EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL GAS NATURAL EN EL SECTOR INDUSTRIAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN BOGOTÁ MEDIANTE EL ÍNDICE DE CALIDAD DE VIDA

DIANA CAROLINA OBANDO ANZOLA
EDGAR ANDRÉS VIRGUEZ RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2009

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL GAS NATURAL EN EL SECTOR INDUSTRIAL PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN BOGOTÁ MEDIANTE EL ÍNDICE DE CALIDAD DE VIDA

DIANA CAROLINA OBANDO ANZOLA

Proyecto de grado presentado a la Universidad de los Andes
Como requisito parcial para obtener el título de Ingeniera Química

EDGAR ANDRÉS VIRGUEZ RODRÍGUEZ

Proyecto de grado presentado a la Universidad de los Andes
Como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Químico e Ingeniero Ambiental

Asesores

EDUARDO BEHRENTZ VALENCIA, Ph. D.

FELIPE MUÑOZ GIRALDO, Ph. D.

MAURICIO SANCHEZ SILVA, Ph. D.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.

2009

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES 1
1.1 Indicadores Sociales 1
1.2 Análisis Mediante la Utilización del Índice de Calidad de Vida 2
2. OBJETIVOS 5
2.1 Objetivo General 5
2.2 Objetivos Específicos 5
3. JUSTIFICACION 6
4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS 7
5. METODOLOGÍA 8
5.1 Definición de Escenarios de Evaluación 9
5.2 Inventario de Emisiones 10
5.3 Relación Emisiones y Contaminación Atmosférica 11
5.4 Desplazamiento de la Curva de Mortalidad 15
5.4.1 Función Dosis Respuesta 15
5.4.2 Esperanza de Vida 16
5.5 Costo Asociado a Implementación de la Medida 16
5.6 Cálculo del Tiempo Libre 18
5.7 Calculo del LQI 19
5.8 Reducción de Incertidumbre 21
6. RESULTADOS 23
6.1 Evaluación de la implementación de la medida para diferentes escenarios 24
6.2 Análisis sobre la utilización del LQI en la evaluación de medidas 30
6.2.1 Beneficios de la Utilización de la Metodología LQI 30
6.2.2 Deficiencias de la Utilización de la Metodología LQI 31
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 32
8. REFERENCIAS 34

LISTADO DE FIGURAS

Figura 5.1. Representación esquemática de la metodología utilizada.....8
Figura 5.2. Diagrama esquemático de las categorías industriales utilizadas para la determinación del inventario de emisiones.. 9
Figura 5.3. Volumen de control del modelo. 12
Figura 5.4. Comportamiento de las emisiones de PM (Ton año^{-1}). 13
Figura 5.5. Tiempo libre de los bogotanos 19
Figura 5.7. LQI en algunas regiones del mundo.....20
Figura 5.8. Ajuste de variables a distribución de probabilidad.....21
Figura 6.1. Reducción porcentual en el inventario de emisiones de PM_{10} de Bogotá en función del número de empresas que se reconvirtieron a gas natural. 23
Figura 6.2. PIB per cápita según el porcentaje de empresas participantes en el proceso de conversión. 24
Figura 6.3. Cambio en la esperanza de vida (meses) de acuerdo al número de fuentes reconvertidas a gas natural. 25
Figura 6.4. Probabilidad de efectividad de la medida en términos de muestres evitadas. 26
Figura 6.5. Cambio en la concentración atmosférica de PM (µg m^{-3}) según el número de fuentes reconvertidas a gas natural. 27
Figura 6.6. Probabilidad de generar un cambio positivo en la calidad de vida. 28
Figura 6.7. Promedio e intervalo de confianza del cambio generado en el LQI para diferentes escenarios de participación de fuentes. 29

LISTADO DE TABLAS

Tabla 5.1 Factor de conversión de consumo de combustible sólido a gas natural 11
Tabla 5.2. Información para el desarrollo del modelo. 13
Tabla 5.3. Costos de adquisición e instalación de una caldera típica industrial.....17
Tabla 5.4. Consumo energético de calderas y costos en cada escenario de reconversión. Costos según el escenario de participación del gobierno. 17
Tabla 5.5. PIB per cápita luego de la aplicación de la medida.....18

RESUMEN

Durante el año 2008 la Universidad de los Andes determinó que una de las medidas a ser desarrollada para obtener una calidad del aire adecuada en Bogotá, es la implementación masiva de gas natural como combustible del sector industrial. Para evaluar la efectividad de la implementación de la medida se usó el Índice de Calidad de Vida (LQI) [1] pues es una herramienta que integra dos indicadores, uno social y uno económico, cuya evaluación es importante tener en cuenta a la hora de estudiar la aplicación de políticas públicas. Además, la metodología propuesta para el cálculo del mismo permite reducir la complejidad de sistemas como el analizado en este proyecto.

En el presente estudio, se realizó una evaluación preliminar del LQI en Bogotá para conocer el estado inicial del indicador. La evaluación del índice, posterior a la aplicación de la medida, permitió determinar que una aplicación efectiva de la medida debería darse con una participación del 80-90% de las fuentes industriales, reflejado en una disminución del 80% de las emisiones industriales de material particulado (PM), con una respectiva reducción en la concentración atmosférica del mismo, un incremento en la esperanza de vida de 4 meses y un crecimiento del 0.36% en el LQI.

Se utilizaron herramientas computacionales por medio de las cuales fue posible modelar el sistema y reducir la incertidumbre asociada tanto a las suposiciones realizadas sobre el sistema como la información utilizada en los cálculos.

Estos resultados permitieron analizar la aplicación de la metodología del LQI en medidas ambientales para disminuir la contaminación atmosférica, evidenciando la gran utilidad de esta herramienta como un indicador de efecto secundario.

[1] LQI: Life Quality Index.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El material particulado no sólo es el contaminante atmosférico que presenta un mayor índice de excedencias en la ciudad de Bogotá respecto a la legislación vigente (Gaitán, 2006), sino también es el que presenta mayores efectos sobre la salud humana (Jensen, 1999; Curtis, 2006). Las visitas a los establecimientos de salud asociadas a casos de enfermedad respiratoria aguda (ERA) en la ciudad de Bogotá D.C. han presentado un aumento significativo en los últimos años, relacionadas estas con un aumento en los niveles de concentración de PM en la ciudad. Aunque la calidad de vida de toda la población disminuye, la población más vulnerable a los efectos de la contaminación corresponde a los niños y las personas de tercera edad en la ciudad.

La contaminación por PM tiene efectos importantes en la salud de la población, especialmente de ancianos y niños, pues afecta los sistemas respiratorio y cardiovascular (Pope et al. 2008). De esta realidad proviene el interés de implementar medidas que contribuyan a disminuir la formación de contaminantes, por las distintas fuentes de emisión.

Como resultado de un estudio reciente desarrollado por la Universidad de los Andes se determinó que el principal problema de calidad de aire en Bogotá tiene que ver con las elevadas concentraciones de PM asociado a su vez con la emisión de contaminantes por parte de las fuentes móviles y las fuentes industriales (Behrentz et al. 2008). Este diagnostico también logro determinar que la contribución mayoritaria a la emisiones de PM por parte de las fuentes industriales se encuentra relacionado con fuentes de emisión que usan carbón como combustible.

1.1 Indicadores Sociales

Los indicadores sociales son elementos usados para cuantificar algún aspecto de la calidad de vida en una sociedad o grupo de individuos (Nathwani, 1997). Estos han sido ampliamente utilizados para evaluar el desarrollo de las sociedades en el transcurso del

tiempo mediante la cuantificación del grado de desarrollo de las mismas. Esta cuantificación permite evidenciar aquellos sectores en donde se presentan mayores falencias y en donde deben ser enfocados los esfuerzos para promover un mejor desarrollo. Entre los primeros indicadores sociales utilizados se encuentra la esperanza de vida.

Desde el año 1990, las Naciones Unidas publicó el Índice de Desarrollo Humano (IDH) en un esfuerzo para comparar el desarrollo de diferentes regiones del mundo (United Nations, 2000). Esta una medida de cuantificar el desarrollo que presenta una región, de acuerdo al análisis de diferentes parámetros característicos de la misma. Entre los parámetros utilizados para el cálculo del IDH se encuentran la esperanza de vida al nacer, la alfabetización de los adultos, la tasa bruta de matriculación primaria, secundaria y terciaria, y el PIB per cápita.

1.2 Análisis Mediante la Utilización del Índice de Calidad de Vida

El manejo del riesgo no solo busca la eficiencia ingenieril y económica de las inversiones sino, de forma más importante (Pandey et al. 2006). Los análisis de riesgo no requieren solamente de estrategias para seleccionar los riesgos, sino también un esquema común con las herramientas necesarias para guiar a los tomadores de decisiones.

Estudios empíricos han mostrado que la duración de la vida en buena salud y la riqueza están entre los principales intereses de los seres humanos de las sociedades modernas (Rackwitz, 2006). De esta forma, se torna relevante el desarrollo de herramientas que permitan evaluar cualitativa y cuantitativamente el impacto de las diferentes medidas (sociales, políticas, ambientales y demás) en la calidad de vida de los habitantes de las diferentes poblaciones.

Nathwani et al. (1997) desarrolló el índice de Calidad de Vida (LQI), una herramienta de análisis para evaluar las estrategias de control de riesgo y para examinar la efectividad de las regulaciones diseñadas para reducir riesgos para la vida, la salud y el ambiente.

Este índice ha sido ampliamente utilizado en estudios relacionados con estándares y regulaciones de salud, seguridad y medio ambiente.

El LQI (ver Ecuación 1) es una medida que involucra dos indicadores sociales por medio de los cuales se cuantifica la duración esperada de “buena vida”, es decir, la calidad de vida en términos de buena salud y riqueza. También puede interpretarse como un índice para evaluar medidas monetarias con el fin de encontrar el mejor análisis de costo beneficio posible. El concepto de riesgo tiene cabida al interior del LQI, a través de la mortalidad por sexo y por edad.

$$LQI = g^{w} * e^{(1-w)} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Los tres componentes de este índice son la creación de riqueza (g), la expectativa de vida (e) y el tiempo disponible para disfrutar de la vida con buena salud. La variable (w) representa el tiempo para producir la riqueza y (1-w) es el tiempo no utilizado para producir dinero (e.d., el tiempo libre. La cuantificación de la riqueza puede remplazarse por el PIB per cápita. El beneficio neto de un proyecto o los cambios tanto en riesgo como en costos se miden según el LQI por medio del incremento resultante en riqueza y en expectativa de vida, ambas con base en el parámetro w.

El l uso del LQI tiene como objetivo general, la cuantificación del mejoramiento de la calidad de vida de la población de determinada ciudad.

Rackwitz (2002) señala al LQI como un indicador social que ayuda a cuantificar la inversión necesaria en seguridad estructural, por ejemplo, la inversión necesaria para salvar vidas. Es un índice bastante general que puede ser utilizado para inversiones por parte del sector público en asistencia médica, seguridad vial, sistemas de protección contra fuego y seguridad estructural.

Junto con el LQI existen otros índices que ayudan a clasificar los países desarrollados de una manera similar (v.g., IDH). Sin embargo, el LQI es más fácil de cuantificar que otros y está basado en variables que resultan útiles si se quiere reflejar las

preferencias de la población con respecto a la razón tiempo para trabajar/tiempo libre y a la productividad. Todo lo anterior permite una evaluación explícita de la efectividad de un proyecto con respecto a la prolongación de la vida (Pandey et al. 2006).

