los sitios por el tiempo de exposición, mas la diferencia del tiempo total de esperanza de vida por una concentración de benceno equivalente al valor promedio encontrado en la UH, es decir como si vivieran en la Unidad Habitacional (UH).
- De acuerdo con la información que maneja la EPA en la guía para la elaboración estudios de evaluación de riesgo ambiental, se considera para los contaminantes cuya vía de acceso es por inhalación, que el volumen de aire respirado por día, para el ser humano es de  $20 \text{ m}^3$  (EPA 1995)<sup>21</sup>.
- De acuerdo con la información que maneja la EPA en la guía para la elaboración estudios de evaluación de riesgo ambiental, cuando los contactos son, constantes durante el período de por vida, como la ingesta de agua o por aire ambiente, se puede utilizar el valor de peso promedio de la población o utilizar

un valor de 70 Kg, como la masa corporal, por lo que para el presente estudio se consideró un valor de 70 Kg (EPA 1995)<sup>21</sup>.

Para la realización de la presente memoria de cálculo, se consideraron los valores promedio de concentración de benceno obtenidos para cada una de las zonas de estudio.

### 5.3.1 Determinación del Riesgo Ambiental por Inhalación de benceno en Unidad habitacional (UH)

- **Cuantificación de la exposición al benceno (Es)**

Concentración promedio de benceno =  $9.520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Duración de la exposición

En el caso de sitio: Unidad Habitacional (UH), se consideró la concentración promedio de benceno determinada en dicho sitio para todo el tiempo de exposición, durante todo el tiempo total de esperanza de vida.

Tiempo de exposición diario = 24 hr

Esperanza de vida = 70 años

$$\text{Esperanza de vida} = 70 \text{ años} \times 365.25 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 25,567.5 \text{ días}$$

$$\text{Tiempo total de exposición} = \text{Tiempo de exposición (hr)} \times \frac{1}{24 \text{ hr}} \times \text{Esperanza de vida (días)}$$

$$\text{Tiempo total de exposición} = 24 \text{ hr} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr}} \times 25,567 \text{ días} = 25,567.5 \text{ días}$$

- **Taza de contacto**

$$\text{Volumen de aire respirado diario} = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$Es = C \left( \frac{\text{mg benceno}}{\text{m}^3} \right) \times D(\text{días}) \times T \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$Es = 9.52 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ mg}}{1000 \mu\text{g}} \times 25,567.5 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,868.3 \text{ mg}$$

- **Dosis suministrada ( $D_S$ )**

$$D_S = \frac{Es}{M}$$

Donde:

Es = Exposición (mg)

M = Masa corporal (kg)

M = 70 kg

$$D_S = \frac{4,868.3 \text{ mg}}{70 \text{ kg}} = 69.55 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

- **Dosis absorbida ( $D_A$ )**

$$D_A = D_S \times F_A$$

Donde:

$$D_S = \text{Dosis Suministrada} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$F_A$  = Factor de absorción

El factor de absorción para el riesgo ambiental por inhalación de benceno se considera de uno (100% de la  $D_S$  se absorbe por el cuerpo) (EPA 1995)<sup>21</sup>.

$$D_A = 69.55 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 1$$

- **Dosis diaria vitalicia promedio (DDVP)**

$$DDVP = \frac{D_A}{Ev}$$

Donde:

$$DDVP = \text{Dosis diaria vitalicia promedio} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \right)$$

$$D_A = \text{Dosis absorbida} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

Ev = Esperanza de vida (días)

La Esperanza de vida = 70 años.

$$Ev = 70 \text{ años} \times 365.25 \text{ días/año} = 25,567.5 \text{ días}$$

$$DDVP = \frac{69.55 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}}{25,567.5 \text{ días}} = 2.72 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}}$$

- **Riesgo individual de por vida (Ri)**

$$Ri = DDVP \times DdR$$

Donde:

Ri = Riesgo individual de por vida

DDVP = Dosis diaria vitalicia promedio

DdR = Dosis de referencia

El valor de DdR para el benceno por vía inhalada es de  $2.90 \times 10^{-2}$  (1/(mg/(kg día)))<sup>19</sup>.

$$Ri = 2.72 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \times 2.90 \times 10^{-2} \frac{\text{kg} \cdot \text{día}}{\text{mg}} = 7.89 \times 10^{-5}$$

$$Ri = 7.89 \times 10^{-5} \text{ en 70 años}$$

- **Riesgo de exposición de la población (Rp)**

$$Rp = Ri \times Pe$$

Donde:

Ri = Riesgo individual de por vida

Pe = Población expuesta ( No. de habitantes )

Definición del escenario físico

No. de edificios = 39

No. de departamentos por piso = 4

No. de pisos por edificio = 5

Cuantificación de la población:

Se considero una ocupación por departamento de:

No. de personas por departamento = 5

$$Pe = 39 \times 4 \times 5 \times 5 = 3,900$$

$$Rp = 7.89 \times 10^{-5} \times 3,900 = 3.08 \times 10^{-1}$$

$$Rp = 3.08 \times 10^{-1} \text{ casos en 70 años}$$



### 5.3.2 Determinación del Riesgo Ambiental por Inhalación de benceno en Gasolinera (G)

- **Cuantificación de la exposición al benceno (Es)**

Concentración promedio de benceno en G =  $67.110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Si vivieran en la UH.

Concentración de benceno fuera de G =  $9.520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Duración de la exposición:

Centro de despacho de gasolina con un total de 6 personas laborando. Se considera un horario de trabajo de 8 hr al día, con una jornada laboral de 6 días semana. Se estima una esperanza de vida laboral de 30 años.

Tiempo de exposición en el sitio (G)

Jornada laboral diaria = 8 hr/día

Número de días semana = 6

Jornada laboral por semana =  $8 * 6 = 48 \text{ hr/semana}$

Número de semanas año =  $365/7 \text{ semanas/año}$

Esperanza de vida laboral = 30 años

Tiempo de exposición en el sitio = Jornada laboral semana \* Esperanza de vida laboral

Tiempo de exposición en el sitio. =  $48 \text{ hr/semana} * (365/7) \text{ semanas} * 30 \text{ años}/24\text{hr} = 3,128.6 \text{ días}$

Esperanza de vida = 70 años

1 año = 365.25 días

Esperanza de vida =  $70 \text{ años} * 365.25 \text{ días/año} = 25,567.5 \text{ días}$

Tiempo de exposición fuera del sitio (G)

Tiempo de exposición fuera del sitio = Esperanza de vida - tiempo de exposición dentro del sitio.

Tiempo de exposición fuera del sitio =  $25,567.5 \text{ días} - 3,128.6 \text{ días} = 22,438.9 \text{ días}$

Taza de contacto

Volumen de aire respirado diario =  $20 \text{ m}^3/\text{día}$ .

Exposición al benceno total = Exposición al benceno en G + Exposición al benceno fuera de G

Exposición al benceno en G

$$Es_1 = C_1 \left( \frac{\text{mg benceno}}{\text{m}^3} \right) \times D_1 (\text{días}) \times T \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$Es_1 = 67.11 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{mg}}{1000\mu\text{g}} \times 3,128.6 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,199.2 \text{ mg}$$

Exposición al benceno fuera de G (si vivieran en la unidad habitacional UH)

$$Es_2 = 9.52 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ mg}}{1000 \mu\text{g}} \times 22,438.9 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,272.6 \text{ mg}$$

$$Es = Es_1 + Es_2$$

$$Es = 4,199.2 \text{ mg} + 4,272.4 \text{ mg} = 8,471.7 \text{ mg}$$

- **Dosis suministrada ( $D_s$ )**

$$D_s = \frac{Es}{M}$$

Donde:

Es = Exposición (mg)

M = Masa corporal (kg)

M = 70 kg

$$D_s = \frac{8,471.6 \text{ mg}}{70 \text{ kg}} = 121.02 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

- **Dosis absorbida ( $D_A$ )**

$$D_A = D_s \times F_A$$

Donde:

$$D_s = \text{Dosis Suministrada} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$F_A$  = Factor de absorción

El factor de absorción para el riesgo ambiental por inhalación de benceno se considera de uno (100% de la  $D_s$  se absorbe por el cuerpo) (EPA 1995)<sup>21</sup>.

$$D_A = 121.02 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 1$$

- **Dosis diaria vitalicia promedio (DDVP)**

$$DDVP = \frac{D_A}{E_v}$$

Donde:

$$DDVP = \text{Dosis diaria vitalicia promedio} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \right)$$

$$D_A = \text{Dosis absorbida} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$E_v$  = Esperanza de vida (días)

