

Economic valuation related to public health due to the contamination of particulate matter less than 10 microns in Arequipa, Peru

Joel Velasquez A., Estudiante de Ing. Ambiental¹ , Verónica Valdivia C., Estudiante de Ing. Ambiental¹ , Nicole Caldas B., Estudiante de Ing. Ambiental¹ 
Faculty Mentor: Martiza Chirinos M, Ms en Ciencias¹
Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú¹

Abstract- This paper addresses the economic valuation of environmental costs related to health problems arising from PM₁₀ particulate matter less than 10 microns air pollution in Arequipa in 2017. The study was conducted in the 13 most populated districts of the metropolitan area of Arequipa, totaling 956,226 inhabitants according to the 2017 Census. To assess the level of exposure of the population to PM₁₀, ArcGIS 10.5 software was used, which with the IDW (Inverse Distance Weighting) tool calculates the dispersion of air pollutants in the study area using data from stations placed by the Executive Directorate of Environmental Health (DESA) of the Regional Health Management of Arequipa, this to estimate the average concentration in each of the 13 districts of the study area. Subsequently, with the help of concentration response functions (CRF), the cases of mortality and morbidity attributable to pollution are calculated; for the study, cardiovascular diseases and respiratory diseases were taken into account, in addition to three possible air quality scenarios:

Scenario 1 reduction of PM₁₀ to 0 µg/m³, scenario 2 reduction to 15 µg/m³ (WHO Standard) and scenario 3 reduction to 50 µg/m³ (ECA Peru). Finally, the value of a life year (VOLY) and the willingness to pay (WTP) are used to calculate the costs of mortality and morbidity reduction respectively. Obtaining an environmental economic value for scenario 1 of 414,06 million USD, for scenario 2 a value of 342,30 million USD and for scenario 3 a total of 174,88 million USD, proving that the more PM₁₀ pollution is reduced, the greater the economic benefits will be.

Keywords- Economic valuation, air quality, environmental health, cardiovascular diseases, respiratory diseases.

Valorización económica relacionado a la salud pública por contaminación de material particulado menor a 10 micras en Arequipa, Perú

Joel Velasquez A., Estudiante de Ing. Ambiental¹ , Verónica Valdivia C., Estudiante de Ing. Ambiental¹ , Nicole Caldas B.,
Estudiante de Ing. Ambiental¹ 
Faculty Mentor: Martiza Chirinos M, Ms en Ciencias¹
Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú¹

Resumen– En el presente trabajo se aborda la valoración económica de los costos ambientales relacionados con los problemas de salud derivados de la contaminación del aire por PM₁₀ (material particulado menor a 10 micras) en Arequipa en el 2017. El estudio se realizó en los 13 distritos más poblados de la zona metropolitana de Arequipa, que suman 956,226 habitantes según el Censo de 2017. Para calcular el nivel de exposición de la población al PM₁₀, se utilizó el software ArcGIS 10.5 que con la herramienta IDW (Ponderación de distancia inversa) calcula la dispersión de los contaminantes atmosféricos en el área de estudio utilizando datos de estaciones colocadas por la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental (DESA) de la Gerencia Regional de Salud de Arequipa, esto para estimar la concentración media en cada uno de los 13 distritos del área de estudio. Posteriormente, con la ayuda de funciones de concentración respuesta (FCR) se calculan los casos de mortalidad y morbilidad atribuibles a la contaminación; para el estudio se tomaron en cuenta enfermedades cardiovasculares y enfermedades respiratorias, además de tres escenarios posibles de calidad de aire: Escenario 1 reducción del PM₁₀ a 0 µg/m³, escenario 2 reducción a 15 µg/m³ (Estándar OMS) y escenario 3 reducción a 50 µg/m³ (ECA Perú). Por último, se emplea el valor de un año de vida (VOLY) y la disposición a pagar (DAP), para calcular los costos de la reducción de la mortalidad y morbilidad respectivamente. Obteniendo un valor económico ambiental para el escenario 1 de 414,06 millones de USD, para el escenario 2 un valor de 342,30 millones de USD y para el escenario 3 un total de 174,88 millones de USD, comprobando que cuanto más se reduzca la contaminación de PM₁₀ mayores serán los beneficios económicos.

Palabras clave: Valoración económica, calidad de aire, salud ambiental, enfermedades cardiovasculares, enfermedades respiratorias.

I. INTRODUCTION

A. Problemática

En las últimas décadas, la ciudad de Arequipa ha experimentado un vertiginoso crecimiento económico y demográfico, generando un gran aumento de la industria y el parque automotor, estos factores a su vez producen niveles alarmantes de contaminación del aire con impactos directos en la salud pública y el medio ambiente [1].

La exposición prolongada a contaminantes atmosféricos, como el PM₁₀ (material particulado menor a 10 micras), los

óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono troposférico (O₃), el monóxido de carbono (CO), entre otros han sido relacionados con la problemática de la salud humana. Que incluyen enfermedades cardiovasculares, respiratorias y síntomas neurológicos [2], [3], [4]. Adicionalmente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que la contaminación del aire es un factor ambiental que causa millones de muertes al año [5].

