



FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES

GRADO EN ECONOMÍA

**“LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA BAHÍA DE ALGECIRAS.
IMPACTO SOBRE LA SALUD Y VALORACIÓN ECONÓMICA”**

Trabajo Fin de Grado presentado por Juan Jiménez de Reyna, siendo la tutora del mismo la profesora Rocío Román Collado.

Vº. Bº. de la Tutora

Alumno/a:

D.

D.

Sevilla. Junio de 2016

RESUMEN

Este estudio analiza la contaminación ambiental en la zona industrial de la Bahía de Algeciras. Se estudia la evolución de los principales contaminantes (CO, NO₂, NO_x, SO₂, PM_{2.5} y PM₁₀) y se evalúan respecto de los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (2006). En segundo lugar, se ha estimado el impacto que la contaminación ambiental tiene sobre la salud de la población de la Bahía de Algeciras. Concretamente se han enfocado estos cálculos sobre la mortalidad producida por la contaminación ambiental en la zona. En tercer lugar, se ha calculado la valoración económica que tiene dicho impacto sobre la salud, a través de dos conceptos: el coste de la enfermedad y el Valor Estadístico de la Vida. Los contaminantes que superan los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud fueron el NO_x, PM_{2.5} y PM₁₀. El número de fallecimientos que se evitarían si se alcanzaran los niveles recomendados de PM_{2.5} y PM₁₀ fueron un total de 182 casos. Finalmente el resultado de la valoración económica del coste de la enfermedad fue de 5.329.110€. Y la valoración económica total del valor estadístico de la vida fue de 414.787.113€.

PALABRAS CLAVE

Contaminación ambiental; Impacto sobre la salud; Valoración económica; Riesgo relativo; Mortalidad.

ABSTRACT

In this study, air pollution in the Bay of Algeciras was analyzed. The evolution of main pollutants is studied (CO, NO₂, NO_x, SO₂, PM_{2.5} and PM₁₀) and evaluated with respect to the guide values recommended by the World Health Organization (2006). Secondly, the impact that air pollution has on the health of the population in the Bay of Algeciras has been estimated. These calculations have been specifically focused on the mortality caused by air pollution in this area. Thirdly, it has been estimated the economic assessment that has that impact on health, through two concepts: the Cost of Illness and the Statistical Value of Life. Pollutants that exceed the levels recommended by World Health Organization were NO_x, PM_{2.5} and PM₁₀. The number of deaths would be avoided if the pollutants PM_{2.5} and PM₁₀ were reduced to the recommended levels were a total of 182 cases. Finally, the result of the economic valuation of the Cost of Illness was 5,329,110€. The total economic valuation of Value of Statistical Life was 414,787,113€.

KEYWORDS

Air pollution; Impact on health; Economic valuation; Relative risk; Mortality.

ÍNDICE

1. Introducción	6
2. Metodología y base de datos	11
2.1. Metodología del análisis de los datos de contaminación del aire	12
2.2. Metodología de análisis del impacto de la contaminación del aire en la salud	14
2.3 Metodología de análisis de la valoración económica del impacto de la contaminación en la salud.....	18
2.3.1. El coste de la enfermedad	19
2.3.2. El valor estadístico de la vida	21
3. Resultados	22
3.1. Resultados de la contaminación del aire en Algeciras.....	22
3.1.1 Análisis del contaminante NO _x en Algeciras.	23
3.1.2 Análisis del contaminante PM ₁₀ en Algeciras.....	25
3.1.3 Análisis del contaminante PM _{2,5} en Algeciras.	27
3.2. Resultados de la contaminación del aire en La Línea de la Concepción	29
3.2.1 Análisis del contaminante NO _x en La Línea de la Concepción.	29
3.2.2 Análisis del contaminante PM ₁₀ en La Línea de la Concepción	30
3.3 Resultados de la contaminación del aire en Los Barrios	31
3.3.1 Análisis del contaminante PM ₁₀ en Los Barrios.	32
3.4. Resultados de la contaminación del aire en San Roque.....	33
3.4.1 Análisis del contaminante PM _{2,5} en San Roque.	34
3.5. Resultados del impacto de la contaminación del aire en la salud.	36
3.6. Resultados de la valoración económica del impacto de la contaminación del aire en la salud.....	39
4. Discusión.....	40
5. Limitaciones del estudio.....	45
6. Conclusiones	46
7. Bibliografía	48
8. Anexo	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores guía anuales para los contaminantes establecidos por la OMS (2006) y UE (2008)	12
Tabla 2: Coeficientes β usados para el cálculo de riesgos relativos.....	16
Tabla 3: Relaciones PM _{2,5} /PM ₁₀ para diferentes ciudades y países del mundo.....	17
Tabla 4: Datos de los principales contaminantes en Algeciras (2002-2015)	23
Tabla 5: Tasas de Variación de NO _x Algeciras	24
Tabla 6: Datos de los principales contaminantes en La Línea de la Concepción (2000-2015)...	29
Tabla 7: Datos de los principales contaminantes en Los Barrios (2000-2015).....	31
Tabla 8: Datos de los principales contaminantes en La Línea y su relación con los valores guía de la OMS y la UE	34
Tabla 9: Riesgo relativo del PM ₁₀ por mortalidad según su causa.....	36
Tabla 10: Riesgo relativo del PM _{2,5} para el riesgo por mortalidad según su causa.	37
Tabla 11: Estimación del número de fallecimientos según contaminantes y causas.....	38
Tabla 12: Variación de la mortalidad según contaminante y localidad.....	38
Tabla 13: Valoración económica del impacto de la contaminación. VSL y COI	39
Tabla 14: Actividades industriales en la Bahía de Algeciras y niveles de contaminación elevados.....	40
Tabla 15: Principales planes de la Junta de Andalucía específicos para la zona del Campo de Gibraltar-Bahía de Algeciras.....	42

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: la Bahía de Algeciras. Municipios e industrias.....	9
---	---

ANEXO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A1: Indicadores de error obtenidos para los ajustes de tendencia y medias móviles.....	52
Tabla A2: Planes públicos municipales de acción contra la contaminación en la Bahía de Algeciras	52
Tabla A3: Principales estadísticos descriptivos obtenidos para los contaminantes más significativos	53
Tabla A4: Principales estadísticos descriptivos obtenidos para los contaminantes menos significativos.	54
Tabla A5: Estimación de fallecimientos para el año 2015 y en el caso de alcanzar niveles de contaminación fijados por la OMS (E*) y según el tipo de contaminante y causas de enfermedad.	56
Tabla A6: Estimación del número de fallecimientos evitables al alcanzar los niveles de contaminación fijados por la OMS.....	57
Tabla A7: Estimación del coste de enfermedad debido al PM _{2,5} . Causas cardiovasculares.....	57
Tabla A8: Estimación del coste de enfermedad debido al PM ₁₀ . Todas las causas.....	58
Tabla A9: Estimación del coste de enfermedad debido al PM _{2,5} . Causas respiratorias.	58

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura A1: Diagrama de los cálculos efectuados para estimar las variaciones de mortalidad según causas y contaminantes.	55
--	----

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es considerada hoy como una importante fuente de riesgo para la salud humana, tanto en los países desarrollados como en los no desarrollados. La calidad del aire viene determinada por la presencia de contaminantes en la atmósfera, tales como el material particulado y los contaminantes gaseosos. La importancia de la calidad del aire y su repercusión sobre la salud humana es un tema que ha adquirido importancia en los últimos años.

Los diversos organismos a nivel internacional y nacional ya han emprendido el camino para luchar contra este problema. De esta manera encontramos que la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció en 1987 unos valores guía para determinados contaminantes que debían conseguirse para garantizar la salud humana. Ante la abundancia de nuevos trabajos y estudios y del auge de países en desarrollo donde la calidad del aire está más comprometida desde la segunda edición de la publicación *Air quality Guidelines for Europe (AQG's)*, la OMS actualizó la guía de calidad del aire en 2005. En dicha guía identificaba cuatro grupos de contaminantes, en función de su impacto sobre la salud. En concreto, en el primer grupo se encontraba el material particulado, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno y el ozono (WHO, 2006). En un reciente informe de la OMS en el que se revisan los valores umbrales de los distintos contaminantes fijados en la guía de la calidad del aire 2005, se incide en la necesidad de incluir en este primer grupo al monóxido de carbono, aunque no se fija un valor de referencia (WHO, 2015).

Otras instituciones públicas han decidido actuar sobre la calidad del aire a través de documentos vinculantes. Ese es el caso de la Unión Europea, que actuó a través de la Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo de 2008, en la que se establecen límites a los distintos contaminantes dentro del territorio europeo. España ha incluido dentro de la normativa nacional lo contenido en esta directiva a través del Real Decreto 102/2011. No obstante, los límites establecidos por la UE son menos restrictivos que los contemplados en las guías fijadas por la OMS (2006).

Son diversos los factores que afectan a la calidad del aire, como, por ejemplo, la quema de combustibles fósiles. Pero también son fuente de contaminación las actividades que

se desarrollan cotidianamente en la vida de una ciudad, además de las actividades industriales propias de la economía (Observatorio DKV, 2010). Todos ellos inciden sobre la salud humana, provocando más de siete millones de muertes prematuras en el mundo debido a este tipo de contaminación (WHO, 2012), que tienen un coste social, pero también económico.

Esta contaminación ambiental afecta a la salud humana de diversas formas. Las enfermedades más destacables son el incremento del riesgo de padecer enfermedades respiratorias agudas (como la neumonía) o crónicas (asma), cáncer de pulmón y enfermedades cardiovasculares según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). Además, este tipo de enfermedades afectan de forma más severa a personas ya enfermas o a grupos vulnerables de población como son los niños y los ancianos (Ballester et al. 1999).

Debido a esto, son muchos los estudios que analizan este problema, y que han determinado un protocolo de análisis del impacto de la contaminación del aire en la salud humana. Destacan los estudios sobre el impacto del material particulado de diámetro inferior a 2,5 micras ($PM_{2,5}$) en la población de diferentes ciudades europeas (Ballester et al. 2008), o sobre el impacto de otros contaminantes en diversas ciudades (Ballester et al. 2005; Díaz et al. 1999; Schwartz et al. 2002). En el caso de España hay trabajos centrados en el impacto de la contaminación en la salud de grupos de población específicos, como es el caso de los niños (Linares et al. 2009; Pablo-Romero et al. 2015). Otros estudios también se centran en reseñar los beneficios económicos que se derivan de la reducción de ciertos contaminantes para una zona concreta (Linares et al. 2009; Pérez et al. 2009; Pablo-Romero et al. 2015).

En el caso de España, resulta de interés el análisis de la Bahía de Algeciras, dado que se trata de un polo industrial que hasta ahora ha recibido escasa atención, pese a ser una zona de elevada contaminación atmosférica. Trabajos previos tales como Cruz y Almisas (2009) y Cruz et al. (2011) han analizado el impacto de la contaminación sobre la mortalidad y la morbilidad en la Bahía de Algeciras, comparando la zona con Andalucía y España.

Con el objetivo de contribuir a la literatura especializada existente, y dada su importancia económica para Andalucía, desde el punto de vista tanto económico como medioambiental, el presente trabajo se ha centrado en el análisis de la evolución de la contaminación del aire en la Bahía de Algeciras en los últimos años, concretamente en los municipios de Algeciras, San Roque, Los Barrios y La Línea de la Concepción.

La Bahía de Algeciras tiene un total de 233.555 habitantes (INE, 2014), lo que supone casi el 18,8% del total de la población de la provincia de Cádiz.

En el campo de Gibraltar se encuentra uno de los polos industriales más importantes de Andalucía junto con Huelva, el polo industrial energético de la Bahía de Algeciras. Además, el puerto de la ciudad de Algeciras es uno de los más transitados del mundo, habiendo atracado en dicho puerto más de 28.000 buques en el año 2015 (Puerto de Algeciras), por estar ubicado en un enclave privilegiado, el estrecho de Gibraltar. La elevada concentración industrial y el tráfico portuario hacen de la Bahía de Algeciras una zona económicamente importante para la provincia de Cádiz, a la par que supone un problema medioambiental severo en la zona.

Figura 1: la Bahía de Algeciras. Municipios e industrias.



Fuente: Cruz y Almisas (2009)

Dicho polo industrial, que podemos observar en la figura 1, está representado a través de la AGI (Asociación de Grandes Industrias del Campo de Gibraltar). Las empresas que conforman la AGI pueden observarse en la tabla 14. En la composición de esta asociación toman especial relevancia en primer lugar la industria de refino de petróleo (empresas como Cepsa), la industria química y la metalúrgica (Acerinox). Estos tres subsectores conforman un 93,48% de la producción de la AGI (2014). Otras industrias que conforman la AGI se centran en la generación de energía eléctrica (en centrales térmicas y de cogeneración), además de actividades de envasado y trasvase de gases licuados de petróleo y la regasificación de gas natural licuado.

En conjunto, el polo industrial de Algeciras representa el 7,33% del valor añadido bruto de la provincia gaditana (2014), y da trabajo al 4,5% de los habitantes de la citada provincia (2014).

Como hemos destacado, el problema medioambiental en la zona es evidente. De un lado, el elevado tráfico marítimo y el vertido de las industrias a las aguas de la bahía provocan que éstas sean de las más contaminadas. De hecho, algunos estudios demuestran que las aguas de la bahía algecireña están más contaminadas que la costa gallega tras el desastre del *Prestige* (Morales, 2007).

El otro aspecto relevante a la contaminación es el referente a la calidad del aire. La presencia de industrias de refino de petróleo, químicas y metalúrgicas, de las más contaminantes según el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes de España, puede poner en duda que la calidad del aire en la zona sea la adecuada, afectando con ello a la salud de la población de la bahía.

Por ello el objetivo de este trabajo es triple: en primer lugar, analizar la composición de la contaminación atmosférica y su evolución en los últimos años en las cuatro localidades de la Bahía de Algeciras, identificando aquellos contaminantes cuyos niveles de concentración comprometan la salud de la población; en segundo lugar, identificar la relación existente entre los contaminantes identificados y la mortalidad en la zona por problemas cardiovasculares y respiratorios. Y en tercer lugar realizar una estimación de la valoración económica del beneficio económico que supondría la

reducción de aquellos contaminantes que superan los umbrales recomendados por la OMS (2006) en la Bahía de Algeciras.

Para ello el trabajo se ha estructurado de la siguiente forma. Tras esta introducción, en el apartado segundo se desarrolla la metodología aplicada y se explican las bases de datos utilizadas. En el apartado tercero se presentan los resultados obtenidos. En el apartado cuarto se discuten los resultados. En el apartado quinto se exponen las principales limitaciones del trabajo. Y en el apartado sexto se sintetizan las principales conclusiones del trabajo.

