

Evaluación de impacto en salud por la reducción de la contaminación del aire con benceno en la Ciudad de México

EIS contaminación del aire benceno

Cervantes-Martínez Karla, I.B.I.

Álamo-Hernández Urinda, M.S.P.

Texcalac-Sangrador José Luis, M. en C.

Riojas-Rodríguez Horacio, Dr. en C.

Schilmann-Halbinger Astrid, M. en C.

Dirección de Salud Ambiental
Centro de Investigación en Salud Poblacional
Instituto Nacional de Salud Pública
Av. Universidad 655 Col. Sta. Ma. Ahuacatitlán
C.P. 62100 Cuernavaca Morelos

Resumen

El aire limpio es un requisito básico de la salud y bienestar humanos. Existe evidencia científica que documenta gran variedad de efectos perjudiciales para la salud debido a la exposición a contaminantes tóxicos atmosféricos. *Objetivo:* Evaluar el impacto en salud bajo diferentes escenarios hipotéticos de exposición a benceno en aire ambiente, propuestos como límites máximos permisibles (LMP). *Material y métodos:* Se estimaron las muertes evitables en la Ciudad de México por exposición crónica a benceno para los años 2008 a 2015, utilizando la metodología establecida por la OMS. Se recurrió al registro de monitoreo de benceno en aire; el indicador de salud utilizado fue la mortalidad por leucemias (CIE10:C91-C95); se seleccionaron funciones exposición-respuesta documentadas en estudios epidemiológicos robustos. Para estimar la exposición se utilizó el software ArcGIS® 10.1. *Resultados:* Se estimó una media anual de benceno en la ciudad de 1.82 ppbV. Para un periodo de latencia de leucemia de 5 años se estimaron un total de 31 muertes evitables, mientras que para 10 años se estimaron 53. El análisis de sensibilidad muestra una posible sub estimación de muertes evitables. *Discusión:* se proporciona evidencia documentada del impacto en salud por exposición a un contaminante tóxico atmosférico y se proponen límites máximos permisibles los cuales pueden coadyuvar en el desarrollo de políticas de gestión de la calidad del aire en materia de contaminantes tóxicos en México.

Palabras clave: benceno, evaluación de impacto en salud, límite máximo permisible.

Introducción

La contaminación del aire constituye una importante amenaza para la salud de los habitantes en las grandes ciudades alrededor del mundo. La OMS ha estimado que la contaminación atmosférica urbana causa alrededor de 1.3 millones de muertes al año en el mundo.(1)

El benceno es un contaminante tóxico del aire que pertenece a la familia de los compuestos orgánicos volátiles (COVs). Se trata de un hidrocarburo aromático cuyo origen es principalmente antropogénico, proveniente principalmente de emisiones vehiculares e industriales. Se ha estimado que la media de las concentraciones de benceno en el aire de las zonas rurales y urbanas es de alrededor de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.3 ppbV) y de $5\text{-}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.6-6.3 ppbV), respectivamente.(2)

En 2008, en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se emitieron a la atmósfera 6,562 toneladas de benceno, de las cuales el 86.1% se generaron en fuentes móviles, el 12.3% en fuentes de área y 1.7% en fuentes fijas. Para el Distrito Federal se emitieron en el mismo año, 3,139 toneladas de benceno, siendo las fuentes móviles las que contribuyeron con la mayor cantidad, con un 87.6% de las emisiones.(3)

La exposición de la población general ocurre principalmente por inhalación del aire contaminado con benceno y este, ha sido asociado a varios efectos crónicos para la salud, entre ellos, carcinógenos, hematológicos, genotóxicos, inmunológicos y neurológicos. El benceno se ha clasificado como cancerígeno para humanos, tanto por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) (Grupo A: conocido carcinógeno humano) como por la Agencia Internacional para la Investigación del

Cáncer (IARC) (Grupo 1: carcinógeno para humanos). Existe evidencia epidemiológica, principalmente en el ámbito ocupacional, de la asociación entre la exposición crónica a este contaminante y el desarrollo de leucemia.(4) (5) (6) (7) Con base en lo anterior, la OMS ha establecido una unidad de riesgo de por vida para el desarrollo de leucemia de entre 4.4×10^{-6} y 7.5×10^{-6} por cada $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de benceno en aire.(2)

La literatura sobre los efectos genotóxicos del benceno es extensa. Los metabolitos del benceno, actuando solos o en conjunto, producen múltiples efectos genotóxicos a nivel de la célula madre hematopoyética pluripotente, lo que resulta en cambios cromosómicos en los seres humanos. Hay evidencia de ensayos in vivo, in vitro y personas ocupacionalmente expuestas, de que la exposición a benceno produce aberraciones cromosómicas estructurales y numéricas. (5) (7)

Ante la evidencia del impacto de la contaminación del aire en la salud pública, las autoridades han emitido normas que establecen las concentraciones límite de los contaminantes atmosféricos para la protección de la salud humana. En México, la Secretaría de Salud (SSA), a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), es la entidad reguladora que emite las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de aplicación nacional que establecen estos LMP para los contaminantes criterio.(8) Sin embargo, en nuestro país no se ha normado ninguno de los contaminantes tóxicos del aire, entre ellos el benceno. Actualmente existe un grupo de trabajo multidisciplinario encabezado por la COFEPRIS, que está trabajando un proyecto de NOM, como instrumento

regulatorio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a los límites máximos permisibles de los COVs: benceno y tolueno, emitidos a la atmósfera; como medida de protección a la salud de la población.

Para dar sustento científico a la normatividad requerida, existen metodologías que permiten estimar los beneficios en salud que se pudieran obtener ante la implementación de LMP, una de ellas es la Evaluación de Impacto en Salud (EIS).(9) Este método deriva del enfoque de evaluación de riesgos y fue definido en el Documento de Consenso de Gotemburgo en 1999 como “...una combinación de procedimientos, métodos y herramientas por las cuales una política, programa o proyecto puede ser evaluado en función de sus potenciales efectos sobre la salud de la población y de la distribución de los mismos en dicha población”.(10)

La EIS es una herramienta para la salud pública cuyo uso va en aumento. Un caso exitoso es el proyecto europeo APHEIS (*Air Pollution and Health: a European Information System*) el cual se realizó para algunos contaminantes criterio y demostró en sus diferentes etapas que, incluso pequeñas reducciones de los niveles de contaminantes atmosféricos, podrían prevenir un gran número de muertes en la población europea.(11)

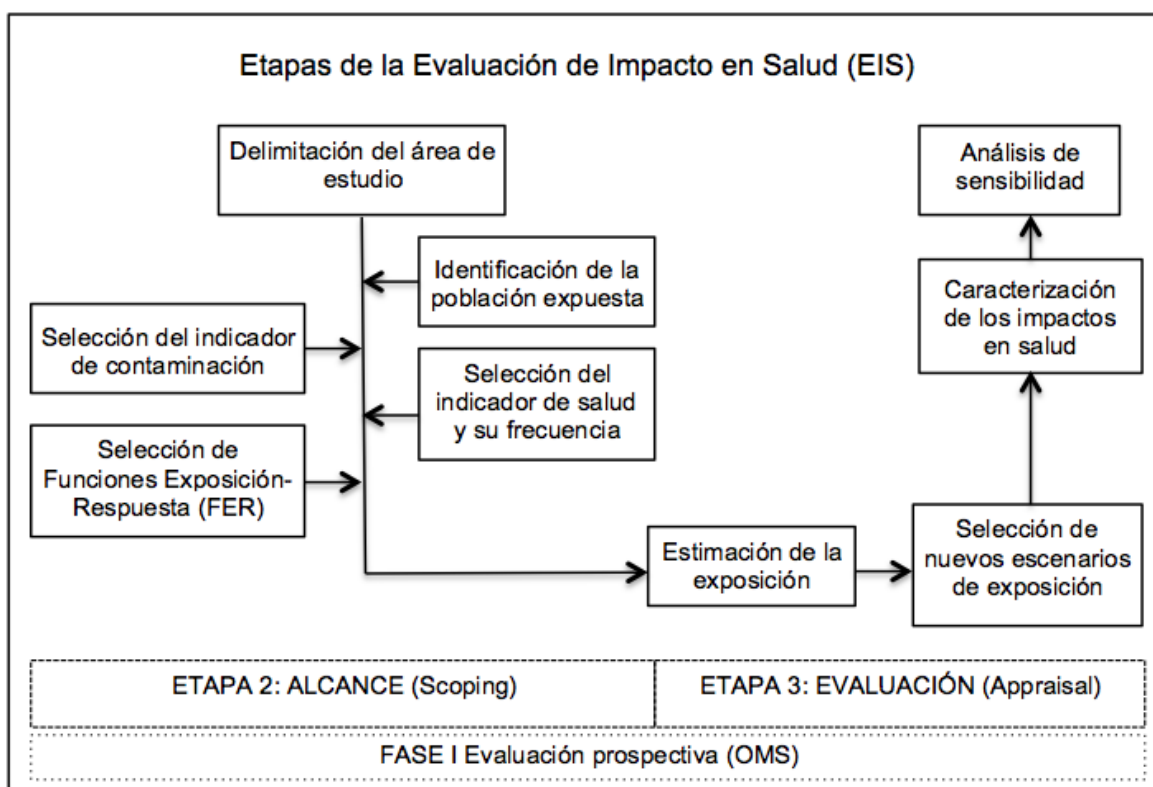
La experiencia en estas evaluaciones es limitada en México y, hasta el momento, se han documentado cinco EIS para contaminantes atmosféricos criterio, ninguna de las cuales determinó muertes atribuibles a la contaminación del aire con benceno o algún otro contaminante tóxico.(12)

En México, existe un avance en la implementación de políticas públicas y programas para el control de la calidad del aire por contaminantes criterio, pero permanece un reto respecto a otros contaminantes tóxicos presentes en el aire, que por su impacto en la salud y los ecosistemas deben ser incluidos en las políticas públicas.(13) Llevar a cabo una EIS permite proveer evidencia de las implicaciones que la contaminación del aire con benceno tiene en la salud pública. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto en salud bajo diferentes escenarios hipotéticos de exposición a benceno en aire ambiente.

Material y métodos

Con base en la metodología establecida por la OMS para el desarrollo de la EIS, se llevó a cabo la fase de evaluación prospectiva, integrada por las etapas de “Alcance” y “Evaluación” (14) las cuales se resumen en la figura 1:

Figura 1. Etapas de la Evaluación de impacto en Salud (EIS).



Delimitación del área de estudio, contaminante e indicador de salud

El área de estudio se circunscribió al territorio de la Ciudad de México, con un nivel de desagregación a escala delegacional (16 delegaciones). Es un área altamente urbanizada y con características geográficas y climáticas particulares que determinan el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera. Durante

el periodo de septiembre de 2005 a septiembre de 2006 se realizó el monitoreo de contaminantes tóxicos en esta área, incluyendo benceno, el cual fue seleccionado como indicador de contaminación para esta evaluación. La información cartográfica fue obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI),(15) mientras que la poblacional fue obtenida del Consejo Nacional de Población (CONAPO) mediante el Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS).(16)

Después de la revisión de la literatura y con base en la disponibilidad de datos, se seleccionó como indicador de salud la mortalidad por leucemias, incluyendo los siguientes tipos de acuerdo a la Clasificación Internacional de Enfermedades versión 10 (CIE10): C91 leucemia linfoide, C92 leucemia mieloide, C93 leucemia monocítica, C94 otras leucemias de tipo celular específico, C95 leucemia de tipo celular no específico. Los registros de mortalidad fueron obtenidos de las bases de datos de la Dirección General de Información en Salud (DGIS) a través de los cubos dinámicos del SINAIS.(16)

Para conocer la frecuencia del indicador de salud seleccionado, se calcularon las tasas de mortalidad por leucemias correspondientes a los años 2006 a 2011 para los siguientes grupos de edad: niños (menos de uno a catorce años), adultos (entre 15 y 64 años) y adultos mayores (mayor igual a 65 años); utilizando las estimaciones del CONAPO con base en proyecciones de la población de México 2005-2030.(17)

Selección de funciones exposición-respuesta (FER)

Se exploraron bases de datos como MEDLINE®/PubMed®, Biblioteca Virtual en Salud LILACS y Scientific Electronic Library Online (SciELO), así como documentos de referencia de organismos internacionales, para identificar y revisar los estudios que han reportado una asociación (OR: razón de momios, RR: riesgo relativo o SMR: tasa de mortalidad estandarizada) entre la exposición a benceno en el aire (como variable continua) y el evento en la salud seleccionado. Como parte de esta revisión, se hizo énfasis en metaanálisis previamente publicados.