Asimismo, los contaminantes atmosféricos más incidentes en Arequipa son el PM₁₀, SO₂, CO, O₃ y NO₂ [6], evidenciando un problema de salud pública en la ciudad, que demanda medidas inmediatas y efectivas.

En ese aspecto, el presente estudio se propone valorar el costo económico ambiental relacionado a los problemas de salud generados por la contaminación del aire por PM₁₀ en Arequipa.

B. Estado del arte

Se realizó una revisión de investigaciones previas relacionadas para tener una buena base metodológica.

En el ámbito nacional, consideramos una investigación de Miranda [7] realizada en Lima metropolitana el año 2005. En este estudio, se analiza la relación existente entre la salud y la calidad de aire, utilizando la metodología de “Integrated Assessment” donde se estima las concentraciones y dispersiones de los contaminantes con el fin de analizar el impacto en la salud utilizando las funciones concentración respuesta (FCRs). Al alcanzar los estándares nacionales de calidad del aire, se podrían prevenir anualmente alrededor de 2 112 casos de mortalidad relacionados con el PM₁₀. Como resultado se obtuvo que 329 millones de dólares sería un monto estimado del efecto económico de la contaminación del aire para el año 2005, este monto incluye la morbilidad y mortalidad.

Asimismo, también se tomó en cuenta un estudio realizado por Tapia et al. [8] en 2018 enfocado en el Reordenamiento Vehicular en Lima Metropolitana. En este análisis se analizó la variación de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂), luego del nuevo orden del parque automotor en la avenida Abancay desde 2013 al 2015 respecto de los años

2007 al 2009, contrastándolo con dos vías adicionales que no experimentaron reordenamientos, se empleó un análisis de regresión lineal para evaluar la variación en las concentraciones antes y después. Los resultados revelaron una disminución significativa en la Avenida Abancay, con reducciones del 62% en los niveles de $PM_{2.5}$, del 65% en los niveles de PM_{10} , 82% en los niveles de SO_2 y 6% en los niveles de NO_2 .

En el ámbito internacional, consideramos los siguientes estudios. Primero, la investigación realizada por Alpizar, Piaggio y Pacay [9] consultores de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), fue realizada en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica y se centró en los aspectos positivos para la salud derivados de la disminución de la polución atmosférica causada por partículas de tamaño inferior a 10 micrómetros (PM_{10}). Se investigan sus orígenes, la exposición de la población a distintos grados de emisiones, el efecto en la salud y las ventajas para la salud relacionadas con la mejora de la pureza del aire. La metodología utiliza el software ArcGIS para calcular los promedios de concentración de PM_{10} por distrito, además de FCRs para calcular los casos de mortalidad, morbilidad y hospitalizaciones atribuibles a la contaminación. Finalmente, se calculan los beneficios económicos para cuatro escenarios diferentes, tomándose como el más adecuado reducir la concentración de PM_{10} a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo que se obtiene una valoración de 133,45 millones de USD.

Por otro lado, se consideró una segunda investigación llevada a cabo por Pinzón et al. [10] en Colombia, se orientó hacia la evaluación de los gastos medioambientales vinculados a la contaminación del aire generada por fuentes móviles en la ciudad de Pereira. Inicialmente, se llevó a cabo una indagación documental, recopilando datos de series temporales mensuales y anuales correspondientes al lapso comprendido entre 1996 y 2010, para posteriormente establecer relaciones lineales entre el material particulado, el parque automotor y las infecciones respiratorias agudas (IRAs). Además, presentó un modelo de simulación desarrollado en el software Stella que le permitió obtener los costos ambientales derivados de la contaminación, concluyendo que los costos de atención a la población mayor de 5 años hospitalizada por infecciones respiratorias agudas y los costos derivados de la asistencia hospitalaria atribuible al PM_{10} fueron de 332 millones de pesos colombianos al año lo que es igual a 84 741 USD.

Por último, se tomó en cuenta un estudio realizado por Wong [11] en 2008, se centra en el impacto de la contaminación del aire en la salud pública. El proyecto se propuso para evaluar los efectos a corto plazo de la exposición a la contaminación del aire en la mortalidad diaria en cuatro ciudades de Asia (Hong Kong, Wuhan, Shanghai y Bangkok), utilizando modelos de regresión de Poisson con funciones de suavizado de spline natural para ajustar las variables. Se encontraron asociaciones entre la mayoría de los contaminantes (NO_2 , SO_2 , PM_{10} y O_3) y la mortalidad por causas naturales, cardiovasculares y respiratorias en las

ciudades individuales estudiadas. Los efectos combinados de los cuatro contaminantes tendieron a ser iguales o mayores que los identificados en estudios realizados en naciones occidentales. Se determinó que el incremento de cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} se relaciona con el aumento en un 0.55% de mortalidad por causas naturales. Además, las ciudades con mayor presencia de PM_{10} son las que presentan un mayor índice de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Para finalizar, indica que los efectos de contaminantes particulados son similares en otras partes del mundo a pesar de las distintas concentraciones.