2. METODOLOGÍA Y BASE DE DATOS

Las bases de datos utilizadas son las proporcionadas por la Consejería de Medioambiente de la Junta de Andalucía, a través de dos de sus organismos: La Red de Información Ambiental (REDIAM) y la Dirección General de Prevención y Calidad del Aire. Ambos organismos proporcionaron datos sobre contaminantes para el periodo 2000-2015. En total, han sido proporcionados datos procedentes de 21 tomadores y tres torres meteorológicas, distribuidos entre las cuatro localidades especificadas: Algeciras, San Roque, Los Barrios y La Línea de la Concepción.

Los contaminantes estudiados son las partículas con diámetro inferior a 2,5 ($PM_{2,5}$) y 10 micras (PM_{10}), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el óxido de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono (CO). Todos ellos (excepto el NO_x) están incluidos dentro del grupo 1 de contaminantes de la OMS (2006), y por tanto, son considerados los más peligrosos para la salud.

A partir de los datos diarios de todos los contaminantes se han obtenido los datos medios mensuales y anuales de los diferentes tomadores para los contaminantes disponibles. En general, el periodo analizado ha sido 2000-2015. No obstante no se ha podido realizar un análisis tan amplio para todos los contaminantes debido a que no han sido suministrados datos suficientes. Algunas series de datos comenzaban en los años 2002 o 2003, no presentando valores desde el 2000 hasta entonces. En el caso del

contaminante $PM_{2,5}$ los valores a los que ha podido accederse comienzan en el año 2011 (salvo en la localidad de San Roque, que se tienen datos desde 2005). No pudiendo seguir ningún criterio para obtener esos datos se decidió no tener en cuenta determinados años para algunos contaminantes.

Con los datos de medias diarias, mensuales y anuales de los diferentes contaminantes para los distintos tomadores, se procedió a aglutinar los datos por localidad. Se agruparon los tomadores por término municipal y se obtuvo la media de los tomadores disponibles desglosados en los ya especificados: medias diarias, mensuales y anuales.

La observación y análisis de estos datos se ha hecho en relación a los límites propuestos por la OMS en sus guías para la calidad del aire, además de en lo dispuesto en la Directiva 2008/50/CE que establece los límites para la Unión Europea, realizándose el análisis para cada contaminante que superase dichos valores límites en cada localidad.

Tabla 1: Valores guía anuales para los contaminantes establecidos por la OMS (2006) y UE (2008)

OMS						UE					
CO	NO_2	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2,5}$	CO*	NO_2	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2,5}$
ND	40	40	ND	20	10	7	40	125	30	40	25

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la Guía de Calidad del Aire (2005) OMS y de la Directiva 2008/50. Los datos están expresados en $\mu g/m^3$, salvo los datos de CO, que se expresan en mg/m^3

*Valor incluido en el Real Decreto 102/2011

En relación a estos límites, debemos destacar que la normativa española ya citada anteriormente incluye también un límite a las medidas diarias de CO de $7mg/m^3$, que será el usado para analizar los datos en referencia a dicho contaminante.

De esta forma, para cada contaminante y localidad, se ha calculado el valor medio del periodo estudiado y la media del último año disponible. Estos dos valores se han comparado con los umbrales límites propuestos por la OMS y la UE, procediéndose a analizar sólo los contaminantes que presentan valores superiores a dichos umbrales.

2.1. Metodología del análisis de los datos de contaminación del aire.

La metodología de estudio de estos datos ha seguido un análisis de series temporales que se describe a continuación.

Con los contaminantes elegidos se ha procedido a realizar las medias móviles del periodo para los datos mensuales, con una longitud de 15 términos, para suavizar la evolución de los datos debido a la volatilidad de los mismos, y poder determinar los distintos periodos con comportamientos distintos que se encuentran en la serie de datos. Una vez establecidos los distintos periodos, se ha procedido a cuantificar las variaciones entre esos periodos a través de tasas de variación.

$$m_t = \left(\frac{Y_t}{Y_{t-1}} - 1 \right) * 100 \quad (1)$$

Siendo m_t la tasa de variación de la media mensual de cada contaminante en el período t , Y_t el valor de la media anual de cada contaminante del año t , Y_{t-1} el valor de la media anual de cada contaminante del año $t-1$.

Para estudiar el componente estacional de las series de datos, éstas han sido ajustadas siguiendo el método de descomposición del análisis clásico, concretamente el modelo aditivo (Schwartz et al. 2002), debido a que el patrón de la variación estacional permanece constante.

$$Y_t = \text{Tendencia} + \text{Estacionalidad} + \text{Error} \quad (2)$$

Siendo Y_t el valor medio mensual de cada contaminante.

Este ajuste se ha realizado con el programa informático *Minitab*, con el cuál se han realizado también las medias móviles, la estimación de tendencias y la descomposición de las series según estos componentes, ajustando el modelo según estos.

Conocido el patrón estacional, se ha procedido a establecer la tendencia de cada serie de datos para el total del periodo estudiado. En todos los casos se han contemplado tres

posibilidades de tendencia: lineal, exponencial y cuadrática. Para determinar la tendencia con menor error se han seguido los criterios de: Error Absoluto Medio Relativo (MAPE por sus siglas en inglés), Desviación Absoluta Media (MAD) y el de Desviación Cuadrática Media (MSD).

El criterio MAPE permite obtener un dato de error absoluto medio que se trata de un número positivo que no depende de unidad de medida alguna. Para decidir qué modelo se ajusta más a una serie se elegirá aquel que presente menor valor de este criterio. Además, el criterio MAPE parece ser de los más populares en los trabajos de investigación (Amirkhalhali et al. 1985) y viene incluido en el programa *Minitab*. La interpretación del criterio es el porcentaje de desviación del pronóstico y por tanto, la probabilidad de error en el ajuste de la serie.

$$MAPE = \frac{\sum |y_t - \hat{y}_t| / y_t}{n} * 100 \quad (3)$$

El segundo criterio es la Desviación Absoluta Media (MAD en inglés), que mide la media de los errores absolutos cometidos. Destacar que este criterio se ve menos afectado por los valores atípicos en comparación con el criterio MSD.

$$MAD = \frac{\sum (y_t - \hat{y}_t)}{n} \quad (4)$$

El último criterio es la Desviación Cuadrática Media (MSD), indicador que mide la media de los errores absolutos al cuadrado.

$$MSD = \frac{\sum (y_t - \hat{y}_t)^2}{n} \quad (5)$$

Se ha determinado el ajuste de la evolución de los datos de cada contaminante mediante una estimación de tendencia. Dicha estimación resulta de la elección entre una función lineal o una cuadrática. La pauta de elección de una u otra función fue la de menor valor de los criterios MAPE, MAD y MSD.

Finalmente, en algunos casos se ha creído útil realizar pronósticos sobre la evolución de las series de datos. Dichos pronósticos se han realizado a través del modelo aditivo previamente descrito, siguiendo la descomposición ya explicada en este apartado.

2.2. Metodología de análisis del impacto de la contaminación del aire en la salud

El estudio del impacto de la contaminación del aire en la salud se ha realizado mediante dos metodologías. En primer lugar se ha realizado el cálculo del riesgo relativo de la población como consecuencia de un cambio de la contaminación del aire a través de la metodología de análisis basado en las funciones dosis-respuesta. Y en segundo lugar, se ha calculado el impacto de la contaminación del aire sobre la mortalidad.

En primer lugar, se ha calculado el riesgo relativo al que está sometida la población como consecuencia de un cambio en los niveles de contaminación. Esta medida es muy frecuente en la literatura (Pope et al. 2002; Ballester et al. 2008; Linares et al. 2009; Cruz y Almisas, 2009), aunque destaca principalmente el artículo citado en primer lugar. Para realizar este estudio se han elegido los contaminantes PM_{10} y $PM_{2,5}$, debido a la limitación de datos para otros contaminantes.

Las funciones utilizadas han sido tomadas del “Informe sobre los efectos en la salud asociados al plan de mejora de la calidad del aire de la zona industrial Bahía de Algeciras” (Junta de Andalucía, 2014), que se basan en el artículo ya citado de Pope et al. (2002), además de una función específica para el caso de niños menores de 5 años (Ritz et al. 2000) y para el cual establece una estimación de coeficientes β , con intervalos de confianza al 95%. Las funciones son diferentes en función del contaminante estudiado. Se usará la función (6) para el PM_{10} y la función (7) para $PM_{2,5}$.

$$RR_{PM_{10}} = e^{\beta(C-C_0)} \quad (6)$$

$$RR_{PM_{2,5}} = \left[\frac{(C + 1)}{(C_0 + 1)} \right]^{\beta} \quad (7)$$

Siendo $RR_{PM_{10}}$ y $RR_{PM_{2,5}}$ los riesgos relativos por distintas causas asociadas a los coeficientes β estimados de la tabla 2 y siendo C y C_0 los niveles de contaminación entre dos periodos de estudio para los contaminantes PM_{10} y $PM_{2,5}$. En primer lugar se ha calculado el riesgo relativo tomando como valor de referencia la media de cada contaminante en el periodo de estudio (C), y se ha usado como valor objetivo el valor observado en el año 2015 (C_0). En segundo lugar, se ha calculado el riesgo relativo tomando como valor de referencia el valor del contaminante para el año 2015 (C) y se ha usado como valor objetivo los niveles de contaminación fijados por la OMS para los contaminantes estudiados (C_0).

Tabla 2: Coeficientes β usados para el cálculo de riesgos relativos

PM₁₀	β	IC (95%)
Correlación entre la mortalidad por todas las causas y grupos de edad	0,0008	(0,0006-0,0010)
Correlación entre la mortalidad por causas respiratorias en menores de cinco años.	0,00166	(0,00034-0,0030)
PM_{2,5}	β	IC (95%)
Correlación entre la mortalidad en mayores de 30 años por causas cardiovasculares.	0,15515	(0,0562-0,2541)
Correlación entre la mortalidad en mayores de 30 años por causas pulmonares	0,23218	(0,08563-0,37873)

Fuente: Junta de Andalucía, 2014.

Dado que los datos de los que se dispone relativos a $PM_{2,5}$ en este trabajo para la mayoría de las localidades solo están disponibles a partir del año 2011, se hace necesario, para poder comparar con otros estudios y con el informe ya citado, buscar una forma de generar esos datos.

En el informe de la Junta de Andalucía, los datos de $PM_{2,5}$ se obtienen a partir de los datos de PM_{10} . Concretamente, establece que el 60% del material particulado pertenece a la fracción de partículas finas, según USEPA (1996), (Junta de Andalucía, 2014). No obstante, existe multitud de trabajos que han establecido la relación entre partículas finas respecto a las partículas con diámetro inferior a 10 μm , tal y como podemos observar en la tabla 3.

Tabla 3: Relaciones PM_{2,5}/PM₁₀ para diferentes ciudades y países del mundo

Lugar	Fuente	Relación PM _{2,5} /PM ₁₀		
México	(Romeu et al. 1997)	DF: 0,50 – 0,70		
Santiago, Chile	(Romeu et al. 1997)	Invierno: 0,80	Verano: 0,40	
Birmingham, UK	(Harrison et al. 1997)	Invierno: 0,80	Verano: 0,50	
Italia	(D'Innocenzio et al. 1998)	0,58		
Holanda	(Janssen et al. 1997)	0,57		
Alemania	(Kainka et al. 1997)	0,70-0,80		
España	(Rodríguez et al. 2003)	País Vasco: 0,74	Barcelona: 0,60	Tarragona: 0,62
EE.UU.	(USEPA. 2003)	Este: 0,75	Centro: 0,52	Oeste: 0,53
Sidney, Australia	(Cohen. 1999)	0,29-0,53		
Hong Kong, China	(Ho et al. 2003)	0,53-0,78		

Fuente: Galvis y Rojas (2005).

De entre los criterios mostrados por todos los trabajos, en este estudio se ha optado por continuar con el criterio utilizado por el informe de la Junta de Andalucía (USEPA, 1996), para poder comparar los resultados obtenidos.

En segundo lugar, se ha analizado el impacto de la contaminación del aire por contaminantes PM₁₀ y PM_{2,5} en términos de mortalidad utilizando funciones dosis-respuesta. El punto de partida de estas estimaciones son los datos procedentes de Cruz et al. (2009), en el que se muestran las tasas de mortalidad por cada 100.000 habitantes según diferentes causas para el año 2005 en las localidades de la Bahía de Algeciras.

De manera que usaremos la ecuación (8) para estimar los datos referentes a PM₁₀, y la función (9) para estimar los datos referentes a PM_{2,5}.

$$E_{15} = \frac{E_{05}}{e^{\beta(C_{05}-C_{15})}} \quad (8)$$

$$E_{15} = \frac{E_{05}}{\left[\frac{(C_{05}+1)}{(C_{15}+1)} \right]^{\beta}} \quad (9)$$

Siendo E_{05} el número de fallecimientos en el año 2005 y E_{15} el número de fallecimientos para el año 2015. En el caso de la ecuación (8) se analiza la mortalidad por todas las causas y en el caso de la ecuación (9) se obtiene la mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias. Y siendo C_{05} y C_{15} los valores medios de la contaminación por PM_{10} y $PM_{2,5}$ en 2005 y 2015 respectivamente. Debemos señalar que para el cálculo de la tasa de variación de la mortalidad, se ha considerado el supuesto de que la población se ha mantenido constante a lo largo del periodo.

Asimismo, los coeficientes β utilizados en estas estimaciones son los calculados por el informe asociado al Plan de Mejora de la Calidad del Aire a partir de las funciones de riesgo relativo de Pope et al. (2002), que fueron calculadas para la mortalidad debida a todas las causas (PM_{10}) y por causas cardiovasculares y respiratorias ($PM_{2,5}$).

Con los datos estimados para el año 2015, se calcula el efecto sobre la mortalidad de la reducción de la contaminación por PM_{10} y $PM_{2,5}$ a los límites fijados por la OMS (2006). La figura A1 del Anexo muestra un esquema de los pasos realizados para la obtención de dichos cálculos. Las ecuaciones 10 y 11 muestran la metodología seguida en los casos de los contaminantes PM_{10} y $PM_{2,5}$ respectivamente, siendo E^* la tasa de mortalidad asociada a los niveles de contaminación recomendados por la OMS (2006) y C^* , los citados niveles de contaminación:

$$E^* = \frac{E_{15}}{e^{\beta(C_{15}-C^*)}} \quad (10)$$

$$E^* = \frac{E_{15}}{\left[\frac{(C_{15}+1)}{(C^*+1)} \right]^{\beta}} \quad (11)$$

2.3 Metodología de análisis de la valoración económica del impacto de la contaminación en la salud.

Como se ha especificado en la introducción, el objetivo último de este trabajo, es la estimación del impacto económico que se derivaría de la reducción de la contaminación ambiental en la Bahía de Algeciras. A continuación, se describen los dos criterios de valoración económica que se han seguido: el coste de la enfermedad o Cost of Illness, y el valor estadístico de la vida o Value Statistical Life.