Pandey et al. (2003) realizó una análisis costo-beneficio de la implementación de varios escenarios de mejoramiento de la calidad del aire en Canadá, por medio del establecimiento de una norma de calidad del aire más estricta para PM y ozono. En este estudio se usó el LQI como herramienta para seleccionar estrategias óptimas en cuanto a la regulación en salud, seguridad y ambiente. Según el esquema de análisis realizado, un estándar de calidad del aire para PM_{10} de 60 µg m^{-3} y para $PM_{2.5}$ de 35 µg m^{-3} es eficiente, dadas las suposiciones hechas en el estudio.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Realizar una evaluación de la promoción del gas natural como combustible mayoritario en el sector industrial en la ciudad de Bogotá mediante la utilización del LQI.

2.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar el estado del LQI en Bogotá mediante la utilización de parámetros locales.
- Evaluar semi-cuantitativa y cualitativamente el riesgo (beneficio o perjuicio) asociado a la implementación del gas natural en el sector industrial de Bogotá usando la metodología del LQI.
- Examinar los beneficios y deficiencias de la implementación de la metodología LQI en la evaluación de las medidas contempladas dentro del plan de descontaminación atmosférica de Bogotá.

3. JUSTIFICACION

Las razones para definir un programa de reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá han sido ampliamente discutidas por la alcaldía y las entidades ambientales de la ciudad. La adopción de estos programas debe realizarse teniendo en cuenta el gasto económico que la contaminación atmosférica le genera al país ya que, como demostró el Banco Mundial, esta le cuesta al país millones de pesos al año.

Asimismo existen razones legales y jurídicas dado que según el Artículo 9 de la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial se debe elaborar un programa de reducción de la contaminación cuando se presenten violaciones a los estándares definidos en la misma. Este programa de descontaminación es comúnmente conocido como Plan de Descontaminación.

En el año de 2006 la Universidad de los Andes mediante un convenio con la Secretaria Distrital de Ambiente, ente encargado de velar por el medio ambiente en la ciudad, elaboró una serie de estudios con el fin de diseñar las políticas necesarias para controlar factores que generan contaminación atmosférica (Behrentz, 2008). Estas políticas se encuentran establecidas mediante una serie de lineamientos, que constituyen las medidas que deben ser adoptadas dentro del plan de descontaminación de la ciudad en los próximos años.

Con el fin de realizar la implementación de dichos lineamientos, durante el transcurso del año 2009 y 2010 la Universidad de los Andes realizará una evaluación integral de la factibilidad de aplicar las medidas en la ciudad. Se evaluará el impacto económico y social que generará la instauración de estas medidas en el transcurso de los próximos años. Para esto se utilizarán diferentes metodologías económicas con las cuales se examina el bienestar generado por las medidas en relación a la inversión inicial.

Siendo la utilización de gas natural industrial uno de los principales lineamientos planteados dentro del estudio en referencia, es de vital importancia realizar una evaluación adecuada sobre los efectos que traerá consigo la implementación de esta medida en la ciudad.

4. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS

Escenarios de Evaluación: Los escenarios de evaluación son diferentes porcentajes de participación de las fuentes industriales en la adopción de la medida (reconversión a gas natural en el sector industrial de Bogotá).

Esperanza de vida: indicador social que representa la cantidad de años promedio que vive una población, dadas unas condiciones de mortalidad y sobrevivencia.

Esperanza de vida al nacer: indicador que, a diferencia del anterior, hace referencia a la cantidad de años promedio que se espera viva un recién nacido si la tasa de mortalidad permanece constante a lo largo de su vida. Este último refleja el nivel de mortalidad de una población en general, desde niños hasta ancianos (WHO, 2009).

Función contaminación-respuesta: busca relacionar los niveles de mortalidad y morbilidad con la contaminación de la ciudad.

Función dosis-respuesta: busca relacionar los niveles de mortalidad y morbilidad con la exposición personal al contaminante en la ciudad.

Tabla de Vida: describe el proceso de extinción de una generación hasta la desaparición del último de sus componentes usando la mortalidad que se observa en un periodo dado (OPS, 2003).

Reconversión a gas natural: proceso a través del cual las industrias adquieren tecnologías que les permiten operar su maquinaria usando gas natural, un combustible más limpio que el carbón y el ACPM.

5. METODOLOGÍA

Para desarrollar este proyecto se siguió la metodología que se presenta en la Figura 5.1. En primer lugar se definieron diferentes escenarios de evaluación, según diferentes porcentajes de participación en la medida, modificando el número de fuentes que se acogerían a la medida de transformar sus procesos de tal forma que la fuente de energía utilizada sea el gas natural; esto se realizó con base en el inventario de emisiones generado por Behrentz et al. (2008). La evaluación de cada uno de los escenarios establecidos se realizó en dos etapas. La primera consistió en la evaluación de los efectos en salud generados por la implementación de la medida y una posterior determinación del desplazamiento de la curva de esperanza de vida (ver sección 5.4). La segunda etapa consistió en la valoración económica de la implementación de la medida para varios escenarios de participación monetaria del gobierno. En las páginas siguientes se describe en detalle cada una de estas etapas.

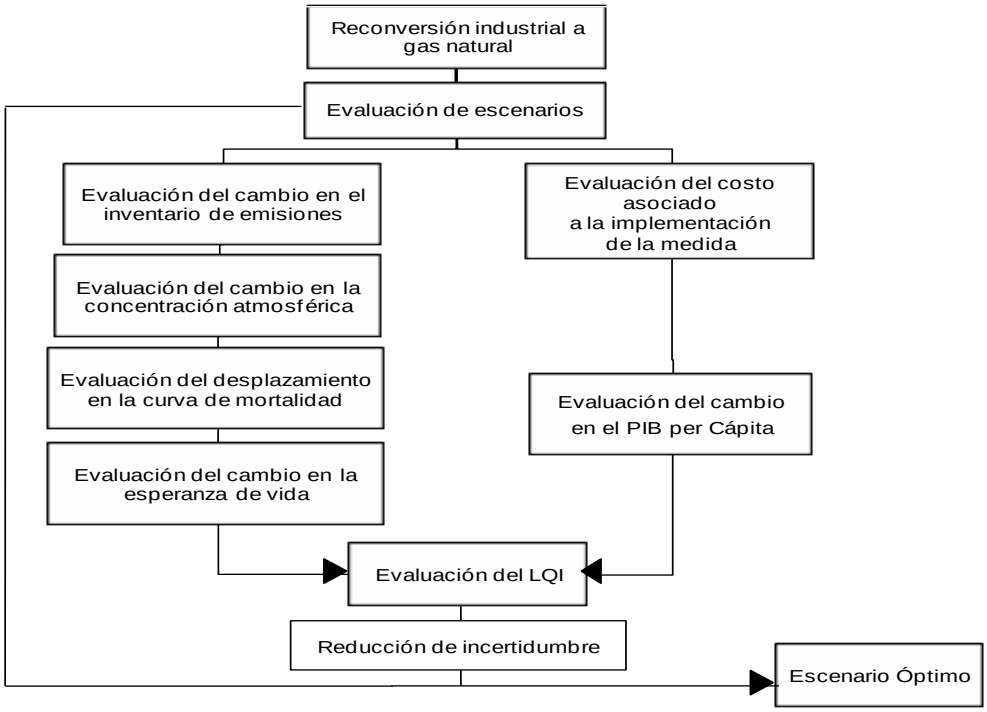

Figura 5.1. Representación esquemática de la metodología utilizada.

La evaluación de los diferentes escenarios se realizo utilizando *Matlab*® para el desarrollo de los algoritmos de simulación, *CrystalBall*® para la determinación de las

funciones de probabilidad de las variables participantes en el proceso y *SPSS*® para el desarrollo de intervalos de confianza y demás estadísticos. Estas herramientas computacionales fueron utilizadas con el fin de darle un mejor manejo a la complejidad del sistema y reducir la incertidumbre asociada al mismo.

5.1 Definición de Escenarios de Evaluación

La evaluación de estos escenarios de reducción fue realizada utilizando el inventario de emisiones generado por Behrentz et al. (2008), en el cual se calcularon factores de emisión para distintas categorías industriales (ver Figura 5.2) mediante la elaboración de muestreos isocinéticos en la ciudad de Bogotá. Dentro de cada una de las categorías industriales se agrupan las fuentes dependiendo del tipo de combustible utilizado y de las características de las fuentes (v.g. año de fabricación).

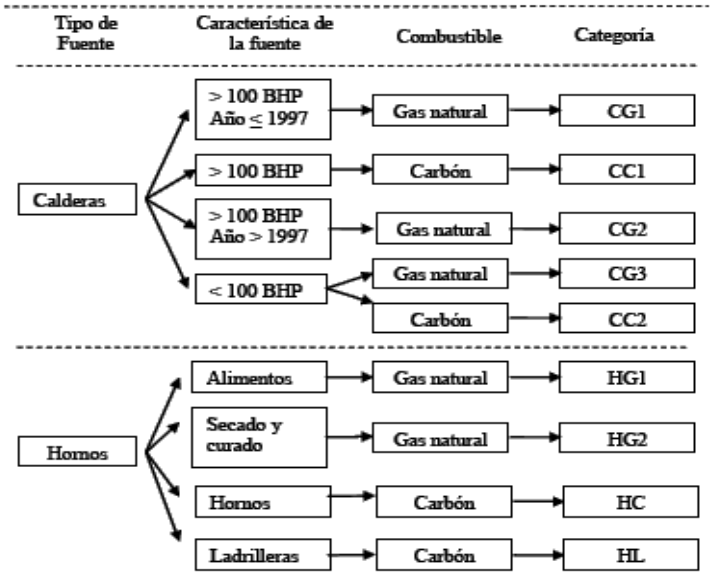

Figura 5.2. Diagrama esquemático de las categorías industriales utilizadas para la determinación del inventario de emisiones. (Fuente: Fandiño, 2008).

Los diferentes escenarios de evaluación planteados se obtuvieron modificando el número de fuentes industriales pertenecientes a la categoría CC1 y CC2 (calderas que utilizan carbón como combustible), y a las categorías HC y HL (hornos que utilizan carbón como combustible), agrupando estas fuentes dentro de una nueva categoría. A estas fuentes se les asignó el factor de emisión correspondiente al de las categorías

CG1, CG2, CG3, HG1 y HG2, según las características de cada una de las fuentes en las nuevas categorías. El escenario base se planteó como aquel en cual la industria continua operando con los mismos equipos de combustión. Los escenarios de evaluación seleccionados fueron 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 90% y 100% de las fuentes industriales que se convierten a gas natural.

5.2 Inventario de Emisiones

Para el cálculo del nuevo inventario para cada uno de los escenarios evaluados se utilizó la Ecuación 5.

$$E = \sum Fe_{ij} A_j N_j \qquad \text{Ecuación (5)}$$

En donde Fe_{ij} corresponde al factor de emisión para el contaminante i (PM, SO_x, NO_x) y la categoría industrial j (CG1, CG2, CG3, CC1, CC2, HG1, HG2, HL) (g Ton^{-1} ó g m^{-3}), A_j representa el factor de de actividad para la fuente correspondiente a la categoría industrial j (m^3 $día^{-1}$ ó Ton $día^{-1}$), y N_j es el número de fuentes pertenecientes a la categoría j.