Esperanza de vida = 70 años

$$E_v = 70 \text{ años} \times 365.4 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 25,567.5 \text{ días}$$

$$DDVP = \frac{121.02 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}}{25,567.5 \text{ días}} = 4.73 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}}$$

- **Riesgo individual de por vida (Ri)**

$$R_i = DDVP \times DdR$$

Donde:

$R_i$  = Riesgo individual de por vida

DDVP = Dosis diaria vitalicia promedio

DdR = Dosis de referencia

El valor de DdR para el benceno por vía inhalada es de  $2.90 \text{ E-}02 \text{ (1/(mg/(kg día))}^{19}$ .

$$R_i = 4.73 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \times 2.90 \times 10^{-2} \frac{\text{kg} \cdot \text{día}}{\text{mg}} = 13.73 \times 10^{-5}$$

$$R_i = 13.73 \times 10^{-5} \text{ en 70 años}$$

- **Riesgo de exposición de la población (Rp)**

$$R_p = R_i \times P_e$$

Donde:

$R_i$  = Riesgo individual de por vida

Pe = Población expuesta ( No. de habitantes )

Calculo de población expuesta:

Despachadores x turno = 6

No. De turnos al día = 2

$$Pe = 6 \times 2 = 12$$

$$Rp = 13.73 \times 10^{-5} \times 12 = 1.65 \times 10^{-3}$$

$$Rp = 1.65 \times 10^{-3} \text{ casos en 70 años}$$

### 5.3.3 Determinación del Riesgo Ambiental por Inhalación de benceno en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)

5.3.3.1.- Con base en los resultados de benceno de los muestreos instantáneos realizados en CCA por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>.

- **Cuantificación de la exposición al benceno (Es).**

Concentración promedio de benceno en CCA =  $8.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Si vivieran en la UH.

Concentración de benceno fuera de CCA =  $9.520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Duración de la exposición:

Tiempo de exposición en el sitio (CCA)

Jornada laboral diaria = 8 hr/día

Número de días semana = 5

Jornada laboral por semana =  $8 * 5 = 40 \text{ hr/semana}$

Número de semanas año =  $365/7 \text{ semanas/año}$

Esperanza de vida laboral = 30 años

Tiempo de exposición en el sitio = Jornada laboral semana \* Esperanza de vida laboral

Tiempo de exposición en el sitio. =  $40 \text{ hr/semana} * (365/7) \text{ semanas} * 30 \text{ años}/24\text{hr} = 2,607.1 \text{ días}$

Esperanza de vida = 70 años

$$1 \text{ año} = 365.25 \text{ días}$$

$$\text{Esperanza de vida} = 70 \text{ años} \times 365.25 \text{ días/año} = 25,567.5 \text{ días}$$

Tiempo de exposición fuera del sitio (CCA)

Tiempo de exposición fuera del sitio = Esperanza de vida - tiempo de exposición dentro del sitio.

$$\text{Tiempo de exposición fuera del sitio} = 25,567.5 \text{ días} - 2,607.1 \text{ días} = 22,960.4 \text{ días}$$

Taza de contacto

$$\text{Volumen de aire respirado diario} = 20 \text{ m}^3/\text{día}$$

Exposición al benceno total = Exposición al benceno en CCA + Exposición al benceno fuera de CCA

Exposición al benceno en CCA

$$Es_1 = C_1 \left( \frac{\text{mg benceno}}{\text{m}^3} \right) \times D_1 (\text{días}) \times T \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$Es_1 = 8.012 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{mg}}{1000\mu\text{g}} \times 2,607.1 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 417.8 \text{ mg}$$

Exposición al benceno fuera de CCA (si vivieran en la unidad habitacional UH)

$$Es_2 = 9.52 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ mg}}{1000 \mu\text{g}} \times 22,438.9 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,371.9 \text{ mg}$$

$$Es = Es_1 + Es_2$$

$$Es = 417.8 \text{ mg} + 4,371.9 \text{ mg} = 4,789.7 \text{ mg}$$

- **Dosis suministrada ( $D_s$ )**

$$D_s = \frac{Es}{M}$$

Donde:

Es = Exposición (mg)

M = Masa corporal (kg)

M = 70 kg

$$D_s = \frac{4,789.7 \text{ mg}}{70 \text{ kg}} = 68.42 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

- **Dosis absorbida ( $D_A$ )**

$$D_A = D_s \times F_A$$

Donde:

$$D_s = \text{Dosis Suministrada} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$F_A$  = Factor de absorción

El factor de absorción para el riesgo ambiental por inhalación de benceno se considera de uno (100% de la  $D_s$  se absorbe por el cuerpo) (EPA 1995)<sup>21</sup>.

$$D_A = 68.42 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 1$$

- **Dosis diaria vitalicia promedio (DDVP)**

$$DDVP = \frac{D_A}{E_v}$$

Donde:

$$DDVP = \text{Dosis diaria vitalicia promedio} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg} * \text{día}} \right)$$

$$D_A = \text{Dosis suministrada} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$E_v$  = Esperanza de vida (días)

La expectativa de vida que se consideró para el estudio es de 70 años.

$$E_v = 70 \text{ años} \times 365.25 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 25,567.5 \text{ días}$$

$$DDVP = \frac{68.42 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}}{25,567.5 \text{ días}} = 2.68 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} * \text{día}}$$

- **Riesgo individual de por vida ( $R_i$ )**

$$R_i = DDVP \times DdR$$

Donde:

Ri = Riesgo individual de por vida

DDVP = Dosis diaria vitalicia promedio

DdR = Dosis de referencia

El valor de DdR para el benceno por vía inhalada es de  $2.90 \times 10^{-2}$  (1/(mg/(kg día)))<sup>19</sup>.

$$Ri = 2.68 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \times 2.90 \times 10^{-2} \frac{\text{kg} \cdot \text{día}}{\text{mg}} = 7.76 \times 10^{-5}$$

$Ri = 7.76 \times 10^{-5}$  en 70 años

- **Riesgo de exposición de la población (Rp)**

$$Rp = Ri \times Pe$$

Donde:

Ri = Riesgo individual de por vida

Pe = Población expuesta ( No. de habitantes )

Calculo del número de personas:

Total de personas que laboran en el CCA = 60

Pe = 60

$$Rp = 7.76 \times 10^{-5} \times 60 = 4.66 \times 10^{-3}$$

$Rp = 4.66 \times 10^{-3}$  casos en 70 años

5.3.3.2.- Con base en los resultados benceno de los muestreos integrados de 24 horas realizados por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>.

- **Cuantificación de la exposición al benceno (Es).**

Concentración promedio de benceno en CCA =  $4.368 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Si vivieran en la UH.

Concentración de benceno fuera de CCA =  $9.520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Duración de la exposición:

Tiempo de exposición en el sitio (CCA)

Jornada laboral diaria = 8 hr/día

Número de días semana = 5

Jornada laboral por semana =  $8 * 5 = 40$  hr/semana

Número de semanas año =  $365/7$  semanas/año

Esperanza de vida laboral = 30 años

Tiempo de exposición en el sitio = Jornada laboral semana \* Esperanza de vida laboral

Tiempo de exposición en el sitio. =  $40$  hr/semana \*  $(365/7)$  semanas \*  $30$  años/ $24$ hr =  $2,607.1$  días

Esperanza de vida = 70 años

1 año =  $365.25$  días

Esperanza de vida =  $70$  años x  $365.25$  días/año =  $25,567.5$  días

Tiempo de exposición fuera del sitio (CCA)

Tiempo de exposición fuera del sitio = Esperanza de vida - tiempo de exposición dentro del sitio.