2.3.1. El coste de la enfermedad.

El primer criterio de valoración es el Coste de la Enfermedad (COI en sus siglas en inglés), presente en la literatura cuando se ha tratado de realizar la valoración económica de los aspectos sanitarios. El COI está muy aceptado entre los investigadores que parten de la perspectiva del Capital Humano y basan el coste de enfermedad no sólo en el coste de asistencia sanitaria, sino en la pérdida de productividad generada por el trabajador, fruto de su estancia sin poder trabajar o de su fallecimiento, al considerar el trabajo humano como el sujeto que asume la autoría de los comportamientos económicos y es, entre otras cosas, considerado uno de los principales factores de producción (Jo, 2014).

Este concepto se subdivide en dos tipos de coste: el coste directo, derivado de la atención hospitalaria, y el coste indirecto en el que se incurre debido a la enfermedad, generalmente medido en pérdida de salarios (Hall et al. 2006). El coste indirecto también puede ser medido como la productividad perdida por mortalidad y morbilidad prematura (Cebr, 2014).

En este trabajo el coste directo (C_D) es una valoración del coste de atención hospitalaria que nos podríamos ahorrar si la contaminación atmosférica se redujese a los niveles recomendados por la OMS (2006). En este caso solamente se han valorado las atenciones hospitalarias que han derivado en fallecimiento. Para realizar esta estimación se ha tomado como referencia el coste de una admisión hospitalaria efectuado por Netcen (2002). Se asume, por tanto, que el coste sanitario depende únicamente del coste

de la admisión hospitalaria, y consideramos que cada caso ha sido hospitalizado en una única ocasión.

En el caso concreto de admisiones hospitalarias, el coste sanitario por persona por causas respiratorias queda estimado en 4.320€ y por causas cardiovasculares sería de 16.730€. Dichos datos están expresados en euros del año 2000. Por este motivo, para mostrar el dato del coste directo por atención hospitalaria en el año 2015, se ha actualizado el valor de dicha renta al año 2015 a través de los datos del INE, alcanzando un valor de 6.117€ y de 23.690€ respectivamente.

$$C_D = C_d \cdot (E_{15} - E^*) \quad (12)$$

Donde C_d es el coste sanitario por persona actualizado a euros del año 2015, siendo entonces $E_{15} - E^*$ el número de fallecimientos que se podrían evitar si la contaminación atmosférica del 2015 se redujese a niveles de contaminación recomendados por la OMS (2006).

El coste indirecto (C_I) muestra la pérdida de productividad laboral asociada a los fallecimientos de personas en edad de trabajar que han sido provocados por una contaminación atmosférica superior a los niveles recomendados por la OMS (2006). La pérdida de productividad se ha calculado a través de los ingresos medios que hubiese obtenido una persona durante toda la vida laboral restante actualizados al momento del fallecimiento tal y como propone Cebr (2014), en el que se hace referencia a las enfermedades cardiovasculares. En nuestro trabajo, los resultados se han hecho extensibles para todas las causas de mortalidad.

En primer lugar, se ha estimado el número de muertes prematuras de la Bahía de Algeciras (M_P^{BA}) que se hubiesen podido evitar en el caso de reducir los niveles de contaminación existente en el año 2015 a los niveles recomendados por la OMS (2006) tal y como se muestra en la ecuación (13).

$$M_P^{BA} = (E_{15} - E^*) \cdot \frac{M_P^E}{M_T^E} \quad (13)$$

Siendo M_p^E la mortalidad prematura en España y M_T^E el total de mortalidad en España ambas de 2014. En segundo lugar, se estima el coste indirecto per cápita de la mortalidad prematura (C_{Ipc}) a partir de los datos del estudio de Cebr (2014) para España mediante la siguiente expresión:

$$C_{Ipc} = \frac{C_I^E}{M_p^E} \quad (14)$$

Siendo C_I^E la pérdida de productividad o coste indirecto provocado por los fallecimientos prematuros en España en el año 2014. El dato C_{Ipc} ha sido considerado representativo para el caso de la Bahía de Algeciras, utilizándose en la estimación del coste indirecto total (C_I). De esta forma, el COI estimado para la Bahía de Algeciras será la suma del coste directo y del coste indirecto por mortalidad prematura:

$$COI = C_D + C_I = C_D + C_{Ipc} \cdot M_p^{BA} \quad (15)$$

2.3.2. El valor estadístico de la vida.

El motivo de la inclusión de este criterio de valoración se debe a que el COI es un recurso considerado por la literatura como limitado, al no tener en cuenta todos los beneficios derivados de una mejora en la salud. Se hace necesario, por tanto, incluir otros elementos, como la pérdida de tiempo (años de vida perdidos en el caso de la mortalidad), el dolor o la ansiedad provocada por los efectos de la enfermedad, la pérdida de tiempo de ocio o los efectos adversos causados en familiares y amigos (Hall et al. 2006). De esta manera, se persigue evaluar el impacto externo que la contaminación tiene sobre la Bahía de Algeciras.

El criterio del valor estadístico de la vida o Value Statistical Life (VSL en adelante) es una medida del coste de la mortalidad que se deriva de la agregación de las disponibilidades a pagar (DAP) individuales en una sociedad. El razonamiento en el que este estudio se basa parte de los conceptos de utilidad del consumo en un periodo dado ($U[y]$) y el riesgo de morir en dicho periodo, r , (WHO Regional Office for Europe, 2015), y asumiendo que cada individuo tiene una función de utilidad esperada (EU):

$$EU(y, r) = (1 - r)U(y) \quad (16)$$

De esta forma, se obtiene que la disponibilidad a pagar o willingness to pay (WTP por sus siglas en inglés) es la cuantía que, ante una reducción en el riesgo de morir en el periodo dado, permite que la utilidad se mantenga constante, tal que:

$$EU(y - WTP, r') = EU(y, r) \quad (17)$$

Por tanto, en el informe ya citado se define que el VSL es la tasa marginal de sustitución entre la disponibilidad a pagar de una persona (WTP) y el riesgo a morir en el periodo dado (r) siguiendo lo establecido en la ecuación (18). La metodología empleada para conocer el valor de la WTP es mediante encuestas. Según WHO Regional Office for Europe (2015), la disponibilidad a pagar por la población de Estados Unidos era de 30\$ para una reducción en el riesgo de morir de 1 entre 100.000.

$$VSL = \frac{\delta WTP}{\delta r} \quad (18)$$

La OCDE calcula el valor VSL específico para cada país a partir del valor ya especificado para EE.UU, ajustando las distintas tasas de inflación, incorporando la paridad del poder adquisitivo y diversos ajustes más, todos especificados en dicho informe. En el caso concreto de España, se establece que el WTP en el año 2010 era de 30,6\$ por una reducción en el riesgo a morir de 1 entre 100.000. Lo que hace que el valor VSL en España sea de 3,06 (millones de \$, 2010).

Obtenido el valor VSL para España, se ha actualizado dicho valor a 2015 y se ha convertido a euros para facilitar la comparación de datos, obteniéndose un valor de 2.275.848€. A partir del dato de VSL individual estimado para España, se ha considerado representativo para la Bahía de Algeciras y se ha calculado el VSL total (VSL_T), teniendo en cuenta los fallecimientos que se hubiesen evitado al reducir la contaminación existente en 2015 a los niveles recomendados por la OMS (2006), tal y como se muestra en la ecuación (19).

$$VSL_T = (E_{15} - E^*) \cdot VSL = (E_{15} - E^*) \cdot 2.275.848€ \quad (19)$$

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de la contaminación del aire en Algeciras.

Tras analizar los datos de los diferentes contaminantes de la ciudad de Algeciras y, en comparación con los límites fijados por la OMS y la UE, obtenemos lo mostrado en la tabla 4.

Tabla 4: Datos de los principales contaminantes en Algeciras (2002-2015)

	CO	NO ₂	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}
Media del periodo	447	27,7	11,2			
2015	460	20,1	9,9	37	30,1	11,7

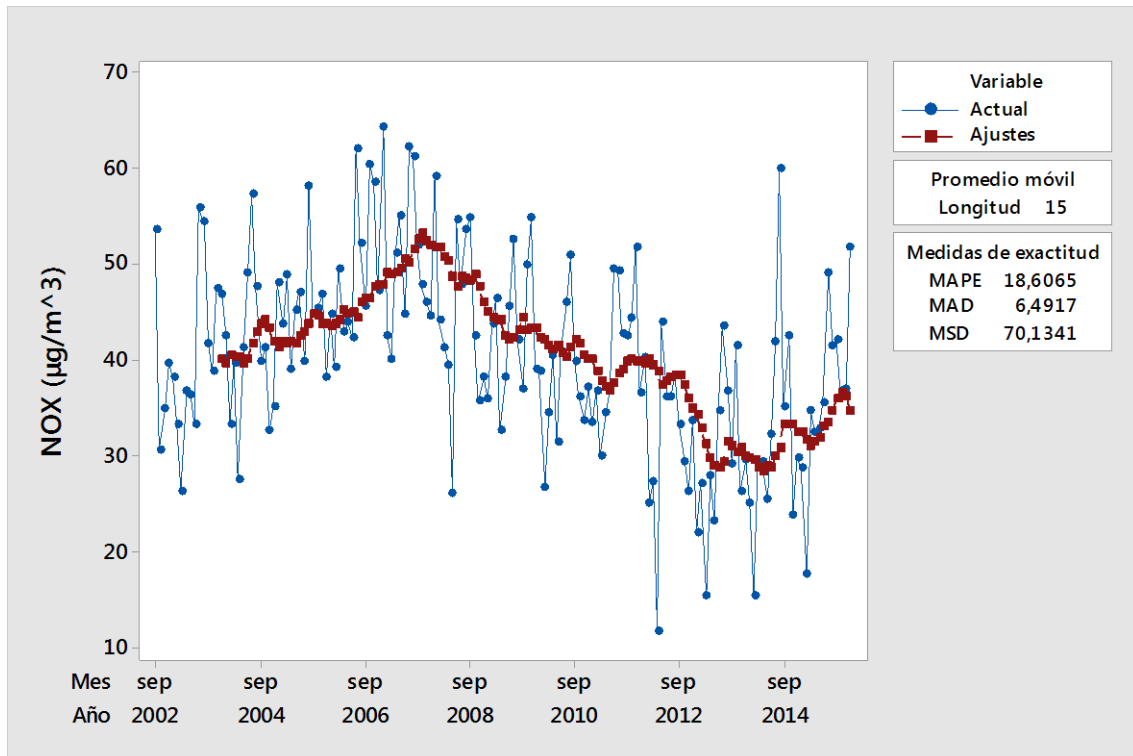
Fuente: Elaboración propia. Los datos están expresados en μ /m^3

Según los datos analizados, los contaminantes CO, NO₂ y SO₂ se sitúan bajo los niveles establecidos por los entes internacionales. Por otro lado, las partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}) se encuentran en niveles que superan los establecidos por la OMS (2006), pero cumplen con la normativa europea y española, por lo que requerían un análisis más profundo de su evolución. A su vez, el óxido de nitrógeno no cumple con la normativa española, por lo que será descrito de forma más profunda a continuación.

3.1.1 Análisis del contaminante NO_x en Algeciras.

La evolución del contaminante NO_x presenta una tendencia divisible en tramos, tal y como podemos observar en la gráfica 1. Atendiendo a la media móvil, podemos observar tres periodos. El primero comprende los años 2002 a 2007, el segundo de 2007 a 2013, y el tercero hasta el final de la serie. Para esos periodos se han obtenido las tasas de variación mostradas en la tabla 5.

Gráfica 1: Promedio móvil de NOx en Algeciras (2002-2015)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Tasas de Variación de NO_x Algeciras

	Tasa de Variación del Periodo	Nivel alcanzado al final del periodo
2002-2007	35,46%	51,5
2007-2013	-42,09%	29,8
2013-2015	24,06%	37

Fuente: Elaboración propia. Unidades expresadas en $\mu g/m^3$

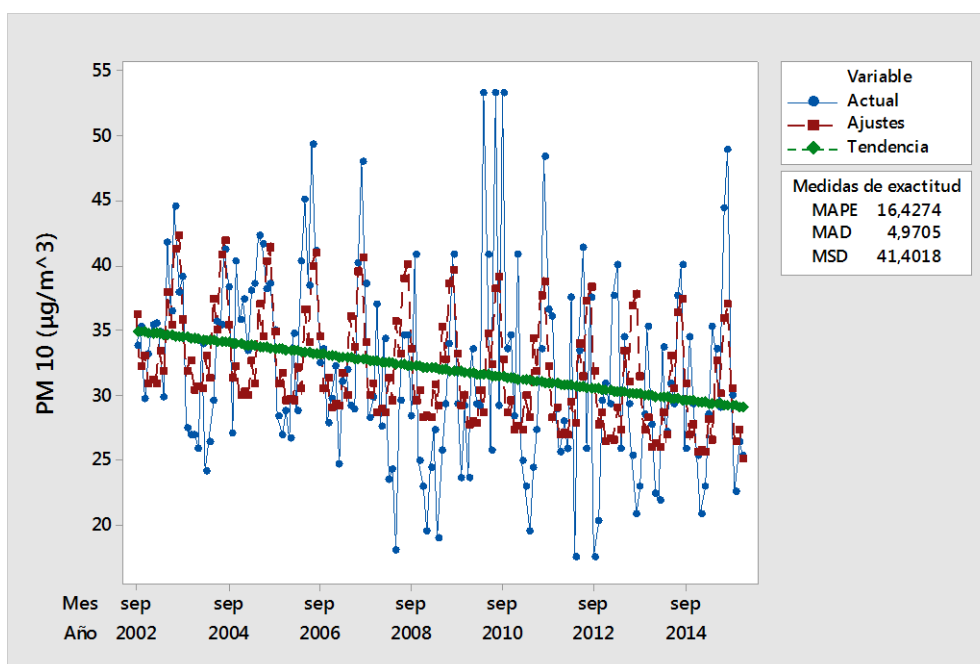
Encontramos por tanto un primer periodo con una tasa notable de variación, llegando a alcanzarse un nivel máximo anual de $51,5 \mu g/m^3$, nivel muy alejado del establecido por la normativa europea. En los años posteriores a 2007, se produce una caída de los niveles de concentración de este contaminante, situándose al final del periodo bajo el límite legal establecido de $30 \mu g/m^3$. No obstante en los últimos años se observa un nuevo crecimiento de dichos niveles, que en la actualidad se encuentran en $37 \mu g/m^3$.

Además, la evolución presenta un comportamiento cíclico y estacional. Se ha determinado a través de coeficientes de estacionalidad, que los mayores niveles de concentración se dan en los meses de *julio* y *agosto*, mientras que los meses que presentan niveles de menor concentración son los de *febrero* a *mayo*.

Para obtener una tendencia general del periodo, se ha descompuesto la serie mediante ajustes estacionales. La tendencia lineal ajustada del periodo muestra un ritmo en términos generales a lo largo del periodo de reducción de los niveles de concentración de NO_x.

Sobre dicho modelo se han calculado pronósticos para los cinco años próximos, de manera que la media anual podría situarse, siguiendo el patrón de reducción establecido por el modelo, en ese tiempo, por debajo de los límites legales.

Gráfica 2: Descomposición de NO_x Algeciras (2002-2015). Modelo aditivo.