La revisión permitió una selección de tres FER, así como la identificación del periodo de latencia reportado para el desarrollo de leucemia. Las FER seleccionadas fueron ajustadas a una unidad de cambio en la exposición acumulada (expresada como ppm-años) mediante la siguiente fórmula matemática:

$$FCR_{lb} = \exp [(\ln FER_{Uc})/Uc]$$

Donde:

FER_{lb} = Función exposición respuesta expresada como el riesgo relativo para el efecto l asociada a una unidad de cambio en la concentración del contaminante b

FER = Función exposición respuesta asociada a Uc unidades de cambio

Uc = Unidades de cambio

Estimación de la exposición

Durante el periodo de septiembre de 2005 a septiembre de 2006, el Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de

Ecología (CENICA-INE) realizó el estudio “Monitoreo y evaluación de las concentraciones de COVs en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México”,(18) que se llevó a cabo en cinco estaciones de las 24 que conforman la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).(19) Estas estaciones representan las regiones: noreste, noroeste, centro, suroeste y sureste de la Ciudad de México. En estos sitios se realizaron muestreos de 24 horas cada seis días, obteniendo un total de 292 promedios de benceno (en partes por billón por volumen (ppbV)) de 24 horas válidos. Para la toma de muestra se utilizaron contenedores de acero inoxidable de seis litros (*canisters*) conectados a un tubo de teflón de 1/4 de pulgada de diámetro con embudo de plástico para facilitar la entrada del aire, el cual ingresó mediante la apertura y cierre de una válvula selenoide que empleó una fuente de poder de 24 voltios. La posterior determinación de los COVs en los laboratorios del CENICA se realizó con base en el método TO-14A de la USEPA (1999) el cual se basa en un análisis químico por Cromatografía de Gases (CG).(18)

Se obtuvo la base de datos para las concentraciones de benceno de 24 horas de la cual, por eliminación de valores extremos y agregando por temporadas climáticas, solo se consideraron para esta evaluación once meses de monitoreo de los trece disponibles.

Como parte del análisis exploratorio de la base de datos, se verificó el criterio de compleción de datos (contar con al menos 75% de los muestreos calendarizados para el periodo del estudio), como lo establece el “Protocolo de manejo de datos de la calidad del aire” del INE.(20) El análisis descriptivo de estos datos incluyó los promedios de benceno: anual para toda el área de estudio (considerando las cinco

estaciones de monitoreo), por temporada climática (seca-fría, seca-caliente y lluvias) y anual para cada una de las cinco estaciones de monitoreo de benceno, que representan cinco regiones en el área de estudio.

Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para estimar la exposición. Éstos se han empleado con mayor frecuencia en la estimación de la exposición humana a contaminantes del aire, ya que minimizan los errores de clasificación de exposición.(21)

Se usaron las siguientes capas espaciales de información:

- 1) Capa de estaciones de monitoreo de benceno de la RAMA, la cual fue generada a partir de las coordenadas correspondientes, disponibles en el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) (19)

- 2) Capa del área de la Ciudad de México, disponible en INEGI (22)

Estas capas se cruzaron y se generó una malla con celdas de 1,000 m², abarcando únicamente el área de estudio.

Para el análisis de esta información espacial se utilizó el software ArcGIS® 10.1 y su módulo *Spatial Analyst*. Éste permitió estimar la distribución espacial de benceno para el año de referencia (2005) para cada una de las celdas de la malla, utilizando el inverso de la distancia ponderada al cuadrado (IDW) como método geoestadístico de cálculo, el cual produce estimaciones razonables del contaminante en cuestión en los sitios no muestreados. A pesar de que no evalúa estadísticamente los errores de las estimaciones, es apropiado en los casos donde la red de muestreo es escasa y se asumen errores grandes.(23) El método no considera los patrones de tiempo-actividad de la población. Se trata de un método de interpolación basado en el supuesto de que a medida que nos

alejamos del punto de la muestra (las estaciones de monitoreo) la concentración va disminuyendo.(21)

Una vez ejecutado el método de interpolación y para cada delegación, se identificó el total de celdas que contenían en su interior, promediando las concentraciones respectivas y obteniendo un valor único de concentración promedio anual de benceno por delegación.

La concentración estimada por delegación fue convertida a partes por millón por volumen (ppmV) y multiplicada por los diferentes años de latencia considerados, para obtener la exposición acumulada en ppm-años, es decir, el promedio anual de benceno en 2005 se consideró constante durante los 10 años de latencia para el desarrollo de la enfermedad y durante los 365 días de cada año.

Caracterización de los impactos en salud

Se estimó el beneficio en salud en términos de muertes evitables para el evento seleccionado (CIE10:C91-C95), mediante la siguiente fórmula matemática:

$$Me_{lb} = Tm_l Pe_b - \frac{Tm_l Pe_b}{\exp[(\ln FER_{lb}) \Delta C_b]}$$

Donde:

Me_{lb} = Número de muertes evitables del efecto en salud l asociado con el cambio en la concentración del contaminante b

Tm_l = Tasa cruda de mortalidad asociada con el impacto l para la población Pe

Pe_b = Población expuesta al contaminante b en la zona de estudio

FER_{lb} = Función exposición-respuesta expresada como el riesgo relativo para el efecto l asociada a una unidad de cambio en la concentración del contaminante b

ΔC_b = Cambio en la concentración del contaminante b de acuerdo a diferentes escenarios de exposición en ppm-años

Considerando el año 2005 como de referencia, se evaluaron de 3 a 10 años de latencia para el desarrollo de leucemia, en el grupo de edad de adultos por un lado, y por el otro incorporando a los adultos mayores.

En una primera serie de cálculos, para los años de latencia 3 al 6 se utilizó la Tm_l y la Pe_b correspondientes a cada año, realizando estimaciones de muertes evitables por delegación.

En la segunda serie de cálculos, debido a que aún no se cuenta con información de mortalidad para los años de latencia 7 al 10, se utilizó como Tm_l el promedio de las tasas de mortalidad de 2006-2011. Estimando las razones de tasas de los años promediados, se comprobó que no existían diferencias estadísticamente significativas durante ese lapso de tiempo.

En la primera serie de cálculos se usó el promedio de benceno por delegación estimado con el IDW y en la segunda, el promedio anual de benceno para toda el área de estudio, obtenido en el análisis descriptivo de la correspondiente base de datos. Para corroborar el uso de este promedio general, se realizó una prueba estadística que comparó el promedio anual por estación de monitoreo contra el promedio de toda el área de estudio, determinando que a excepción de la estación Pedregal, el promedio por estación no es estadísticamente diferente al general.

Se establecieron tres escenarios hipotéticos de exposición, que representan LMP establecidos a nivel internacional y/o valores guía: escenario 1: 0.5 ppbV (OMS), escenario 2: 0.9 ppbV (EPA) y escenario 3: 1.6 ppbV (Unión Europea).

El ΔC_b se empleo en términos de exposición acumulada es decir en ppm-años, por lo que fue necesaria la conversión matemática de los promedios anuales de benceno de 2005 y los escenarios hipotéticos de exposición a estas unidades.

Análisis de sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad que cuantifica la incertidumbre en torno a las FER. En una primera etapa se evaluó el impacto en el número de muertes evitables estimadas de acuerdo a los límites superior e inferior del intervalo de confianza (IC) al 95% de la FER mas confiable. En la segunda etapa se evaluó la sobre o sub estimación del número de muertes evitables recurriendo a dos FER alternativas reportadas en literatura científica.(24) En ambos casos las estimaciones se realizaron para los diferentes años de latencia para el desarrollo de leucemia (3 al 10).

Resultados

Delimitación del área de estudio, contaminante e indicador de salud

En el año 2005 la población total del área de estudio era de 8,815,319 habitantes.(17) Este territorio, conformado por 16 delegaciones, representa el 0.1% del nacional con 1,495 km². Se ubica dentro de la cuenca del Valle de México a una altura promedio de 2,300 metros sobre el nivel del mar; el terreno es plano cercado por montañas, lo que influye en la meteorología y en la forma en que los contaminantes se comportan en la atmósfera. Lo rodea la Sierra de Guadalupe al norte, la Sierra de las Cruces al oeste, la Sierra del Ajusco al sur y al oriente la Sierra Nevada que incluye a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl. A lo largo del año se diferencian tres temporadas climáticas:

- Seca-fría: caracterizada por escasa precipitación y bajas temperaturas; comprende los meses de noviembre a febrero
- Seca-caliente: caracterizada por días calurosos, acompañados de humedad y masas de aire cálidas; comprende los meses de marzo a mayo
- Lluvias: esta temporada es debida a tormentas tropicales y huracanes que se forman en los océanos Pacífico y Atlántico; comprende los meses de junio a octubre

Las condiciones meteorológicas que caracterizan a la Ciudad de México resultan importantes ya que regulan el transporte, dispersión y acumulación de los contaminantes, además de influir en los procesos fotoquímicos de la atmósfera.

Con base en las estaciones que monitorearon benceno en aire en 2005, se identificaron las cinco regiones de monitoreo en el área de estudio, siendo la

región centro la que presentó el mayor promedio anual con 2.38 ± 4.5 ppbV y la región suroeste la del menor promedio anual con 1.24 ± 1.8 ppbV. El promedio anual para toda la Ciudad de México fue de 1.82 ± 3.0 ppbV, cuyo valor rebasa los tres escenarios hipotéticos de exposición planteados. El promedio por temporada climática mostró la menor concentración de benceno en lluvias con un valor de 0.61 ± 0.5 ppbV, comparado con las temporadas seca-fría (3.15 ± 4.6 ppbV) y seca-caliente (1.68 ± 0.9 ppbV).

Las tasas crudas de mortalidad por leucemias de 2006 a 2011 tuvieron un promedio de 2.9 por 100,000 habitantes para el grupo de adultos, mientras que si se incorpora a los adultos mayores a este grupo, el promedio asciende a 4.3 casos por 100,000 habitantes.

En 2011, la distribución de las tasas crudas de mortalidad por leucemias para los adultos en las diferentes delegaciones de la Ciudad de México fue de 3.10 ± 1.3 por 100,000 habitantes, con un máximo de 4.91 en la delegación Cuauhtémoc, mientras que para los adultos mayores fue de 14.76 ± 7.6 con un máximo de 26.13 en Tlalpan.

Selección de funciones exposición-respuesta (FER)

Durante la selección de la medida de asociación entre exposición a benceno y el desarrollo de leucemia se dio especial importancia a los metaanálisis recientes, ya que éste tipo de estudios tienen una mayor representatividad geográfica, poder estadístico y credibilidad.(9) (25) Se identificó que la evidencia epidemiológica proviene de algunos estudios ocupacionales, en su mayoría de cohorte, que

proveen suficiente evidencia para establecer una clara relación exposición-respuesta. La mayoría coincide en que existe un riesgo elevado de leucemia en trabajadores después de la exposición crónica a altas concentraciones de benceno.(26) (27)

Se identificaron y seleccionaron las siguientes FER propuestas por Vlaanderen et al.(28) : 1)RR=1.52 (1.08-2.15), 2)RR=1.22 (1.11-1.34) y 3)RR=1.14 (1.04-1.26) que fueron ajustadas por unidad de cambio obteniendo: 1)RR=1.043 (1.008-1.08), 2)RR=1.02 (1.01-1.03) y 3)RR=1.013 (1.004-1.023). La FER1 fue seleccionada como la más confiable. Estas provienen de un metaanálisis que incluyó diez estudios epidemiológicos ocupacionales, y en algunos casos las muertes por leucemia se presentaron en individuos de 65 años o más,(29) por lo que se estimaron las muertes evitables para dos grupos de población, el de adultos y el de adultos más adultos mayores. De forma general, considerar a los adultos mayores en las estimaciones de muertes evitables y no solo a los adultos, implica alrededor de un 70% más casos (tabla 1).

Tabla 1. Muertes evitables en la Ciudad de México para los años de latencia para el desarrollo de leucemia 3 al 10 y dos grupos de población.

Año	Latencia	Adultos			Adultos y adultos mayores		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
2008	3	10 (2-18)	7 (1-13)	2 (0-4)	17 (3-31)	12 (2-21)	4 (1-7)
2009	4	13 (3-23)	9 (2-16)	3 (1-5)	21 (4-36)	14 (3-26)	5 (1-8)
2010	5	19 (4-33)	13 (3-23)	4 (1-7)	31 (6-54)	22 (4-38)	7 (1-12)
2011	6	22 (4-39)	16 (3-27)	5 (1-9)	35 (7-61)	24 (5-43)	8 (1-14)
2012	7	23 (5-41)	16 (3-29)	5 (1-9)	38 (8-66)	27 (5-47)	8 (2-14)
2013	8	26 (5-45)	19 (4-32)	6 (1-10)	43 (9-75)	30 (6-53)	9 (2-16)
2014	9	29 (6-50)	21 (4-36)	6 (1-11)	48 (10-82)	34 (7-59)	10 (2-18)
2015	10	32 (7-55)	23 (5-39)	7 (1-12)	53 (11-90)	38 (8-65)	11 (2-10)

Nota: Muertes evitables calculadas con base en la FER más confiable (RR=1.043 (1.008-1.08) por 1 ppm-año). Escenarios hipotéticos de exposición a benceno E1: 0.5 ppbV, E2: 0.9 ppbV, E3: 1.6 ppbV.