Los factores de actividad asociados a las categorías que utilizan carbón como combustible se reportan en unidad de masa por tiempo, por lo que fue necesario calcular el nuevo consumo de combustible en una unidad adecuada que cumpliera con el análisis dimensional de la ecuación de cálculo del inventario de emisiones. Este consumo fue evaluado utilizando el cociente entre las capacidades caloríficas del combustible que tradicionalmente utiliza la fuente y el del gas natural. En la Tabla 5.1 se presentan los factores de conversión utilizados para dicho proceso.

Tabla 5.1 Factor de conversión de consumo de combustible sólido a gas natural

Combustible	Capacidad Calorífica ($kJ\ kg^{-1}$)	Factor de conversión de Consumo ($m^3\ kg^{-1}$)
Carbón Coque	29,500	1.46
Carbón Mineral	21,000	2.05
Carbón Bituminoso	20,125	2.14
Carbón Vegetal	29,600	1.45

Capacidad calorífica del gas natural: 43,000 kJ/m^3.

En el presente estudio solo se trabajó la reconversión de industrias que operan con carbón pues no fue posible obtener información de industrias que usan combustibles líquidos.

5.3 Relación Emisiones y Contaminación Atmosférica

Se desarrolló un modelo basado en un volumen de control para relacionar las emisiones de PM de fuentes industriales con la concentración ambiental de este mismo contaminante según los registros de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). La Ecuación 6 representa el modelo utilizado.

$$\frac{dC}{dt} = uC_0yz + Qxy - uCyz \qquad \text{Ecuación (6)}$$

En donde C_o es la concentración base de contaminante en Bogotá ($\mu g\ m^{-3}$), Q es la tasa de emisión de contaminante (Ton $año^{-1}$), u es la velocidad del viento ($m\ s^{-1}$) y x, y y z son el ancho, largo y la altura de capa de mezcla de Bogotá (metros).

El volumen de control seleccionado para realizar el modelo se ilustra en la Figura 5.3.

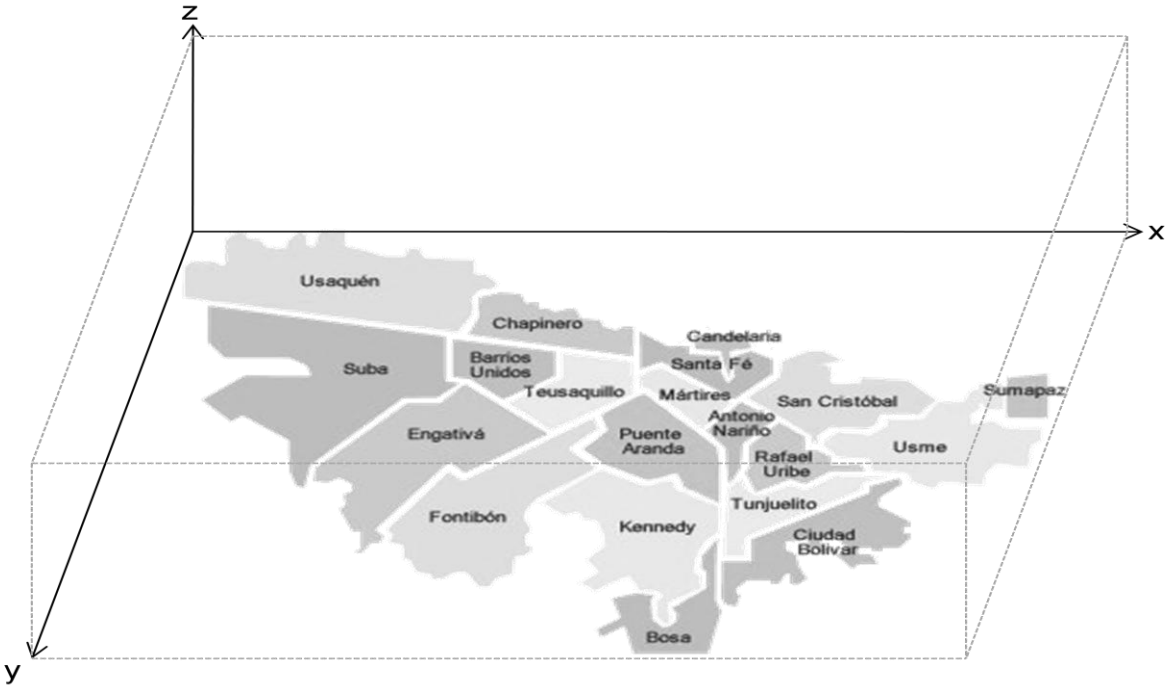

Figura 5.3. Volumen de control del modelo.

Las dimensiones de la ciudad fueron obtenidas del Sistema de Información Geográfica del Instituto Geográfico Agustin Codazzi (IGAC) y la altura de capa de mezcla de la ciudad de valores reportados en la literatura científica (Ruiz, 2002). El ancho de la ciudad fue supuesto en 22,000 m, el largo en 42,000 m y la altura en 495 m.

La tasa de emisión de contaminante se relacionó con el PIB para poder estimar su comportamiento en el tiempo según la metodología de Huang et al. (2007). El valor de referencia para las emisiones (Q) fue supuesto en 1,100 Ton año^{-1} para el año 2007. Con el valor de referencia y la variación porcentual del PIB desde el año 1994 fue posible encontrar el comportamiento de Q en los años 1997-2007 (ver Figura 5.4).

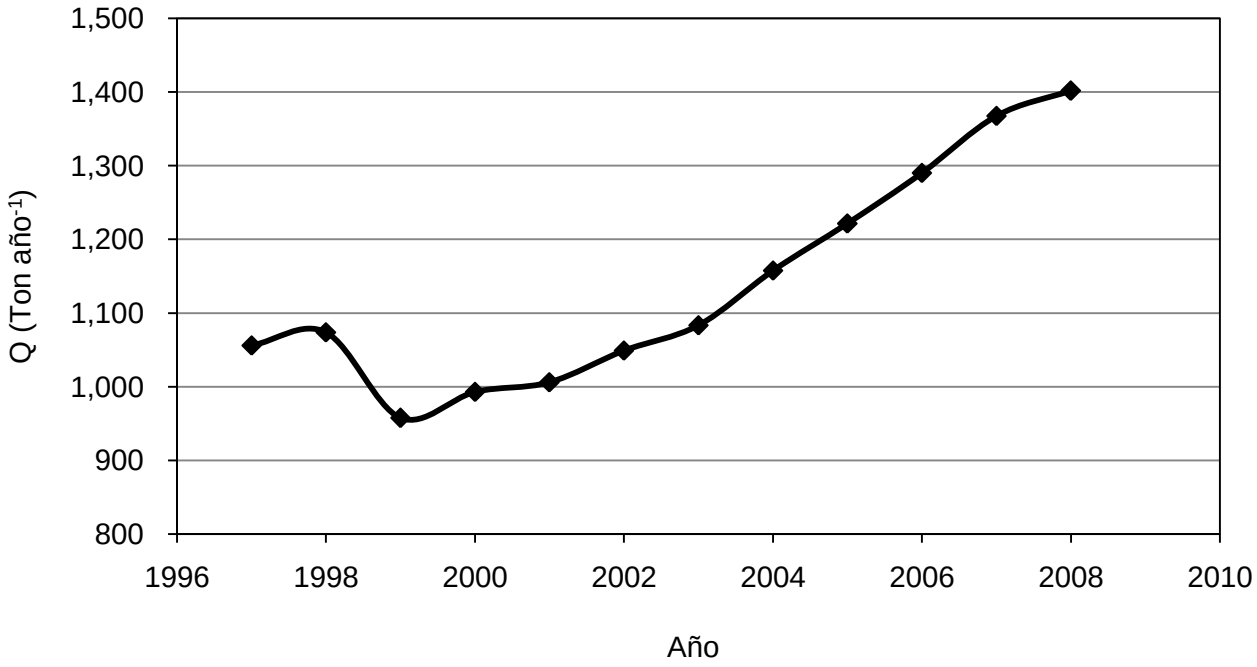

Figura 5.4. Comportamiento de las emisiones de PM (Ton año^{-1}).

La concentración de fondo de la ciudad se usó como la concentración de PM reportada por la estación Bosque que hace parte de la RMCAB, pues es una estación de monitoreo localizada en un sector alejado de focos de contaminación. La información tomada de esta estación fueron los promedios trimestrales desde el año 1997 a 2007. Los datos recolectados de velocidad del viento y concentración ambiental fueron los promedios trimestrales de los valores reportados en todas las estaciones desde el año 1997 a 2007 (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Información para el desarrollo del modelo.

Año	Trimestre	Velocidad del viento (m s^{-1})	Concentración mínima de PM en Bosque (µg m^{-3})	Concentración atmosférica de PM (µg m^{-3})
1997	Dic.	1.0248	30.297	65.05
1998	Mar.	1.1418	43.033	65.45
	Jun.	1.1303	29.363	62.88
	Sep.	1.1703	29.427	48.34
	Dic.	0.9931	30.553	50.94
1999	Mar.	1.0577	35.797	40.98
	Jun.	1.0175	26.707	51.96

5.4 Desplazamiento de la Curva de Mortalidad

Para establecer una relación entre la contaminación en las ciudades del mundo y la esperanza de vida de sus habitantes, se han propuesto diferentes tipos de modelos con los cuales es posible observar desplazamientos en la mortalidad de la población (v.g. sección cruzada y ecológicos). Se usó una función dosis respuesta para relacionar el cambio en la concentración atmosférica de PM con las muertes evitadas en la ciudad. Esto se realizó con el fin de analizar el impacto en salud pública de la reducción de las emisiones industriales de PM, obtenidas con la implementación de gas natural como combustible de la industria de Bogotá.

5.4.1 Función Dosis Respuesta

Teniendo en cuenta la poca información con la que cuenta nuestro país respecto a obtención de funciones dosis-respuesta, fue necesario utilizar una función para PM desarrollada internacionalmente. La función utilizada fue formulada por Ostro et al. (1996) para la ciudad de Santiago de Chile (ver Ecuación 7), y proporciona la cantidad de muertes evitadas en función del cambio en la concentración de PM, la población afectada y la mortalidad cruda de la ciudad de estudio.

$$\text{Muertes evitadas} = 0.1 * \frac{dPM}{100} * \text{Mortalidad Cruda} * \text{PoblaciónAfectada} \qquad \text{Ecuación (7)}$$

En donde dPM hace referencia a la reducción anual de PM (µg/m^3), la mortalidad cruda se calcula con el total de defunciones sobre el total de personas y la población afectada se obtiene a partir de información proporcionada por el IDEAM (2005)[2]. Las proporciones de defunciones y población para cada edad fueron obtenidas de la información proporcionada por el DANE en el censo 2005.

[2] El valor de afectación con el que se trabajó en el presente estudio fue una concentración de PM ≥ 60 µg/m^3, que equivale a la norma de larga duración de la ciudad de Bogotá.