Tiempo de exposición fuera del sitio =  $25,567.5$  días -  $2,607.1$  días =  $22,960.4$  días

Taza de contacto

Volumen de aire respirado diario =  $20$  m<sup>3</sup>/día

Exposición al benceno total = Exposición al benceno en CCA + Exposición al benceno fuera de CCA

Exposición al benceno en CCA

$$Es_1 = C_1 \left( \frac{\text{mg benceno}}{\text{m}^3} \right) \times D_1 (\text{días}) \times T \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$Es_1 = 4.368 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{mg}}{1000\mu\text{g}} \times 2,607.1 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 227.8 \text{ mg}$$

Exposición al benceno fuera de CCA (si vivieran en la unidad habitacional UH)

$$Es_2 = 9.52 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{mg}}{1000\mu\text{g}} \times 22,960.4 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,371.9 \text{ mg}$$

$$Es = Es_1 + Es_2$$



$$Es = 227.8 \text{ mg} + 4,371.9 \text{ mg} = 4,599.7 \text{ mg}$$

- **Dosis suministrada ( $D_s$ )**

$$D_s = \frac{Es}{M}$$

Donde:

Es = Exposición (mg)

M = Masa corporal (kg)

M = 70 kg

$$D_s = \frac{4,599.7 \text{ mg}}{70 \text{ kg}} = 65.71 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

- **Dosis absorbida ( $D_A$ )**

$$D_A = D_s \times F_A$$

Donde:

$$D_s = \text{Dosis Suministrada} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$F_A$  = Factor de absorción

El factor de absorción para el riesgo ambiental por inhalación de benceno se considera de uno (100% de la  $D_s$  se absorbe por el cuerpo) (EPA 1995)<sup>21</sup>.

$$D_A = 65.71 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 1$$

- **Dosis diaria vitalicia promedio (DDVP)**

$$DDVP = \frac{D_A}{E_v}$$

Donde:

$$DDVP = \text{Dosis diaria vitalicia promedio} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg} * \text{día}} \right)$$

$$D_A = \text{Dosis absorbida} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$E_v$  = Esperanza de vida (días)

Esperanza de vida = 70 años

$$E_v = 70 \text{ años} \times 365.25 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 25,567.5 \text{ días}$$

$$DDVP = \frac{65.71 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}}{25,567.5 \text{ días}} = 2.57 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}}$$

- **Riesgo individual de por vida (Ri)**

$$R_i = DDVP \times DdR$$

Donde:

Ri = Riesgo individual de por vida

DDVP = Dosis diaria vitalicia promedio

DdR = Dosis de referencia

El valor de DdR para el benceno por vía inhalada es de  $2.90 \text{ E-}02 \text{ (1/(mg/(kg día))}^{19}$ .

$$R_i = 2.57 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \times 2.90 \times 10^{-2} \frac{\text{kg} \cdot \text{día}}{\text{mg}} = 7.45 \times 10^{-5}$$

$$R_i = 7.45 \times 10^{-5} \text{ en 70 años}$$

- **Riesgo de exposición de la población (Rp)**

$$R_p = R_i \times P_e$$

Donde:

Ri = Riesgo individual de por vida

Pe = Población expuesta ( No. de habitantes )

Calculo del número de personas:

*Total de personas que laboran en el CCA = 60*

$$P_e = 60$$

$$R_p = 7.45 \times 10^{-5} \times 60 = 4.47 \times 10^{-3}$$

$$R_p = 4.47 \times 10^{-3} \text{ casos en 70 años}$$

5.3.4.3.- Con base en los resultados benceno de los muestreos integrados de 24 horas realizados por Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>.

- **Cuantificación de la exposición al benceno (Es).**

Concentración promedio de benceno en CCA =  $4.473\mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Si vivieran en la UH.

Concentración de benceno fuera de CCA =  $9.520\mu\text{g}/\text{m}^3$ , (ver Tabla 5.6)

Duración de la exposición:

Tiempo de exposición en el sitio (CCA)

Jornada laboral diaria = 8 hr/día

Número de días semana = 5

Jornada laboral por semana =  $8 * 5 = 40$  hr/semana

Número de semanas año =  $365/7$  semanas/año

Esperanza de vida laboral = 30 años

Tiempo de exposición en el sitio = Jornada laboral semana \* Esperanza de vida laboral

Tiempo de exposición en el sitio. =  $40$  hr/semana \*  $(365/7)$  semanas \*  $30$  años/ $24$ hr =  $2,607.1$  días

Esperanza de vida = 70 años

1 año =  $365.25$  días

Esperanza de vida =  $70$  años x  $365.25$  días/año =  $25,567.5$  días

Tiempo de exposición fuera del sitio (CCA)

Tiempo de exposición fuera del sitio = Esperanza de vida – tiempo de exposición dentro del sitio.

Tiempo de exposición fuera del sitio =  $25,567.5$  días –  $2,607.1$  días =  $22,960.4$  días

Taza de contacto

Volumen de aire respirado diario =  $20$  m<sup>3</sup>/día

Exposición al benceno total = Exposición al benceno en CCA + Exposición al benceno fuera de CCA

Exposición al benceno en CCA

$$Es_1 = C_1 \left( \frac{\text{mg benceno}}{\text{m}^3} \right) \times D_1(\text{días}) \times T \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$Es_1 = 4.473 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{mg}}{1000\mu\text{g}} \times 2,607.1 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 233.2 \text{ mg}$$

Exposición al benceno fuera de CCA (si vivieran en la unidad habitacional UH)

$$Es_2 = 9.52 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ mg}}{1000 \mu\text{g}} \times 22,960.4 \text{ días} \times 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,371.9 \text{ mg}$$

$$Es = Es_1 + Es_2$$

$$Es = 233.2 \text{ mg} + 4,371.9 \text{ mg} = 4,605.1 \text{ mg}$$

- **Dosis suministrada ( $D_s$ )**

$$D_s = \frac{Es}{M}$$

Donde:

Es = Exposición (mg)

M = Masa corporal (kg)

M = 70 kg

$$D_s = \frac{4,605.1 \text{ mg}}{70 \text{ kg}} = 65.79 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}$$

- **Dosis absorbida ( $D_A$ )**

$$D_A = D_s \times F_A$$

Donde:

$$D_s = \text{Dosis Suministrada} \left( \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right)$$

$F_A$  = Factor de absorción

El factor de absorción para el riesgo ambiental por inhalación de benceno se considera de uno (100% de la  $D_s$  se absorbe por el cuerpo) (EPA 1995)<sup>21</sup>.

$$D_A = 65.79 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \times 1$$

- **Dosis diaria vitalicia promedio (DDVP)**

$$DDVP = \frac{D_s}{E_v}$$

Donde:

DDVP = Dosis diaria vitalicia promedio  $\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}\cdot\text{día}}\right)$

$D_A$  = Dosis absorbida  $\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)$

$E_v$  = Esperanza de vida (días)

Esperanza de vida = 70 años

$$E_v = 70 \text{ años} \times 365.25 \frac{\text{días}}{\text{año}} = 25,567.5 \text{ días}$$

$$DDVP = \frac{65.79 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}}{25,567.5 \text{ días}} = 2.57 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}}$$

- **Riesgo individual de por vida (Ri)**

$$R_i = DDVP \times DdR$$

Donde:

$R_i$  = Riesgo individual de por vida

DDVP = Dosis diaria vitalicia promedio

DdR = Dosis de referencia

El valor de DdR para el benceno por vía inhalada es de  $2.90 \text{ E-}02 \text{ (1/(mg/(kg día))}^{19}$ .

$$R_i = 2.57 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg} \cdot \text{día}} \times 2.90 \times 10^{-2} \frac{\text{kg} \cdot \text{día}}{\text{mg}} = 7.46 \times 10^{-5}$$

$R_i = 7.46 \times 10^{-5}$  en 70 años

- **Riesgo de exposición de la población (Rp)**

$$R_p = R_i \times P_e$$

Donde:

$R_i$  = Riesgo individual de por vida

$P_e$  = Población expuesta ( No. de habitantes )

*Total de personas que laboran en el CCA = 60*

$$P_e = 60$$

$$R_p = 7.46 \times 10^{-5} \times 60 = 4.48 \times 10^{-3}$$

$$R_p = 4.48 \times 10^{-3} \text{ casos en 70 años.}$$

## 6 RESULTADOS

Con base en la aplicación de la metodología para la Evaluación de Riesgos Ambientales para cada uno de los sitios de estudio, y considerando las concentraciones promedio de benceno determinadas por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup> y Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>, a continuación se presenta una Tabla resumen con los resultados obtenidos en el capítulo 5:

**Tabla 6.1.-** Resultados promedio de las concentraciones de benceno y de Evaluación de Riesgo Ambiental.

Sitios de muestreo	Concentración de benceno (ppb)	Concentración de benceno ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Riesgo Individual Esperanza de vida 70 años	Riesgo Población No. de Casos en 70 años
Unidad habitacional (UH) <sup>a</sup>	3.671	9.520	7.89E-05	3.08E-01
Gasolinera (G) <sup>a</sup>	25.826	67.110	1.37E-04	1.65E-03
Centro de la ciencias de la atmósfera (CCA) <sup>a</sup>	3.092	8.012	7.76E-05	4.66E-03
Centro de la ciencias de la atmósfera (CCA) <sup>b</sup>	1.684	4.368	7.45E-05	4.47E-03
Centro de la ciencias de la atmósfera (CCA) <sup>c</sup>	1.389	4.473	7.46E-05	4.48E-03

Notas:

- a) Con base en los muestreos instantáneos realizados por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>
- b) Con base en los muestreos integrados de 24 hr. Realizados por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>.
- c) Con base en los muestreos compuesto realizados por Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>.