Los niños presentan un caso singular. La búsqueda de FER para este grupo permitió reconocer que, la mayoría de estudios que han evaluado la posible asociación entre exposición a benceno en el aire y el desarrollo de leucemia, han utilizado medidas indirectas de exposición tales como: 1) variedad de fuentes de exposición (uso de solventes en casa, densidad del tráfico, cercanía a carreteras, distancia entre vías y residencia, emisiones vehiculares, proximidad a fuentes industriales, etc.) y 2) la exposición de cualquiera de los padres antes, durante y después de la concepción; como medidas aproximadas de la exposición a benceno en el aire. Adicional a que la evaluación de la exposición se ha llevado a cabo a través de mediciones indirectas, cabe resaltar que muchos de estos estudios tienen un tamaño de muestra pequeño y no se puede descartar el efecto de otros químicos del aire.(30) (31) (32) Por otra parte, Belson et al. (2007) concluye que en los niños, solamente la radiación ionizante ha sido fuerte y significativamente relacionada con algunos tipos de leucemia, mientras que para

los demás factores de riesgo ambientales como el benceno, la evidencia no es concluyente.(33)

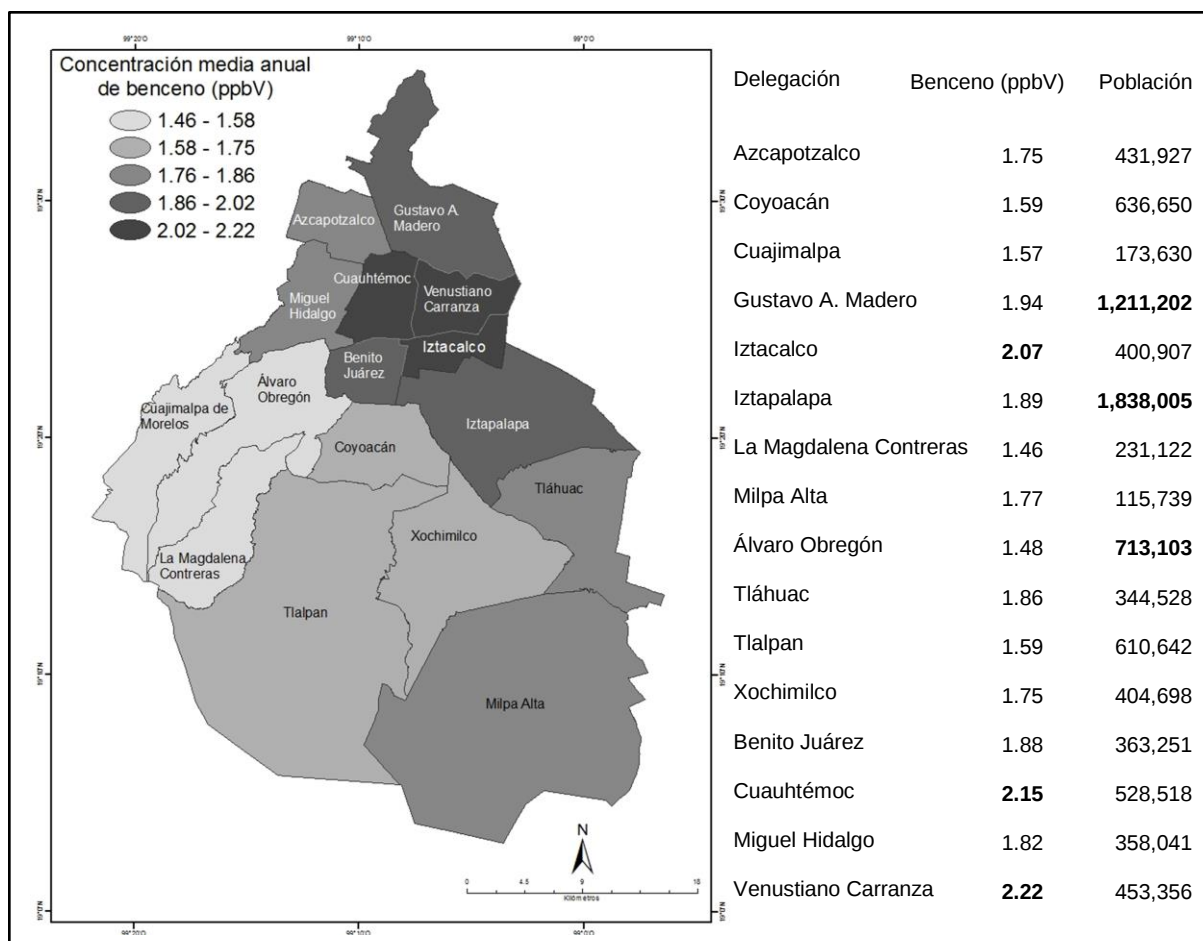
Debido a que las conclusiones acerca de la asociación con el riesgo de desarrollar leucemia en niños no son definitivas y no se encontraron funciones de exposición-respuesta adecuadas,(34) no se estimaron las muertes evitables para este grupo.

Por otro lado, existe suficiente evidencia epidemiológica para afirmar que el riesgo de desarrollar leucemia varía con el tiempo de exposición. Triebig (2010) concluye que los resultados de varios estudios indican que el riesgo es pequeño o incluso inexistente después de 10 a 15 años de que la exposición cesó. Asimismo, una mayor asociación corresponde a exposiciones con duración menor a 5 años.(26) Debido a lo anterior, se estimaron muertes evitables para los años de latencia 3 al 10.

Estimación de la exposición

La estimación de las concentraciones promedio anual de benceno por delegación mostraron que, La Magdalena Conteras y Venustiano Carranza son las del mínimo y el máximo valor estimado, con 1.46 ppbV y 2.22 ppbV respectivamente. Para ilustrar la distribución espacial de la concentración de benceno, se presentan las categorías por quintiles en la figura 2. La región con las mayores concentraciones de benceno en aire es la centro de la Ciudad de México.

Figura 2. Distribución espacial de las concentraciones promedio anual de benceno en las delegaciones de la Ciudad de México, 2005.



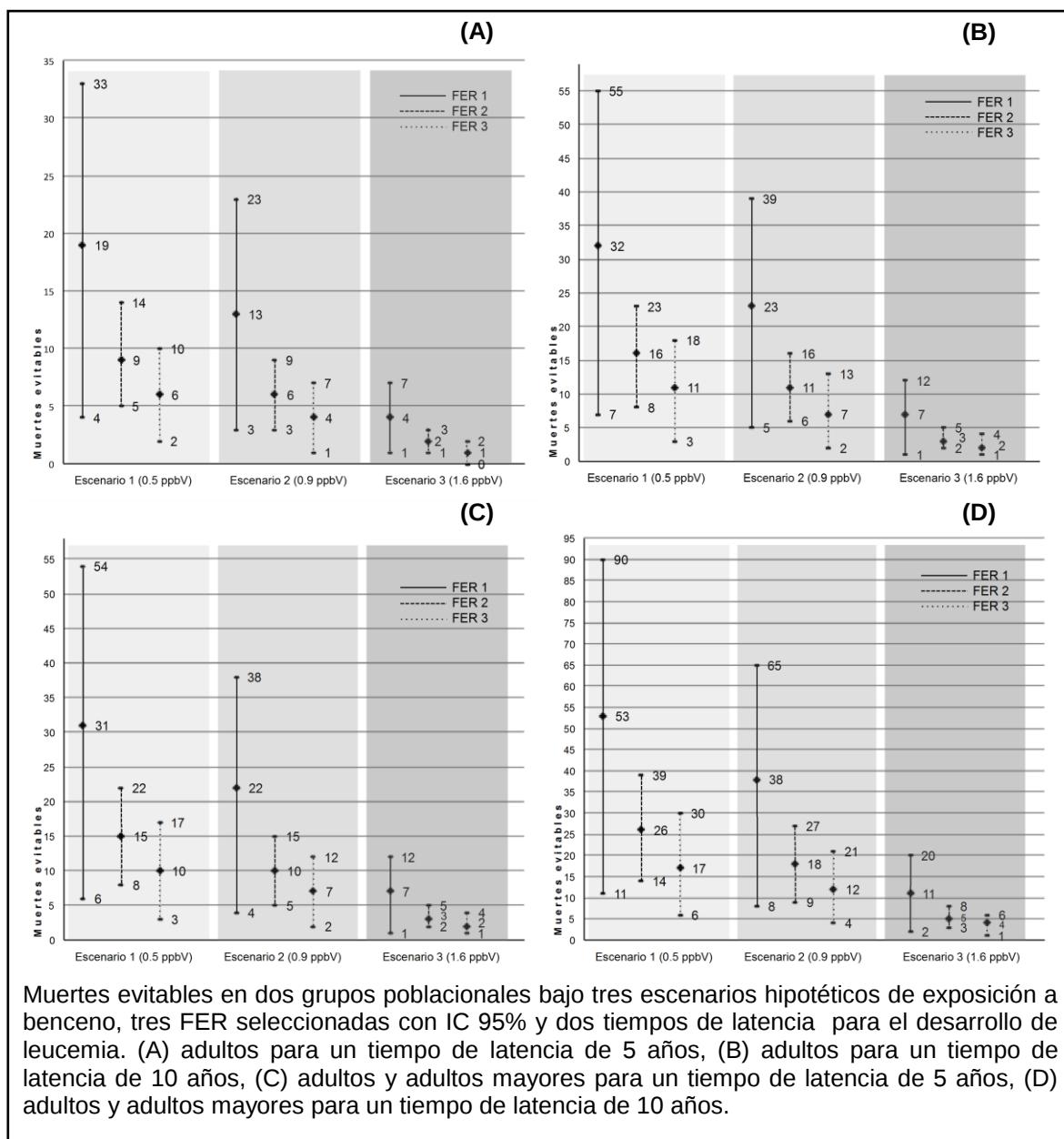
Caracterización de los impactos en salud

En la figura 3 se presentan gráficamente las muertes evitables para los periodos de latencia de 5 y 10 años, bajo los tres escenarios hipotéticos de reducción de concentración de benceno y dos grupos de población; considerando el IC al 95% de las FER seleccionadas. Estos resultados indican que para un periodo de latencia para el desarrollo de leucemia de 5 años, considerando la FER más confiable y con el escenario hipotético de reducción mas drástico se evitarían 19 muertes al año en la población de adultos; mientras que si se incorpora a los

adultos mayores el número asciende a 31. Los resultados desagregados por delegación mostraron que las delegaciones Gustavo A. Madero e Iztapalapa son aquellas en las que se evitaría el mayor número de muertes (número máximo), mientras que en Cuajimalpa y Milpa Alta no existe ninguna muerte atribuible para ese año.

Al considerar un periodo de latencia para el desarrollo de leucemia de 10 años, las muertes evitables aumentan un 68% en el grupo de adultos es decir, el número asciende a 32 casos, mientras que si se añade a los adultos mayores las muertes evitables aumentan un 71%.

Figura 3. Muertes evitables totales por año de latencia de acuerdo a los escenarios hipotéticos de exposición y tres FER (IC 95%).



Nota: Referencia de FER: Vlaanderen et al.(28) FER1: RR=1.043(1.008-1.08), FER2: RR=1.02(1.01-1.03), FER3: RR=1.013(1.004-1.023) por 1 ppm-año.