C. Justificación

Los estudios que tienen como objeto valorar económicamente la calidad del aire en Arequipa, Perú son reducidos, por lo que es importante desarrollar más investigaciones que relacionen variables como contaminación, salud ciudadana y costos, esto para tener una vista más general del problema y poder mitigar sus consecuencias.

D. Objetivos

D1. Objetivo general

Valorar económicamente el impacto a la salud producido por la contaminación por PM_{10} en Arequipa

D2. Objetivos específicos

Determinar el número de casos de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias atribuibles a la contaminación por PM_{10} en Arequipa.

Determinar el número de casos de morbilidad por enfermedades respiratorias atribuibles a la contaminación por PM_{10} en Arequipa.

E. Marco teórico

E1. Valoración económica ambiental

Se emplea para otorgar un valor económico a los bienes y servicios proporcionados por los ecosistemas, sin importar si poseen un precio o mercado establecido [12]. El método del Costo de Oportunidad es muy usado para la valoración de la calidad de aire y se basa en la premisa de que los recursos naturales tienen un valor inherente que puede ser evaluado al considerar las oportunidades perdidas al usar o conservar dichos recursos. La aplicación de este método implica identificar los beneficios económicos y ambientales que se pierden o ganan al elegir una acción particular [13].

E2. Contaminantes del aire

Según la OMS, se han identificado los siguientes contaminantes como causantes de impactos negativos en la salud de las personas: PM_{10} , dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_x), óxido de nitrógeno (NO), componentes orgánicos volátiles (COVs) e hidrocarburos. En los componentes químicos del PM_{10} principalmente se encuentra el nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbón orgánico (OC), amonio (NH_4^+), carbón elemental y partículas de suelo, que contienen elementos como

silicio (Si), aluminio (Al), titanio (Ti), calcio (Ca) y hierro (Fe) [14]. Por lo que el impacto del material particulado en la salud de las personas está condicionado tanto por su cantidad como por su estructura química [15].

E3. Salud humana y calidad de aire

Los impactos en la salud originados por el deterioro de la pureza del aire son diversos y pueden influir en diversas funciones del organismo humano [16], provocando daños en el sistema respiratorio, inmunológico, sensorial, nervioso, cardiovascular, cutáneo, entre otros. Sin embargo, la intensidad de dichos efectos está directamente relacionada con el período de tiempo durante el cual los individuos están expuestos. Es fundamental destacar que si bien muchos de estos efectos están relacionados con la contaminación atmosférica exterior, también se ven significativamente influenciados por la pureza del aire en el interior de los hogares (sobre todo en países donde se sigue cocinando con leña) y por el hábito de fumar. [17].

E4. Fuentes de contaminación

La cantidad de contaminantes en el aire está determinada por las fuentes emisoras y las condiciones meteorológicas. Estas fuentes no siempre se encuentran en la misma ubicación donde se produce el deterioro de la pureza del aire, sino que pueden estar dispersas y desplazarse a través del espacio. [16], [17], [18].

Las emisiones generadas por las actividades humanas pueden clasificarse en tres categorías principales, donde encontramos las fuentes puntuales, como las emisiones de chimeneas industriales; fuentes móviles, como vehículos; y fuentes de área, como la quema al aire libre de desechos agrícolas, los incendios forestales, entre otros [16].

En el caso de Arequipa, la contaminación proviene principalmente de las industrias cementeras y ladrilleras, así como del parque automotor, que son fuentes fijas y móviles respectivamente. Según el Informe Nacional de la Calidad del Aire en 2014, las fuentes fijas en Arequipa generan contaminación que está compuesta en un 50% a 60% por partículas totales suspendidas (PTS), las cuales incluyen material particulado PM_{10} . Por otro lado, las fuentes móviles generan contaminación que está compuesta en un 50% a 60% por monóxido de carbono (CO). Además de estas emisiones, tanto las fuentes fijas como las móviles producen otros contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de azufre (SO_x) [19].

En el presente trabajo, se utilizó el PM_{10} como indicador de la contaminación del aire porque es el contaminante atmosférico más importante en la ciudad de Arequipa. Además, muchos de los estudios que mencionan los efectos de la contaminación del aire en la salud utilizan el PM_{10} [20]. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el uso de un único indicador suele subestimar los efectos totales de la contaminación [20].

II. METODOLOGÍA

A. Área de estudio

La investigación se realizará en los 13 distritos más poblados de la zona metropolitana de Arequipa, Perú los cuales son: Alto Selva Alegre, Arequipa, Cayma, Cerro Colorado, Jacobo Hunter, José Luis Bustamante y Rivero, Mariano Melgar, Miraflores, Paucarpata, Sachaca, Socabaya, Tiabaya y Yanahuara, los cuales suman 956 226 habitantes según el Censo realizado en Perú el 2017.