A fin de completar la información, anteriormente presentada, se realizó la Evaluación de Riesgos Ambientales de los sitios de estudio, con base en cada uno de los valores de concentraciones determinadas por Sosa y Bueno, en las Tablas 6.2 a 6.6 se los resultados obtenidos y en las Figuras 6.1 a 6.6 se presentan los resultados en forma gráfica.

**Tabla 6.2.-** Tabla de resultados de UH, muestreos instantáneos por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>

SERIE	CONCENTRACION DE BENCENO		Riesgo Individual Esperanza de vida 70 años	Riesgo Población No. de Casos en 70 años
	(ppb)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
1	2.420	6.195	5.13E-05	2.00E-01
2	2.047	5.241	4.34E-05	1.69E-01
3	3.045	7.796	6.46E-05	2.52E-01
4	2.446	6.262	5.19E-05	2.02E-01
5	1.976	5.059	4.19E-05	1.63E-01
6	3.573	9.277	7.69E-05	3.00E-01
7	0.775	1.991	1.65E-05	6.43E-02
8	2.283	5.907	4.89E-05	1.91E-01
9	1.014	2.596	2.15E-05	8.39E-02
10	3.294	8.463	7.01E-05	2.73E-01
11	3.109	7.987	6.62E-05	2.58E-01
12	2.305	6.027	4.99E-05	1.95E-01
13	1.462	3.756	3.11E-05	1.21E-01
14	0.776	1.987	1.65E-05	6.42E-02
15	2.228	5.704	4.73E-05	1.84E-01
16	3.245	8.308	6.88E-05	2.68E-01
17	3.059	7.859	6.51E-05	2.54E-01
18	4.284	11.045	9.15E-05	3.57E-01
19	2.317	5.995	4.97E-05	1.94E-01
20	3.193	8.261	6.84E-05	2.67E-01
21	2.043	5.286	4.38E-05	1.71E-01
22	6.297	16.292	1.35E-04	5.26E-01
23	5.033	12.976	1.08E-04	4.19E-01
24	1.338	3.474	2.88E-05	1.12E-01
25	1.509	3.960	3.28E-05	1.28E-01
26	5.033	13.068	1.08E-04	4.22E-01
27	11.637	30.430	2.52E-04	9.83E-01
28	5.186	13.659	1.13E-04	4.41E-01
29	9.222	24.289	2.01E-04	7.85E-01
30	4.454	11.606	9.62E-05	3.75E-01
31	12.577	32.771	2.72E-04	1.06E+00
32	5.273	13.691	1.13E-04	4.42E-01
33	2.691	6.962	5.77E-05	2.25E-01



**Tabla 6.3.-** Tabla de resultados de G, muestreos instantáneos por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>

SERIE	CONCENTRACION DE BENCENO		Riesgo Individual Esperanza de vida 70 años	Riesgo Población No. de Casos en 70 años
	(ppb)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
1	6.494	16.626	8.61E-05	1.03E-03
2	6.375	16.321	8.58E-05	1.03E-03
3	7.785	19.931	8.94E-05	1.07E-03
4	9.151	23.427	9.30E-05	1.12E-03
5	14.002	35.847	1.06E-04	1.27E-03
6	4.116	10.686	8.01E-05	9.61E-04
7	2.598	6.676	7.60E-05	9.12E-04
8	2.770	7.166	7.65E-05	9.18E-04
9	27.589	70.631	1.41E-04	1.69E-03
10	26.590	68.311	1.38E-04	1.66E-03
11	75.974	195.184	2.67E-04	3.21E-03
12	17.702	46.291	1.16E-04	1.39E-03
13	12.619	32.420	1.02E-04	1.23E-03
14	9.757	24.980	9.46E-05	1.13E-03
15	41.567	106.416	1.77E-04	2.13E-03
16	1.648	4.220	7.35E-05	8.82E-04
17	12.329	31.674	1.01E-04	1.22E-03
18	5.091	13.125	8.25E-05	9.90E-04
19	22.060	57.074	1.27E-04	1.53E-03
20	4.304	11.136	8.05E-05	9.66E-04
21	1.720	4.449	7.37E-05	8.85E-04
22	4.513	11.675	8.11E-05	9.73E-04
23	6.001	15.471	8.49E-05	1.02E-03
24	14.174	36.802	1.07E-04	1.28E-03
25	1.285	3.371	7.26E-05	8.72E-04
26	68.635	178.205	2.50E-04	3.00E-03
27	61.594	161.065	2.33E-04	2.79E-03
28	91.255	240.345	3.13E-04	3.75E-03
29	141.647	373.066	4.47E-04	5.37E-03
30	18.648	48.590	1.18E-04	1.42E-03
31	28.791	75.019	1.45E-04	1.74E-03
32	76.839	199.505	2.72E-04	3.26E-03
33	26.635	68.912	1.39E-04	1.67E-03

**Tabla 6.4.-** Tabla de resultados de CCA, muestreos instantáneos por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>

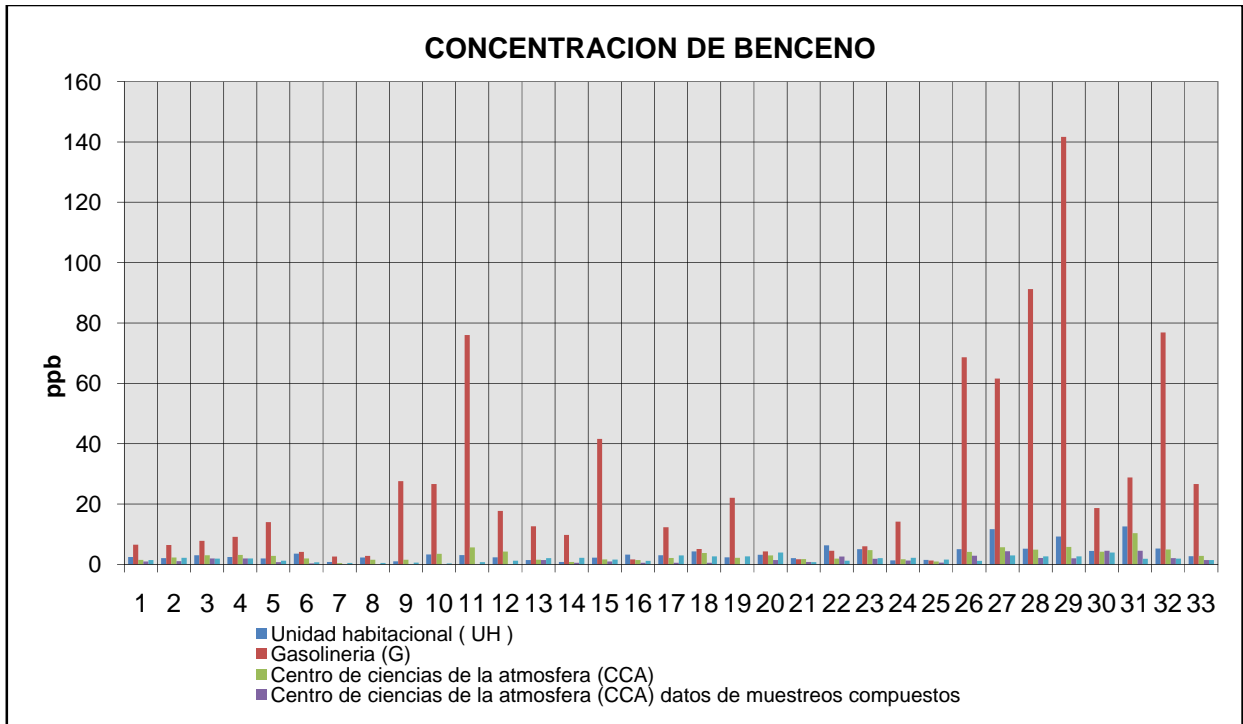
SERIE	CONCENTRACION DE BENCENO		Riesgo Individual Esperanza de vida 70 años	Riesgo Población No. de Casos en 70 años
	(ppb)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
1	1.495	3.591	7.41E-05	4.44E-03
2	2.294	5.385	7.58E-05	4.55E-03
3	3.022	4.758	7.74E-05	4.64E-03
4	3.158	4.940	7.77E-05	4.66E-03
5	2.860	3.152	7.70E-05	4.62E-03
6	1.981	1.729	7.52E-05	4.51E-03
7	0.410	1.157	7.17E-05	4.30E-03
8	1.529	1.121	7.42E-05	4.45E-03
9	1.538	1.449	7.42E-05	4.45E-03
10	3.510	0.712	7.85E-05	4.71E-03
11	5.643	1.799	8.31E-05	4.99E-03
12	4.233	3.115	8.02E-05	4.81E-03
13	1.525	5.218	7.42E-05	4.45E-03
14	0.766	5.371	7.25E-05	4.35E-03
15	1.668	3.962	7.44E-05	4.47E-03
16	1.434	2.998	7.39E-05	4.44E-03
17	2.136	7.482	7.55E-05	4.53E-03
18	3.759	6.602	7.90E-05	4.74E-03
19	2.164	6.608	7.56E-05	4.53E-03
20	3.017	9.862	7.74E-05	4.65E-03
21	1.778	1.823	7.47E-05	4.48E-03
22	1.923	3.136	7.50E-05	4.50E-03
23	4.689	5.229	8.11E-05	4.86E-03
24	1.704	5.427	7.46E-05	4.47E-03
25	0.979	3.991	7.30E-05	4.38E-03
26	4.127	3.018	7.99E-05	4.79E-03
27	5.678	7.510	8.34E-05	5.00E-03
28	4.915	6.627	8.18E-05	4.91E-03
29	5.782	6.659	8.37E-05	5.02E-03
30	4.201	10.034	8.01E-05	4.81E-03
31	10.337	4.678	9.36E-05	5.62E-03
32	4.948	4.828	8.17E-05	4.90E-03
33	2.848	3.624	7.71E-05	4.62E-03