De forma general, considerando el análisis desagregado por delegación y para los años de latencia 3 al 6, destacan las delegaciones Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc en donde se evitarían el mayor número de muertes. Situación que

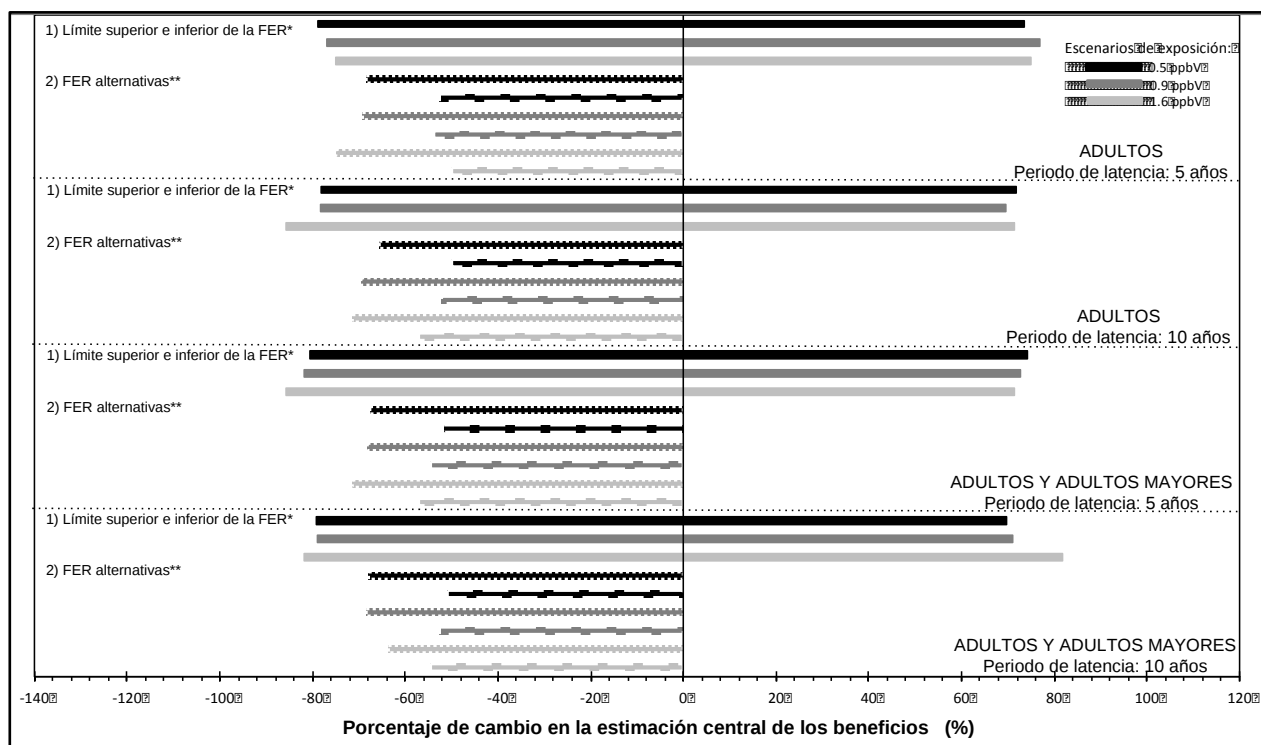
podiera deberse a la elevada densidad poblacional en este territorio o a que aquí se encuentran algunas de las mayores concentraciones de benceno en aire según la estimación por IDW. La intensa actividad vehicular y las emisiones de origen industrial de la zona pueden explicar lo anterior.(3)

Análisis de sensibilidad

Las muertes evitables variaron de acuerdo a la FER utilizada. En la figura 4 se presenta el análisis de sensibilidad que muestra en la primera serie de cálculos, que el margen de incertidumbre asociado al IC al 95% de la FER1 y para el periodo de latencia de 5 años en el grupo de adultos, se encuentra entre $\pm 75\%$ y $\pm 77\%$. El intervalo más amplio es el que corresponde al escenario hipotético de reducción de benceno de 0.9 ppbV. En el caso del periodo de latencia de 10 años para el grupo de adultos, el margen de incertidumbre asociado al IC al 95% de la FER1 se encuentra entre $\pm 78\%$ y $\pm 72\%$, siendo el escenario de reducción de benceno de 1.6 ppbV el del intervalo más amplio. Para los tres escenarios hipotéticos y ambos periodos de latencia, el margen de incertidumbre es menor al 86%.

En la segunda serie de cálculos del análisis de sensibilidad, considerando las dos FER alternativas para el grupo de adultos y adultos mayores y en los tres escenarios hipotéticos, se observa que los cálculos de estimaciones centrales para las muertes evitables podrían ser considerablemente menores, lo que sugiere una posible sobre estimación de los resultados. Ésta se encuentra en un rango de -71% a -52% para el periodo de latencia de 5 años, y de entre -68% a -51% para el periodo de latencia de 10 años.(8)

Figura 4. Sensibilidad de los resultados expresada como porcentaje de cambio en la estimación central de los beneficios. Periodos de latencia para el desarrollo de leucemia de 5 y 10 años.



Nota: Referencia de FER: Vlaanderen et al.(28) *FER1: RR=1.043(1.008-1.08), **FER2: RR=1.02(1.01-1.03), FER3: RR=1.013(1.004-1.023) por 1 ppm-año.

Discusión

Se obtuvieron resultados que confirman que incluso pequeñas reducciones en las concentraciones de benceno en aire podrían prevenir muertes en la población de la Ciudad de México. Considerando el escenario de reducción de exposición más drástico (OMS: 0.5 ppbV), se hubiesen evitado 53 muertes tras 10 años de latencia para el desarrollo de la enfermedad; y cerca de dos terceras partes de éstas si se redujera la concentración de benceno a niveles más tolerantes como el del escenario 2 (EPA: 0.9 ppbV). Estos escenarios hipotéticos de exposición representan potenciales LMP que podrían ser implementados en México para la protección de la salud pública.

Los resultados obtenidos de este estudio conllevan incertidumbre, ya que en las diferentes etapas de la evaluación se tuvieron limitaciones, las cuales posiblemente pueden tener el efecto de sobre o sub estimar los beneficios en salud al reducir la contaminación del aire.

De la calidad de los datos y sus limitaciones

La validez de los resultados está ligada a la calidad de los datos utilizados en las diferentes etapas de la metodología: poblacionales, de salud, monitoreo atmosférico de benceno y FER.

La selección de FER puede representar grandes incertidumbres por la variabilidad de los estudios epidemiológicos que registran medidas de asociación entre la exposición y efecto seleccionados. Las FER utilizadas se han catalogado como confiables para el grupo de adultos, pues provienen de estudios epidemiológicos ocupacionales, aunque las concentraciones de benceno suelen ser mayores a las

del ambiente. Cuando se extrapolan los resultados ocupacionales a la población general, hay que tomar en cuenta que se ha observado una mejor condición de salud en la población que trabaja, por lo que en los estudios epidemiológicos puede existir el sesgo del trabajador sano, que aún estando expuesto, tiene menor riesgo de enfermar. Las cohortes ocupacionales consideradas son de países desarrollados o en desarrollo, cuyas condiciones laborales son potencialmente diferentes a las de México. Bajo estas condiciones, el riesgo de desarrollar leucemia por la exposición crónica ocupacional a benceno, podría estar subestimado.

A pesar de que las dos FER alternativas reflejan un menor número de muertes evitables, la elegida como principal fue denominada por el autor como “el mejor modelo ajustado” es decir, las estimaciones obtenidas con la FER1 son las más confiables.

Dado que el riesgo de desarrollar leucemia por exposición a benceno en un grupo sensible como son los niños no presenta evidencia suficientemente fuerte, (34) no se estimaron muertes evitables en este grupo.

Para los datos de salud de mortalidad es muy probable que exista un subregistro; adicional a esto, debido a que los datos disponibles en México son mas robustos para mortalidad que para morbilidad (12) no se consideró este último indicador en la cuantificación de los beneficios en salud, además de otros efectos en salud que se han relacionado con la exposición crónica y/o aguda a benceno y terminan en muerte. A su vez, no se incluyeron las potenciales interacciones del benceno con otros contaminantes del aire, lo que pudiera resultar en otros efectos

independientes. Por estos motivos la estimación de muertes evitables que se presenta podría estar sub estimada.

A pesar de que el efecto más específico por exposición crónica a benceno es la leucemia mieloide aguda,(27) (5) (4) la mayoría de los estudios epidemiológicos han integrado otros varios tipos de leucemia en los análisis y se han encontrado asociaciones positivas. Dados estos antecedentes, Vlaanderen et al. consideró los tipos C91-C95 de acuerdo a la CIE10 para la derivación de las RR utilizadas como FER.

Debido a que se buscó la homogeneidad en la fuente de la información, los datos poblacionales de 2005 a 2015 provienen de proyecciones de población registrados en SINAIS-CONAPO y no de conteos o censos. En 2005 por ejemplo, estas proyecciones contemplan un 1% más población que la reportada por el conteo de población y vivienda del mismo año, mientras que en 2010 los datos del censo contemplan un 0.05% menos habitantes. Dado que el número de muertes evitables son de máximo un orden de magnitud, éstas diferencias pueden ser despreciables.

Los datos de monitoreo de benceno en México más recientes, confiables, accesibles y de periodo más o menos amplio corresponden a los realizados por CENICA en 2005 y 2006. Éstos datos se encuentran limitados a un año de monitoreo, los cuales por cuestión de eliminación de valores extremos y agregando por temporadas climáticas se redujeron a once meses de los trece disponibles. Lo anterior originó una estimación de las medias anuales de benceno desde 1% a 13% más elevadas en las cinco diferentes regiones de monitoreo. Cabe resaltar el número reducido de estaciones que monitorean benceno y la

restricción para representar todo el territorio de la Ciudad de México. Debido a lo anterior, se seleccionó un método de estimación de exposición apropiado en los casos donde la red de muestreo es escasa y se asumen errores grandes.(23)

De los supuestos

Dada la calidad de los datos y las limitaciones ya expuestas, para la estimación de la exposición se hicieron varios supuestos. En primer lugar, para conocer la exposición acumulada a través de los años y por el número reducido de datos de monitoreo, se consideró que la media anual de benceno en aire de 2005 permaneció constante durante los 365 días de los 10 años de latencia. Actualmente se está realizando el monitoreo de benceno en las cinco estaciones mencionadas en la Ciudad de México, aunque los datos reportados a la fecha tienen faltantes importantes.(35) La única estación de monitoreo de la que se pudo obtener un año completo de datos fue Pedregal, donde la media anual de benceno en 2011 fue de 0.78 ppbV mientras que en 2005 había sido de 1.24 ppbV, resultando en una diferencia no significativa (prueba Kruskal Wallis $p=0.92$). Con una sola estación y un solo año de monitoreo no se podría asegurar que las concentraciones de benceno en el aire de la Ciudad de México hayan descendido en los últimos años.

En segundo lugar, se trabajó bajo el supuesto de que todos los habitantes de la Ciudad de México han permanecido en la misma residencia desde 2005 y hasta 2015, así como que no se mueven en diferentes microambientes.

En tercer lugar, los escenarios hipotéticos de exposición seleccionados fueron transformados a exposición acumulada bajo el supuesto de que esta

concentración permaneciera constante durante los 365 días de los 10 años de latencia y ninguno de los días este límite fuera rebasado. Dos de estos tres escenarios corresponden a valores guía de agencias internacionales como OMS y EPA que corresponden a un riesgo de leucemia de por vida de 1 en 100,000 habitantes. Ambos fueron derivados de lo que se ha denominado “la cohorte más fiable” a partir de la cual se pueden hacer estimaciones de riesgo, esta es la cohorte Goodyear Pliofilm Rubber de Ohio.(36) (37) (38) Por lo anterior, cualquiera de estos dos escenarios hipotéticos pudiera ser establecido como LMP en México. En cuarto lugar, se sabe que en la población general, la principal vía de exposición a benceno es la inhalatoria, por lo que se hizo el supuesto de que otras vías como la dérmica y la oral son despreciables.

Debido a que el método de interpolación usado para evaluar la exposición supone que a medida que nos alejamos del punto de la muestra (las estaciones de monitoreo) la concentración va disminuyendo,(21) y a que la cantidad de puntos de muestreo con los que se contaba era reducida; la precisión del método IDW para estimar la concentración de benceno en aquellas delegaciones muy alejadas de los puntos de muestreo como Tlalpan y Milpa Alta, se ve disminuida. Entre otras limitaciones, el método no considera los patrones de tiempo-actividad de la población. A pesar de éstas, los SIG se están utilizando cada vez más en la estimación de la exposición humana a contaminantes del aire porque minimizan los errores de clasificación de exposición.(21) Lo ideal es aplicar el método de interpolación solo para el dominio de las cinco estaciones de monitoreo sin embargo, por el interés de presentar resultados a escala delegacional y para todo el territorio de la Ciudad de México; se hizo el supuesto de que este método es

aplicable a toda el área de estudio. Lo anterior pudiera haber ocasionado una sub estimación de la exposición.

Entre los supuestos que se hicieron para la caracterización de los impactos en salud están, en primer lugar que existe una relación causal, confirmada con evidencia epidemiológica sólida, entre la exposición y todos los efectos en salud seleccionados. En segundo lugar, que las FER seleccionadas aplican para todo el grupo de edad expuesto considerado, en especial para el grupo de adultos más adultos mayores.