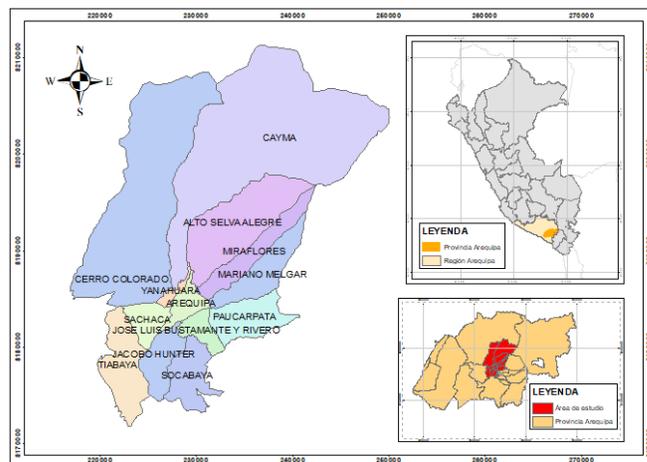


Fig. 1 Área de estudio

B. Metodología

El proceso para evaluar los beneficios económicos y el impacto en la salud respecto a la reducción de la contaminación del aire se pueden dividir en cuatro pasos [21] que se presentan en la Fig. 2: i) identificar las fuentes de contaminantes y delimitar el o los indicadores de calidad del aire (en este caso el PM_{10}), ii) calcular la concentración de PM_{10} promedio en cada distrito e identificar a la población expuesta a la contaminación, iii) a partir de esta información, y con las funciones Concentración respuesta (FCRs), se evalúa el impacto en diversas dimensiones de la salud vinculadas a las variaciones en la concentración de PM_{10} , y iv) realizar el cálculo de los beneficios económicos para la salud como consecuencia del aumento de la calidad del aire. Siendo que el paso i) se desarrolló en el marco teórico, se procede a desarrollar los siguientes puntos.

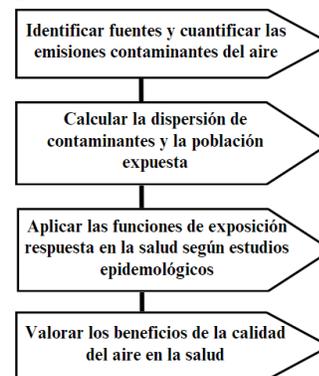


Fig. 2 Metodología aplicada

B1. Cálculo de dispersión de los contaminantes y la población expuesta

Se determinó el grado de exposición de la población mediante el análisis de la dispersión de la contaminación atmosférica en la región de estudio. Este análisis se basó en los datos de PM₁₀ obtenidos durante las evaluaciones de la calidad del aire llevadas a cabo por la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental (DESA) de la Gerencia Regional de Salud de Arequipa (GRSA) en el año 2017. Estas mediciones se efectuaron en 5 puntos de control, en lugares representativos de la ciudad.

Se utilizó el promedio anual de PM₁₀ de cada estación para calcular la concentración media en cada uno de los 13 distritos de la región de estudio. Se empleó la herramienta de interpolación IDW (Ponderación de Distancia Inversa), de la extensión Spatial Analyst del software ArcGIS 10.5. Esta herramienta ayudó a interpolar los valores de las celdas al calcular promedios ponderados en función de su cercanía a un punto de muestreo. En el caso de este estudio el PM₁₀ será el que disminuirá a medida que se incremente la distancia desde su punto de muestreo [22].

Tras la caracterización de la dispersión de partículas PM₁₀, se puede determinar el grado de exposición de la población. Un análisis exhaustivo involucraría la superposición de mapas que representen la dispersión espacial de la contaminación atmosférica con mapas demográficos, lo que permite obtener información más precisa sobre las áreas y grupos de personas más afectados. [20]. Sin embargo, en este artículo se empleó el método del promedio anual de la concentración para cada distrito y se consideró a toda la población como expuesta .

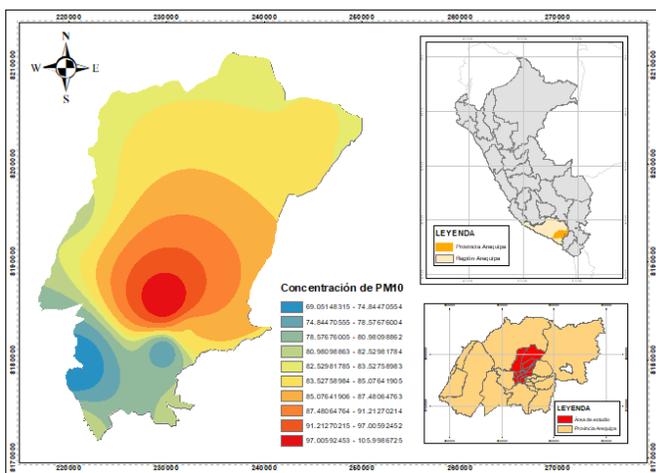


Fig. 3 Distribución de concentraciones de PM₁₀ en el Área de estudio

B2. Cálculo del impacto en la salud FCRs

B2.1. Efectos en la salud humana

En este estudio se abordan las áreas de salud que, según la literatura, se verán impactadas por la contaminación del aire y para las cuales existe una cantidad de información