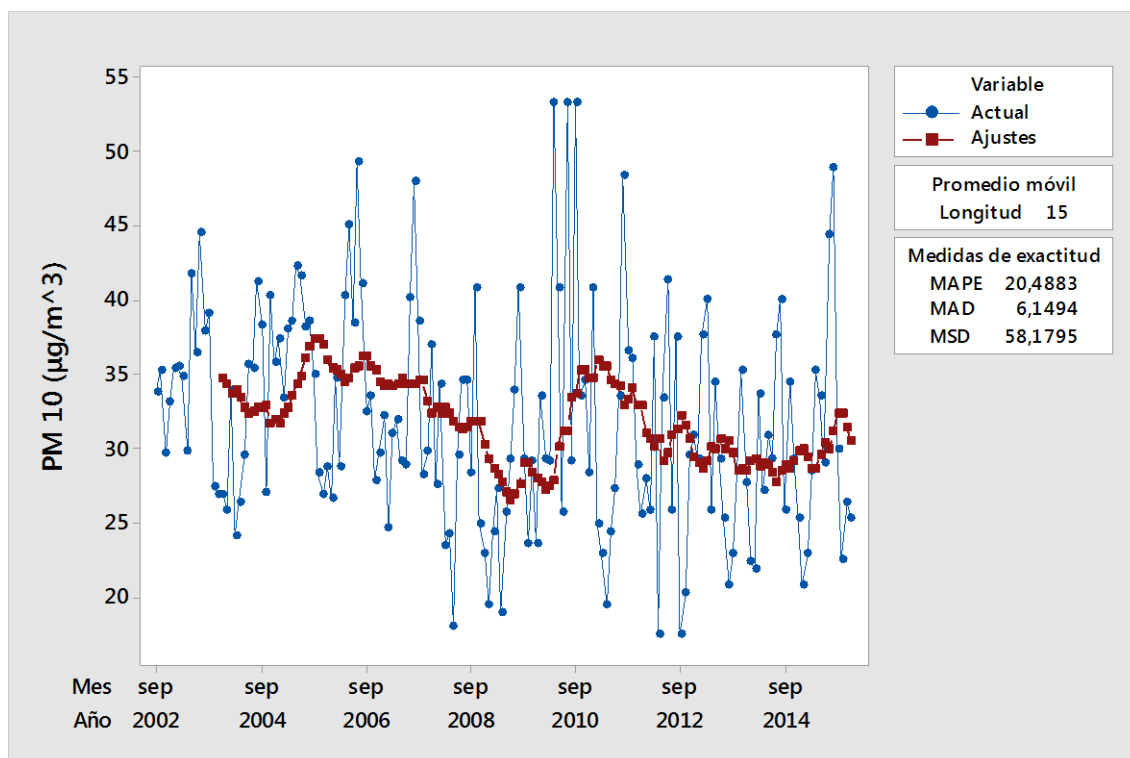
Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Análisis del contaminante PM₁₀ en Algeciras.

Las partículas de diámetro inferior a las diez micras presentan un comportamiento parecido al del óxido de nitrógeno. Destacar que el valor correspondiente al año 2015 es

similar al de la media del periodo. No obstante, sus valores destacan por ser muy volátiles a lo largo del periodo. De nuevo, la media móvil ajustada presenta mejor la evolución de los datos del periodo.

Gráfica 3: Promedio móvil de PM₁₀ Algeciras (2002-2015)



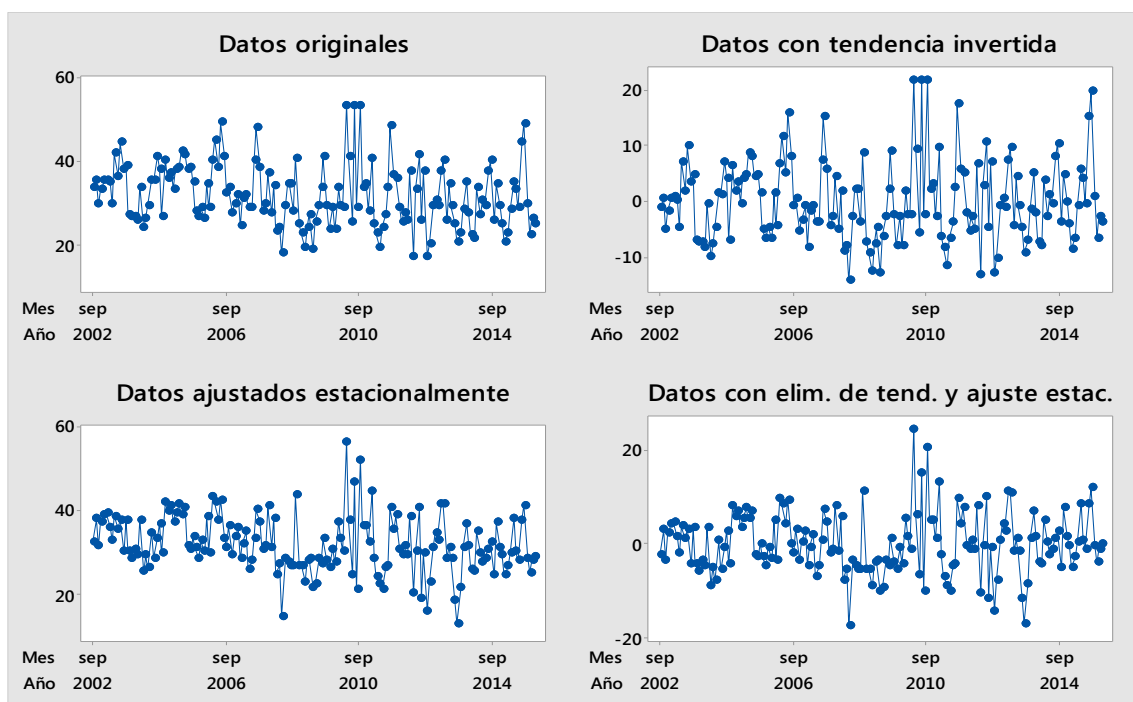
Fuente: Elaboración propia

La evolución de los datos muestra dos periodos bien diferenciados: el primero (2004-2008), caracterizado por un descenso de los niveles de concentración de PM₁₀, seguido de un aumento tras el inicio de la crisis y el segundo (2010-2015), en el que los niveles vuelven a disminuir, con un aparente estancamiento de los niveles de concentración en los últimos años.

Concretamente el primer periodo descrito se caracteriza por presentar una reducción del 12% en los niveles de PM₁₀. Entre ambos periodos se produce un nuevo incremento de los niveles de este contaminante, alcanzando los $34 \mu g/m^3$. Posteriormente y hasta 2013 se sucede un ritmo descendente que acumulará una reducción del 22%. Entre este dato y el final del periodo vuelve a aparecer una tendencia creciente (del 12%), volviendo a situar los niveles de PM₁₀ en torno a los $30 \mu g/m^3$.

Atendiendo a la estacionalidad de los datos, el coeficiente de estacionalidad vuelve a mostrar una mayor concentración en los meses de verano (concretamente los meses de julio y agosto), y menores niveles en invierno. No obstante, ajustando el modelo según el componente estacional podemos observar que, eliminando la tendencia y observando el ajuste estacional, la serie presenta una evolución de la concentración casi constante (puede observarse en la gráfica 4), algo nada extraño si volvemos al dato de la tabla 4 en el que se observaba que la media del periodo y el dato del año 2015 eran muy parecidos.

Gráfica 4: Análisis de componente de PM₁₀ Algeciras (2002-2015). Modelo aditivo



Fuente: Elaboración propia

Por tanto, la concentración de este contaminante, pese a las variaciones sucedidas a lo largo del periodo, permanece en niveles superiores a los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo por tanto unos niveles por encima de los fijados por la OMS.

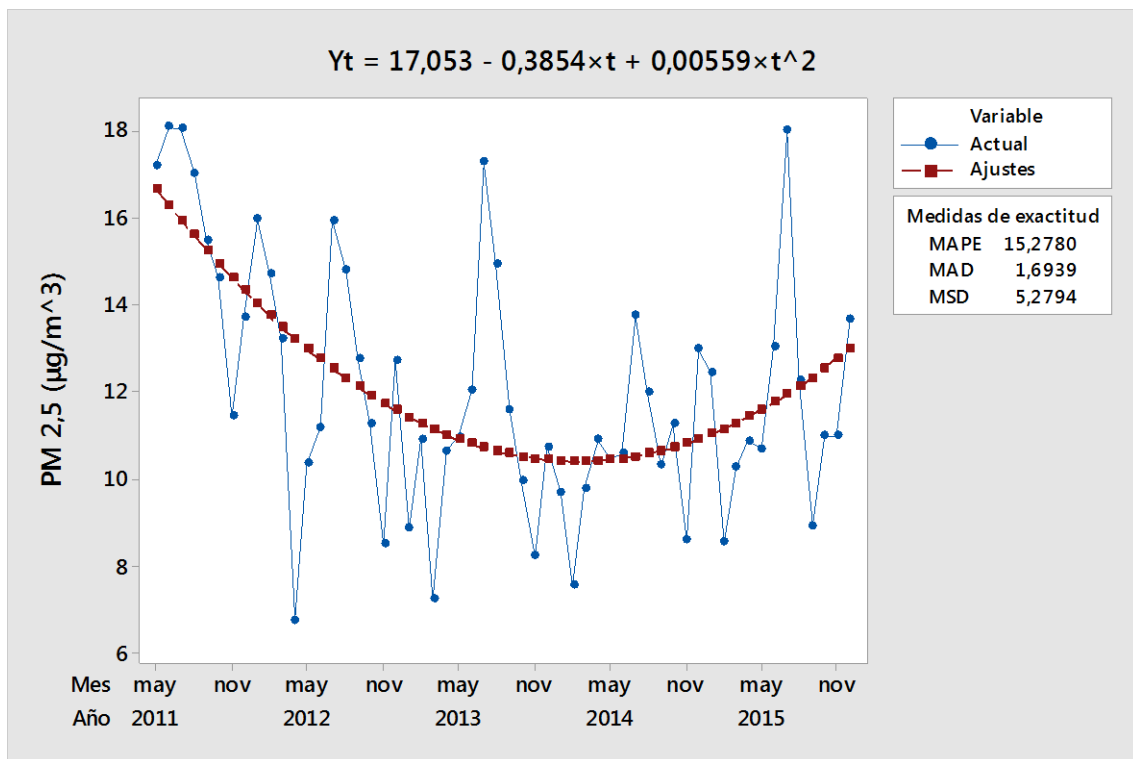
3.1.3 Análisis del contaminante PM_{2,5} en Algeciras.

Las partículas con diámetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$ presentan un comportamiento similar a las de $10 \mu\text{m}$. La estacionalidad sigue el mismo patrón, manteniéndose los niveles de

concentración más elevados en los meses de julio y agosto, mientras que los niveles menores se concentran entre los meses de noviembre a marzo, e incluso abril. Además, el valor medio del periodo prácticamente coincide con el del año 2015.

Sin embargo, el recorrido y la tendencia del mismo siguen, en términos generales, una evolución diferente. La serie de datos presenta un periodo dividido en dos: desde 2011 hasta noviembre de 2013 una tendencia decreciente, y los años posteriores unos niveles crecientes. Se observa de forma clara en la gráfica 5.

Gráfica 5: Modelo de tendencia cuadrática para PM_{2,5} Algeciras (2011-2015)



Fuente: Elaboración propia

Cuantitativamente, durante el primer periodo que se ha establecido se observa una reducción de la media mensual de más del 50% (pasando de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a casi 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En el periodo posterior, como se ha dicho, la tendencia se revierte, para volver a situarnos a niveles por encima de las 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.2. Resultados de la contaminación del aire en La Línea de la Concepción.

Respecto de los datos relativos a la localidad de La Línea de la Concepción (en adelante, La Línea) se obtiene lo expuesto en la Tabla 6.

Tabla 6: Datos de los principales contaminantes en La Línea de la Concepción (2000-2015)

	NO ₂	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}
Media del periodo	27	13,7	37	35,9	11
2015	27,2	10,2	34,2	29,5	11,2

Fuente: Elaboración propia. Los datos están expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al igual que en el caso de la ciudad de Algeciras, los contaminantes que superan los umbrales establecidos vuelven a ser las partículas y el óxido de nitrógeno. En el caso de NO_x el valor está claramente por encima del límite legal establecido y a continuación se ofrecerá más detalle sobre su evolución. Respecto de las partículas, el PM₁₀ por un lado presenta un valor final por debajo de la media, mientras que el PM_{2,5} el valor final supera levemente la media del periodo. No se profundiza el análisis de este último contaminante por ser el mismo igual que en el caso de Algeciras. La reducción total del periodo para este último contaminante fue de aproximadamente el 20%.

3.2.1 Análisis del contaminante NO_x en La Línea de la Concepción.

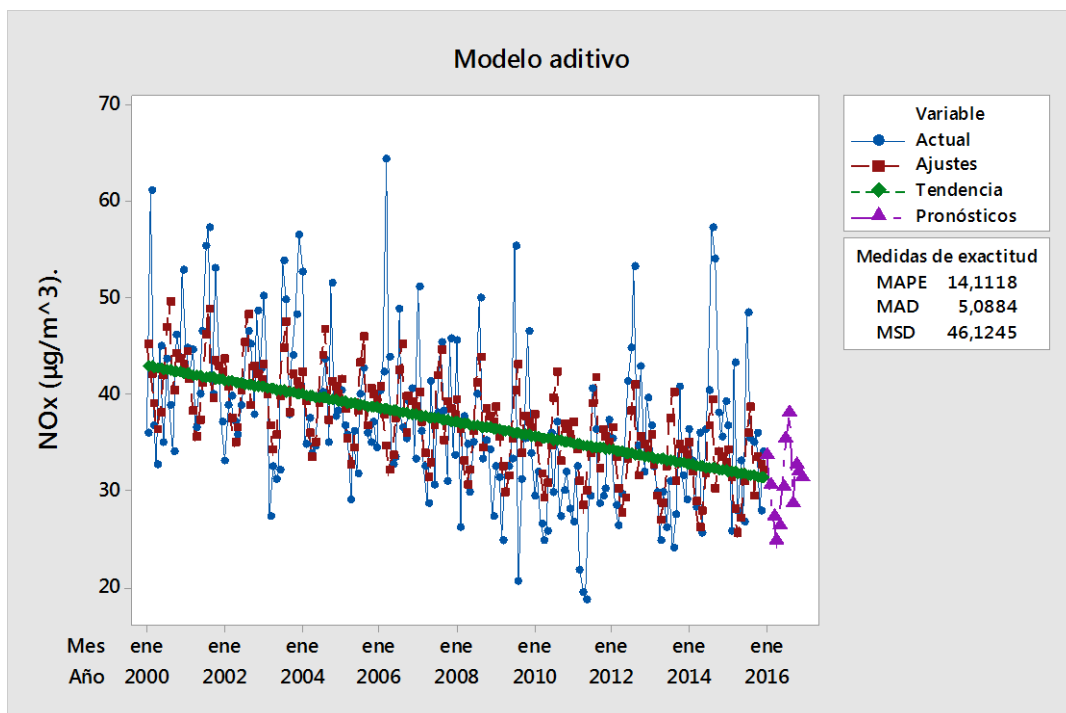
En la localidad de La Línea, el contaminante NO_x no sigue el mismo patrón de evolución que en Algeciras. La serie de datos presenta tendencia decreciente durante todo el periodo hasta el año 2011, año en que se revierte la tendencia. Esto se puede observar en el gráfico de medias móviles. Concretamente, los periodos sufren una reducción del 30% en el primer periodo, pero posteriormente, hasta el final del periodo, se observa un aumento del 15%.