Es importante tener en cuenta que, para adoptar funciones desarrolladas para otras ciudades del mundo, se debe analizar qué tan comparables son las características de las ciudades (Künzli et al. 2007). Variables como la distribución de población, el sistema de salud y el acceso de la población a éste, en Santiago de Chile, son algunos parámetros que son comparables con lo que sucede en la ciudad de Bogotá. Estos pueden ser tenidos en cuenta de forma preliminar para decidir la función dosis respuesta a utilizar (Romieu et al. 1997).

5.4.2 Esperanza de Vida

El cálculo de la esperanza de vida al nacer se realizó mediante la construcción de una tabla de vida, la cual se genera a partir de los datos de mortalidad de la población. La mortalidad se obtiene a partir del número de habitantes y de las defunciones, por lo que en fue en este momento donde se tuvieron en cuenta el número de muertes evitadas obtenidas de la función dosis-respuesta. El número de muertes evitadas fueron descontadas de las defunciones del año de análisis para poder así recalcular la esperanza de vida al nacer para cada escenario de reducción de emisiones. La construcción de la tabla de vida se realiza usando herramientas demográficas y la metodología fue obtenida del DANE y de la Organización Panamericana de la Salud (OPS, s.f.).

5.5 Costo Asociado a Implementación de la Medida

Para realizar esta estimación, se realizo una cotización de una caldera típica industrial (ver Tabla 5.3) con una capacidad de 100BHP y presión de 150psi. A partir de esta información se procedió a encontrar el costo de la energía consumida al usar la caldera en un tiempo de operación de 1 año. La escogencia de una potencia de 100 BHP se debe a que estudios anteriores han mostrado que este es el valor de corte de acuerdo a la distribución de las capacidades de las calderas utilizadas en las industrias de Bogotá (Behrentz, 2008).

	Sep.	1.1593	26.460	47.76
	Dic.	0.8851	37.217	60.18
2000	Mar.	1.0363	40.487	69.11
	Jun.	1.2327	26.907	58.58
	Sep.	1.2455	27.627	43.95
	Dic.	1.2002	23.817	70.20
2001	Mar.	1.2254	34.187	73.73
	Jun.	1.2188	37.777	71.78
	Sep.	1.3544	19.353	63.13
	Dic.	1.0687	26.077	72.93
2002	Mar.	1.0936	28.723	85.23
	Jun.	1.1854	22.520	74.98
	Sep.	1.3712	20.217	61.07
	Dic.	1.0623	21.785	72.32
2003	Mar.	7.3119	45.435	84.38
	Jun.	13.3164	29.437	65.39
	Sep.	5.7045	29.797	58.26
	Dic.	1.0748	61.950	76.91
2004	Mar.	1.2699	47.733	78.99
	Jun.	1.5621	30.185	76.06
	Sep.	1.8797	25.110	57.17
	Dic.	1.2887	45.760	82.94
2005	Mar.	1.6025	39.197	93.08
	Jun.	1.3532	27.580	93.08
	Sep.	1.8640	37.063	103.33
	Dic.	1.3001	51.877	90.31
2006	Mar.	1.3648	47.333	116.44
	Jun.	1.3934	33.663	106.98
	Sep.	1.7808	26.643	98.94
	Dic.	7.8934	46.923	76.29
2007	Mar.	2.8480	55.163	96.36
	Jun.	3.1540	32.920	96.38
	Sep.	3.2530	29.263	88.80
	Dic.	2.7680	44.753	77.88

Tabla 5.3. Costos de adquisición e instalación de una caldera típica industrial

Equipo	Costo ($)	Costo por unidad de potencia ($/BHP)
Caldera (100 BHP)	$ 159,100,000	$ 1,948,100
Tanque y motobomba	$ 10,300,000	
Total	$ 169,400,000	

Se estimó entonces la energía consumida por el número total de fuentes reconvertidas en cada escenario con base al consumo reportado en el inventario de fuentes fijas de Behrentz. Con el costo de la caldera, se estimó el costo de este consumo para cada uno de los escenarios, información que se lista en la Tabla 5.4. Finalmente, se supusieron diferentes escenarios de participación del gobierno en el financiamiento de las calderas para la reconversión y con esto se obtuvo el cambio tanto en el PIB como en el PIB per cápita (ver Tabla 5.5).

Tabla 5.4. Consumo energético de calderas y costos en cada escenario de reconversión. Costos según el escenario de participación del gobierno.

Escenarios	Consumo de calderas nuevas (m^3 $año^{-1}$)	Costo ($ Miles de millones)	Escenarios participación del gobierno en la medida			
			10%	25%	50%	75%
			(Miles de Millones de $)			
10%	42,944,239	9.66	0.966	2.414	4.829	7.243
20%	89,422,109	20.11	2.011	5.028	10.055	15.083
40%	111,757,452	25.13	2.513	6.283	12.567	18.850
60%	159,014,098	35.76	3.576	8.940	17.880	26.821
80%	219,893,785	49.45	4.945	12.363	24.726	37.089
90%	242,302,647	54.49	5.449	13.623	27.246	40.869
100%	264,711,509	59.53	5.953	14.883	29.766	44.648

Tabla 5.5. PIB per cápita luego de la aplicación de la medida.

Escenario de Reducción	Nuevo PIB per Cápita				
	10% ($ Millones)	25% ($ Millones)	50% ($ Millones)	75% ($ Millones)	100% ($ Millones)
10%	9.154320	9.154121	9.153788	9.153455	9.153123
20%	9.154176	9.153761	9.153068	9.152375	9.151683
40%	9.154107	9.153588	9.152722	9.151856	9.150991
60%	9.153961	9.153222	9.151990	9.150758	9.149526
80%	9.153772	9.152750	9.151047	9.149343	9.147640
90%	9.153703	9.152576	9.150700	9.148823	9.146946
100%	9.153633	9.152403	9.150352	9.148302	9.146251

5.6 Cálculo del Tiempo Libre

El tiempo libre para los bogotanos se determinó a partir de la información suministrada por la Encuesta de Consumo de Cultura realizada por el DANE (DANE, 2007). Esta encuesta proporciona el número de horas que cada persona, de 5 a 11 años y de 12 años o mayor, dedica a realizar actividades tales como estudiar, transportarse, trabajar, cocinar, cuidado personal, entre otras. Cabe resaltar que al sumar las horas empleadas en cada actividad no se obtiene un total de 24 horas, pues la encuesta proporciona una percepción de los encuestados respecto a las actividades que realizan.

El cálculo se realizo teniendo en cuenta que, según Rackwitz (2002), el tiempo libre se define como el tiempo que no es empleado en realizar actividades económicas ni en transportarse. Por lo tanto, para el cálculo del tiempo libre con base en la encuesta se incluyeron todas las actividades a excepción del tiempo empleado en trabajo y transporte. Con el tiempo dedicado a estas dos actividades se calculó el tiempo empleado en actividades económicas. El valor del tiempo libre se obtuvo para diferentes grupos de edades y al final se realizó un promedio ponderado de estos para obtener un valor de tiempo libre para la ciudad (ver Figura 5.5). Se realizó una normalización de los datos con respeto a las horas totales en una semana.

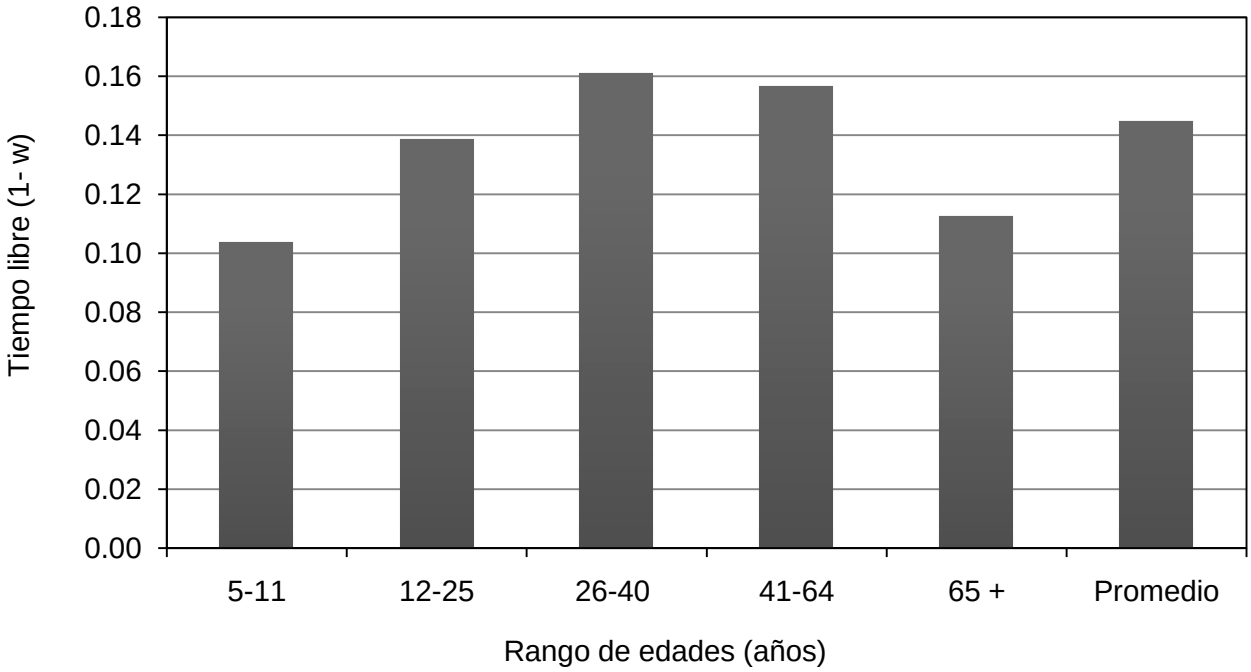

Figura 5.5. Tiempo libre de los bogotanos

5.7 Calculo del LQI

Usando la Ecuación 1, se calculo el estado inicial del LQI en la ciudad de Bogotá, entre los años 2000 a 2008, con la información de PIB per cápita suministrada por el Banco de la Republica, la esperanza de vida proporcionada por el DANE y el tiempo libre calculado anteriormente. La Figura 5.6 muestra la evolución del LQI en la ciudad en los años mencionados.