disponible y veraz para aplicar las funciones concentración-respuesta (FCR). Comúnmente se estiman los efectos de la carga de contaminación atmosférica en tres áreas de salud: mortalidad, morbilidad y hospitalizaciones, en este análisis se limitará a las dos primeras debido a su mayor relevancia. Los datos sobre mortalidad se recopilaron del Boletín de defunciones del año 2017, mientras que los datos sobre morbilidad provienen del Análisis de la Situación de Salud (ASIS) y de los Boletines epidemiológicos semanales del mismo año, todos elaborados por la GRSA [23], [24], [25].

En lo que respecta a la mortalidad, se tomaron en cuenta los efectos de corto plazo y los acumulativos o a largo plazo [26]. Analizando la cantidad de muertes por distrito por causas respiratorias que abarcan los códigos J00 al J99 según la CIE-10 (Clasificación internacional de enfermedades 10ma edición) y por causas cardiovasculares que abarcan los códigos I00 al I52.

En el análisis de morbilidad, se decidió estudiar la frecuencia de enfermedades que impactan el sistema respiratorio, mediante la recopilación de datos sobre los casos reportados en cada distrito. Las enfermedades específicas seleccionadas para este estudio incluyen la bronquitis crónica, y el asma en individuos menores y mayores de 5 años. Estas afecciones son consideradas como enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores con códigos del J40 al J47.

B2.2. Funciones concentración respuesta (FCRs)

Para investigar la conexión entre el grado de exposición a distintas concentraciones de contaminantes atmosféricos y varios aspectos de la salud, se utilizaron las Funciones concentración respuesta (FCR). Estas funciones sirven para medir el cambio de nivel de contaminación en relación con la afectación a la salud humana [20].

En la Tabla I se especifican todas las FCRs utilizadas. Como interpretación de la tabla tenemos, el caso de la mortalidad por causas respiratorias, donde la FCR indica que por cada variación de 10 µg/m³ de PM₁₀, se registra un cambio del 1,3% en la mortalidad. Respecto a la morbilidad, para la causa de bronquitis crónica la FCR sugiere un aumento del 9,8%.

TABLA I
DIMENSIONES DE SALUD Y FUNCIONES CONCENTRACIÓN RESPUESTA

Frecuencia de efectos iniciales y funciones concentración-respuesta					
Variable objetivo	Edad	Población		FCR para PM_{10}	
		N°	Fuente	Media 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IC de 95%)	Fuente
Mortalidad					
Causas respiratorias	Todas	347	GRSA 2017	1,013 (1,005-1,021)	OMS 2004
Causas cardiovasculares	Todas	450	GRSA 2017	1,009 (1,005-1,013)	OMS 2004
Morbilidad					
Bronquitis crónica	Todas	12216	GRSA 2017	1,098 (1,009-1,194)	Abbey et al., 1993
Asma	<5	9885	GRSA 2017	1,039 (1,020-1,051)	Künzli et al., 2000
	>5	21425	GRSA 2017	1,041 (1,019-1,059)	Ward y Ayres, 2004

B2.3. Escenarios evaluados

Bajo el fin de realizar una evaluación económica de los beneficios en la salud, es esencial definir distintos escenarios de reducción de concentración de PM_{10} . Con este fin, se han definido tres escenarios hipotéticos que se fundamentan en estándares de calidad del aire.

El primer escenario se considera irreal, ya que determina los beneficios económicos de una reducción total de la contaminación atmosférica, es decir, una concentración de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} como promedio anual. A pesar de ser improbable de lograr, es importante determinarlo porque permite entender los costos totales para la salud asociados a la carga de contaminación atmosférica.

El segundo escenario se establece en el estándar propuesto por la OMS y evalúa los beneficios económicos si la contaminación atmosférica se redujera a un promedio anual de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} ,

Por último, en el tercer escenario se sigue el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del aire del Perú definido en el DS N° 003-2017-MINAM [27] y se contempla una contaminación promedio anual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} .

B2.4. Carga de enfermedad

La carga de enfermedad se emplea para cuantificar la proporción de casos de una enfermedad que se puede atribuir a cierto factor de riesgo; en este sentido, son el número de afecciones a la salud relacionadas a la contaminación atmosférica. Primero, se debe usar (1) para calcular la FAP (fracción de población atribuible).

$$FAP = (P(FCR - 1))/(P(FCR - 1) + 1) \quad (1)$$

En (1), P representa la proporción de la población que está en contacto con la contaminación y FCR es la función concentración respuesta para la variación del contaminante

[21]. Ya que toda la población ha sido expuesta, P equivale a 1 y podemos resumir la anterior ecuación en (2).

$$FAP = (FCR - 1)/FCR \quad (2)$$

Para determinar la carga de enfermedad correspondiente para cada enfermedad en el año 2017, se usa (3).

$$CA_{ij} = ((FAP * PM_{10})/10) * K_{ij} \quad (3)$$

En (3), CA_{ij} indica la carga de enfermedad asignable a la contaminación para una enfermedad específica (i) y un distrito determinado (j). FAP se halló en (2). El PM_{10} se denota como la concentración reducida para el escenario correspondiente en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por último, K_{ij} refiere al total de casos por distrito y enfermedad.