El ajuste estacional de la serie de datos indica que la evolución tiende a estancarse, no continuando la tendencia decreciente inicial. Los pronósticos efectuados a un año confirman esta posibilidad. Lo que observamos en la gráfica 6 es la tendencia decreciente del periodo, pues en el total del periodo la reducción es del 17%. Los meses

con mayor y menor concentración vuelven a ser los de verano e invierno respectivamente.

Atendiendo a la predicción para un año efectuada en la gráfica 6, parece que de mantenerse la tendencia, en pocos años se lograría alcanzar valores para este contaminante por debajo de los establecidos por los umbrales europeos.

Gráfica 6: Descomposición de NOx La Línea (2000-2015).



Fuente: Elaboración propia

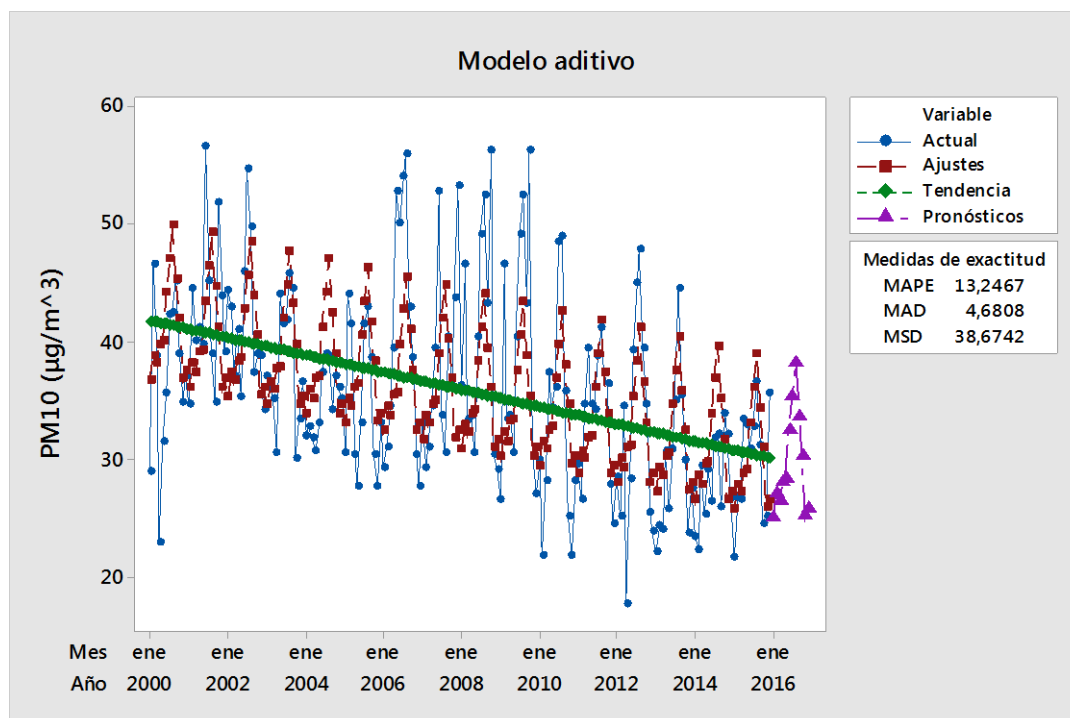
3.2.2 Análisis del contaminante PM₁₀ en La Línea de la Concepción

Respecto de este tipo de partículas, teniendo en cuenta que las características respecto de la evolución estacional a lo largo del periodo es idéntica a la ya comentada para el caso de la ciudad de Algeciras, la diferencia es que ahora la tendencia sí muestra una reducción a lo largo del periodo en el balance, siendo esta reducción total de aproximadamente el 20%.

No obstante, destacar la presencia de valores elevados entre los años 2007 y 2010 (alcanzándose valores en torno a los $50 \mu m/m^3$), que se revirtieron al final de este

subperiodo para continuar con la tendencia decreciente descrita con anterioridad. Pese a todo esto, los valores se encuentran bastante alejados de los límites de la OMS y no se espera un alcance de esos valores guía en los próximos años.

Gráfica 7: Descomposición de PM₁₀ La Línea (2000-2015). Modelo aditivo.



Fuente: Elaboración propia

De hecho, una vez ajustado el periodo y descrita la tendencia, se muestra que se alcanzarían los valores por debajo del límite de la OMS a finales del año 2016.

3.3 Resultados de la contaminación del aire en Los Barrios.

Los datos que presenta la localidad barreña son los que se muestran en la tabla 7, que recoge las medias anuales del periodo y del último año.

Tabla 7: Datos de los principales contaminantes en Los Barrios (2000-2015)

	CO	NO ₂	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}
Media del periodo	464	19,2	10,9	27,6	31	17,5
2015	329	15,6	9,2	23,4	28,8	18

Fuente: Elaboración propia. Los datos están expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

En este caso, en la localidad de Los Barrios, al contrario de lo que ocurría en La Línea y en Algeciras, el contaminante NO_x cumple con la normativa europea. Si se observa el valor correspondiente a 2015, existe un margen considerable respecto del valor fijado de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y el total del periodo se muestra por debajo de dicho valor, por lo tanto se extrae del grupo de contaminantes en niveles peligrosos y no se analizará con más profundidad.

En relación a las partículas, vuelven a situarse también en esta localidad por encima de los niveles indicados. Los valores de 2015 parecen indicar una leve reducción respecto del total del periodo que, no obstante, profundizaremos a continuación.

Las partículas con diámetro inferior a $2,5 \mu\text{m}/\text{m}^3$ presentan el mismo recorrido que en las otras localidades: niveles por encima de los establecidos por la OMS y una tendencia cuadrática inicialmente descendente que aumenta en los últimos años. De hecho se observa en la tabla 4 como el dato del último presenta un valor por encima de la media del periodo.

No obstante, existe una reducción de estas partículas en el total del periodo del 12,5% (desglosado en una reducción hasta llegar a las $16 \mu\text{m}/\text{m}^3$ hasta el 2014, y subiendo posteriormente hasta el valor indicado en la tabla 5).

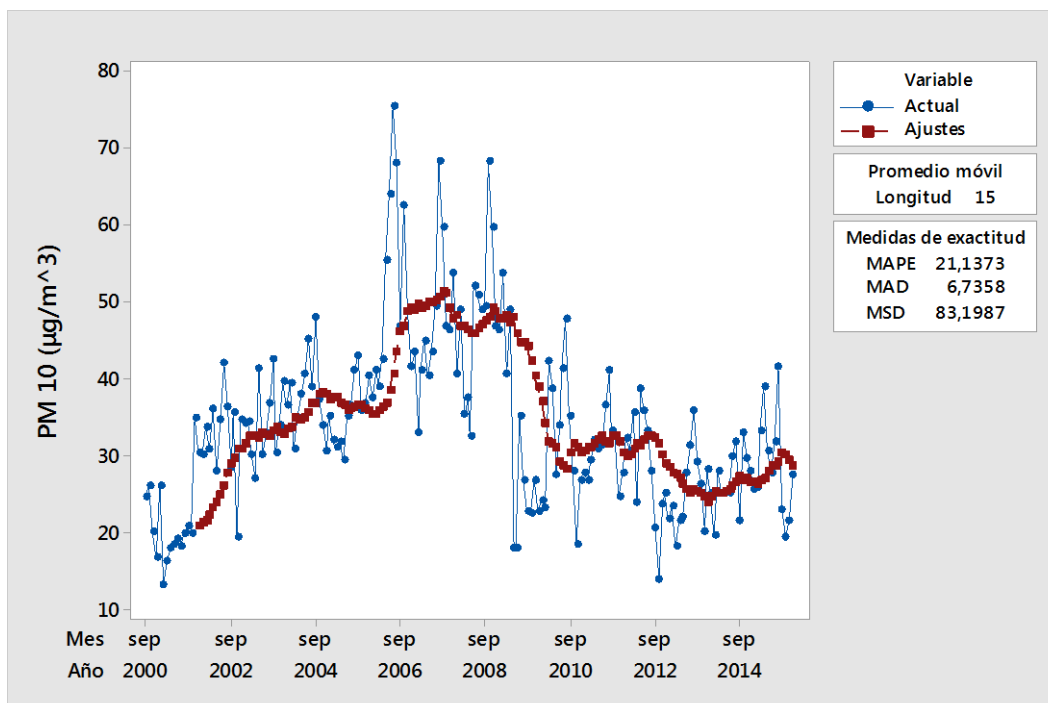
3.3.1 Análisis del contaminante PM_{10} en Los Barrios.

La concentración de este contaminante en la localidad de Los Barrios presenta un valor medio por encima de las guías de la OMS. Los resultados son similares a las otras dos localidades, pero los datos parecen indicar una reducción progresiva. Atendiendo a la evolución de los datos, se destaca la volatilidad de lo mismo. Suavizando de nuevo los datos mediante medias móviles se aprecia mejor el recorrido de la tendencia (gráfica 8).

Mediante una estimación cuadrática se establece una tendencia final decreciente. Aunque la media móvil parece indicar un estancamiento de los datos en los años observados al final del periodo. Siguiendo los criterios de estacionalidad seguidos para las otras localidades, se ha procedido a estimar una tendencia lineal sobre la serie

ajustada estacionalmente, que ofrece una visión sobre el ritmo de reducción de la concentración de PM_{10} .

Gráfica 8: Promedio móvil de PM_{10} Los Barrios (2000-2015)



Fuente: Elaboración propia

De nuevo observando la gráfica podemos visualizar dos periodos muy diferenciados. En primer lugar, el periodo desde 2000 a 2006 se caracteriza por un incremento de más del 90% (llegando a niveles de $45 \mu m/m^3$). En el segundo periodo, que comprende de 2006 a 2015, la concentración de PM_{10} disminuye en hasta un 36%, alcanzando el valor a final del periodo de $28 \mu m/m^3$.

3.4. Resultados de la contaminación del aire en San Roque.

La última localidad estudiada de la Bahía de Algeciras es la de San Roque. Dicha localidad presenta los datos que se muestran en la tabla 8. En relación a esos datos (no se ha analizado el PM_{10} ante la falta de dichos datos), cabe destacar que el único contaminante con niveles de concentración lo suficientemente elevados a lo largo del período sea el $PM_{2.5}$. Al contrario del comportamiento mostrado por las otras localidades, San Roque no supera los niveles legales en referencia al óxido de nitrógeno.

Tabla 8: Datos de los principales contaminantes en La Línea y su relación con los valores guía de la OMS y la UE

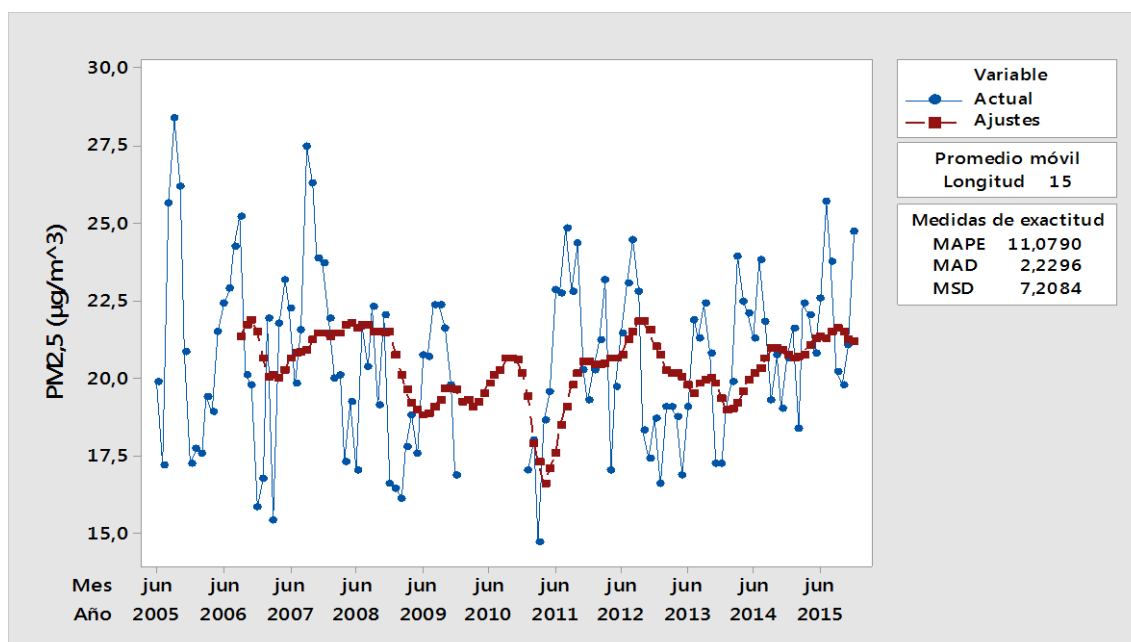
	CO	NO ₂	SO ₂	NO _x	PM _{2,5}
Media del periodo	448	19,1	13,2	25,6	20,6
2015	580	15,2	11,7	22,3	21,9

Fuente: Elaboración propia. Los datos están expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.4.1 Análisis del contaminante PM_{2,5} en San Roque.

Mientras que en el resto de las localidades, la evolución del contaminante PM_{2,5} seguía una tendencia cuadrática de descenso de la concentración en un primer periodo y aumento en el periodo siguiente, pero con una tendencia global decreciente, en el caso de San Roque se observa que se repite esa tendencia cuadrática de inicio decreciente pero que en el total del periodo la tendencia es alcista (habiéndose tenido en cuenta los ajustes estacionales como se viene haciendo en el trabajo).