**Tabla 6.5.-** Tabla de resultados de CCA, muestreos integrados de 24 horas por Sosa (Sosa 2001)<sup>38</sup>

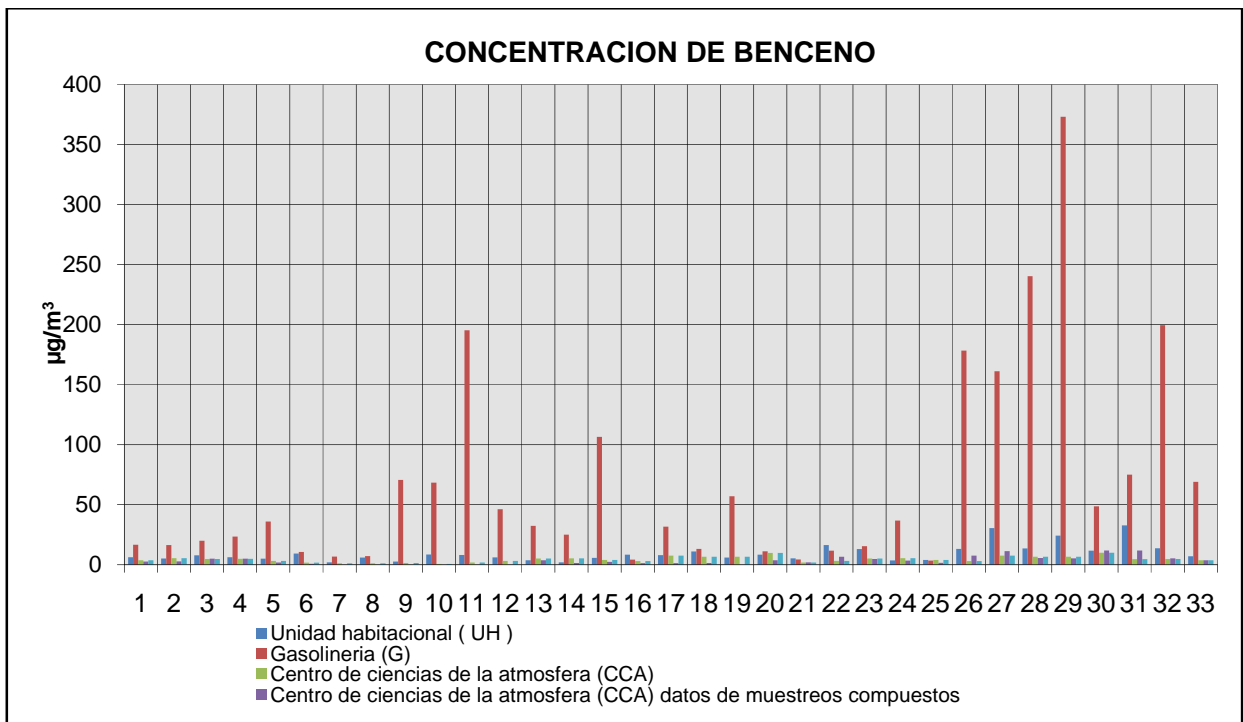
SERIE	CONCENTRACION DE BENCENO		Riesgo Individual Esperanza de vida 70 años	Riesgo Población No. de Casos en 70 años
	(ppb)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
1	1.004	2.570	7.30E-05	4.38E-03
2	1.065	2.727	7.31E-05	4.39E-03
3	1.960	5.018	7.51E-05	4.50E-03
4	1.970	5.043	7.51E-05	4.51E-03
5	0.718	1.838	7.24E-05	4.34E-03
6	0.320	0.831	7.15E-05	4.29E-03
13	1.470	3.777	7.40E-05	4.44E-03
14	0.541	1.385	7.20E-05	4.32E-03
15	0.907	2.322	7.28E-05	4.37E-03
16	0.498	1.275	7.19E-05	4.32E-03
17	0.491	1.261	7.19E-05	4.31E-03
18	0.535	1.379	7.20E-05	4.32E-03
20	1.444	3.736	7.40E-05	4.44E-03
21	0.753	1.948	7.25E-05	4.35E-03
22	2.561	6.626	7.64E-05	4.59E-03
23	1.863	4.803	7.49E-05	4.49E-03
24	1.301	3.378	7.37E-05	4.42E-03
25	0.569	1.493	7.21E-05	4.33E-03
26	2.881	7.480	7.72E-05	4.63E-03
27	4.324	11.307	8.04E-05	4.82E-03
28	2.117	5.576	7.56E-05	4.53E-03
29	2.014	5.304	7.53E-05	4.52E-03
30	4.510	11.751	8.08E-05	4.85E-03
31	4.512	11.757	8.08E-05	4.85E-03
32	2.049	5.320	7.53E-05	4.52E-03
33	1.419	3.671	7.39E-05	4.44E-03

**Tabla 6.6.-** Tabla de resultados de CCA, muestreos integrados de 24 horas por Bueno (Bueno 2005)<sup>8</sup>

SERIE	CONCENTRACION DE BENCENO		Riesgo Individual Esperanza de vida 70 años	Riesgo Población No. de Casos en 70 años
	(ppb)	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
1	1.428	3.591	7.39E-05	4.43E-03
2	2.147	5.385	7.54E-05	4.52E-03
3	1.909	4.758	7.49E-05	4.49E-03
4	1.953	4.940	7.50E-05	4.50E-03
5	1.247	3.152	7.35E-05	4.41E-03
6	0.691	1.729	7.23E-05	4.34E-03
7	0.460	1.157	7.18E-05	4.31E-03
8	0.449	1.121	7.18E-05	4.31E-03
9	0.582	1.449	7.21E-05	4.32E-03
10	0.286	0.712	7.14E-05	4.29E-03
11	0.725	1.799	7.24E-05	4.34E-03
12	1.247	3.115	7.35E-05	4.41E-03
13	2.072	5.218	7.52E-05	4.51E-03
14	2.143	5.371	7.54E-05	4.52E-03
15	1.576	3.962	7.42E-05	4.45E-03
16	1.192	2.998	7.34E-05	4.40E-03
17	2.976	7.482	7.72E-05	4.63E-03
18	2.627	6.602	7.64E-05	4.59E-03
19	2.635	6.608	7.64E-05	4.59E-03
20	3.935	9.862	7.92E-05	4.75E-03
21	0.725	1.823	7.24E-05	4.34E-03
22	1.247	3.136	7.35E-05	4.41E-03
23	2.072	5.229	7.53E-05	4.52E-03
24	2.143	5.427	7.54E-05	4.53E-03
25	1.576	3.991	7.42E-05	4.45E-03
26	1.192	3.018	7.34E-05	4.40E-03
27	2.976	7.510	7.72E-05	4.63E-03
28	2.627	6.627	7.64E-05	4.59E-03
29	2.635	6.659	7.65E-05	4.59E-03
30	3.935	10.034	7.93E-05	4.76E-03
31	1.868	4.678	7.48E-05	4.49E-03
32	1.908	4.828	7.49E-05	4.50E-03
33	1.436	3.624	7.39E-05	4.43E-03