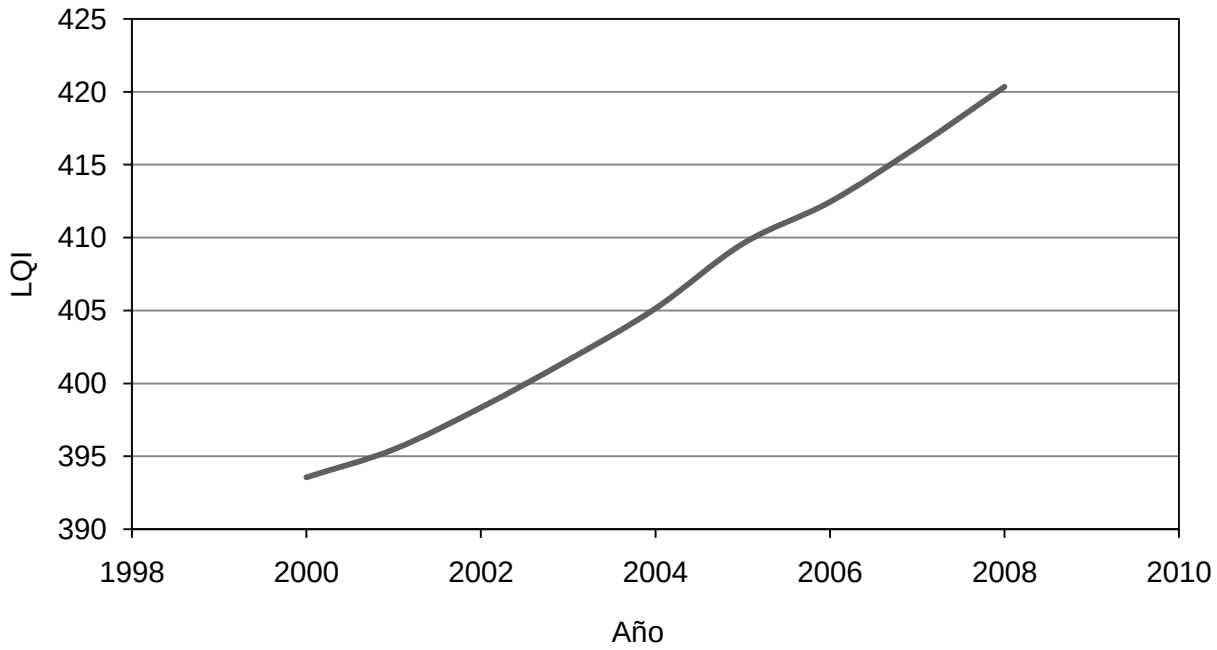

Figura 5.6. LQI en la ciudad de Bogotá.

Adicionalmente se calculó el LQI para algunos países del mundo con el fin de observar los órdenes de magnitud de este indicador en regiones diferentes a la nuestra (ver Figura 5.7).

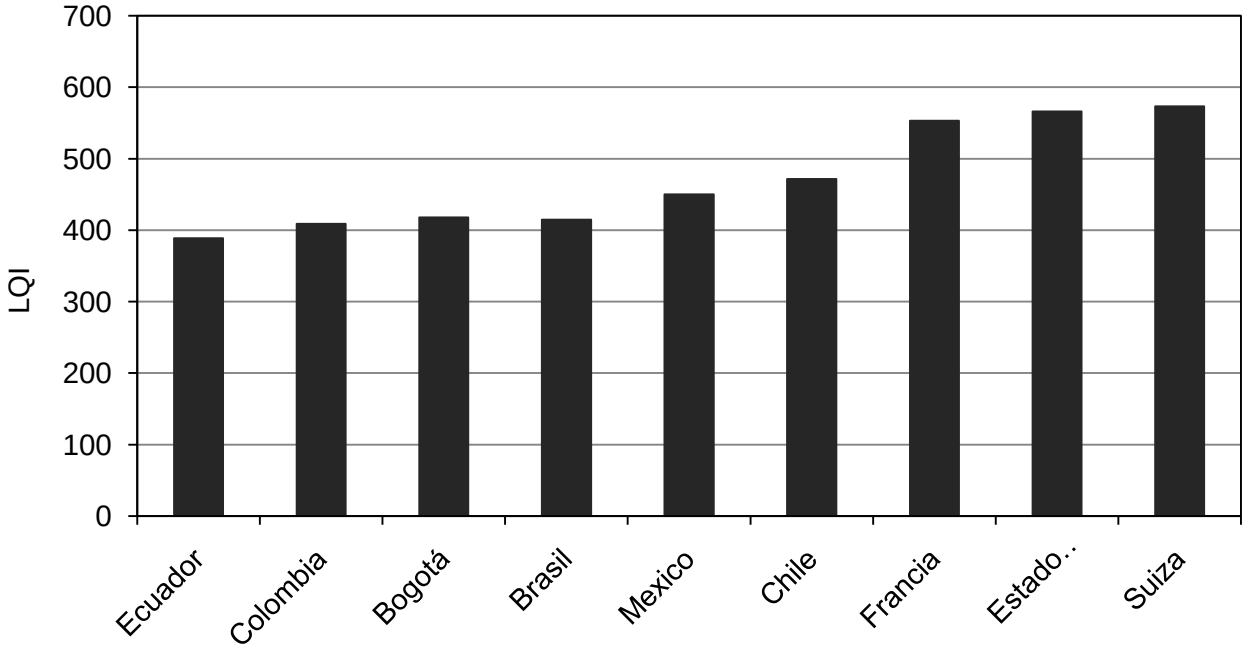

Figura 5.7. LQI en algunas regiones del mundo. (Fuente: UN, 2008; Rackwitz et al., 2006)

Finalmente, se procedió a calcular el LQI para cada uno de los escenario de reducción propuestos y a realizar un análisis juicioso de los resultados obtenidos.

5.8 Reducción de Incertidumbre

Las variables Q, u, C_0 y C del modelo de volumen de control fueron ajustadas a distribuciones de probabilidad con la información temporal recolectada por medio del software Crystal Ball®; con el fin de calibrar el modelo. La Figura 5.8 muestra el ajuste de los datos de una de las variables a su distribución de probabilidad, que para este caso es Lognormal.

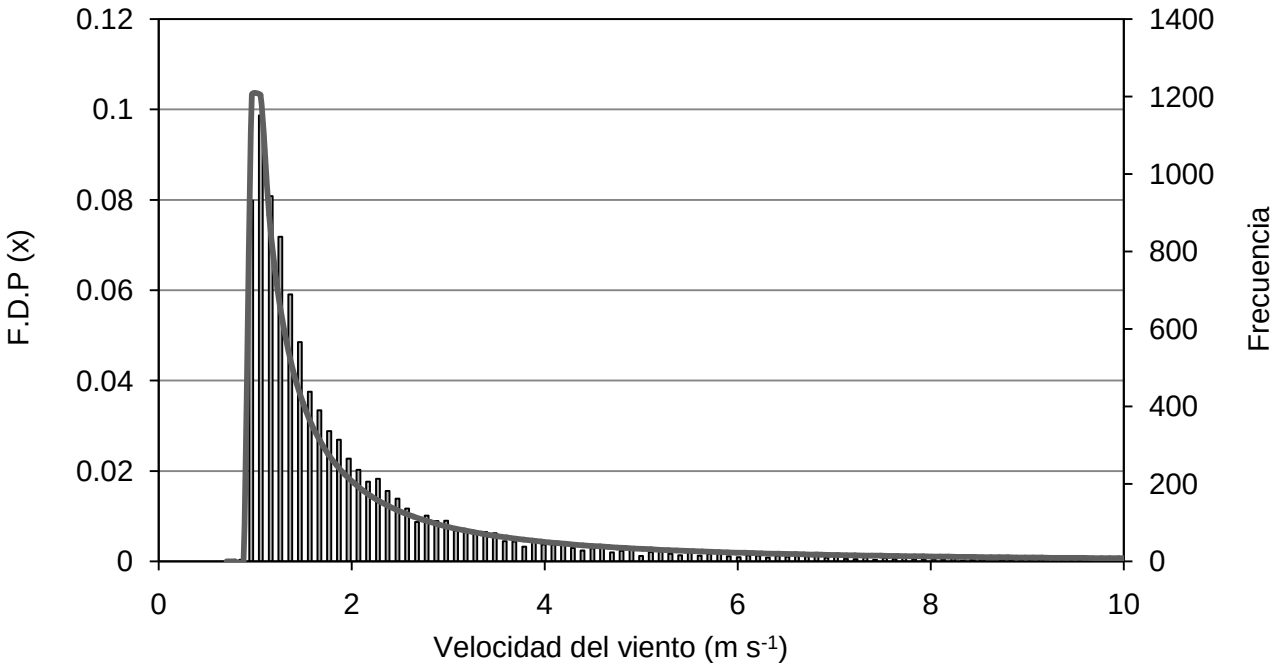

Figura 5.8. Ajuste de variables a distribución de probabilidad.

Posteriormente, se realizó la evaluación del LQI para todos los escenarios de conversión siguiendo el algoritmo mostrado en la Figura 5.1, mediante una simulación realizada en el software MatLab®.

El desarrollo de la simulación consistió en generar vectores de tamaño 100,000; para cada una de las variables del modelo de volumen de control y las involucradas en cálculo del LQI. Estos vectores fueron generados a partir de la distribución de

probabilidad de cada una de las variables y de números aleatorios referentes a la probabilidad de ocurrencia de un valor. Al final fue posible obtener la distribución de probabilidad del LQI para cada uno de los escenarios.

En el desarrollo del modelo de volumen de control el ancho de la ciudad y la altura de capa de mezcla se supusieron constantes. En el desarrollo del LQI el tiempo libre se supuso constante.

6. RESULTADOS

La Figura 6.1 muestra la reducción porcentual en el inventario de emisiones en función del porcentaje de empresas participantes del proceso de conversión a gas natural, para el contaminante PM_{10}. Se puede ver cómo el aumento en el número de empresas participantes de la conversión a gas natural produce una reducción en las emisiones de PM_{10}. En el caso de que el 100% de las fuentes industriales se reconvirtieran a gas natural se reducirían las emisiones de PM_{10} en un 78%. Esto era de esperarse dado que el gas natural es un combustible más limpio.

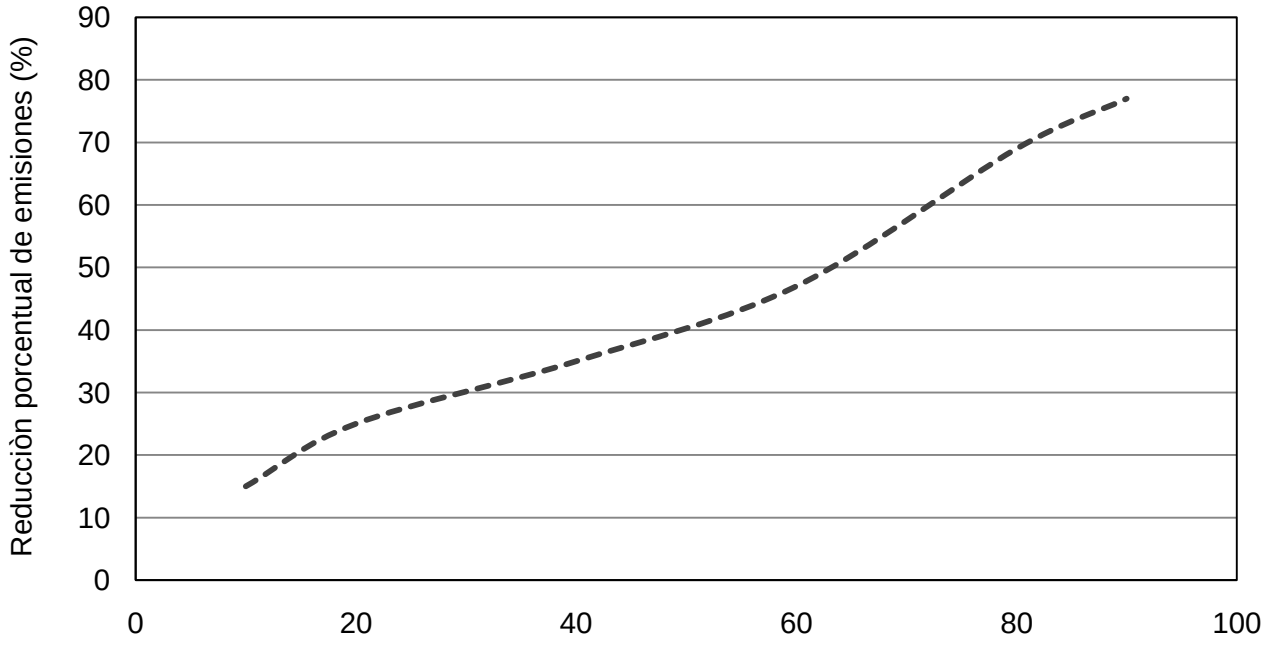

Figura 6.1. Reducción porcentual en el inventario de emisiones de PM_{10} de Bogotá en función del número de empresas que se reconvirtieron a gas natural.