Gráfica 9: Promedio móvil PM_{2,5} San Roque (2005-2015)



Fuente: Elaboración propia

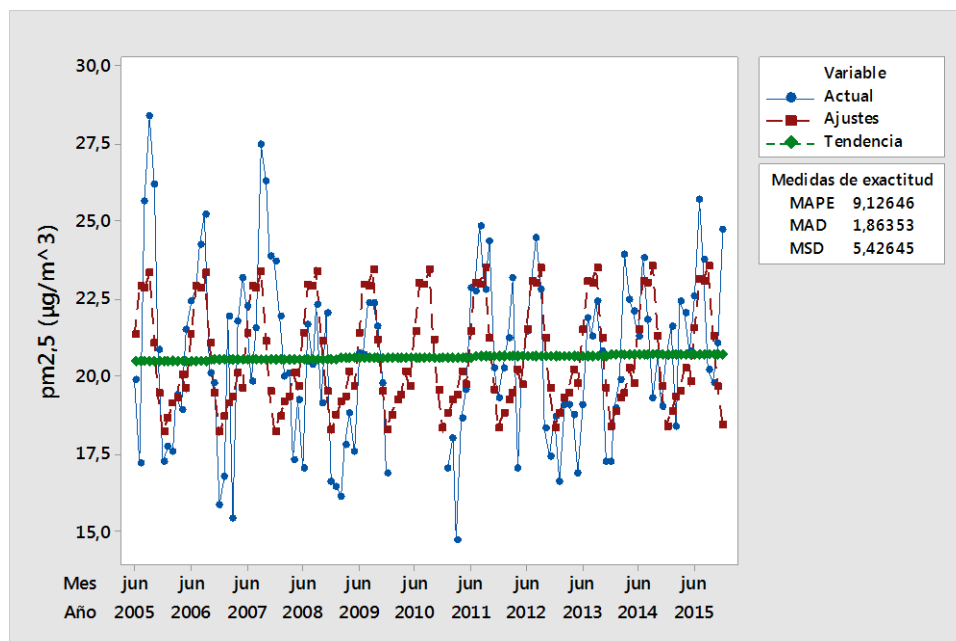
En el gráfico 9 en el que se observan las medias móviles del periodo podemos observar dos grandes periodos diferenciados antes y después del año 2011, con tendencias claramente decrecientes en el primer periodo (se logra alcanzar una reducción del 8% en

este primer periodo) y crecientes a continuación (en torno al 7%), con lo que los niveles al inicio y al final del periodo son similares, pero con una evolución tal y como se ha descrito.

Además, en la gráfica 10 podemos observar como la tendencia lineal ajustada al modelo, tal y como se ha comentado con anterioridad, tiene pendiente positiva, lo que permite prever un aumento de los niveles de concentración de este contaminante en los próximos años, alejándose de los valores guía establecidos por la OMS.

En relación a esto podemos observar como el valor final del periodo en el año 2015 ($21 \mu\text{m}/\text{m}^3$) supera a la media del periodo, lo que permite observar el origen de esa tendencia creciente. No obstante en el balance total del periodo y sin tener en cuenta la evolución ni la tendencia la variación de la concentración de $\text{PM}_{2,5}$ es una reducción del 1% del valor de dicho contaminante.

Gráfica 10: Descomposición de series de tiempo $\text{PM}_{2,5}$ San Roque (2005-2015). Modelo aditivo.



Fuente: Elaboración propia

3.5. Resultados del impacto de la contaminación del aire en la salud.

Los datos asociados al riesgo relativo procedente de la reducción de la contaminación son los que se muestran en las tablas 9 y 10.

En la Tabla 9 se observa que, respecto de la media del período, al llegar a 2015, la reducción del PM₁₀ ha provocado una reducción de los casos de mortalidad por cualquier causa de entre el 0,08% y el 0,51% en la Bahía de Algeciras (salvo en San Roque, donde dichos casos han aumentado en torno al 0,17%). Si se alcanzaran los valores guía de la OMS se produciría una reducción adicional de estos casos de entre el 0,7% y el 0,82%. Para el caso de San Roque la reducción sería del 1,3% aproximadamente.

Respecto de la mortalidad debida a causas respiratorias en menores de cinco años, la variación de los casos de enfermedades respiratorias en este sector de población se reduzca a razón de entre el 0,2% y el 1% (de nuevo en San Roque aumentan los casos). De alcanzar los niveles fijados por la OMS, la reducción adicional que se produciría provocaría una disminución de estos casos de entre el 1,4% y el 2,7%.

Tabla 9: Riesgo relativo del PM₁₀ por mortalidad según su causa.

RR _{PM10}	Mortalidad todas las causas y grupos de edad		Mortalidad por causas respiratorias (menores de 5 años)	
	Respecto de la media del periodo	Límite OMS	Respecto de la media del periodo	Límite OMS
Algeciras	1,0008	1,0082	1,0016	1,0170
La Línea	1,0051	1,0077	1,0107	1,0159
Los Barrios	1,0018	1,0070	1,0038	1,0146
San Roque	0,9983	1,0133	0,9965	1,0278

Fuente: Elaboración propia

Si analizamos los datos referidos al riesgo relativo en relación al PM_{2,5} se puede observar que, en referencia al valor medio del periodo, la reducción conseguida para el año 2015 alcanza, en el caso de las enfermedades cardiovasculares, un total de entre el 0,6% y el 7,5% según la localidad.

Para las enfermedades respiratorias la reducción alcanza valores de entre el 0,9% y el 11%. Las localidades que ven reducido este riesgo en una cuantía mayor son las de Algeciras y La Línea. Por el contrario Los Barrios reduce poco el riesgo relativo. La localidad de San Roque aumenta, en proporciones que oscilan entre el 0,8% y el 1,3%, el riesgo relativo de mortalidad por las causas descritas.

Tabla 10: Riesgo relativo del PM_{2,5} para el riesgo por mortalidad según su causa.

RR _{PM_{2,5}}	Mortalidad por causas cardiovasculares (mayores de 30 años)		Mortalidad por causas pulmonares (mayores de 30 años)	
	Respecto de la media del periodo	Límite OMS	Respecto de la media del periodo	Límite OMS
Algeciras	1,0522	1,0233	1,0791	1,0351
La Línea	1,0825	1,0163	1,1260	1,0245
Los Barrios	1,0061	1,0886	1,0092	1,1354
San Roque	0,9913	1,1207	0,9870	1,1859

Fuente: Elaboración propia

Observando la variación del riesgo relativo de alcanzarse los valores definidos por la OMS, se tiene que el riesgo de mortalidad por enfermedad cardiovascular se reduce entre un 1,6% y un 2,2% adicional para las localidades que ya veían reducidos estos niveles de forma considerable en el periodo estudiado.

Respecto de las enfermedades por causas respiratorias la reducción sería de entre el 2% y el 3% para esas mismas localidades. En el caso de Los Barrios (con niveles de reducción de riesgo muy bajos en el periodo) y de San Roque, la reducción del riesgo en el supuesto de alcanzarse los valores fijados por la OMS sería de aproximadamente entre el 8% y el 10% para las enfermedades cardiovasculares, y del 12% y el 15% para las enfermedades respiratorias.

Asimismo, se ha estimado que la mortalidad registrada según las diferentes causas observadas y dado el tipo de contaminante es la que se muestra en la tabla 11. Primero se calcula la tasa de variación que ha experimentado la mortalidad cuando medimos la contaminación por PM₁₀ y PM_{2,5} en 2015 frente a la de 2005. En este caso se observa una reducción generalizada de las tasas de mortalidad de todas las localidades (salvo en San

Roque), oscilando entre el 0,5% y casi el 4%. En concreto, las localidades que relativamente han reducido más las diferentes tasas de mortalidad dentro del periodo estudiado son Los Barrios y La Línea, mientras que San Roque es la única localidad que ve aumentada las estimaciones de mortalidad según las diferentes causas.

Tabla 11: Estimación del número de fallecimientos según contaminantes y causas.

	Mortalidad PM₁₀ (todas las causas)			Mortalidad PM_{2,5} (causas cardiovasculares)			Mortalidad PM_{2,5} (causas pulmonares)		
	E ₀₅	E ₁₅	E*	E ₀₅	E ₁₅	E*	E ₀₅	E ₁₅	E*
Algeciras	1822	1815	1800	237	230	202	590	577	530
La Línea	1026	1021	1014	134	128	114	332	324	298
Los Barrios	330	328	325	43	41	36	107	104	95
San Roque	418	423	416	55	54	46	136	135	121

Fuente: Elaboración propia

Segundo, se ha calculado la tasa de variación (tabla 12) que experimentaría la mortalidad si partiendo de los niveles de contaminación por PM₁₀ y PM_{2,5} de 2015, se redujese a los límites recomendados por la OMS (2006). En este último caso, la mortalidad se reduciría significativamente, sobre todo en el caso del contaminante PM_{2,5}. La localidad que experimenta mayores reducción en su mortalidad sería San Roque, aunque el rango de los datos en puntos porcentuales es, en el mayor de los casos, de 1.

Tabla 12: Variación de la mortalidad según contaminante y localidad

	Mortalidad PM₁₀ (todas las causas)		Mortalidad PM_{2,5} (causas cardiovasculares)		Mortalidad PM_{2,5} (causas pulmonares)	
	Variación E ₀₅ - E ₁₅	Variación E ₁₅ - E*	Variación E ₀₅ - E ₁₅	Variación E ₁₅ - E*	Variación E ₀₅ - E ₁₅	Variación E ₁₅ - E*
Algeciras	-0,39%	-0,81%	-3,24%	-12,03%	-2,17%	-8,21%
La Línea	-0,47%	-0,76%	-3,94%	-11,61%	-2,65%	-7,92%
Los Barrios	-0,58%	-0,70%	-3,95%	-11,93%	-2,65%	-8,14%
San Roque	0,81%	-1,31%	-0,28%	-15,67%	-0,19%	-10,77%

Fuente: Elaboración propia

3.6. Resultados de la valoración económica del impacto de la contaminación del aire en la salud.

La valoración económica, atendiendo a los criterios COI y VSL son los que se observa en la tabla 13. Los cálculos se han realizado para los contaminantes que superan los valores guía de la OMS (2006), y según las causas de enfermedad producida.

Tabla 13: Valoración económica del impacto de la contaminación. VSL y COI

	$E_{15} - E^*$	VSL	COI
PM₁₀. Todas las causas.	30	68.953.870 €	605.467 €
PM_{2,5} Causas respiratorias	56	127.351.764 €	1.118.244 €
PM_{2,5} Causas cardiovasculares	96	218.481.478 €	3.605.399 €
Total	182	414.787.113 €	5.329.110 €

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, la valoración se realiza sobre el número de fallecimientos resultante de la diferencia entre los ocurridos en 2015 y en el hipotético caso de alcanzar los valores de concentración de la contaminación fijados por la OMS. Dicha diferencia nos muestra que el número de fallecimientos que se evitarían sería un total de 182. Además, en relación a dicho dato destacar que 16 de esos fallecimientos serían prematuros, es decir, menores de 65 años.

Respecto del criterio COI, destacar que se ha estimado el coste directo de atención sanitaria (C_D) en 6.117€ para los ingresos hospitalarios por causas respiratorias y en 23.690€ por causas cardiovasculares. Por otro lado, las muertes prematuras suponen un coste indirecto per cápita (C_{IPC}) de 156.463€ por persona. Atendiendo a los diferentes contaminantes y a los costes explicados, se ha estimado un COI de 5.329.110€ derivados de la acción de la contaminación de la Bahía de Algeciras.

En segundo lugar, en relación al VSL_T , se ha obtenido un valor base de 2.275.848€ por persona. Este valor representa la agregación de los WTP individuales obtenidos en el informe de la OCDE (2015). Además, el valor VSL está actualizado a euros del año 2015. El valor VSL_T , unido a las 182 muertes estimadas a causa de la contaminación ambiental, supone entonces un coste total de 414.787.113€.

4. DISCUSIÓN

Los resultados de los contaminantes analizados muestran que, en la Bahía de Algeciras existe la presencia de contaminantes que presentan concentraciones por encima de los valores especificados por los organismos internacionales y pueden suponer un riesgo para la salud. En concreto, destacan los altos niveles alcanzados por el contaminante PM_{2,5} en todas las localidades, así como los niveles de PM₁₀ en todas las localidades excepto en San Roque, y los altos niveles de NO_x en los casos de Algeciras y La Línea.

En la tabla 14 podemos observar de forma resumida los contaminantes relevantes tras este estudio y la presencia de industria en cada localidad. Además se incluye los valores medios del periodo para dichos contaminantes.

Tabla 14: Actividades industriales en la Bahía de Algeciras y niveles de contaminación elevados.

LOCALIDAD	Contaminantes que superan el umbral OMS (2006)	Valores medios 2000-2015 (µg/m ³)	INDUSTRIA	ACTIVIDAD
Algeciras	NO _x	40,2	Torrespapel	Fabricación de papel
	PM ₁₀	30,7	APM Terminals	Terminal de contenedores del Puerto de Algeciras
	PM _{2,5}	12		
La Línea	NO _x	37		
	PM ₁₀	35,9		
	PM _{2,5}	11		
Los Barrios	PM ₁₀	31	Acerinox	Fabricación de acero inoxidable
	PM _{2,5}	17,5	Central Térmica Los Barrios	Producción energía eléctrica
San Roque	PM _{2,5}	20,6	Grupo CEPESA-Refinería	Complejo petroquímico y unidades de fabricación de lubricantes
			Factoría GLP-Repsol YPF	Envasado, almacenamiento y trasvase de gases licuados del petróleo
			Abelló Linde	Producción, distribución y comercialización de gases
			Air Liquide	Fabricación de gases industriales y medicinales
			Interquisa	Producción de productos químicos y materias primas para la industria del poliéster
			Central de ciclos combinados (NGS, Endesa, Viesgo)	Generación energía eléctrica y de vapor

Fuente: Cruz y Almisas (2009)

Los resultados obtenidos respecto a estos niveles de contaminación son similares a los obtenidos por otros estudios para diferentes ciudades europeas y españolas (Ballester et al. 2008 e IDAEA, 2013).

Ballester et al. (2008) realiza un estudio por contaminantes para 26 ciudades europeas. En este trabajo se observa que los niveles registrados para las localidades de la Bahía de Algeciras son similares a los valores observados para ciudades como Bilbao, Liubliana, Madrid, Marsella o Viena, con valores que oscilan entre los 29-36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM_{10} y de entre los 16,5-22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el $\text{PM}_{2,5}$. Todas son capitales o importantes ciudades en sus respectivos países, con poblaciones que oscilan entre los 300.000 y los 3.000.000 habitantes.

En IDAEA (2013) se analiza el nivel de contaminación en ciudades como Zaragoza y Avilés observándose que ambas presentan niveles similares de contaminación en los mismos contaminantes. La cuestión es que, mientras Zaragoza tiene una población de más de 650.000 personas, Avilés no alcanza los 85.000, aunque en este último caso existe una importante actividad industrial en su término municipal.

De la observación de estos trabajos se puede extraer que las ciudades de la Bahía de Algeciras, cuya localidad más importante no supera los 120.000 habitantes, presentan niveles de contaminación similares a los de grandes capitales (Madrid, Viena) o a los de ciudades con presencia industrial (Avilés o Liubliana). El factor que parece influir en este caso en los altos niveles de contaminación, no es tanto la población existente sino la presencia del polo industrial en la Bahía que influye en la concentración de contaminación, concretamente de partículas en suspensión.

Respecto de las acciones emprendidas por órganos públicos en el ámbito medioambiental, el organismo competente en la materia es la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Son diversos los planes de mejora del medioambiente de la calidad del aire emprendidos durante el periodo analizado, tal y como podemos observar en la tabla 15.