De la sub estimación de muertes evitables

La OMS reportó (39) que en 2005 la tasa estandarizada de mortalidad por leucemias en nuestro país fue de 3.9 por 100,000 habitantes, valor que se ha mantenido prácticamente constante desde 1990 e incluso se ha elevado un poco. La tasa estandarizada por edad del Distrito Federal es muy similar, el promedio de los años 2006 a 2011 es de 3.8 por 100,000 habitantes. En comparación, otros países de América como Brasil y Estados Unidos de América presentaron tasas de 3.3 y 4.9 por 100,000 habitantes en 2005, respectivamente. En Brasil, la tendencia ha sido semejante a la de México desde hace poco más de 20 años. La tasa de mortalidad en México posiblemente se podría reducir si se establecieran normas de calidad del aire que contemplaran a los contaminantes tóxicos como el benceno. Tal es el caso de España que en 1990 tenía una tasa de 4.6 y llegó a 4.0 por 100,000 habitantes en 2005, siguiendo a la baja en los últimos años. Estos resultados podrían deberse en parte a las medidas ejecutadas por las autoridades de la Unión Europea, donde desde 2010 se estableció el LMP para benceno de

1.6 ppbV así como a proyectos que han permitido una mejor vigilancia epidemiológica de la contaminación atmosférica y de sus efectos en la salud, como el APHEIS en donde han participado cinco ciudades españolas desde 1999.(10)

El SINAIS reportó (40) que en 2005 la mortalidad por leucemias en edad preescolar ocupó el séptimo lugar entre las principales causas de mortalidad con una tasa de 3.0 por 100,000 habitantes, mientras que para los niños en edad escolar ocupó el segundo lugar con una tasa de 2.7 por 100,000 habitantes. Dada la gravedad de esta enfermedad en la población infantil, valdrían la pena contar con evidencia epidemiológica que reportara una medida de asociación confiable, ya que al no incluir a este grupo poblacional en el cálculo de muertes evitables, existe una sub estimación considerable.

En general, este grupo de trabajo considera que las limitaciones y supuestos expuestos con anterioridad, suponen en su mayoría una sub estimación de muertes evitables en la Ciudad de México.

Conclusiones

En conclusión, este estudio representa un primer esfuerzo en la cuantificación del impacto en salud atribuible a uno de los contaminantes tóxicos del aire, el benceno. Los resultados indican beneficios en salud como resultado de la hipotética reducción de las concentraciones de benceno en el aire en la Ciudad de México, y representan evidencia científica documentada que servirá como fundamento para la toma de decisiones, pues pueden coadyuvar en el desarrollo de políticas de gestión de la calidad del aire en materia de contaminantes tóxicos

en México, gracias a la recomendación de LMP que reflejan con cierta variabilidad, el impacto de la implementación de los mismos. Cabe mencionar que de implementarse una NOM que establezca un LMP y a la par de los beneficios ya mencionados, se esperaría una reducción de ozono troposférico ya que éste se forma por reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar y contaminantes precursores como COVs,(41) así como los beneficios en salud por la reducción de las concentraciones de ozono en el aire.

Recomendaciones

Debido a que la exposición a los contaminantes atmosféricos está en gran medida fuera del control personal y requiere medidas de las autoridades públicas a nivel nacional, regional e internacional,(1) se recomienda agilizar el establecimiento de LMP para benceno y otros contaminantes tóxicos en México; así como realizar un monitoreo estricto de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX) y ampliar la cobertura de la red, que a futuro permita evaluar el impacto en salud de otros contaminantes tóxicos, con datos de monitoreo confiables, históricos y más representativos del área de estudio. A su vez se recomienda establecer los métodos de medición para determinar la concentración de BTEX en el aire ambiente y los procedimientos de calibración de los equipos de medición.

Gracias a que este estudio permitió observar la distribución espacial de la contaminación del aire con benceno y los beneficios en salud, se recomienda realizar intervenciones focalizadas según las delegaciones identificadas como más problemáticas.

Por otro lado se recomienda realizar investigación epidemiológica para conocer una medida de asociación confiable entre exposición a benceno en aire y leucemia en niños; lo que permitirá evaluar el impacto en este grupo sensible dado el lugar que ocupa la leucemia entre las primeras causas de mortalidad y sus respectivas tasas en México.

Como última recomendación, es importante considerar para futuras EIS la incorporación de una evaluación económica, lo que permitirá una visión mas sólida de las implicaciones por la implementación de LMP. Una evaluación económica de los impactos en salud presentados en esta evaluación, podrían complementar este estudio.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Alan Castillo Ferraez por su ayuda y orientación en el uso del software ArcGIS® 10.1.; así como al Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA) por la disponibilidad en el uso de la base de datos de monitoreo de benceno en aire de la ZMCM.

Referencias

1. OMS | Calidad del aire y salud [Internet]. WHO. [cited 2013 Jun 11]. Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html>
2. World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. 2nd ed. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe; 2000.
3. SMA-GDF. Inventario de emisiones de contaminantes tóxicos de la ZMVM. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal; 2010.
4. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Benzene. Atlanta, GA.: Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services; 2007.
5. Environmental Protection Agency (EPA). Carcinogenic Effects of Benzene: an update. Washington, DC.: U.S. Environmental Protection Agency; 1998. Report No.: EPA/600/P-97/001F.
6. Environmental Protection Agency (EPA). Toxicological Review of Benzene (Noncancer effects). Washington, DC.: U.S. Environmental Protection Agency; 2002. Report No.: EPA/635/R-02/001F.
7. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Conference IA for R on C, World Health Organization. A review of human carcinogens. International Agency for Research on Cancer; 2012.
8. SMA-GDF. Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2010. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal; 2010.
9. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología. Guía para evaluar los impactos en la salud por la instrumentación de medidas de control de la contaminación atmosférica. Primera edición. México; 2012.
10. Boldo E, Aragonés N, Medina S, Pérez-Gómez B, Pollán M, Lope V, et al. Evaluación de Impacto en Salud: una herramienta infrautilizada en salud pública. Ejemplo Apehis (Air pollution and health: a European Information System). Boletín Epidemiológico Semanal. 2005;13(9):97–108.
11. Medina S, Plasencia A, Ballester F, Mücke HG, Schwartz J, Apehis group. Apehis: public health impact of PM10 in 19 European cities. J Epidemiol Community Health. 2004 Oct;58(10):831–6.
12. Horacio Riojas Rodríguez, Urinda Álamo Hernández, José Luis Texcalac Sangrador, Isabel Romieu. Evaluación de impacto en salud por exposición a ozono y material particulado (PM10) en la Zona Metropolitana del Valle de México. Primera edición. Cuernavaca, Morelos, México: Instituto Nacional de Salud Pública; 2012.
13. Matilde Eva Espinosa Rubio, Miguel Magaña Reyes, Salvador Blanco Jiménez, Beatriz Cárdenas Gonzáles. Análisis y revisión de información que sustente la elaboración de una NOM sobre benceno, tolueno y xilenos. México, D.F.: Consultoría Ambiental; 2008

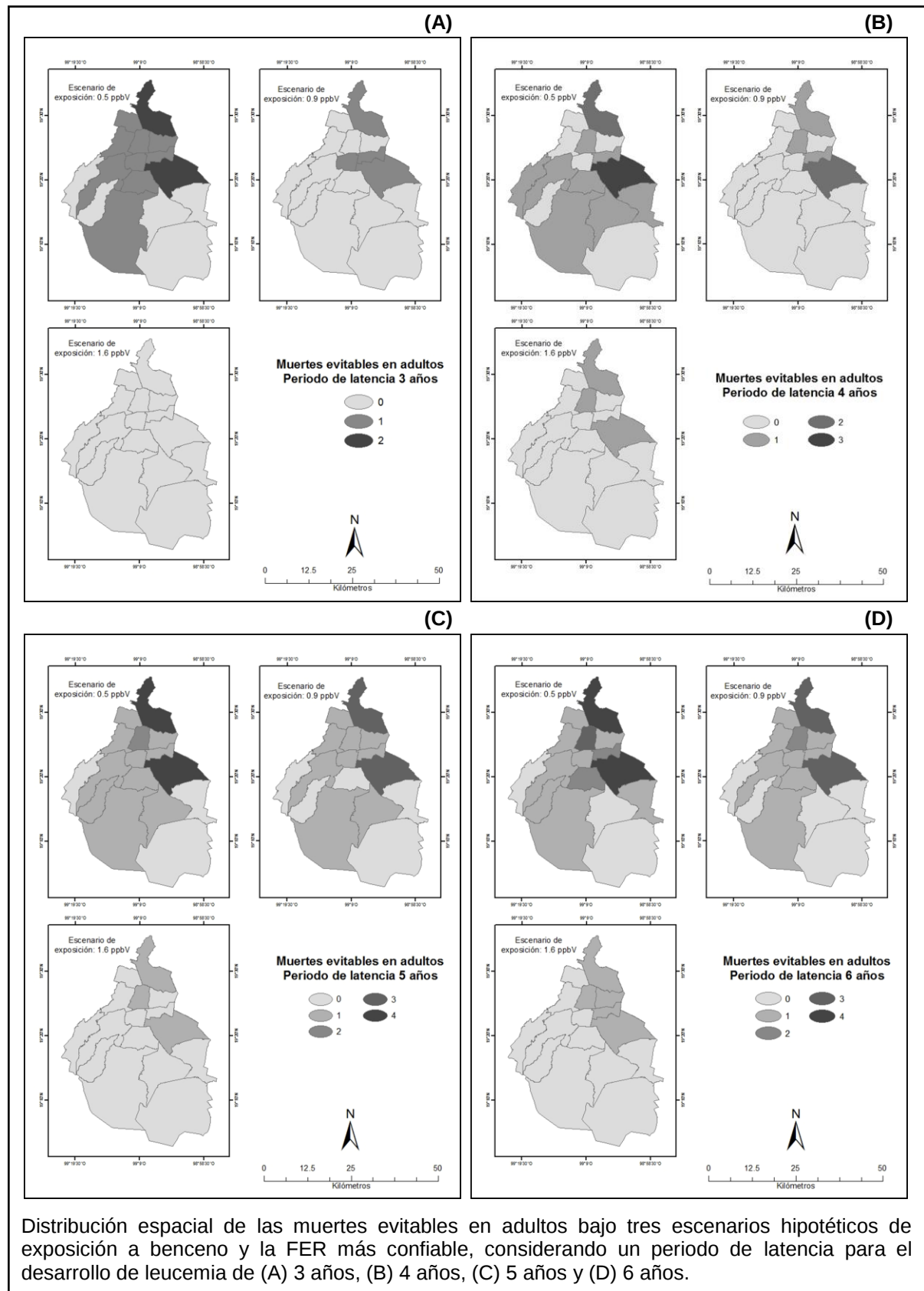
Oct.

14. WHO | Tools and methods [Internet]. WHO. [cited 2013 Jun 11]. Available from: <http://www.who.int/hia/tools/en/>
15. INEGI | Censos y conteos [Internet]. INEGI. [cited 2013 Jun 11]. Available from: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/consulta.asp?p=10215&c=16851&s=est>
16. SSA | Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS) [Internet]. SSA. [cited 2013 Jun 12]. Available from: <http://www.sinais.salud.gob.mx/basesdedatos/index.html>
17. CONAPO | Proyecciones de la población [Internet]. CONAPO. [cited 2013 Jun 12]. Available from: <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
18. SMA-GDF, INE-DGCENICA, UAM-I. Informe técnico de monitoreo y evaluación de las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal; 2008 Feb.
19. INE | Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) [Internet]. INE. [cited 2013 Jun 11]. Available from: http://sinaica.ine.gob.mx/rama_zmvm.html
20. Instituto Nacional de Ecología. Manual 5. Protocolo de manejo de datos de la calidad del aire. Primera edición. México; 2010.
21. Zou B, Wilson JG, Zhan FB, Zeng Y. Air pollution exposure assessment methods utilized in epidemiological studies. *J Environ Monit Jem*. 2009 Mar;11(3):475–90.
22. INEGI | Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales [Internet]. INEGI. [cited 2013 Jun 11]. Available from: <http://mapserver.inegi.gob.mx/data/inf1m/>
23. Jerrett M, Arain A, Kanaroglou P, Beckerman B, Potoglou D, Sahsuvaroglu T, et al. A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2005 Mar;15(2):185–204.
24. Pérez L, Sunyer J, Künzli N. Estimating the health and economic benefits associated with reducing air pollution in the Barcelona metropolitan area (Spain). *Gac Sanit Sespas*. 2009 Aug;23(4):287–94.
25. Evaluation and use of epidemiological evidence for environmental health risk assessment: WHO guideline document. *Environ Health Perspect*. 2000 Oct;108(10):997–1002.
26. Triebig G. Implications of latency period between benzene exposure and development of leukemia--a synopsis of literature. *Chem Biol Interact*. 2010 Mar 19;184(1-2):26–9.
27. National Environment Protection Measure (NEPM). Benzene Health Review. Canberra, Australia: National Environment Protection Measure (NEPM); 2003.