B3. Valoración económica ambiental en la carga de enfermedad

B3.1. Valoración de la mortalidad

[21] propone el uso del Valor de la Pérdida de Años de Vida (VOLY) para calcular el costo asociado a muertes prematuras, teniendo en cuenta la reducción en la esperanza de vida (EV). Esta medida se diferencia del Valor Estadístico de Vida (VSL) que se utilizaba antes de 1996. El VSL resultaba en aproximaciones inadecuadas, principalmente porque las muertes relacionadas con la contaminación del aire no son directamente observables, como ocurre con las muertes por accidentes. Esta falta de observabilidad dificulta su cuantificación precisa.

$$VSL = VOLY \sum_{i=1}^N (1 + r_{dis})^{-i} \quad (4)$$

En (4), r_{dis} es la tasa de descuento aplicada que es tomada como 3 % e i es la diferencia entre la esperanza de vida y la vida promedio en Perú. Posteriormente, en (5) se calcula el AVP (años de vida perdidos), que en inglés es YGL (years life gained).

$$YGL = N_i E_i \quad (5)$$

En (5) el número de muertes atribuibles que se le atribuye a cada enfermedad está presentado por N, mientras que la esperanza de vida en Perú es E.

Por último, se multiplicó el YGL por cada VOLY correspondiente, en cada escenario de reducción de la contaminación.

B3.2. Valoración de la morbilidad

La morbilidad se describe como la presencia de casos de enfermedad o situaciones en las que el estado de salud no es óptimo. Se puede categorizar mediante diversos criterios, que abarcan desde la persistencia de la condición (ya sea crónica o aguda) hasta el grado de interferencia en actividades cotidianas o la manifestación de síntomas.

En esta investigación, nos basamos en evaluaciones económicas previamente realizadas en otros países que aplican

el enfoque de la disposición a pagar (DAP) de los individuos para mitigar el riesgo de adquirir ciertas enfermedades.

B3.2.1. Valoración de la bronquitis crónica

Para valorar económicamente los casos de bronquitis este estudio se basó en la investigación realizada por Viscusi et al. [28]. Esta determinó que la DAP de una persona para reducir el riesgo de desarrollar bronquitis crónica severa es de 457 000 dólares. Sin embargo, dado que la investigación tuvo lugar en los Estados Unidos utilizando precios de 1989, se ajustó este monto al año 2017, resultando en una cifra de 903 627 dólares por caso.

El método "naïve" es utilizado para transferir el valor de DAP de un caso de bronquitis crónica de los Estados Unidos a un caso de bronquitis crónica en Perú, se describe de la siguiente manera:

$$DAP_{PERÚ} = DAP_{USA} (PBI_{PERÚ} / PBI_{USA})^e \quad (6)$$

Donde $PBI_{PERÚ}$ y PBI_{USA} Es el PBI per cápita del Perú y Estados Unidos en 2017, respectivamente, y e representa la elasticidad. Hammit y Robinson [29] propusieron el uso de elasticidades mayores a 1 para transferir valores de países de altos ingresos a países de bajos ingresos. Además, al tener en cuenta la sensibilidad de la tasa de elasticidad, se determinó la DAP calculando elasticidades de ingresos que oscilan entre 1 y 2, con intervalos de 0.25, siendo 1 el valor para países con ingresos muy altos y 2 para países con ingresos muy bajos. Dado que Perú es un país de ingresos medios bajos, se consideró que el valor más adecuado para la elasticidad sería 1.75. El valor transferido se estableció en 19 423 dólares por caso de bronquitis crónica.

Por último, para el cálculo total de la valoración se multiplicó la cantidad de casos de bronquitis crónica atribuibles a la concentración de PM_{10} por el valor transferido de DAP.

B3.2.2. Valoración del asma

En el caso del asma se utilizó una investigación de Ready et al. [30], el cual realizó una valoración contingente para hallar el valor de un caso de asma para cinco países europeos (Holanda, Noruega, Inglaterra, Portugal y España). Se determinó que el valor de un caso de asma era de 44,59 dólares a precios de 2003, lo que equivale a 59,96 dólares por caso de asma para el 2017.

Para trasladar el valor de la DAP de las naciones europeas a una situación de asma en Perú, se empleó nuevamente el método "naïve". Para tal fin, se determinó el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita para los cinco países europeos donde se llevó a cabo la investigación, calculando un monto de 35 221 dólares. Este valor se combinó con el PIB per cápita de Perú en 2017, el cual ascendió a 6 676 dólares, para adecuar el monto a transferir. El valor transferido se estableció en 3,26 dólares por caso de asma en el Perú.