La Figura 6.2 muestra el cambio en el PIB per cápita en función del porcentaje de empresas participantes en el proceso de conversión, para algunos escenarios de participación del gobierno. La tendencia del PIB per cápita es a la reducción a medida que aumenta el número de empresas que se involucran en el proceso de reconversión a gas natural dado que se asume la participación del gobierno en la adquisición de la tecnología. Se observa una reducción del 0.07% del PIB per cápita si el gobierno

asume el 100% del costo de adquisición de tecnología para reconvertir el 100% de las fuentes industriales, siendo este el caso en el que se presenta una reducción porcentual mayor. Este cambio resulta ser pequeño si se compara con el cambio en el PIB per cápita para la ciudad entre los años 2006-2007, que fue del 7.2% según reportes del Banco de la República.

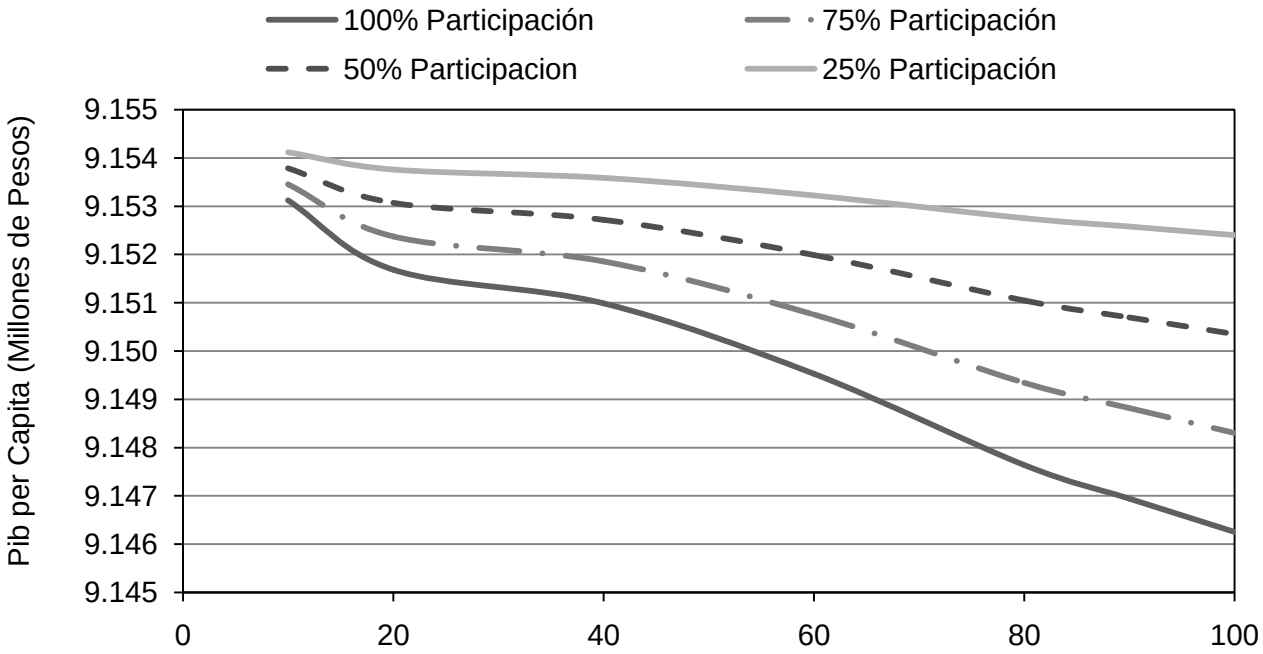

Figura 6.2. PIB per cápita según el porcentaje de empresas participantes en el proceso de conversión.

6.1 Evaluación de la implementación de la medida para diferentes escenarios

La efectividad de las medidas puede ser evaluada, en primera instancia, por el número de muertes evitadas tras su implementación que, de acuerdo con la función dosis-respuesta, se relaciona directamente con una reducción de la concentración atmosférica de PM. Según la literatura, un cambio de 10 µg m^{-3} en la concentración de PM se traduce en una reducción del 10% en la mortalidad (EPA, 2005). El número de muertes evitadas encontrado en este estudio, para el escenario en el que el 100% de las fuentes industriales se convierten a gas natural, fue de 400 muertes para una reducción en la concentración atmosférica de PM 25 µg m^{-3}. Este valor es comparable con los valores reportados en la literatura internacional.

La Figura 6.3 muestra el cambio en la esperanza de vida de acuerdo al número de fuentes reconvertidas a gas natural. Se observa como el aumento en la esperanza de la vida en el escenario de menor participación de las fuentes es cercano a 3 meses y en el escenario de mayor participación es cercano a 4 meses. Según Künzli (2007), en una ciudad como Barcelona es posible obtener un aumento de 14 meses en la esperanza de vida si se cumplen los estándares de calidad del aire de la OMS.

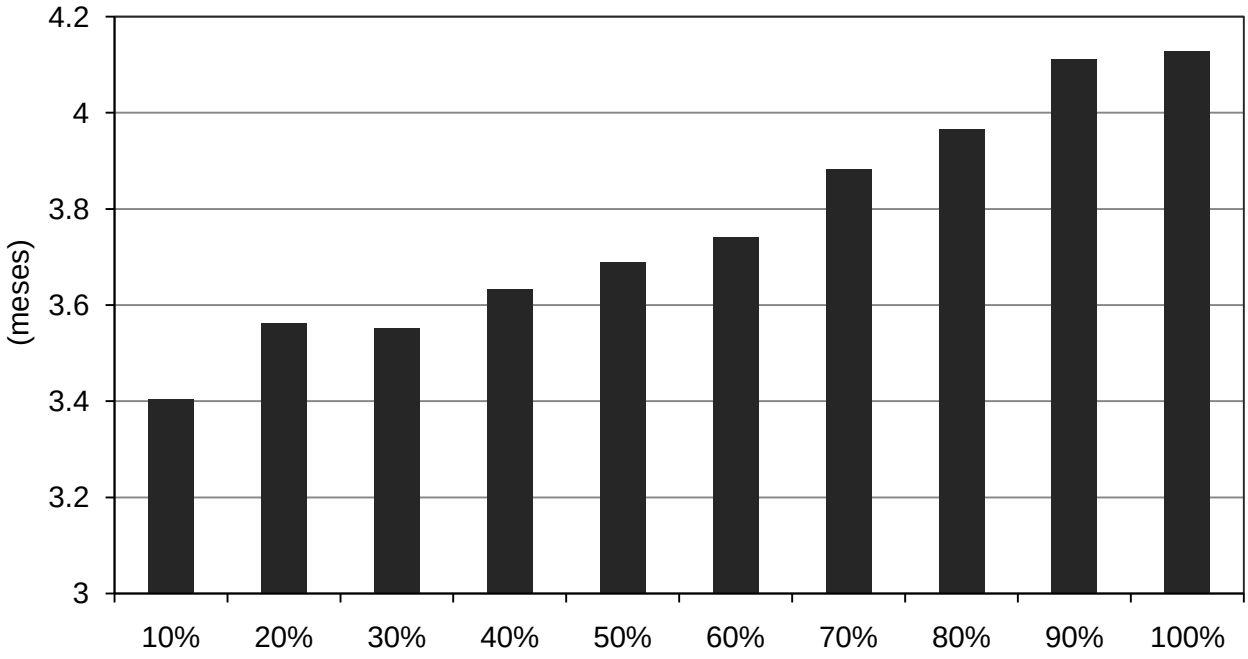

Figura 6.3. Cambio en la esperanza de vida (meses) de acuerdo al número de fuentes reconvertidas a gas natural.

La Figura 6.4 muestra cómo la probabilidad de evitar al menos una muerte para cada uno de los escenarios de participación de las fuentes es superior al 50% para todos los escenarios. Esto indica que en todos los casos, la probabilidad de presentar una reducción en la concentración atmosférica de PM es mayor a la probabilidad de que no se presente. Esto justifica la implementación de la medida en términos de un beneficio para la sociedad en el número de muertes que se evitan. Sin embargo, para determinar en qué proporción se debe implementar la medida es necesario examinar de manera

más profunda la relación con los costos incurridos en la implementación de la misma.

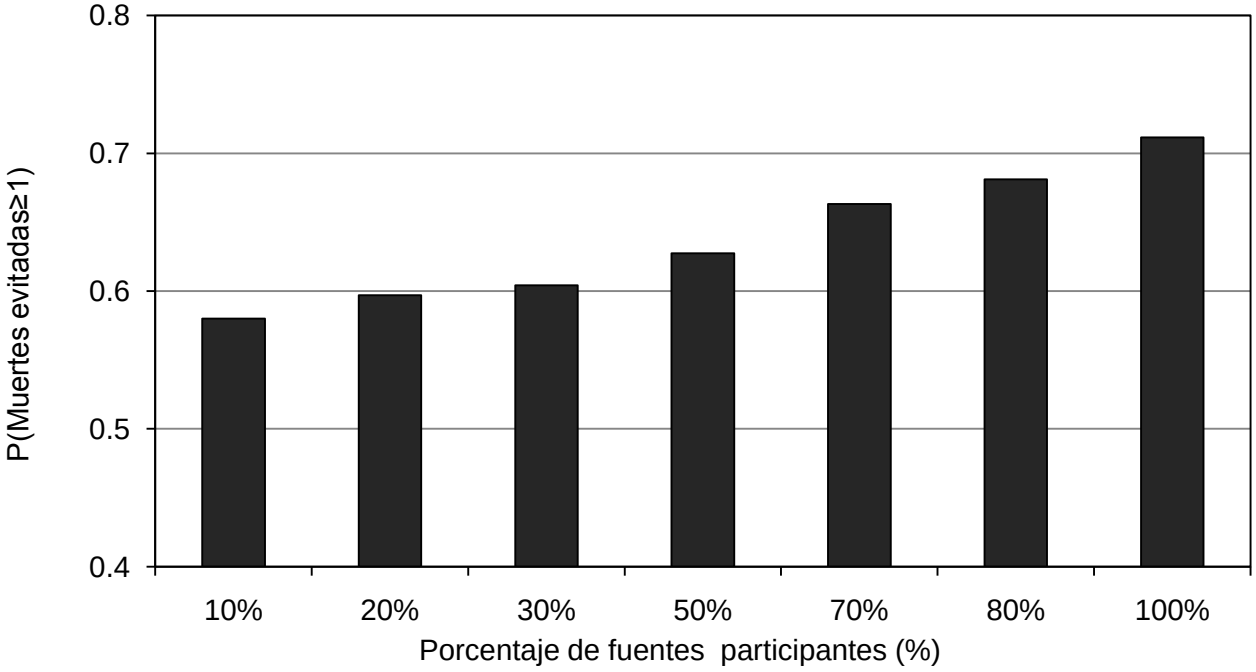

Figura 6.4. Probabilidad de efectividad de la medida en términos de muestres evitadas.