**Figura 6.1** Concentración de benceno en cada uno de los sitios de muestreo en ppb



**Figura 6.2** Concentración de benceno en cada uno de los sitios de muestreo en µg/m<sup>3</sup>

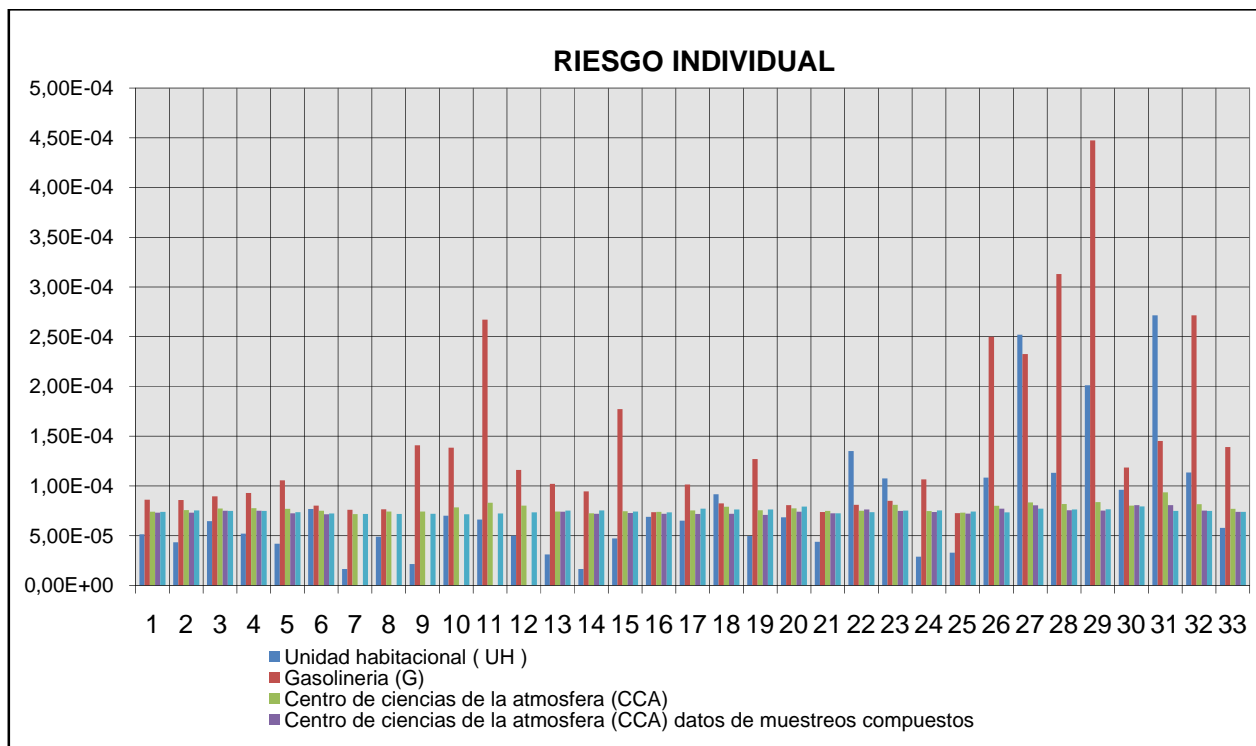


Figura 6.3 Riesgo individual por exposición al benceno, con una Esperanza de Vida de 70 años

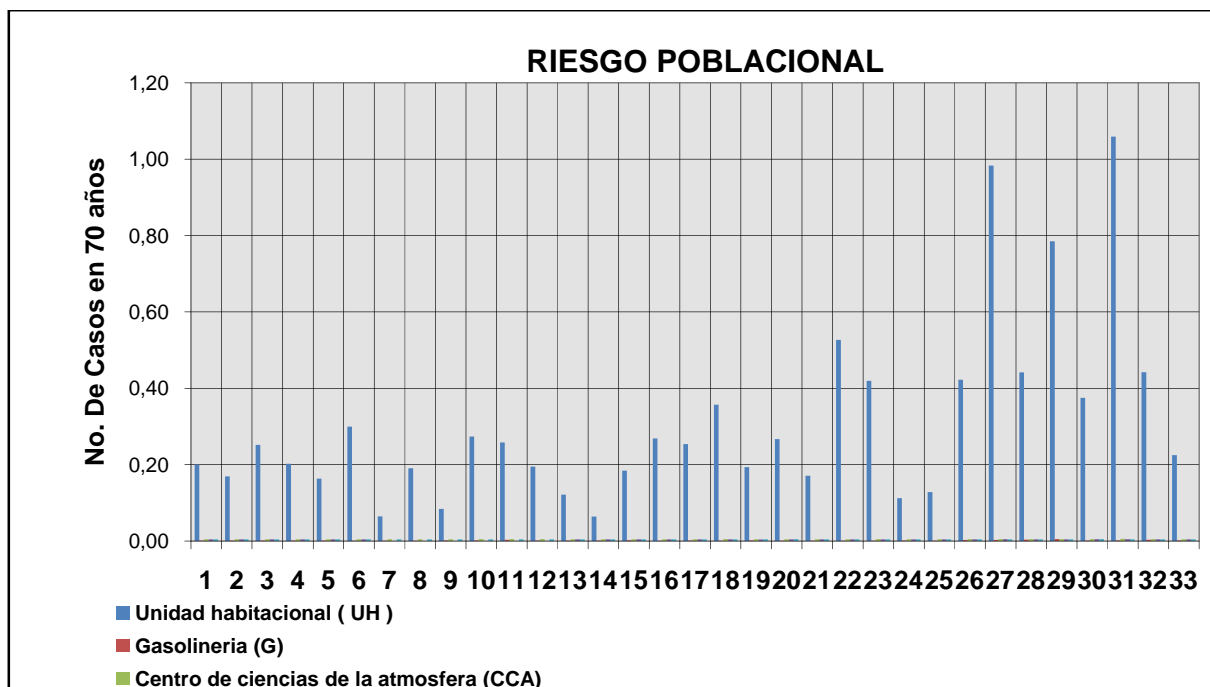


Figura 6.4 Riesgo poblacional por exposición al benceno, expresado como casos en 70 años

## 6.1 Estimación del riesgo ambiental en las gasolineras de la ciudad de México

A fin de determinar el posible impacto por exposición al benceno, en la salud del personal que labora como despachadores en las estaciones de gasolina de la Ciudad de México, se realizó el análisis del riesgo ambiental, tomando en cuenta el total de estaciones de servicio que se encuentran en la Ciudad.

Para tal fin se extrapolaron los resultados de concentración de benceno encontrados en la gasolinera al resto de las estaciones de servicio.

Considerando la información que se encuentra en la página web del GDF ([www.gdf.gov.mx](http://www.gdf.gov.mx)) en la ciudad de México se cuenta con alrededor de 310 centros de servicio para el despacho de gasolina.

Con base en los resultados obtenidos en los muestreos de benceno en la atmósfera, correspondientes al sitio de muestreo gasolinera (ver Tabla 5.5), se encontró que:

Concentración de benceno promedio fue de  $67.110 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Concentración de benceno máxima fue de  $373.066 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Considerando estos valores, los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología para la determinación de riesgo ambiental por exposición de benceno, tenemos que:

Si se tiene un promedio de 12 empleados en cada centro de servicio, con turnos de trabajo de 48 horas por semana y una esperanza de vida laboral de 30 años, y si tomamos como referencia los valores de concentración de benceno promedio o máxima tendríamos los siguientes valores de riesgo poblacional a 70 años de esperanza de vida:

Con una población expuesta de 3,720 individuos, y si se tiene las mismas consideraciones empleadas en la determinación de grado de riesgo presentada en 5.3.2 se tendrían los siguientes resultados:

Riesgo poblacional considerando la concentración de benceno promedio = 0.511 casos en 70 años

Riesgo poblacional considerando la concentración de benceno máxima = 1.665 casos en 70 años.

## 6.2 Estimación del riesgo ambiental con base información de la EPA

La EPA señala en la Ley de Aire Limpio de 1992 que el riesgo a la salud que representa la exposición a una concentración de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de benceno es de  $8.3 \text{ E-}6$  casos en un periodo de 70 años (EPA), esto significa que considerando una población de 1 millón de habitantes, se tendría una incidencia de 8.3 casos de leucemia por periodo de exposición de 70 años.

Con base en el valor promedio de la concentración de benceno en la atmósfera de la UH, que es de  $9.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ver Tabla 5.5) y extrapoliándolo a una población de un millón de habitantes, se tendría:

$$Rp = \frac{9.52 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}}{1 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}} \times 8.3 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^6 = 79$$

Lo anterior nos representa una incidencia de 79 casos de leucemia en un periodo de exposición de 70 años.