Tabla 15: Principales planes de la Junta de Andalucía específicos para la zona del Campo de Gibraltar-Bahía de Algeciras

Nombre del plan	Año de implantación	Objetivos (específicos para la calidad del aire)
Plan de Calidad Ambiental del Campo de Gibraltar	2000	Reducción de la concentración de los contaminantes que superan la normativa europea (SO ₂ , partículas, etc.) Disminución de la carga contaminante emitida a la atmósfera procedente de las instalaciones industriales
Plan de Acción Medioambiental para el Campo de Gibraltar	2005	Reducir los niveles de dióxido de azufre existentes en el Campo de Gibraltar (valores diario < 125 µg/m ³)
Plan de Mejora de la Calidad del Aire en la Zona Industrial de la Bahía de Algeciras	2014	Mantener los niveles de PM ₁₀ para no superar un umbral de 32 µg/m ³ .

Fuente: Elaboración propia

En relación al primero de estos planes, el Plan de Calidad Ambiental del Campo de Gibraltar, aprobado en el año 2000, pretendía abarcar el problema medioambiental en la zona de la Bahía de Algeciras. En relación a la calidad del aire, destaca el principal objetivo de reducción de los principales contaminantes, haciendo hincapié en las emisiones procedentes de las actividades industriales. Los valores objetivo que el informe determina son aquellos fijados por la normativa europea. Sin embargo, en el periodo de vigencia de este plan (hasta 2005) la evolución de los datos fue precisamente la contraria a las perseguidas por este plan. Todos los contaminantes muestran incrementos en la concentración a lo largo del periodo. Con ello podemos reseñar que este primer plan no logró cumplir con sus objetivos.

En segundo lugar, se aprobó en 2005 el plan de Acción Medioambiental, que centraba sus esfuerzos en la reducción del dióxido de azufre. En la orden de 15 de septiembre del año 2005 se recoge el principal objetivo de este plan: reducir los valores diarios de SO₂

por debajo de los 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Observando los datos proporcionados por la Junta de Andalucía para este trabajo, puede observarse que el dióxido de azufre experimenta una notable disminución a partir del año 2005. De hecho, desde la implantación de este plan no ha vuelto a superarse el valor fijado como límite y, de hecho, en este trabajo no se ha analizado por cumplir con dicho valor. Además, desde el año 2007 los contaminantes principales presentan tendencias decrecientes tal y como se ha expuesto en el apartado de resultados. Se concluye que este plan ha cumplido su objetivo.

Finalmente, y ante los elevados valores de contaminantes como NO_x y las partículas, la Junta de Andalucía ha reconocido la insuficiencia de estos planes, caracterizados por un enfoque amplio y generalista. Por ello, ha elaborado en el año 2014 un Plan de Mejora de la Calidad del Aire, focalizado específicamente en la zona industrial de la Bahía de Algeciras, atendiendo un problema concreto: la contaminación del aire. En este informe se subraya la no consecución de objetivos en el primer plan del que hemos hablado, aunque se destaca la mejora de la calidad del aire derivada de la reducción de los valores de SO_2 . Sin embargo, pese a la implantación de este plan en el año 2014, la concentración de los distintos contaminantes presenta tendencias crecientes. No obstante, es temprano para valorar este Plan de Mejora de la Calidad del Aire, pero los primeros datos iniciales no son alentadores.

De hecho, de lo anteriormente expuesto podemos llegar a concluir que la tendencia a disminuir o aumentar la concentración no depende de la acción de estos planes. Se observa una coincidencia de los periodos con la evolución de la economía en general. El periodo de crisis (iniciada a finales de 2007) coincide con una tendencia claramente a la baja de los niveles de concentración de los distintos contaminantes. Esto puede ser debido a la reducción de la actividad económica. De igual manera, los valores para los años finales del periodo, que como hemos dicho presentan tendencia creciente, coinciden con aumentos en la producción de la zona industrial (AGI, 2014). A esto puede sumarse que la falta de recursos, ya sea de la propia industria o de la administración, hubiese obligado a disminuir los esfuerzos en la reducción de la contaminación ambiental en la zona. Lo que cabe destacar es que, salvo en el caso del dióxido de azufre, todas las mejoras conseguidas parecen haberse diluido en el periodo. Por otro lado, podemos destacar que también se han llevado a cabo numerosas políticas a nivel local en cada uno de los cuatro municipios (ordenanzas municipales, planes

generales y especiales, declaraciones, etc.) tal y como podemos observar en la tabla del anexo. En concreto, pese a lo comentado anteriormente en este trabajo (los niveles crecientes de contaminación en estos últimos años) no se han realizado medidas locales más allá del año 2009.

Los municipios con mayor cuantía de planes locales fueron Algeciras y San Roque. De Algeciras cabe subrayar que las mejoras han sido muy bajas en relación a lo que puede conseguirse si se alcanzasen los niveles de contaminación recomendados por la OMS (2006). Esto es observable en los resultados de riesgo relativo de mortalidad por contaminantes expuestos en las tablas 9 y 10. Además, entre sus planes locales se encuentra el Plan Estratégico Algeciras 2015, que nace en mayo de 2009. Hoy día es imposible acceder a la página web que se creó para explicar el proyecto porque se encuentra fuera de servicio.

Con respecto a San Roque, observando como el riesgo relativo aumenta a final del periodo, se concluye que los planes locales son del todo ineficaces para la lucha contra la contaminación ambiental.

La situación del resto de localidades es similar. Son diversos los planes municipales que tienen como objetivo la lucha contra la contaminación, pero la problemática persiste, al igual que en las otras ciudades. La mejora del riesgo relativo de fallecer a causa de esta contaminación muestra una reducción pequeña en relación a la que puede conseguirse.

No obstante, en relación a las partículas en suspensión, la Bahía de Algeciras cumple con la normativa europea y mantiene sus niveles de concentración por debajo de los valores límites. Sin embargo, esto no es suficiente. El objetivo debe ser alcanzar los niveles de contaminación marcados por la OMS, mucho menos laxos que los establecidos por la UE. De esta manera, el margen de mejora es notable y se alcanzaría una mejora de la calidad del aire significativa en la Bahía de Algeciras.

Respecto de la valoración económica, los resultados obtenidos son modestos en comparación con otros resultados (Pérez et al. 2009). Esto se debe a la población que es objeto de estudio y a las causas sujetas a valoración. El estudio citado se realiza en el área metropolitana de Barcelona y estudia el impacto sobre mortalidad y morbilidad,

por diferentes causas y enfermedades, mientras que en este estudio solo se observa la mortalidad atribuible a la contaminación del aire. En resumen, se concluye que los beneficios asociados a una reducción de la contaminación hasta los niveles fijados por la OMS supondría un total de 5.390.110 € en coste de enfermedad (COI), y más de 400 millones de euros atendiendo al criterio VSL.

5. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La estimación del efecto que la contaminación del aire tiene sobre la salud en la Bahía de Algeciras durante el periodo 2005-2015, así como sobre su valoración económica se ha realizado a partir de unos supuestos que hacen que las conclusiones de este estudio sean limitadas. Estos supuestos han sido asumidos debido a la ausencia de datos disponibles para todas las variables de interés. A continuación se muestran de forma resumida los supuestos asumidos durante la elaboración de este estudio:

Primero, no ha podido estimarse el impacto sobre la salud del contaminante NO_x , que en el análisis se determinaba que superaba los umbrales de la Unión Europea y suponía un factor de riesgo para la salud de la población.

Segundo, ante la imposibilidad de calcular un coeficiente de correlación β de las enfermedades con los distintos contaminantes por la falta de datos, se han asumido como válidos los calculados por la Junta de Andalucía (2014), cuyos cálculos derivaban, a su vez, de las funciones de riesgo relativo de Pope et al. (2002).

Tercero, para la estimación sobre la salud, se ha tenido en cuenta únicamente la mortalidad por diferentes causas de enfermedad y contaminantes. No se ha considerado la morbilidad. Los datos de mortalidad para el año 2005 se han obtenido del estudio de Cruz et al. (2009) y han sido extrapolados al año 2015 dada la falta de datos disponibles para dicho año.

Cuarto, para el cálculo del coste directo (C_D) se ha considerado los datos de mortalidad, considerando que cada persona fallecida lo ha hecho previo ingreso hospitalario. No obstante, se ha considerado que la persona ingresa una única vez y fallece. No se han

tenido en cuenta los costes asociados a una hospitalización de larga duración ni los costes por medicación.

Quinto, en la estimación del coste indirecto (C_I) se hacía necesario el cálculo de la mortalidad prematura (es decir del número de fallecidos menores de 65 años) en la Bahía de Algeciras. Ante la falta de dichos datos, se ha calculado la relación entre el número de fallecimientos prematuros y totales para España en el año 2014 a partir del estudio de Cebr (2014). Se ha asumido que esa relación permanece igual para la Bahía de Algeciras y se mantiene constante en el tiempo. A su vez, para hallar el coste indirecto ha sido necesario calcular el coste indirecto per cápita (C_{Ipc}), que también se ha obtenido para el caso de España, dividiendo la pérdida de productividad total entre el número de fallecimientos prematuros en el año 2014 y se ha aplicado a la Bahía de Algeciras.

Sexto, en el caso del cálculo del valor estadístico de la vida (VSL), se ha considerado el valor base de 3,06 millones de \$ (2010) calculado para España (WHO Regional Office for Europe, 2015). Dicho valor ha sido asumido para el cálculo del VSL en la Bahía de Algeciras, considerándose a su vez, que dicho valor es extrapolable al año 2015, y por tanto, que no ha sufrido una variación sustancial.

6. CONCLUSIONES.

Las conclusiones que se derivan de este estudio son las que se muestran a continuación:

1. Los contaminantes que superan los niveles recomendados por la OMS (2006) en la Bahía de Algeciras fueron el NO_x , PM_{10} y el $\text{PM}_{2,5}$.
2. Las diferentes políticas implantadas por la Junta de Andalucía solo han cumplido su objetivo de reducción de la contaminación para el dióxido de azufre.
3. La evolución de la contaminación muestra que se encuentra ligada a la actividad económica y en particular, a la actividad industrial.
4. A lo largo del periodo 2005-2015 la reducción de la mortalidad es de 36 fallecimientos menos.

5. La disminución de la contaminación de 2015 a los niveles guía de la OMS (2006) supondría una reducción estimada del número de fallecimientos en la Bahía de Algeciras de 182 casos.
6. La reducción de la contaminación en 2015 a los niveles recomendados por la OMS (2006) supondría un ahorro total en coste sanitario y de productividad laboral estimado de 5.309.110€ en la Bahía de Algeciras.
7. La reducción del riesgo a morir derivado de la reducción de la contaminación a los niveles guía de la OMS (2006) en 2015 supondría un beneficio estimado de más de 414 millones de euros en la Bahía de Algeciras.

7. BIBLIOGRAFÍA

Asociación de Grandes Industrias del Campo de Gibraltar. 2014. Memoria Anual. [online] <http://www.agicg.es> [Acceso el 10 de abril de 2016].

Andalucía. DECRETO 231/2013, de 3 de diciembre. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía., 10 de marzo de 2014, núm.46, p. 1288

Amirkhalkhali, S.; U.L. Gouranga, R.; Amirkhalkhali, S. 1985. An study of selection and estimation of statistical growth. *Empirical economics: a journal of the Institute for Advanced Studies*. Vol. 10.1985, 3, p. 201-208

Ballester, F. 2005. Contaminación Atmosférica, Cambio Climático y Salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79: 159-175.

Ballester, F.; Medina, S.; Boldo, E.; Goodman, P.; Neuberger, M.; Iñiguez, C.; Künzli, N. 2008. Reducing ambient levels of fine particulates could substantially improve health: a mortality impact assessment for 26 European cities. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 62: 98-105.

Ballester, F.; Tenías, J.M.; Pérez-Hoyos, S. 1999. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud. Una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73: 109-121.

Cebr. 2014. Coste económico de las enfermedades cardiovasculares desde 2014 a 2020 en seis países europeos. AstraZeneca. Londres.

Jo, C. 2014. Cost-of-illness studies: concepts, scopes, and methods. *Clinical and Molecular Hepatology*, 20(4): 327-337.

Cruz, C.; Almisas, M. 2009. Análisis epidemiológico de la mortalidad por causas en la Bahía de Algeciras (2001-2005). *Gaceta Sanitaria*, 23 (5): 388-395.

Cruz, C.; Béjar, L.M.; López, D.J. 2011. Ingresos hospitalarios en el área de la Bahía de Algeciras. Comparación con Andalucía y España (2001-2005). *Gaceta Sanitaria*, 25 (5): 403-411.

Díaz, J.; García, R.; Ribera, P.; Alberdi, J.C.; Hernández, E.; Pajares, M.S.; Otero, A. 1999. Modeling of air pollution and its relationship with mortality and morbidity in Madrid, Spain. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 72: 366-376.

España. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de enero de 2011, nº. 25, p. 9574-9626.

Galvis, B.; Y. Rojas, N. 2005. Relación entre $PM_{2,5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*. Bogotá. 22: 54-60

Hall, J.V.; Brajer, V.; Lurmann, F.W. 2006. The health and related economic benefits of attaining healthful air in the San Joaquin valley. Institute for Economic and Environmental Studies. California, USA.

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) e Instituto de Salud Carlos III (2013). Niveles, composición y fuentes de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en España: Aragón, Asturias, Castilla La Mancha y Madrid. Barcelona: Subdirección General de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial.

Linares, C.; Díaz, J. 2009. Efecto de las partículas de diámetro inferior a 2,5 micras ($PM_{2,5}$) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid. *Gaceta Sanitaria*, 23 (3): 192-197.

Morales, C. 2007. Caracterización de la calidad de sedimentos afectados por vertidos de petróleo: comparación entre casos de vertidos accidentales (impacto agudo) frente a derrames continuos (impacto crónico). Doctorado. Universidad de Cádiz.

Netcen. 2002. Benefits Table Database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe. [online]

<http://ec.europa.eu/environment/enveco/air/pdf/betaec02aforprinting.pdf> [Acceso el 1 de mayo de 2016].

Observatorio DKV. 2010. Segundo informe del Observatorio DKV Salud y Medio ambiente: Contaminación atmosférica y salud. [online] http://ecodes.org/component/option,com_phocadownload/Itemid,446/id,22/view,category/ [Acceso el 26 de marzo]

Pablo-Romero, M.; Román, R.; González, JM.; Praena-Crespo, M. 2015. Effects of fine particles on children's hospital admissions for respiratory health in Seville (Spain). *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65:4, 436-444.

Pérez, L.; Sunyer, J.; Künzli, N. 2009. Estimating the health and economic benefits associated with reducing air pollution in the Barcelona metropolitan area (Spain). *Gaceta. Sanitaria*, 23 (4): 287-294.

Pope, CA.; Burnett, RT.; Thun, MJ.; Calle, EE.; Krewski, D.; Ito, K.; Thurston, GD. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate pollution. *Jama-Journal of the American Medical Association*. Vol 297, 9:1132-1141.