En la Figura 6.5 se muestra la disminución en la concentración atmosférica de PM de acuerdo al número de fuentes que se reconviertan a gas natural. Se puede observar cómo sin importar el número de fuentes industriales que se reconviertan, siempre se presenta un beneficio ambiental.

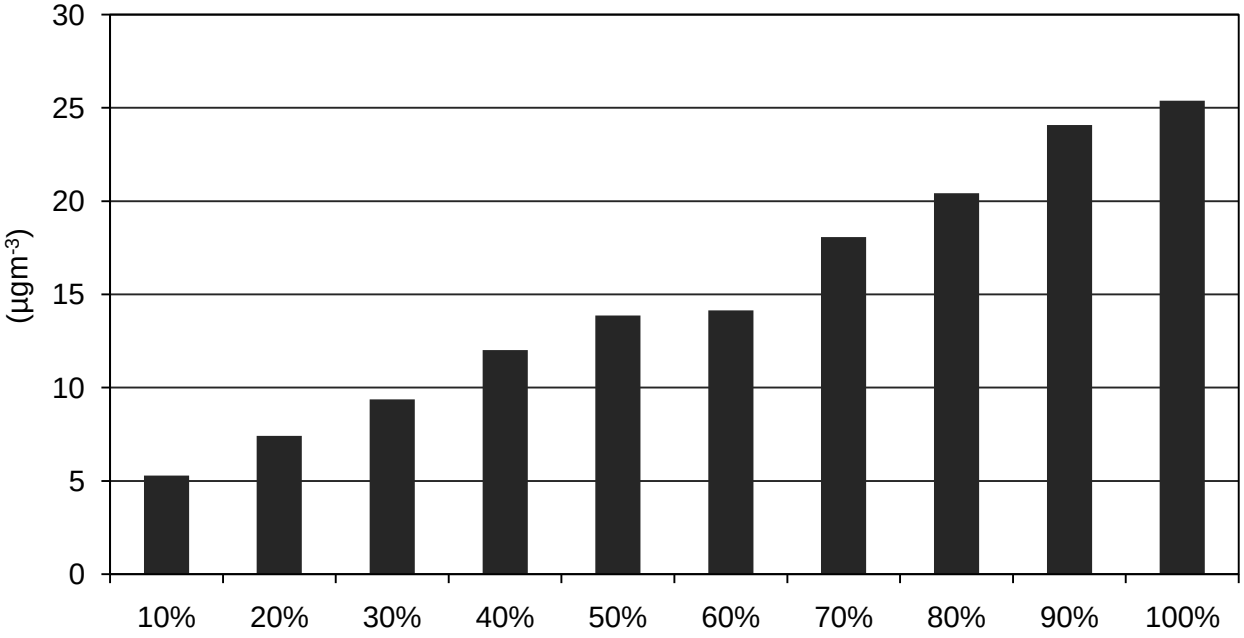

Figura 6.5. Cambio en la concentración atmosférica de PM (µg m^{-3}) según el número de fuentes reconvertidas a gas natural.

La conversión del 100% de fuentes industriales se traduce en una disminución de 25 µg m^{-3} en la concentración atmosférica de PM. Esto representa una disminución de la concentración atmosférica de PM en un 30%[3]. Asumiendo un comportamiento lineal de la concentración atmosférica en función de la emisión de contaminante, las fuentes industriales son responsables de cerca del 35% de la concentración atmosférica de PM de Bogotá. Esto implica que la conversión a gas natural de las fuentes industriales es una solución parcial del problema de la emisión de PM en fuentes industriales en Bogotá.

La Figura 6.6 muestra la probabilidad de generar un cambio positivo en la calidad de vida[4] según el escenario de conversión a implementar. Al igual que en el caso de las muertes evitadas, la probabilidad de generar un cambio positivo en el LQI con la implementación de cualquiera de los escenarios es mayor al 50%, lo que reitera que la conversión industrial al uso de gas natural en las industrias genera un impacto positivo

[3] En relación a la media anual calculada con datos de RMCAB.
[4] Este cambio se representa en un aumento del LQI evaluado con los parámetros resultantes después de la implementación de la medida.

en la calidad de vida. No obstante es importante tener en cuenta que existe una probabilidad asociada a cada escenario de tener una disminución de la calidad de vida, la cual es menor en los escenarios en los que están involucradas un mayor número de industrias.

Esta probabilidad de disminución del LQI se debe a que, en algunos escenarios, el costo de adquisición de tecnología es superior al beneficio obtenido al aumentar la esperanza de vida.

Se definió un valor máximo de probabilidad de falla con el fin de obtener un rango efectivo de industrias que se acogieran a la reconversión y así sugerir un escenario de implementación de la medida. El máximo de probabilidad de falla escogido para la implementación de la medida fue del 40%. Según este rango, solo las medidas que consideren una participación de más del 70% de las fuentes industriales pueden ser consideradas como efectivas.

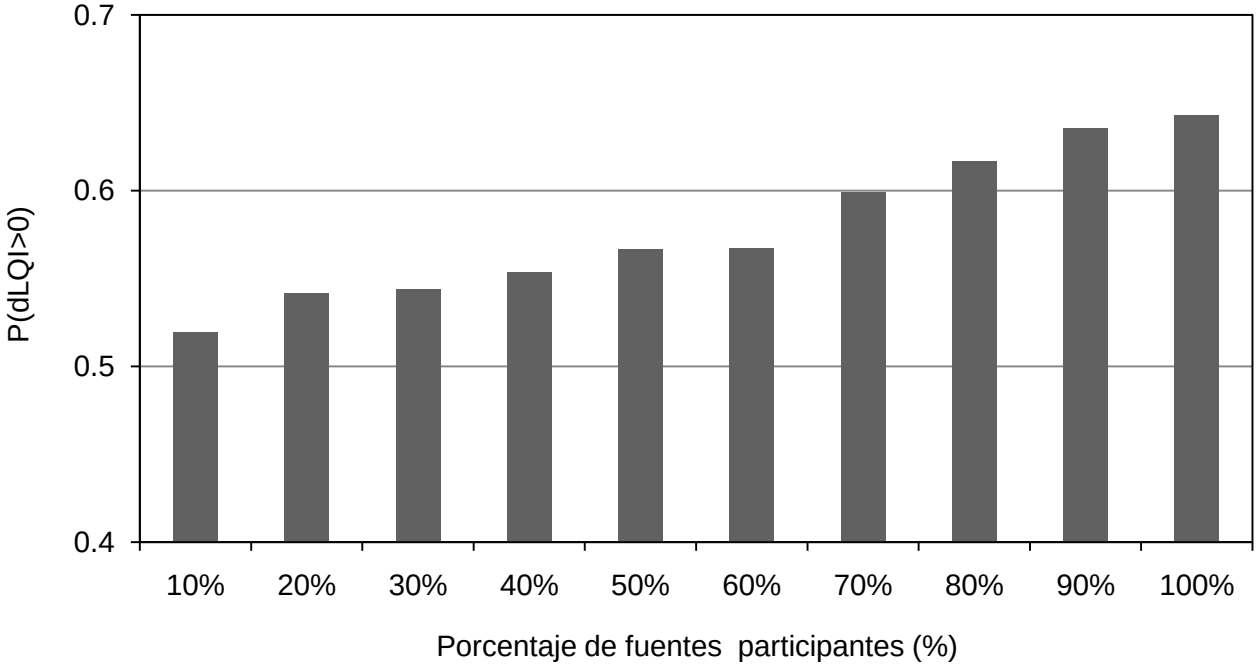

Figura 6.6. Probabilidad de generar un cambio positivo en la calidad de vida.

Los escenarios correspondientes al rango ubicado entre una participación de las fuentes industriales entre el 60% y el 90% presentan una razón de cambio máxima en la probabilidad de generar un cambio positivo en el LQI respecto al número de fuentes industriales participantes. Desde el punto de vista del aumento en la calidad de vida, el porcentaje de industrias participantes del proceso de conversión debería estar ubicada entre este rango. Considerando los criterios expuestos anteriormente, la implementación ideal de la medida debe estar entre un rango de participación de fuentes comprendido entre el 80% y el 90% de las fuentes industriales.
La Figura 6.7 muestra el cambio medio del LQI para cada uno de los escenarios de participación de las fuentes junto a los respectivos intervalos de confianza con una confiabilidad del 95%. En términos estadísticos, el cambio generado en el LQI por los escenarios con un porcentaje de participación de fuentes mayor al 80% es superior al cambio generado por los escenarios con participación de menos del 60% de las fuentes.

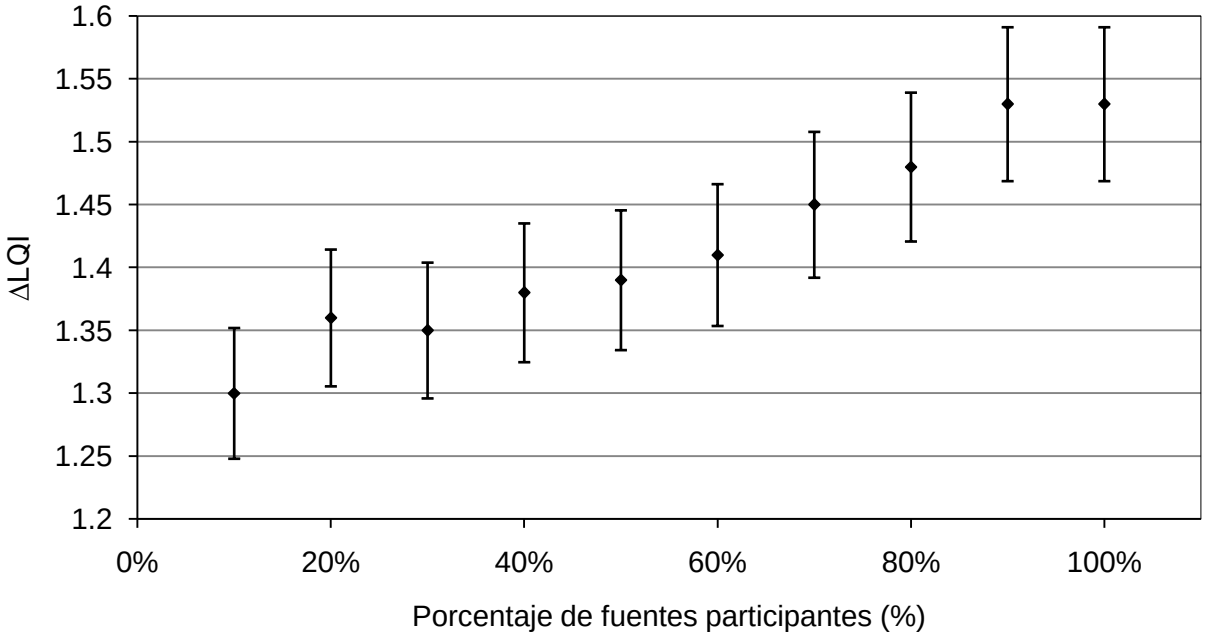

Figura 6.7. Promedio e intervalo de confianza del cambio generado en el LQI para diferentes escenarios de participación de fuentes.