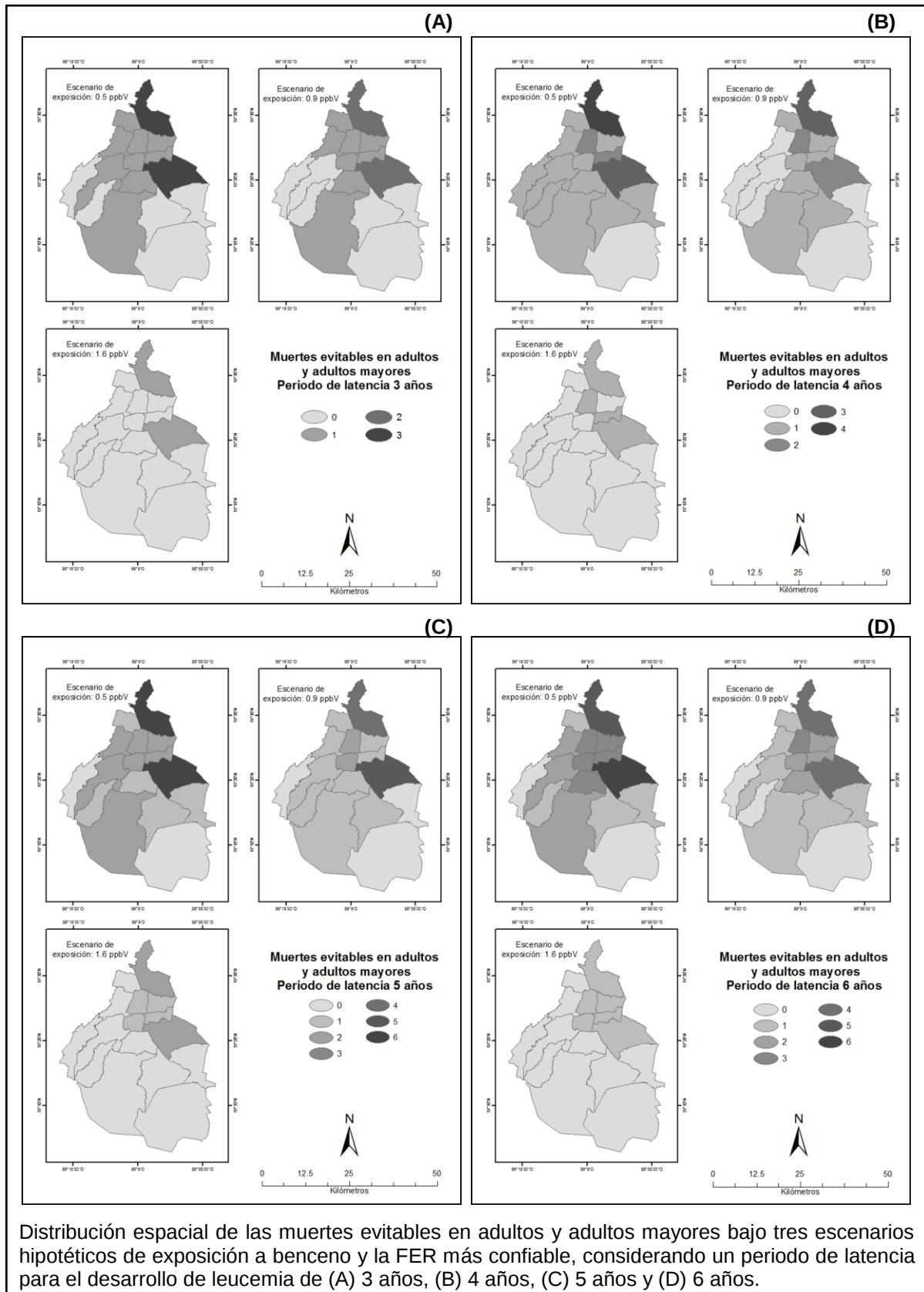
28. Vlaanderen J, Portengen L, Rothman N, Lan Q, Kromhout H, Vermeulen R. Flexible meta-regression to assess the shape of the benzene-leukemia exposure-response curve. *Environ Health Perspect.* 2010 Apr;118(4):526–32.
29. Rinsky RA, Hornung RW, Silver SR, Tseng CY. Benzene exposure and hematopoietic mortality: A long-term epidemiologic risk assessment. *Am J Ind Med.* 2002 Dec;42(6):474–80.
30. Pyatt D, Hays S. A review of the potential association between childhood leukemia and benzene. *Chem Biol Interact.* 2010 Mar 19;184(1-2):151–64.
31. Crosignani P, Tittarelli A, Borgini A, Codazzi T, Rovelli A, Porro E, et al. Childhood leukemia and road traffic: A population-based case-control study. *Int J Cancer J Int Cancer.* 2004 Feb 10;108(4):596–9.
32. Raaschou-Nielsen O, Hertel O, Thomsen BL, Olsen JH. Air pollution from traffic at the residence of children with cancer. *Am J Epidemiol.* 2001 Mar 1;153(5):433–43.
33. Belson M, Kingsley B, Holmes A. Risk factors for acute leukemia in children: a review. *Environ Health Perspect.* 2007 Jan;115(1):138–45.
34. National Institute for Health and Welfare. European Perspectives on Environmental Burden of Disease. Estimates for nine stressors in six European countries. Helsinki, Finland: National Institute for Health and Welfare; 2011 p. 95.
35. SIMAT | Concentración de compuestos orgánicos tóxicos en el aire [Internet]. SIMAT. [cited 2013 Jun 12]. Available from: <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=46>
36. Crump KS. Risk of benzene-induced leukemia: a sensitivity analysis of the pliofilm cohort with additional follow-up and new exposure estimates. *J Toxicol Environ Health.* 1994 Jun;42(2):219–42.
37. Rinsky RA, Young RJ, Smith AB. Leukemia in benzene workers. *Am J Ind Med.* 1981;2(3):217–45.
38. Rinsky RA, Smith AB, Hornung R, Filloon TG, Young RJ, Okun AH, et al. Benzene and leukemia. An epidemiologic risk assessment. *N Engl J Med.* 1987 Apr 23;316(17):1044–50.
39. WHO | WHO Mortality Database [Internet]. WHO. [cited 2013 Jun 14]. Available from: http://www.who.int/healthinfo/mortality_data/en/index.html
40. SINAIS | Mortalidad [Internet]. [cited 2013 Jun 12]. Available from: <http://www.sinais.salud.gob.mx/mortalidad/index.html>
41. Organización Mundial de la Salud (OMS). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Ginebra, Suiza.: Organización Mundial de la Salud (OMS); 2006. Report No.: WHO/SDE/PHE/OEH/06.02.

Anexos

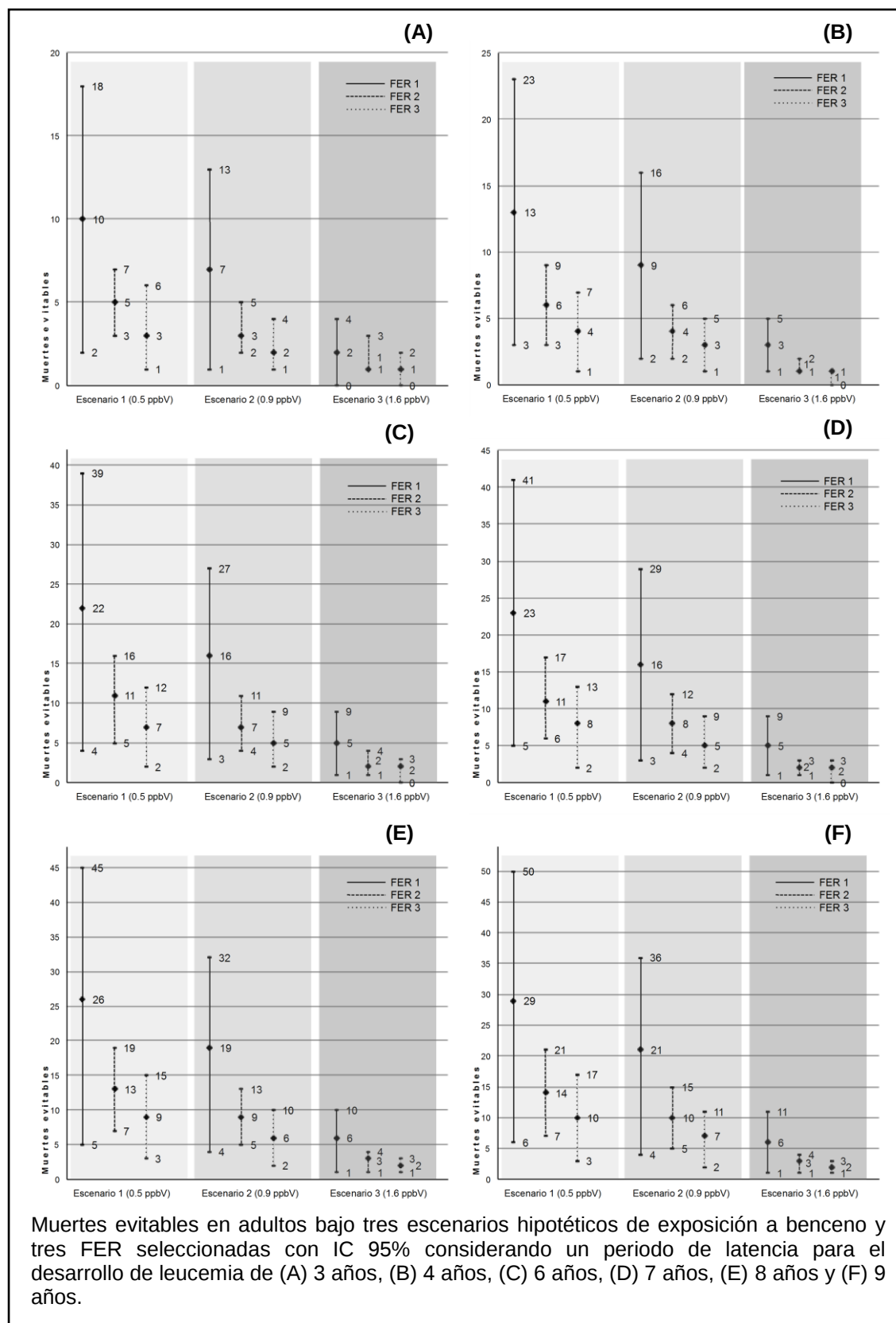
A-Figura 1. Distribución espacial de las muertes evitables en adultos de la Ciudad de México.



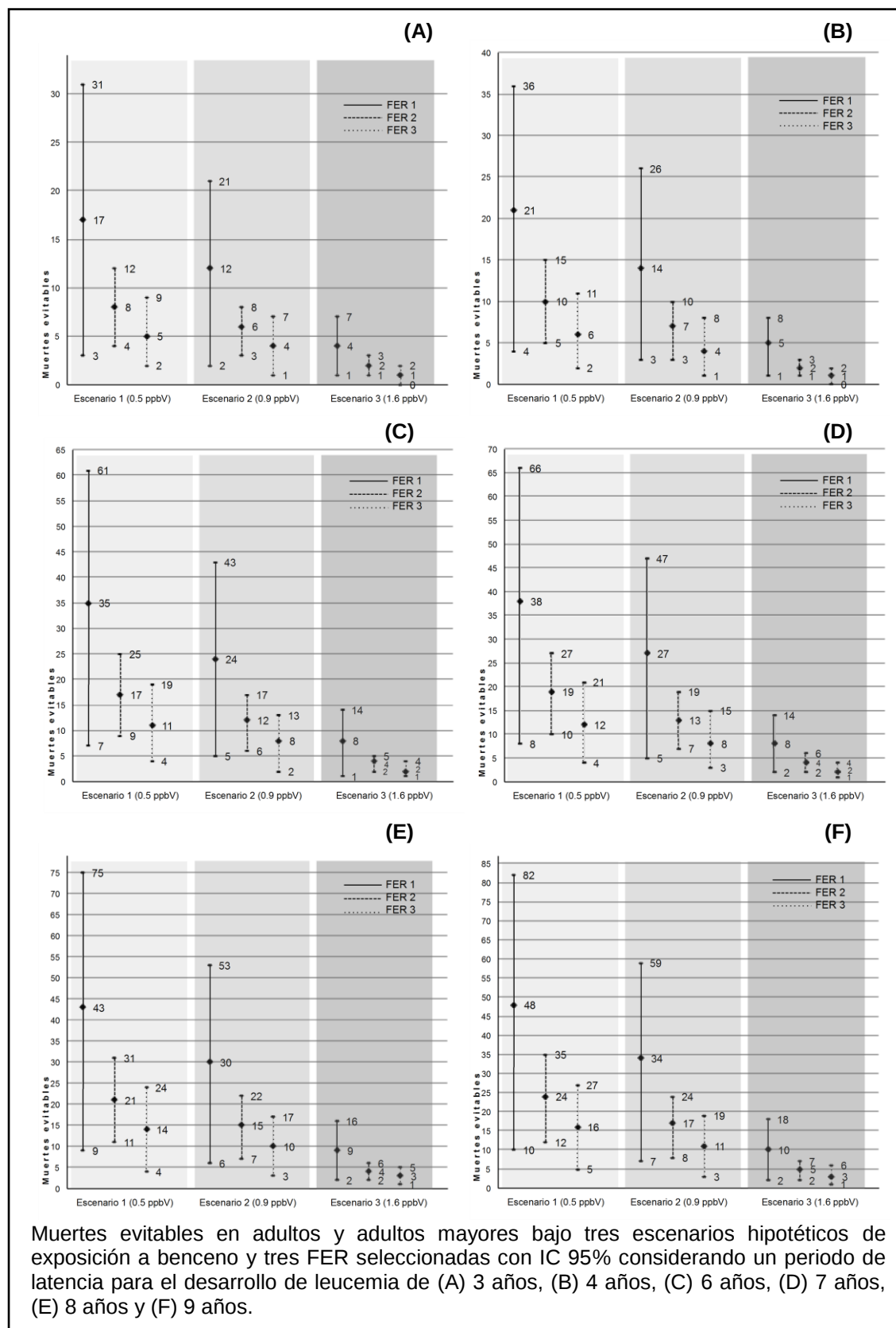
A-Figura 2. Distribución espacial de las muertes evitables en adultos y adultos mayores de la Ciudad de México.