Si se considera el valor de riesgo individual obtenido para en dicho sitio (UH) que es de  $7.89 \text{ E-}05$ , y lo aplicamos a una población de un millón de habitantes, se tendrá un riesgo potencial de 79 casos en un periodo de exposición de 70 años, que es el mismo valor que tiene al aplicar el criterio señalado por la EPA.



## 7 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Con el fin de disminuir al máximo las emisiones de benceno en la atmósfera, se requiere que en todas las fuentes generadoras de emisiones, se apliquen estándares que consideren la mejor Tecnología de Control.

Crear en la legislación nacional el concepto de riesgo ambiental, con el objeto de que donde existan instalaciones que emitan sustancias cancerígenas pueden ser sujetas a una regulación adicional si el riesgo para los individuos mayormente expuestos es superior a uno en un millón, aún después de la aplicación de la mejor Tecnología de Control. Sin embargo la evaluación de un nivel de riesgo de esta magnitud puede requerir de un monitoreo de concentraciones del orden de  $10^{-6}$  ppm. Por ejemplo en el caso del benceno, para una población expuesta mayor a un millón de habitantes, se tendrán que reducir sus concentraciones a niveles menores de  $0.125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Se requiere que en la legislación nacional se promulgue un listado y valores límites permisibles para al menos 100 contaminantes atmosféricos que presenten un alto riesgo por fuga accidental, además de regulaciones para la prevención y detección de fugas accidentales. Se requiere preparar e implementar planes de administración de riesgos que especifiquen procedimientos de detección en las instalaciones.

Debido que el benceno es un compuesto cancerígeno y con el objeto de minimizar los riesgos a la salud de los trabajadores expuestos, se recomienda que se revise la normatividad en cuanto a la legislación para el área laboral, ya que actualmente se tiene como límite de exposición una concentración de 10 ppm, para una jornada de 8 horas y una concentración para la exposición de corto tiempo de 25 ppm. Actualmente la OSHA recomienda para una jornada laboral de 8 horas una concentración máxima de benceno de 0.5 ppm, y una concentración máxima de 5 ppm para un corto tiempo de exposición.

Algunos países como el Reino Unido y Japón manejan una norma de calidad del aire anual para benceno de entre 1 y 5 ppb, no obstante al reconocerse el benceno como un compuesto cancerígeno y genotóxico se recomienda reducir al mínimo su presencia en la atmósfera. Por lo que se requiere que en México se elabore una norma de calidad de aire para benceno, que permita vigilarla concentración de dicho contaminante, la cual continuamente se irían haciendo cada vez más estricta.

Medidas técnicas de control e higiene laboral.

- 1) En los locales donde se fabrique, manipule o emplee benceno o productos que contengan benceno deberían adoptarse todas las medidas necesarias para prevenir la emanación de vapores de benceno en la atmósfera del lugar de trabajo, como pueden ser campanas de extracción.
- 2) La autoridad competente debería fijar mediante normas apropiadas el modo de medir la concentración de benceno en la atmósfera del lugar de trabajo.
- 3) Deberán tomarse medidas para asegurar que los residuos que contengan benceno líquido o vapores de benceno no pongan en peligro la salud de los trabajadores, para lo cual siempre se deberá disponer en recipiente cerrados.
- 4) Los trabajadores deberán recibir instrucciones por escrito sobre las medidas de protección que han de tomar contra los riesgos del benceno
- 5) Los trabajadores que puedan entrar en contacto con benceno líquido o con productos líquidos que contengan benceno deberán estar provistos de equipo de protección personal adecuado, como puede ser trajes ahulados, para evitar los riesgos de absorción cutánea.
- 6) Los trabajadores que puedan estar expuestos a concentraciones de benceno en la atmósfera del lugar de trabajo deberán estar provistos de medios de protección personal adecuados contra los riesgos de inhalación de vapores de benceno, como el uso de equipos de respiración con cartucho para vapores orgánicos. Se debería limitar la duración de la exposición en la medida de lo posible.
- 7). Todo trabajador expuesto al benceno o a productos que contengan benceno debería usar uniforme de trabajo de 100% algodón.
- 8). Se debería prohibir a los trabajadores el uso de benceno o de productos que contengan benceno para limpiarse las manos o limpiar la ropa de trabajo.
- 9). No deberían introducirse ni consumirse alimentos en los locales donde se fabrique, manipule o utilice benceno o productos que contengan benceno. Tampoco se debería permitir que se fume en dichos locales.
- 10). En las empresas donde se fabrique, manipule o utilice benceno o productos que contengan benceno, el empleador deberá tomar las siguientes medidas:
  - a) instalaciones adecuadas y suficientes para lavarse, debidamente situadas y mantenidas en buenas condiciones;
  - b) locales e instalaciones adecuados para comer;
  - c) guardarropas u otros lugares adecuados donde los trabajadores puedan guardar la ropa de trabajo separada de la ropa de calle.

Control medico

- 1) Los trabajadores que, a causa de las tareas que hayan de realizar, estén expuestos al benceno o a productos que contengan benceno deberían ser objeto de:

- a) Un examen médico completo, previo al empleo, que comprenda un análisis de sangre.
  - b) Exámenes periódicos posteriores que comprendan exámenes biológicos (incluido un análisis de sangre) a intervalos que no deberán exceder de un año.
- 2). Los exámenes médicos previstos deberían:
- a) efectuarse bajo la responsabilidad de un médico calificado y reconocido por la autoridad competente, con la ayuda, de un laboratorio competente;
  - b) certificarse en la forma apropiada.
- 3). Los exámenes médicos deberían efectuarse durante las horas de trabajo y no deberían ocasionar gasto alguno al trabajador.
- 4). Las mujeres embarazadas cuyo estado haya sido certificado por un médico y las madres lactantes no deberían ser empleadas en trabajos que entrañen exposición al benceno o a productos que lo contengan.
- 5). Los menores de dieciocho años de edad no deberían ser empleados en trabajos que entrañen exposición al benceno o a productos que contengan benceno, a menos que se trate de jóvenes que reciban formación profesional impartida bajo la vigilancia técnica y médica adecuada. .

## Biomarcadores

Los biomarcadores son los cambios cuantificables, ya sean estos bioquímicos, fisiológicos o morfológicos, que se asocian a la exposición a un tóxico.

Los biomarcadores se utilizan para:

- detectar la presencia de una exposición
- determinar las consecuencias biológicas de la exposición
- detectar los estados iniciales e intermedios de un proceso patológico
- identificar a los individuos sensibles de una población
- fundamentar la decisión de intervenir, tanto a nivel individual como ambiental

En el diseño de una rutina de muestreo es necesario considerar lo siguiente:

- especificidad y sensibilidad del biomarcador
- dificultad de muestreo
- cinética de la formación del biomarcador y
- estabilidad del biomarcador

Los biomarcadores más útiles son los que se pueden obtener menos invasivamente, por eso es que se prefieren los que se encuentran en sangre.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-047-SSA1-1993, "que establece los límites biológicos máximos permisibles de disolventes orgánicos en el personal ocupacionalmente expuesto". Menciona que

se debe cumplir para el personal expuesto al benceno en áreas laborales, que el contenido de fenoles en orina, al final del turno de trabajo, se menor a 50 mg/g creatinina.

#### Educación

El Estado deberá tomar las medidas apropiadas para que todo trabajador expuesto al benceno o a productos que contengan benceno reciba la formación y las instrucciones adecuadas, a cargo del empleador, sobre las precauciones que deba tomar para proteger su salud y evitar accidentes, y sobre el tratamiento apropiado en caso de que se manifiesten síntomas de intoxicación.

En los locales donde se utilice benceno o productos que contengan benceno deberían fijarse en lugares apropiados avisos que indiquen:

- a) los riesgos existentes;
- b) las medidas de prevención que deban tomarse;
- c) el equipo de protección que deba emplearse,
- d) las medidas de primeros auxilios que han de aplicarse en caso de intoxicación grave debida al benceno.

## 8 CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se observa que en los tres sitios de estudio los valores de Riesgo Ambiental por inhalación de benceno, en la expuesta son muy bajos, por lo que el número de casos probables de leucemia es menor a uno en un período de 70 años.

De acuerdo con los datos presentados por la EPA, en su estudio sobre el efecto carcinógeno del benceno de 1998, se estima que una exposición al benceno en el curso de la vida de 4 ppb en aire dará lugar a un 1 caso de leucemia en 10.000 personas expuestas. Observando los resultados (Tabla 5,3) se tiene que tanto en la Unidad Habitacional, como el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el 30% de los resultados individuales superaban el valor de 4 ppb de benceno, y en el caso de la Gasolinera se tiene que el 90% de los valores encontrados se encuentran por arriba de las 4 ppb de benceno.