Por último, para el cálculo total de la valoración se multiplicó el número de casos de asma atribuibles a la concentración de PM_{10} por el valor transferido de DAP.

III. RESULTADOS

A. Casos atribuibles a la contaminación atmosférica por cada dimensión de salud

A1. Casos de mortalidad atribuibles

Los casos de mortalidad atribuibles se calcularon para cada distrito con (3). En la Tabla II se muestran la suma de estos resultados, es decir, los casos de mortalidad atribuibles totales si se redujera la concentración media de PM_{10} de cada distrito a los escenarios propuestos de 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (escenario 1), 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (escenario 2) y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (escenario 3).

TABLA II
MORTALIDAD ATRIBUIBLE

Número de muertes atribuibles a la contaminación de PM_{10} en Arequipa				
Causas	Edad	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Respiratorias	Todas	38,71	32,03	16,44
Cardiovasculares	Todas	34,72	28,70	14,65

A2. Casos de morbilidad atribuibles

Los casos de morbilidad atribuibles se calcularon para cada distrito con (3). En la Tabla III se muestran la suma de estos resultados, es decir, los casos de morbilidad atribuibles totales si se redujera la concentración media de PM_{10} de cada distrito a los tres escenarios propuestos.

TABLA III
MORBILIDAD ATRIBUIBLE

Número de casos de enfermedad atribuibles a la contaminación de PM_{10} en Arequipa				
Causas	Edad	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Bronquitis crónica	Todas	9 415,38	7 779,90	3 963,80
Asma	<5 años	3 361,98	2 777,99	1 415,36
	>5 años	6 944,72	5 738,41	2 923,67

B. Valoración de la reducción de la contaminación del aire en Arequipa

B1. Valoración de la reducción en la mortalidad

La valoración de los casos de mortalidad se obtuvo multiplicando el Valor de la Pérdida de Años de Vida (VOLY) y los Años de Vida Ganados (YLG) calculados con (4) y (5) respectivamente. Además para calcular YLG se utilizó el número de casos de mortalidad atribuibles de la Tabla II con (5). En la Tabla IV se muestra la valoración económica de los casos de mortalidad para los tres escenarios propuestos.

TABLA IV
VALORACIÓN DE LOS CASOS DE MORTALIDAD

Valoración económica de las muertes atribuibles por la reducción de contaminación de PM_{10} en Arequipa (millones de USD)
--

Causas	Edad	Método	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Respiratorias	Todas	VOLY	121,59	100,61	51,65
Cardiovasculares	Todas	VOLY	109,06	90,15	46,02

B2. Valoración de la reducción en la morbilidad

B2.1. Bronquitis crónica

Para los casos de bronquitis crónica, la valoración económica se obtuvo multiplicando el número de casos atribuibles de la Tabla III con la DAP para no contraer la enfermedad. La DAP para Perú es obtenida mediante (6). En la Tabla V se muestran los valores de la DAP para diferentes elasticidades.

TABLA V
VALOR DE UN CASO DE BRONQUITIS CRÓNICA

Valor de un caso de bronquitis crónica en Arequipa usando el método naive para diversas elasticidades (miles de USD)					
Elasticidad	1	1,25	1,50	1,75	2
DAP para evitar un caso de bronquitis crónica	100,70	58,18	33,62	19,42	11,22

El valor más adecuado para la elasticidad es de 1,75, por lo que la DAP sería de 19 420 dólares por caso de bronquitis crónica, esto debido a que el Perú es considerado un país de ingresos medios bajos.

En la Tabla VI se muestra la valoración de los casos de bronquitis crónica atribuibles para las elasticidades y escenarios propuestos.

TABLA VI
VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS CASOS ATRIBUIBLES DE BRONQUITIS CRÓNICA

Valor económico de los casos de bronquitis crónica atribuibles a la contaminación de PM_{10} en Arequipa (millones. de USD)					
Causa	Edad	Elasticidad	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Bronquitis crónica	Todas	1	948,15	783,46	399,16
		1,25	547,82	452,67	230,63
		1,50	316,52	261,54	133,25
		1,75	182,88	151,11	76,99
		2	105,66	87,31	44,48

B2.2. Asma

En los casos de asma, la valoración se obtuvo al multiplicar el número de casos de asma atribuibles de la Tabla III con la DAP para no contraer la enfermedad. La DAP para Perú es obtenida mediante (6). En la Tabla VII se muestran los valores de la DAP para diferentes elasticidades.

TABLA VII
VALOR DE UN CASO DE ASMA

Valor de un caso de asma en Arequipa usando el método naive para diversas elasticidades (USD)					
Elasticidad	1	1,25	1,50	1,75	2
DAP para evitar un caso de asma	11,37	7,50	4,95	3,27	2,15

El valor más adecuado para la elasticidad es de 1,75, por lo que la DAP sería de 3,27 dólares por caso de asma, esto debido a que el Perú es considerado un país de ingresos medios bajos.

En la Tabla VIII se muestra la valoración de los casos de asma atribuibles para las elasticidades y escenarios propuestos.