A-Figura 3. Muertes evitables totales en adultos de la Ciudad de México.



A-Figura 4. Muertes evitables totales en adultos y adultos mayores de la Ciudad de México.

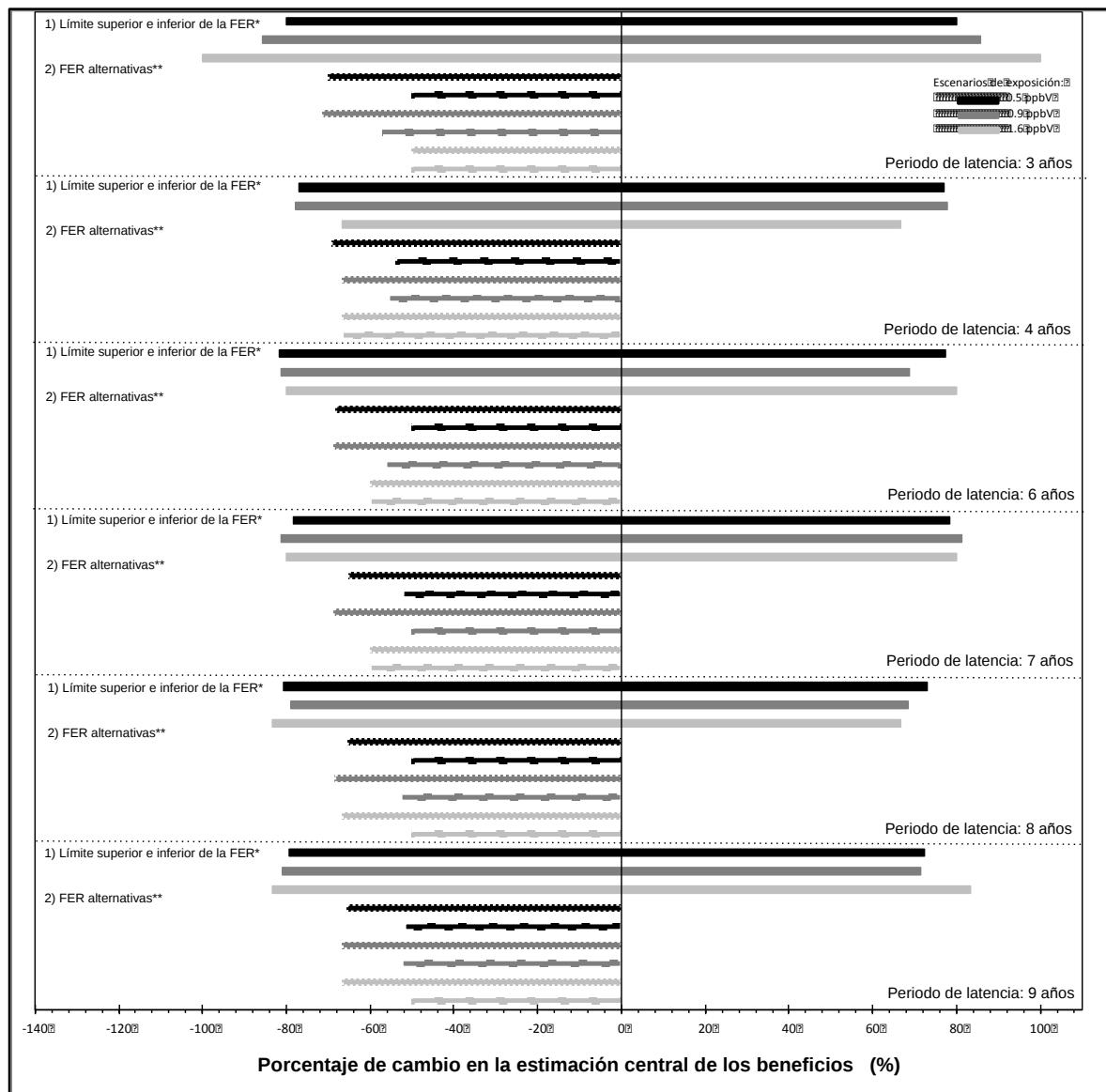


A-Tabla 1. Límites máximos permisibles (promedio anual) para benceno en aire ambiente alrededor del mundo.

Referencia	Valor límite promedio anual		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppbV	ppbC
Irlanda	5	1.6	9.6
Corea	5	1.6	9.6
Unión Europea y Reino Unido	5	1.6	9.6
Colombia	5	1.6	9.6
Texas	4.5	1.4	8.5
Japón	3	0.9	5.4
Alberta, Canadá	3	0.9	5.4
IRIS-EPA USA*	1.3 - 4.5 promedio 2.9	0.9	5.4
OMS*	2.2 – 1.3 promedio 1.7	0.5	3.2

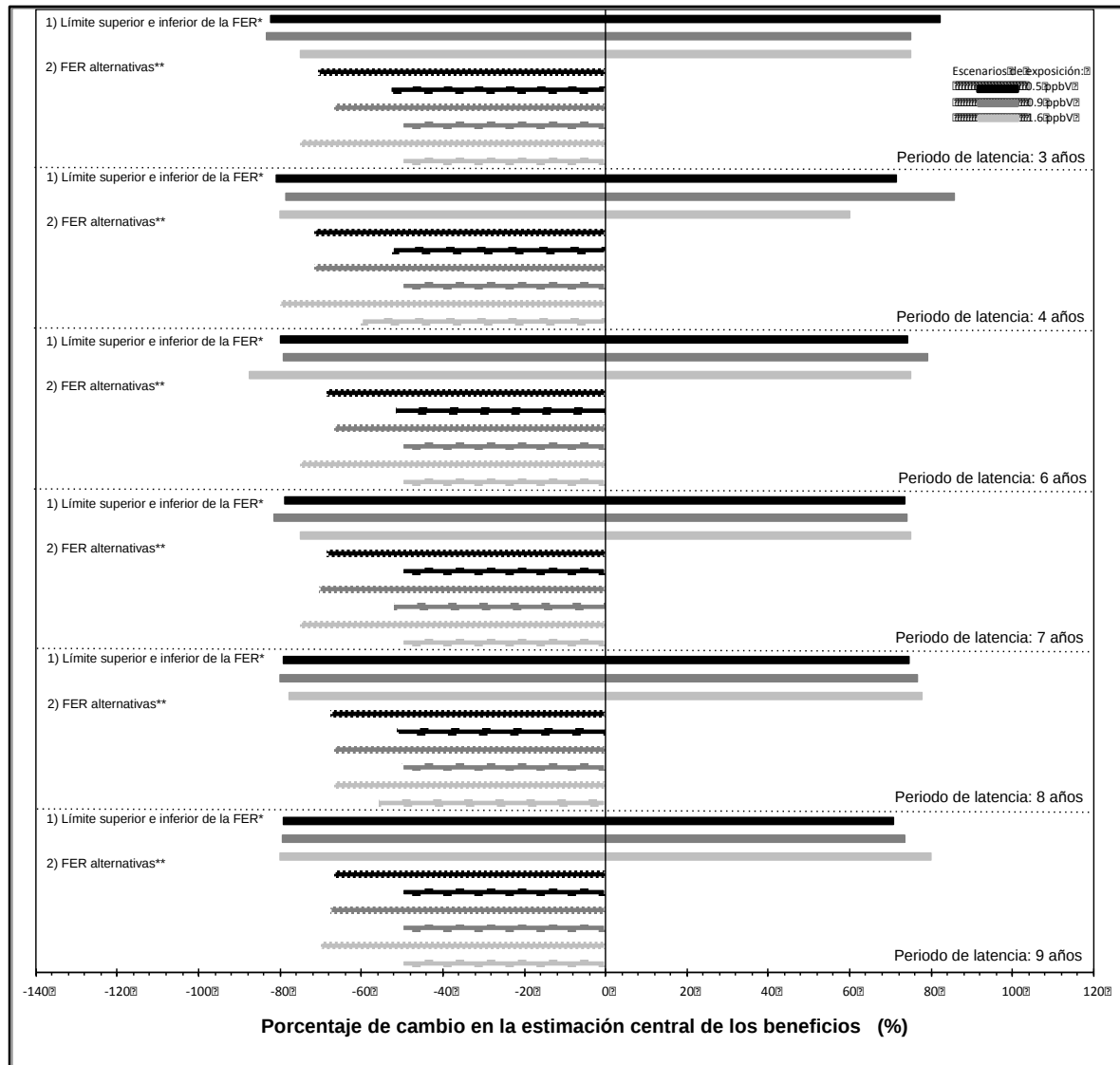
Nota: *Valor guía para benceno por vía de exposición inhalatoria. Correspondiente a un riesgo de por vida de leucemia de 1×10^{-5} (1 caso en 100 000) ante la exposición a la concentración de benceno correspondiente indicada. En el caso IRIS-EPA se considera una UR= 2.2×10^{-6} a 7.8×10^{-6} por cada $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el caso OMS se considera una UR= 4.4×10^{-6} a 7.5×10^{-6} por cada $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Factores de conversión $1 \text{ ppmV} = 3190 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1 \text{ ppmV} = 1000 \text{ ppbV}$, $1 \text{ ppbC} = \text{ppbV}$ (# de átomos de carbono del benceno).

A-Figura 5. Sensibilidad de los resultados expresada como porcentaje de cambio en la estimación central de los beneficios, considerando periodos de latencia para el desarrollo de leucemia de 3, 4, 6, 7, 8 y 9 años, en el grupo de adultos.



Nota: Referencia de FER: Vlaanderen et al.(28) *FER1: $RR=1.043(1.008-1.08)$, **FER2: $RR=1.02(1.01-1.03)$, FER3: $RR=1.013(1.004-1.023)$ por 1 ppm-año.

A-Figura 6. Sensibilidad de los resultados expresada como porcentaje de cambio en la estimación central de los beneficios, considerando periodos de latencia para el desarrollo de leucemia de 3, 4, 6, 7, 8 y 9 años, en el grupo de adultos y adultos mayores.



Nota: Referencia de FER: Vlaanderen et al.(28) *FER1: $RR=1.043(1.008-1.08)$, **FER2: $RR=1.02(1.01-1.03)$, FER3: $RR=1.013(1.004-1.023)$ por 1 ppm-año.

A-Tabla 2. Tasas de mortalidad por leucemia por año y grupo de edad, Ciudad de México 2006-2011.

Tasas de mortalidad por leucemia por año y grupo de edad						
Grupo de edad	Año					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Niños (<1 a 14 años)	2.36	3.10	2.06	2.10	2.76	2.97
Adultos (15 a 64 años)	2.83	2.88	2.87	2.70	3.22	3.13
Adultos mayores (≥65 años)	18.49	15.96	19.24	15.57	18.62	16.29

Nota: Tasas crudas por 100 000 habitantes. Leucemias consideradas de acuerdo a la CIE10: C91 leucemia linfóide, C92 leucemia mieloide, C93 leucemia monocítica, C94 otras leucemias de tipo celular específico, C95 leucemia de tipo celular no específico.