Así mismo, es posible apreciar cómo estadísticamente la implementación de la medida con participación del 100% de las fuentes industriales no representa un aumento en la calidad de vida respecto a la implementación con una participación del 90% de las fuentes. Esto significa que, en términos de calidad de vida, el beneficio obtenido con la implementación de la medida en el escenario del 90% y 100% de las fuentes industriales es el mismo, contrario a lo que sucede con la inversión en tecnología para la implementación de la misma, que es superior en el escenario del 100%. Esto significa que el escenario del 90% de participación de las fuentes industriales es límite máximo de la implementación de la medida.

El aumento medio del 0.36% en el LQI, obtenido en el escenario de 90% de fuentes, es comparable con los valores de crecimiento del mismo para la ciudad, por ejemplo 0.96% entre los años 2006-2007, teniendo en cuenta que este último es producto de una gran cantidad de factores que ocasionan el crecimiento económico de la ciudad.

Es importante mencionar que el proceso de conversión a gas natural analizado no es la única medida a tomar, en cuanto a contaminación del aire se refiere, para generar mejoramientos en LQI de Bogotá D.C.

6.2 Análisis sobre la utilización del LQI en la evaluación de medidas

La utilización del LQI como herramienta de medición indirecta para evaluar medidas enfocadas en la reducción de contaminantes atmosféricos presenta tanto beneficios como deficiencias, cuya identificación hace posible analizar la aplicación de esta metodología para evaluar políticas ambientales.

6.2.1 Beneficios de la Utilización de la Metodología LQI

Los beneficios de la aplicación de esta metodología son amplios y pueden verse en el resultado final de este proyecto, que fue la determinación de una proporción de industrias recomendable a las que debe ser aplicada la medida. Esta metodología hace posible evaluar proyectos de alta complejidad. La metodología del LQI presenta la posibilidad de evaluar las medidas generadas dentro del plan de descontaminación de

forma integral, pues tiene en cuenta tanto los beneficios obtenidos como el costo incurrido en la implementación de políticas. Además, la simplicidad matemática en el cálculo del índice hace posible incluir el cálculo de funciones de probabilidad dentro del mismo y por ende, hacer una reducción en la incertidumbre del sistema e incluir la probabilidad de éxito o de falla en la evaluación de cada una de las medidas.

6.2.2 Deficiencias de la Utilización de la Metodología LQI

El planteamiento de este tipo de metodología simplifica la complejidad del sistema de análisis, algo que se vuelve una deficiencia ya que se genera incertidumbre en el cálculo del indicador. Esta simplificación del sistema viene acompañada de la falta de información disponible sobre algunas variables necesarias para el cálculo del índice y para calibrar modelos para la evaluación de la medida. Variables como la relación entre las emisiones de PM y la contaminación atmosférica del mismo en la ciudad, las defunciones asociadas a contaminación por PM, la relación entre la contaminación por PM y la muerte por enfermedad respiratoria, fueron de acceso limitado para la realización de este proyecto y dificultaron en algún momento del desarrollo del mismo tanto el cálculo de la esperanza de vida como el planteamiento del modelo de caja.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La utilización del LQI para evaluar la política de conversión al gas natural en el sector industrial de Bogotá fue muy adecuada, ya que nos permitió tener una primera visión sobre la efectividad de la medida en la ciudad. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la implementación de esta medida trae consigo el aumento en la esperanza de vida, la reducción en las emisiones industriales de PM, que se traduce en una reducción en la concentración atmosférica del mismo, la disminución en el PIB per cápita de Bogotá debido a la adquisición de tecnologías y el aumento del LQI en la misma.

La promoción del gas natural en un porcentaje entre el 80% y 90% de las fuentes industriales que actualmente no lo utilizan, trae consigo una disminución de aproximadamente el 75% del inventario de emisiones industriales de PM y con esto, una disminución de 22 $\mu g\ m^{-3}$ en la concentración atmosférico. Con esta reducción en la concentración atmosférica de PM es posible evitar alrededor de 400 muertes por enfermedad respiratoria y cardiovascular.

Los resultados muestran un aumento de 4 meses en la esperanza de vida de Bogotá, una cifra que es comparable con valores reportados en la literatura internacional, como por ejemplo, el aumento de 14 meses en la esperanza de vida con el cumplimiento de los estándares de calidad del aire de la OMS en la ciudad de Barcelona.

Se obtiene un incremento en la calidad de vida en la ciudad, representada en un aumento porcentual del 0,36% en el LQI, que es comparable con los valores de crecimiento del mismo para la ciudad, por ejemplo 0.96% entre los años 2006-2007, teniendo en cuenta que este último es producto de una gran cantidad de factores que ocasionan el crecimiento económico de la ciudad.

Con base en el análisis realizado, se sugiere implementar un escenario de reconversión industrial que contemple una participación entre 80% y 90% de las fuentes industriales que utilizan combustibles diferentes al gas natural. En este rango se presentó una probabilidad de efectividad de la medida con base en la probabilidad de falla

seleccionada mayor al 80% y una probabilidad de generar un cambio positivo en el LQI mayor al 70%.

La implementación de un escenario de reconversión industrial que contemple una participación del 100% de las fuentes industriales que utilizan combustibles diferentes al gas natural resulta tener el mismo impacto en la calidad de vida que el escenario del 90%, por lo que se sugiere que este último sea el porcentaje máximo de conversión de industrias. Esto teniendo en cuenta el gasto adicional en tecnología que implicaría la adopción del escenario del 100%.

Es importante mencionar que la política de promoción de la conversión a gas natural en el sector industrial no es la única medida a tomar en cuanto a contaminación del aire se refiere, para generar mejoramientos en LQI de Bogotá. Se sugiere utilizar la metodología del LQI implementada en el presente estudio para analizar la efectividad de la aplicación de los demás lineamientos que hacen parte del plan de descontaminación de Bogotá.

8. REFERENCIAS

Banco Interamericano de Desarrollo, BID. 2007. Retos del medio ambiente urbano en América Latina. [En línea].

Behrentz, E., Sánchez, N., 2008. Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá D.C. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental. Universidad de los Andes.

Behrentz, E., Espinosa, M., 2009. Calidad del aire y contaminación atmosférica. Cartilla de conceptos generales acerca de la calidad del aire y la contaminación atmosférica. Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana Regional SUR. Universidad de los Andes.

Bhanarkar, A.D., Rao, P.S., Gajghate, D.G., Nema P., 2005. Inventory of SO2, PM and toxic metals emissions from industrial sources in Grater Mumbai, India. Atmospheric Environment, 39: 3851-3864.

Cantril H., 1965. The pattern of human concerns. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. 2007. Encuesta de Consumo de Cultura. Colombia. [En línea].

Environmental Protection Agency, EPA. 2005. Progress Report: Chronic and Acute Exposure to Ambient Fine Particulate Matter and Other Air Pollutants: National Cohort Studies of Mortality and Morbidity. [En línea].

Fandiño, M., Behrentz, E., 2009. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas en Bogotá a través de mediciones directas. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.

Gaitán, M., 2007. Evaluación de la calidad del aire de Bogotá con base en la información de la RMCAB. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes.

Gaitán, M., 2009. Análisis del estado de calidad del aire en Bogotá. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.

Huang, W., Lee, G., Wu, C., 2007. GHG emissions, GDP growth and the Kyoto Protocol: A revisit of Environmental Kuznets Curve hypothesis. Energy Policy, 36: 239-247.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. 2005. Documento soporte norma calidad del aire. Subdirección de estudios ambientales. Convenio Asociación 112/04.

Künzli, N., Pérez, L., 2007. Los beneficios para la salud pública de la reducción de la contaminación atmosférica en el área metropolitana de Barcelona. España.

Organización Panamericana de la Salud, OPS. (s.f.). Contaminantes del Aire. Lección 4. Recuperado el 28 de Febrero de 2009 de http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/fulltext/orienta/cap4c.pdf.

Organización Panamericana de la Salud, OPS. 2003. La tabla de vida: una técnica para resumir la mortalidad y la sobrevivencia. Boletín Epidemiológico; 24 (4). [En línea].

Ostro, B., Sánchez, J., Aranda, C., Eskelan, G., 1995. Air pollution and mortality. Policy Research Department. World Bank. Santiago de Chile.

Pandey, M.D., Nathwani, J.S., 2003. Canada wide standard for particulate matter and ozone: cost-benefit analysis using a life-quality index. Int J Risk Anal; 23 (1): 55–67.

Pandey, M.D., Nathwani, J.S., 2003. Life-quality index for the estimation of societal willingness-to-pay for safety. J Struct Safety; 26 (2): 181–99.

Pandey, M., Nathwani, J., Lind, N., 2005. The derivation and calibration of the life-quality index (LQI) from economic principles. Structural safety 28, 341-360.

Pope, C., Renlund, D., Kfoury, A., May, H., Horne, B., 2008. Relation of heart failure hospitalization to exposure to fine particulate air pollution. The American Journal of Cardiology; 102 (9): 1230-1234.

Rackwitz, R., 2002. Optimization and risk acceptability based on the Life Quality Index. Structural Safety; 24: 297-331.

Rackwitz, R. 2006., The effect of discounting, different mortality reduction schemes and predictive cohort life tables on risk acceptability criteria. Reliability Engineering and System. Safety; 91: 469–484.

Ruiz, F., 2002. Simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional.

Nathwani, J., Lind, N., Pandey, M., 1997. Affordable safety by choice: the life quality method. Institute for Risk Research. University of Waterloo.

United Nations, UN. 2008. Human development report. United Nation Development Program. New York. [En línea].

AGRADECIMIENTOS

Diana Carolina Obando Anzola

Quisiera agradecer a Dios por darme la oportunidad de estar aquí, en este momento tan importante y junto las personas que me rodean. Gracias por mis compañeros del SUR, pues son personas que me han aportado muchas cosas buenas.

A mis padres que han sido mis maestros de la vida y lo han dado todo por mí felicidad. A mi hermana que también me apoyo en este proceso.

Gracias a los directores de este proyecto, Eduardo, Felipe y Mauricio, que confiaron en mí y en mis habilidades, e hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

A Andrés, por ser mi compañero, por su paciencia y por sus ganas de enseñarme a ser mejor cada día. Caminar de la mano junto a ti es lo mejor que me ha pasado. “Va por ti”

Edgar Andrés Virgüez Rodríguez

“Gracias a la vida que me ha dado tanto me dio dos luceros que cuando los abro, perfecto distingo lo negro del blanco”

Mercedes Sosa

A mis padres por nunca darse por vencidos y luchar por hacer de mí el hombre que soy. Por siempre brindarme un apoyo incondicional, una hombro amigo donde siempre pude descansar. Todas mis acciones son fruto de lo que ustedes han forjado en mí.

A mi hermana por siempre apoyarme en mis acciones, por ser una persona crítica en mi vida y acompañarme durante tantos años.

A Carolina por caminar junto a mi lado durante estos años, por hacerme un mejor hombre, por amarme incondicionalmente, por ser esa razón para sonreír y luchar por mis sueños todos los días. Este es el primero de muchos triunfos que nos quedan.
“Va por ti”

A Eduardo Behrentz por todas las enseñanzas que me ha brindado, por permitirme conocer la inmensa sabiduría y experiencia que tiene.

A Felipe Muñoz y Mauricio Sanchez por su interés, apoyo incondicional e invaluables aportes que hicieron de este sueño una realidad.