Ritz, B.; Yu, F.; Chapa, G.; Fruin, S. 2000. Effect of Air Pollution on Preterm Birth Among Children Born in Southern California Between 1989 and 1993. *Epidemiology*, 11: 502-511.

Schwartz, J.; Laden, F.; Zanobetti, A. 2002. The concentration-response relation between PM_{2.5} and daily deaths. *Environmental Health Perspectives*, 110: 1025-1029.

Unión Europea. Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

WHO. 2006. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Geneva: WHO.

WHO. 2011a. Database: outdoor air pollution in cities

WHO. 2011b. Calidad del aire y salud. Nota descriptiva N°313. Septiembre de 2011

WHO.2012. Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012

WHO. 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP

WHO. 2015. Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs).

WHO Regional Office for Europe, OECD. 2015. Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

8. ANEXO

Tabla A1: Indicadores de error obtenidos para los ajustes de tendencia y medias móviles

		MAPE	MAD	MSD
NO_x	Algeciras	16,4274	4,9705	41,4018
	Algeciras (promedio móvil)	18,6065	6,4917	70,1341
	La Línea	14,1118	5,0884	46,1245
PM₁₀	Algeciras	20,4883	6,1494	58,1795
	La Línea	13,2467	4,6808	38,6742
	Los Barrios	21,1373	6,7358	83,1987
PM_{2,5}	Algeciras	15,278	1,6939	5,2794
	San Roque	9,12646	1,86353	5,42645
	San Roque (promedio móvil)	11,079	2,2296	7,2084

Fuente: Elaboración propia

Tabla A2: Planes públicos municipales de acción contra la contaminación en la Bahía de Algeciras

Localidad	Planes de acción medioambiental	Año de implantación
Algeciras	Ordenanza Municipal de Protección Ambiental. Ayuntamiento de Algeciras	1999
	Plan General Municipal de Ordenación Urbana	2001
	Plan Especial de Movilidad Urbana	2007
	Programa de Sostenibilidad Urbana	2007
	Plan Estratégico de Algeciras 2015	2009
	La Línea de la Concepción	Plan General de Ordenación Urbana
La Línea de la Concepción	Diagnóstico Ambiental de la Agenda 21. Diputación de Cádiz y Ayuntamiento de La Línea	ND
	Ordenanza Municipal de Circulación.	2003
	Programa de Sostenibilidad Urbana Ciudad 21	2009
Los Barrios	Plan General de Ordenación Urbana	2008
	Programa de Sostenibilidad Urbana Ciudad 21.	2009
San Roque	Ordenanza Municipal Reguladora de la Gestión del Medio Ambiente del Municipio de San Roque	2000
	Política Medioambiental	2005
	Plan General de Ordenación Urbana	2005
	Declaración Medioambiental.	2008
	Reglamento del Consejo Local de Sostenibilidad de la Agenda Local 21	2008

Fuente: Elaboración propia a partir de Junta de Andalucía (2014)

Tabla A3: Principales estadísticos descriptivos obtenidos para los contaminantes más significativos

NO_x									
	Conteo total	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Mediana
Algeciras	5844	4857	987	40,211	0,315	21,942	0	221,503	36,781
La Línea	5844	5844	0	37,329	0,294	22,475	0,715	172,246	33,179
Los Barrios	5844	4976	868	27,547	0,231	16,327	1,542	125,027	24,8
San Roque	5844	3835	2009	25,529	0,218	13,472	6,795	140,904	22,072
PM₁₀									
	Conteo total	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Mediana
Algeciras	5844	4497	1347	30,834	0,199	13,337	5,109	205,219	29,208
La Línea	5844	5395	449	36,102	0,211	15,465	6,236	321,436	34,222
Los Barrios	5844	4817	1027	33,195	0,218	15,122	2,01	287,743	31,243
PM_{2,5}									
	Conteo total	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Mediana
Algeciras	2416	2239	177	11,795	0,118	5,571	3,083	36,778	11,063
La Línea	2416	2252	163	10,289	0,117	5,549	2,028	37,458	9,222
Los Barrios	1686	1686	0	17,29	0,166	6,809	3,326	43,948	16,576
San Roque	1686	1686	0	20,999	0,133	5,454	10,201	49,16	20,085

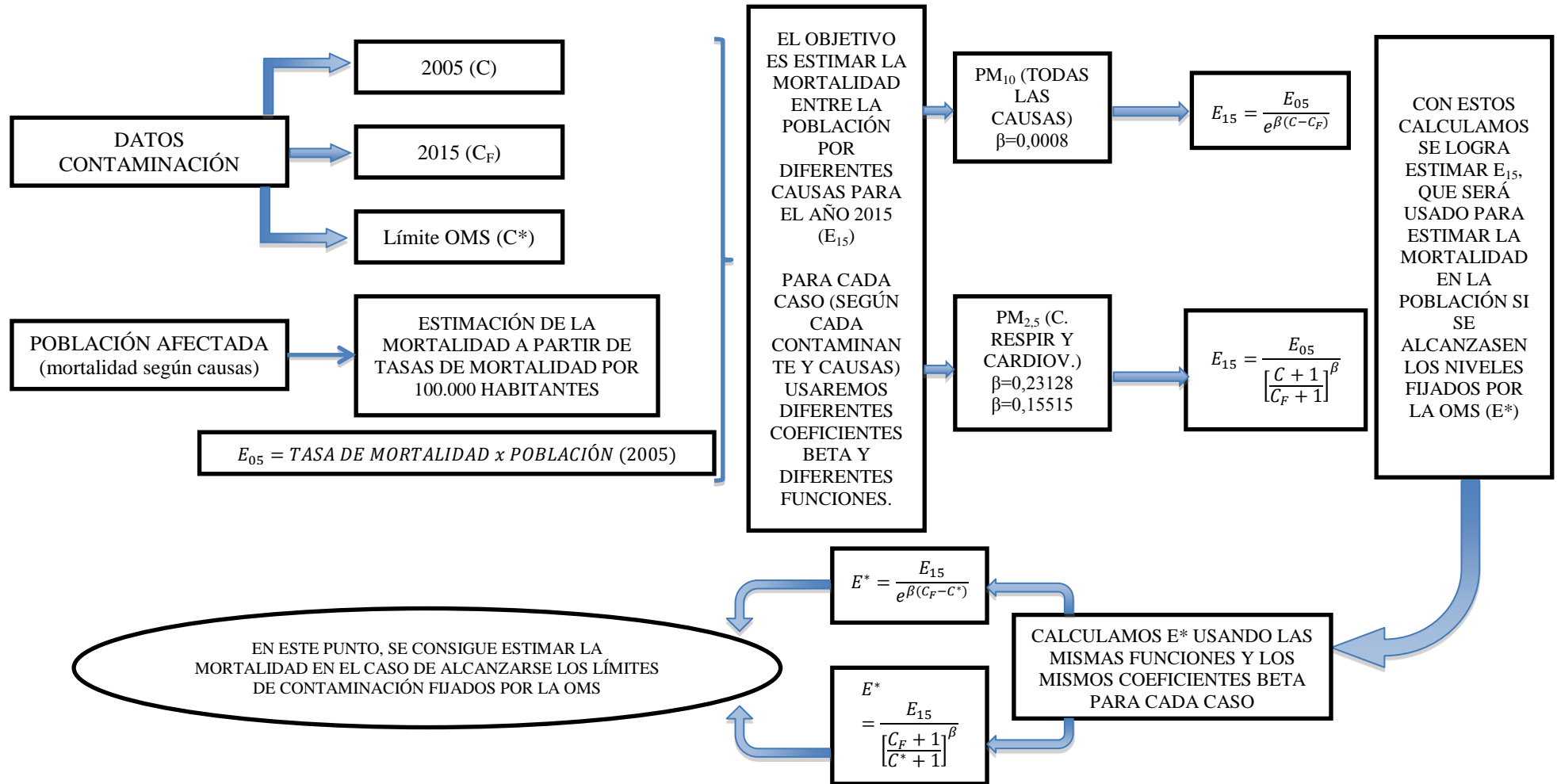
Fuente: Elaboración propia

Tabla A4: Principales estadísticos descriptivos obtenidos para los contaminantes menos significativos.

CO									
	Conteo total	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Mediana
Algeciras	5844	4524	1320	446,61	2,14	143,74	134,79	2059,27	423,49
Los Barrios	5844	4647	1197	464,17	3,3	224,81	37,97	1640,21	398,15
San Roque	5844	5821	23	519,53	2,84	216,86	19,92	2179,17	474,15
NO₂									
	Conteo total	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Mediana
Algeciras	5844	4791	1053	27,687	0,168	11,618	0,243	80,583	27,271
La Línea	5844	5510	334	27,002	0,187	13,886	0,556	94,607	25,677
Los Barrios	5844	5771	73	19,051	0,119	9,04	0,215	74,75	18,072
San Roque	5844	5765	79	18,878	0,106	8,044	2,935	68,061	17,288
SO₂									
	Conteo total	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Mediana
Algeciras	5844	4775	1069	11,219	0,0757	5,228	0	39,91	10,229
La Línea	5844	5780	64	13,06	0,0881	6,697	0,111	71,37	11,748
Los Barrios	5844	5792	52	10,757	0,102	7,776	0,229	173,833	9,188
San Roque	5844	5842	2	12,437	0,092	7,031	1,403	76,794	10,84

Fuente: Elaboración propia

Figura A1: Diagrama de los cálculos efectuados para estimar las variaciones de mortalidad según causas y contaminantes.



Fuente: Elaboración propia

Tabla A5: Estimación de fallecimientos para el año 2015 y en el caso de alcanzar niveles de contaminación fijados por la OMS (E*) y según el tipo de contaminante y causas de enfermedad.

Contaminante PM₁₀. Todas las causas

	B	PM ₁₀ (2005)	PM ₁₀ (2015)	Límite OMS	Tasa Población afectada	Coef. Población	E ₀₅	$e^{\beta(C_{05}-C_{15})}$	Estimación E ₁₅	$e^{\beta(C_{15}-C^*)}$	Estimación E*
Algeciras	0,0008	35,0204	30,1742	20	1637,28	1,11283	1822,0	1,00388453	1815,0	1,00817255	1800,3
La Línea	0,0008	35,4329	29,5308	20	1637,28	0,62682	1026,3	1,00473289	1021,4	1,00765376	1013,7
Los Barrios	0,0008	36,0098	28,7496	20	1637,28	0,20119	329,4	1,00582504	327,5	1,00702427	325,2
San Roque	0,0008	26,5106	36,5397	20	1637,28	0,25548	418,3	0,99200886	421,7	1,01331967	416,1

Contaminante PM_{2,5}. Mortalidad debido a causas respiratorias

	B	PM _{2,5} (2005)	PM _{2,5} (2015)	Límite OMS	Tasa Población afectada	Coef. Pob.	E ₀₅	$e^{\beta(C_{05}-C_{15})}$	Estimación E ₁₅	$e^{\beta(C_{15}-C^*)}$	Estimación E*
Algeciras	0,23218	21,0123	18,1045	10	213,23	1,11283	237,3	1,03344121	229,6	1,13674626	202,0
La Línea	0,23218	21,2598	17,7185	10	213,23	0,62682	133,7	1,04105001	128,4	1,13137122	113,5
Los Barrios	0,23218	21,6059	18,007726	10	213,23	0,20119	42,9	1,04107292	41,2	1,1354067	36,3
San Roque	0,23218	22,2064	21,9238	10	213,23	0,25548	54,5	1,00284873	54,3	1,18588021	45,8

Contaminante PM_{2,5}. Mortalidad debido a causas cardiovasculares.

	B	PM _{2,5} (2005)	PM _{2,5} (2015)	Límite OMS	Tasa Población afectada	Coef. Pob.	E ₀₅	$e^{\beta(C_{05}-C_{15})}$	Estimación E ₁₅	$e^{\beta(C_{15}-C^*)}$	Estimación E*
Algeciras	0,15515	21,0123	18,1045	10	530,22	1,11283	590,0	1,02222431	577,2	1,08942197	529,8
La Línea	0,15515	21,2598	17,7185	10	530,22	0,62682	332,4	1,02724745	323,5	1,08597702	297,9
Los Barrios	0,15515	21,6059	18,007726	10	530,22	0,20119	106,7	1,02726255	103,8	1,08856393	95,4
San Roque	0,15515	22,2064	21,9238	10	530,22	0,25548	135,5	1,00190272	135,2	1,12066656	120,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla A6: Estimación del número de fallecimientos evitables al alcanzar los niveles de contaminación fijados por la OMS

	PM₁₀			PM_{2,5} Causas respiratorias			PM_{2,5} causas cardiovasculares		
	E ₁₅	E*	E ₁₅ -E*	E ₁₅	E*	E ₁₅ -E*	E ₁₅	E*	E ₁₅ -E*
Algeciras	1.815	1.800	15	230	202	28	577	530	47
La Línea	1.021	1.014	8	128	113	15	324	298	26
Los Barrios	327	325	2	41	36	5	104	95	8
San Roque	422	416	6	54	46	9	135	121	15
Total	3.586	3.555	30	454	398	56	1.140	1.044	96

Fuente: Elaboración propia

Tabla A7: Estimación del coste de enfermedad debido al PM_{2,5}. Causas cardiovasculares.

	C_d	C_{I_{PC}}	E₁₅-E*	M_P^{BA}	C_D	C_I	COI
Algeciras			47	4	1.122.396 €	656.984 €	1.779.380 €
La Línea			26	2	606.799 €	355.184 €	961.983 €
Los Barrios	23.690 €	156.463 €	8	1	200.144 €	117.153 €	317.297 €
San Roque			15	1	344.871 €	201.867 €	546.739 €
Total			96	9	2.274.210 €	1.331.188 €	3.605.399 €

Fuente: Elaboración propia

Tabla A8: Estimación del coste de enfermedad debido al PM₁₀. Todas las causas.

	C_d	C_{IPC}	E_{15-E^*}	M_P^{BA}	C_D	C_I	COI
Algeciras			15	1	89.999 €	204.013 €	294.012 €
La Línea			8	1	47.460 €	107.584 €	155.043 €
Los Barrios	6.117 €	156.463 €	2	0	13.974 €	31.676 €	45.650 €
San Roque			6	0	33.905 €	76.856 €	110.761 €
Total			30	3	185.337 €	420.130 €	605.467 €

Fuente: Elaboración propia

Tabla A9: Estimación del coste de enfermedad debido al PM_{2,5}. Causas respiratorias.

	C_d	C_{IPC}	E_{15-E^*}	M_P^{BA}	C_D	C_I	COI
Algeciras			28	2	168.962 €	383.011 €	551.974 €
La Línea			15	1	91.193 €	206.720 €	297.913 €
Los Barrios	6.117 €	156.463 €	5	0	30.061 €	68.144 €	98.206 €
San Roque			9	1	52.085 €	118.067 €	170.152 €
Total			56	5	342.301 €	775.943 €	1.118.244 €

Fuente: Elaboración propia