A-Tabla 3. Distribución de las tasas de mortalidad por leucemia en las 16 delegaciones por año y grupo de edad, Ciudad de México 2006-2011.

Distribución de las tasas de mortalidad por leucemia en las 16 delegaciones						
Grupo de edad	Año					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Niños (<1 a 14 años)	2.36 ± 1.6 (0-6.10) ¹	3.02 ± 1.0 (1.56-5.01) ²	2.18 ± 1.4 (0-6.10) ³	2.07 ± 1.2 (0-4.21) ³	3.33 ± 2.1 (0-8.06) ¹	2.80 ± 2.1 (0-6.75) ³
Adultos (15 a 64 años)	2.76 ± 0.9 (1.30-3.88) ⁴	2.88 ± 1.2 (1.60-5.66) ⁵	2.83 ± 1.2 (0.78-5.19) ³	2.99 ± 1.4 (1.30-7.61) ⁶	3.09 ± 1.2 (1.13-6.09) ⁷	3.10 ± 1.3 (0-4.91) ²
Adultos mayores (≥65 años)	20.79 ± 10.9 (0-45.97) ⁷	15.14 ± 7.6 (0-30.60) ³	18.21 ± 9.2 (0-37.91) ⁸	16.99 ± 10.0 (5.80-43.77) ⁶	17.80 ± 5.6 (3.97-28.84) ³	14.76 ± 7.6 (0-26.13) ⁸

Nota: p>0.05 prueba global (Kruskal-Wallis) y prueba entre grupos (Kruskal-Wallis con corrección de Dunn).

Tasas crudas por 100 000 habitantes. Leucemias consideradas de acuerdo a la CIE10: C91 leucemia linfóide, C92 leucemia mieloide, C93 leucemia monocítica, C94 otras leucemias de tipo celular específico, C95 leucemia de tipo celular no específico.

Considerando las 16 delegaciones del Distrito Federal. Máximos correspondientes a las delegaciones: ¹Venustiano Carranza, ²Cuauhtémoc, ³Benito Juárez, ⁴Miguel Hidalgo, ⁵Azcapotzalco, ⁶Cuajimalpa, ⁷Magdalena Contreras y ⁸Tlalpan.

A-Tabla 4. Tasas de mortalidad por leucemia por año, grupo de edad y delegación, Ciudad de México 2006-2011.

Tasas de mortalidad por leucemia por año, grupo de edad y delegación																								
Delegación	Año																							
	2006				2007				2008				2009				2010				2011			
	Grupo de edad				Grupo de edad				Grupo de edad				Grupo de edad				Grupo de edad				Grupo de edad			
	N	A	AM	A+AM	N	A	AM	A+AM	N	A	AM	A+AM	N	A	AM	A+AM	N	A	AM	A+AM	N	A	AM	A+AM
Azcapotzalco*	1.09	1.33	8.53	2.08	3.37	5.66	16.73	6.84	3.48	4.01	13.68	5.07	1.20	1.68	24.13	4.18	2.46	3.38	13.14	4.49	1.27	2.72	7.72	3.30
Coyoacán*	1.59	3.72	21.80	5.52	4.10	2.63	25.18	4.92	0.85	2.41	34.07	5.70	2.61	1.98	12.94	3.14	1.79	1.76	16.25	3.34	6.45	3.98	21.14	5.90
Cuajimalpa*	2.04	2.47	27.34	3.89	2.03	1.60	12.68	2.26	2.02	0.78	23.54	2.20	2.01	7.61	43.77	9.96	4.00	2.23	20.36	3.46	1.99	3.63	0	3.37
Gustavo A. Madero*	2.85	2.78	22.00	4.68	2.94	2.30	9.70	3.05	2.27	3.54	23.24	5.57	3.51	3.07	24.83	5.37	1.61	4.32	20.26	6.05	2.48	3.61	11.90	4.53
Iztacalco*	2.24	3.62	25.00	5.85	4.63	4.37	15.34	5.53	1.20	4.76	21.08	6.53	1.23	3.68	20.68	5.57	1.27	2.60	20.28	4.60	5.23	4.48	19.87	6.27
Iztapalapa*	2.44	2.45	11.52	3.04	3.31	2.98	12.07	3.59	2.52	2.50	10.46	3.05	1.28	2.48	10.97	3.10	1.52	3.25	20.92	4.57	3.74	2.54	15.41	3.55
Magdalena Contreras*	3.35	3.14	45.97	6.38	1.70	1.87	14.68	2.87	1.73	1.85	21.10	3.40	1.76	3.68	33.70	6.18	5.35	6.09	19.37	7.24	0	4.24	12.37	4.97
Milpa Alta*	0	1.29	38.28	3.63	2.71	2.49	0	2.33	2.67	3.61	0	3.36	0	3.49	15.10	4.32	0	1.13	13.98	2.09	0	0	0	0
Álvaro Obregón*	1.16	2.81	22.72	4.43	2.95	2.79	28.43	4.93	0.60	2.38	14.74	3.44	3.06	1.97	10.14	2.69	3.73	2.75	21.47	4.46	1.90	2.74	18.78	4.25
Tláhuac*	4.90	1.70	0	1.60	2.93	1.65	6.73	1.95	0	1.21	6.24	1.51	3.88	3.15	5.80	3.31	1.93	1.54	16.18	2.51	0.96	1.88	10.03	2.45
Tlalpan*	1.35	3.70	14.77	4.50	2.07	2.29	11.31	2.97	2.10	3.64	37.91	6.30	1.42	2.26	7.78	2.70	2.89	3.37	17.37	4.53	1.47	2.68	26.13	4.70
Xochimilco*	0.93	3.54	25.02	4.95	1.88	2.78	18.88	3.88	1.89	1.36	13.37	2.22	0.95	3.02	12.62	3.73	3.81	4.29	3.97	4.27	2.87	0.98	18.77	2.40
Benito Juárez*	3.78	1.86	23.99	4.84	3.93	2.60	30.60	6.42	6.10	5.19	20.78	7.35	4.21	2.22	15.85	4.13	6.53	3.33	28.84	6.97	6.75	4.43	23.91	7.26
Cuauhtémoc*	0.98	3.69	10.56	4.45	5.01	2.36	10.28	3.25	1.03	2.35	14.02	3.69	3.16	3.90	15.61	5.27	3.23	3.37	9.50	4.10	5.52	4.91	11.09	5.67
Miguel Hidalgo*	3.02	3.88	14.49	5.14	1.56	5.41	16.99	6.81	3.20	3.47	22.13	5.75	1.65	2.31	8.11	3.03	5.07	3.46	23.75	6.03	1.73	3.45	15.45	5.01
Venustiano Carranza*	6.10	2.24	20.66	4.27	3.15	2.25	12.69	3.42	3.25	2.26	14.95	3.72	1.12	1.30	9.79	2.29	8.06	2.61	19.21	4.60	2.37	3.29	23.56	5.77
Ciudad de México*	2.36	2.83	18.49	4.21	3.10	2.88	15.96	4.06 ⁺	2.06	2.87	19.24	4.38	2.10	2.70 ⁺	15.57	3.92 ⁺	2.76	3.22 ⁺	18.62	4.72 ⁺	2.97	3.13	16.29	4.45

Nota: Tasas crudas por 100 000 habitantes. Leucemias consideradas de acuerdo a la CIE10: C91 leucemia linfoide, C92 leucemia mieloide, C93 leucemia monocítica, C94 otras leucemias de tipo celular específico, C95 leucemia de tipo celular no específico.

N: niños (<1 a 14 años); A: adultos (15 a 64 años); AM: adultos mayores (≥65 años); A+AM: adultos y adultos mayores (15 a ≥65 años).

* P<0.05 prueba global (Kruskal-Wallis) para las tasas en el grupo de edad A+AM en los diferentes años por delegación.

⁺ Prueba con razón de tasas. Tasas de mortalidad diferentes por pares de años. 1) A 2009 vs 2010, 2) A+AM 2007 vs 2010, 3) A+AM 2009 vs 2010.

A-Tabla 5. Distribución de las tasas de mortalidad por leucemia por grupo de edad y delegación, Ciudad de México 2006-2011.

Tasas de mortalidad por leucemia 2006-2011			
Delegación	Grupo de edad		
	Niños (<1 a 14 años)	Adultos (15 a 64 años)	Adultos mayores (≥65 años)
Azcapotzalco	2.15±1.03 (1.09-3.48)	3.13±1.47 (1.33-5.66)	13.99±5.53 (7.72-24.13)
Coyoacán	2.90±1.90 (0.85-6.45)	2.75±0.84 (1.76-3.98)	21.89±6.78 (12.94-34.07)
Cuajimalpa	2.35±0.75 (1.99-4.00)	3.05±2.22 (0.78-7.61)	21.28±13.50 (0-43.77)
Gustavo A. Madero	2.61±0.60 (1.61-3.51)	3.27±0.65 (2.30-4.32)	18.66±5.80 (9.70-24.83)
Iztacalco	2.63±1.69 (1.20-5.23)	3.92±0.72 (2.60-4.76)	20.38±2.84 (15.34-25.00)
Iztapalapa	2.47±0.89 (1.28-3.74)	2.70±0.30 (2.45-3.25)	13.56±3.69 (10.46-20.92)
Magdalena Contreras	2.31±1.68 (0-5.35)	3.48±1.47 (1.85-6.09)	24.53±11.84 (12.37-45.97)
Milpa Alta	0.90±1.28 (0-2.71)	2.00±1.32 (0-3.61)	11.23±13.86 (0-38.28)
Álvaro Obregón	2.23±1.12 (0.60-3.73)	2.57±0.31 (1.97-2.81)	19.38±5.89 (10.14-28.43)
Tláhuac	2.43±1.69 (0-4.90)	1.85±0.62 (1.21-3.15)	7.50±4.92 (0-16.18)
Tlalpan	1.88±0.55 (1.35-2.89)	2.99±0.61 (2.26-3.70)	19.21±10.20 (7.78-37.91)
Xochimilco	2.05±1.03 (0.93-3.81)	2.66±1.17 (0.98-4.29)	15.44±6.62 (3.97-25.02)
Benito Juárez	5.22±1.28 (3.78-6.75)	3.27±1.20 (1.86-5.19)	23.99±4.94 (15.85-30.60)
Cuauhtémoc	3.15±1.76 (0.98-5.52)	3.43±0.90 (2.35-4.91)	11.84±2.22 (9.50-15.61)
Miguel Hidalgo	2.71±1.26 (1.56-5.07)	3.66±0.92 (2.31-5.41)	16.82±5.20 (8.11-23.75)
Venustiano Carranza	4.01±2.37 (1.12-8.06)	2.32±0.59 (1.30-3.29)	16.81±4.80 (9.79-23.56)

Nota: Tasas crudas por 100 000 habitantes. Leucemias consideradas de acuerdo a la CIE10: C91 leucemia linfocítica, C92 leucemia mielocítica, C93 leucemia monocítica, C94 otras leucemias de tipo celular específico, C95 leucemia de tipo celular no específico.

A-Tabla 6. Promedio anual de benceno en aire ambiente de la Ciudad de México según estación de monitoreo; y cumplimiento de algunos LMP internacionales.

Estación de monitoreo	Media anual benceno (ppbV)	Unión Europea (1.6 ppbV)	IRIS-EPA (0.9 ppbV)	OMS (0.5 ppbV)
Total de estaciones ^o (n=266)	1.82 ± 3.0	No	No	No
Merced ^o * + (n=50)	2.38 ± 4.5	No	No	No
Pedregal ^o * + (n=54)	1.24 ± 1.8	Si	No	No
Iztapalapa-CENICA ^o (n=54)	1.86 ± 3.2	No	No	No
Tlalnepantla ^o (n=53)	1.49 ± 1.7	Si	No	No
San Agustín ^o ^a (n=55)	2.15 ± 3.0	No	No	No

Nota: ^op<0.05 prueba global (Kruskal-Wallis)

*p<0.05 prueba entre grupos (Kruskal-Wallis con corrección de Dunn)

+ p<0.05 comparación de cada estación contra el resto (Kruskal-Wallis)

^a marginal 0.10>p>0.05 comparación de cada estación contra el resto (Kruskal-Wallis)

A-Tabla 7. Promedio anual de benceno en aire ambiente de la Ciudad de México según la temporada climática.

Temporada climática	Promedio de benceno (ppbV)
Todo el año (nov-sept) ^o (n=266)	1.82 ± 2.99
Seca fría (nov-feb) ^o (n=96)	3.15 ± 4.6
Seca caliente (mar-may) ^o (n=72)	1.68 ± 0.9
Lluvias (jun-sept) ^o * (n=98)	0.61 ± 0.5

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ^op<0.05 prueba global (Kruskal-Wallis)

*p<0.05 prueba entre grupos (Kruskal-Wallis con corrección de Dunn)