Comparando los valores promedio de concentración de benceno determinados en la Unidad Habitacional y en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, se encuentran por arriba del estándar de calidad del aire fijado en el Reino Unido y Japón, que es de 1 ppb como promedio anual,

No obstante que los valores de concentración de benceno encontrados en la gasolinera fueron los más altos, con un valor promedio de  $67.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un valor individual máximo de  $373.066 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabla.- 5.5), los valor de riesgo poblacionales son bajos, debido al número de personas expuesta en el sitio (12 personas que laboran), no obstante los valores de riesgo individual encontrado en la gasolinera son más alto que en los otros sitios del presente estudio.

Si se considera el total de las gasolineras que se encuentran en la Ciudad de México de alrededor de 310 centros de servicio, y se extrapolan los valores de concentración de benceno promedio y máxima encontrados en la Gasolinera, se tendrá un riesgo poblacional por exposición de:

Riesgo poblacional considerando la concentración de benceno promedio = 0.511 casos en 70 años

Riesgo poblacional considerando la concentración de benceno máxima = 1.665 casos en 70 años.

Debido a que la reglamentación mexicana únicamente contempla el límite de concentración de benceno en área laboral, NOM -010-STPS-1994, el cual fija como límite máximo  $20 \text{ mg}/\text{m}^3$  (10 ppm) para una jornada laboral de 8 hrs, se observa que todos los valores de concentración de benceno encontrados en la gasolinera se encuentran muy por debajo de dicho límite. El valor máximo encontrado en la gasolinera fue de  $373.066 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.1644 ppm). Este valor también se encuentra por debajo del límite establecido

por la OSHA para el benceno de 0.5 ppm para una jornada de trabajo de 8 horas, y un límite de la exposición a corto plazo de 5 ppm.

Se considera de suma importancia que la Secretaría del Trabajo realice una revisión a los límites de concentración de benceno en área laboral, con objeto de reducir los riesgos de salud al personal expuesto.

En el caso de la gasolinera, que fue donde se encontraron los valores más altos de concentración de benceno, se requiere realizar estudios de exposición personal, para tomar las medidas preventivas y correctivas que permitan minimizar los posibles riesgos a la salud del personal que labora en este sitio de referencia.

Como se explicó anteriormente, una de las principales fuentes de emisión de benceno a la atmósfera, son las emisiones de gasolina, tanto en su manejo y almacenamiento como cuando se realiza una ineficiente combustión de la misma, esto último se presenta principalmente en los vehículos de modelo atrasado, los cuales además de contar con motores con tecnología más ineficiente, no cuentan con convertidores catalíticos.

Se debe promover la instalación de sistemas de control de vapores de combustibles en las gasolineras a nivel nacional, ya que esta medida por sí sola garantiza una reducción cercana al 10% en las emisiones de benceno a la atmósfera. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México esto es obligatorio, por lo que se deben realizar verificaciones periódicas en su operación y verificar la eficiencia de estos sistemas que de acuerdo a la normatividad vigente (NOM-093-ECOL-1995) debe de ser por lo menos de un 80%.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Albert R. W., "Environmental Risk: Identification and Management", Lewis Publisher INC, Mineapolis, 1990
- 2.- Alcántara, Ma del C., "Química de hoy", McGraw-Hill Interamericana de México, México D.F., 1992
- 3.- Análisis de la industria petroquímica por cadenas productivas, Comisión Petroquímica Mexicana, México D.F., 1996.
- 4.- ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA, A.C.- Pagina de Internet <http://198.139.13.10/industri/index.htm>
- 5.- Bravo H., R. Sosa, P. Sanchez , E. Bueno , L. Gonzalez, " Concentración de benceno y tolueno en la atmósfera en el suroeste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Mexico", México D.F., 2002
- 6.- Bravo. A.H., T. Aldana , M. Espinosa , R. Sosa , M. Tolvía, B. Torres , "Problemática de la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", Comité Técnico de Protección Ambiental Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. Año XL, Vol. 5-6, 33-37, México, D.F. 1999
- 7.- Brockband B., J. Cohrsson, and V.T. Covello. "The Risk Assessment Manual: A Guide to Understanding and Using Health and Environmental Assessments", Council on Environmental Quality, NTIS No. PB89-137772KNK. National Technical Information Service; 5285 Port Royal Rd.; Springfield, 2003
- 8.- Bueno E., "Evaluación benceno en la atmósfera de la Zona metropolitana de la Ciudad de México". Tesis para obtener el grado de Maestría, Facultad de Ciencias Universidad Autónoma de México, México, D.F., 2005
- 9.- CAM, "Evaluación Final del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 (Documento para discusión)". Comisión Ambiental Metropolitana, México D.F., 2000
- 10.- Castillejos M., "La Contaminación Atmosférica en México, sus causas y consecuencias", Comisión Nacional de Derechos Humanos, México, D.F., 1992
- 11.- Colegio de México, "Contaminación Atmosférica y Salud en la Cd. de México" , Seminario Aire y Política, México D.F., 1996
- 12.- Comisión Ambiental Metropolitana, "Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010", Dirección General de Ecología, D.D.F., México, D.F., 2002
- 13.- Comisión metropolitana para la Prevención y Control de la contaminación Ambiental del Valle de México, " La Contaminación Atmosférica en el Valle de México, México, D.F., 1993
- 14.- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, "Avances a Junio 1994. Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México", Dirección General de Ecología, D.D.F., México D.F., 1994
- 16.- DDF, GEM, SEMARNAP, SSA, "Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 (PROAIRE)", D.D.F., Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos

- Naturales y Pesca, Secretaría de Salud., México, D.F., 1996
- 17.- El Mundo del Petroleo, Año 2 tomo 12  
 Octubre-Noviembre, Mexico, D.F., 2005
- 18.- EPA " Risk Assessment for Toxic Air pollutants: A Citizen's Guide" EPA 45013-90-024, Washington DC, 1991
19. - EPA "Carcinogenic Effects of Benzene: An Update. National Center for Environmental Assessment", EPA 45013-90-024, Washington DC, 1998
- 20.- EPA, "Guidance on Risk Characterization for Risk Managers and Risk Assessors", U.S. Environmental Protection Agency, Office of the Administrator, Washington, DC, 1992
- 21.- EPA, "Total Risk Integrated Methodology", U.S. Environmental Protection Agency, Office of the Administrator, Washington, DC, 1995
- 22.- EPA. " Methods for derivation of inhalation reference concentrations and application of inhalation dosimetry", EPA/600/8-90/066F, Washington DC, 1994
- 23.- EPAQS, "Benzene", Expert Panel on Air Quality Standards, Department of the Environment, London, 1991
- 24.- Fernández B. A., "Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México". Industria Ambiental. 1: 7-8., México, D.F., 1997
- 25.- Fromme H., "Implications of Exposure to Benzene for the Health of the General Population", Department of Environmental Medicine, Berlin Senate Health Department. Central Health Bulletin 196, 481-494, Berlin, 1995
- 26.- IMP, "La tecnología en los vehículos y las gasolinas PEMEX Magna y PEMEX Premium", México, D.F., 2000
- 27.- INE, CENICA, "Primer informe sobre la calidad del aire en ciudades mexicanas", Instituto Nacional de Ecología, Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, México, D.F., 1996
28. - Jayanty R.K.M., B. Gay, "Summary of the 1991 EPA/AWMA International Symposium: Measurement of Toxic and Related Air Pollutants". J.Air Waste Manage. Assoc., 41:1432, Washington DC, 1991
- 29.- Leal S. A., "Perspectivas para la Reformulación de los Combustibles en el Sistema de Refinerías de Petróleos Mexicanos" . Bol. Tec. arpel 21(2): 117-139 Junio. Paipa, Colombia, 1992
30. - Main H.H., P. T. Roberts, R. Reiss, L. R. Chinkin, "Analysis of PAMS Data to Evaluate Reformulated Gasoline Effects". Paper: WA59.04(A853). Proceedings of the Air & Waste Management Association. 91 Annual Meeting & Exhibition, San Diego, 1998
31. - Mehlman M.A., "Dangerous and Cancer-Causing Properties of Products and Chemicals in the Oil Refining and Petrochemical Industry-Part XX: Health Dangers of Petroleum Hydrocarbons: Gasoline, Methyl-Tertiary Butyl Ether, Benzene, 1,3-Butadiene and Alkylbenzenes". Journal of Clean Technology and Environmental Sciences, 4: 37-57, 1994