TABLA VIII
VALORACIÓN DE LOS CASOS ATRIBUIBLES DE ASMA

Valor económica para los casos de asma atribuibles a la contaminación de PM_{10} en Arequipa (millones de USD)					
Causa	Edad	Elasticidad	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Asma	<5 años	1	38,21	31,57	16,09
		1,25	25,21	20,83	10,61
		1,50	16,64	13,75	7,00
		1,75	10,98	9,70	4,62
		2	7,24	5,98	3,05
	>5 años	1	78,93	65,22	33,23
		1,25	52,08	43,03	21,93
		1,50	34,36	28,39	14,47
		1,75	22,67	18,74	9,55
		2	14,96	12,36	6,30

B3. Valoración económica ambiental total

Por último, se resume en la Tabla IX la valoración económica ambiental total para morbilidad y mortalidad en cada uno de los escenarios propuestos. Se observa que el escenario 1 es el más favorable con un valor de 182 914 126,05 dólares y 231 146 679, 20 dólares para morbilidad y mortalidad, respectivamente. Estos valores van disminuyendo a continuación en los escenarios 2 y 3; sin embargo, estos son más cercanos a la realidad.

TABLA IX
VALORACIÓN ECONÓMICA TOTAL

Valor económica total de morbilidad y mortalidad evitada por la reducción contaminación de PM_{10} en Arequipa (USD)			
Efecto	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Mortalidad	231 146 679,20	191 167 703,00	97 883 425,29
Morbilidad	182 914 126,05	151 141 469,85	77 005 272,04

IV. DISCUSIÓN

Se observó en los resultados que la mortalidad tiene una mayor valoración que la morbilidad esto concuerda con el estudio de Alpizar, Piaggio y Pacay [9], sin embargo, es necesario tomar en cuenta que probablemente exista una sobreestimación en el caso de la morbilidad, ya que se consideraron todos los casos de bronquitis crónica como severas, esto debido a la carencia de información.

Por otro lado, al considerar el PM_{10} como único indicador de calidad de aire es probable que suela haber una subestimación de la valoración económica total para la contaminación. [20].

Se determinó que los resultados de la valoración en Arequipa para reducir a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el PM_{10} fue de 174,89 millones de dólares para el 2017, y para el trabajo realizado por Miranda [7] en Lima en 2005 la valoración para reducir a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el PM_{10} fue de 329 millones de dólares. Ambos estudios utilizan funciones concentración respuesta (FCR) para el cálculo de los casos atribuibles, sin embargo, la diferencia puede deberse al criterio de enfermedades tomadas, la población y la antigüedad del estudio.

Para el caso del trabajo realizado por Alpizar, Piaggio y Pacay [9], se determinó que la valoración en San José para reducir a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el PM_{10} fue de 133,45 millones de dólares, valor muy parecido al de nuestro estudio. Las metodologías usadas fueron muy parecidas, sin embargo, la diferencia estaría en que los niveles de contaminación de PM_{10} en Arequipa son considerablemente mayores a los de San José, Costa Rica.

Por último, si se redujera la concentración de PM_{10} al ECA peruano, siendo este el escenario más realista del estudio, se ahorraría para el año 2017 un 1,45 % del PBI arequipeño y un 0,091 % del PBI nacional.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se comprobó que la media de PM_{10} de ninguno de los 13 distritos de Arequipa en 2017 cumplía con el ECA peruano, y mucho menos con los estándares de la OMS, por lo que claramente estos niveles de contaminación estarían afectando la salud ciudadana. En el caso de mortalidad por causas respiratorias, se determinaron 38,71, 32,03 y 16,44 muertes atribuibles para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente; mientras que para causas cardiovasculares fueron 34,72, 28,70 y 14,65, respectivamente. En ambas causas se aprecia una disminución significativa en el número de muertes atribuibles a la contaminación de PM_{10} en los diferentes escenarios evaluados. Siendo el escenario 3 el que registró una reducción del 57.6% en las muertes atribuibles a causas respiratorias y del 57.9% en las muertes atribuibles a causas cardiovasculares en comparación con el escenario 1. Comprobando que mientras más se reduzca la concentración de PM_{10} habrá un mayor número de muertes evitadas.

En cuanto a la morbilidad evitada, los resultados indican que la reducción de PM_{10} también tuvo un impacto positivo en la disminución de casos de enfermedades respiratorias. En el caso de la bronquitis crónica se atribuyeron 9 415,38, 7 779,90 y 3 963,80 casos evitados para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente; para el asma en total se obtuvieron 10 306,70, 8 516,40 y 4 339,03, para cada escenario respectivo. Al igual que con la mortalidad, se evidencia que a medida que la concentración de PM_{10} disminuye, los casos de enfermedades evitadas aumentan.

Respecto a la valoración para las muertes evitadas se halló un total de 231 146 679,20, 191 167 703 y 97 883 425,29 de

dólares en los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente para la suma de todas las causas (respiratorias y cardiovasculares). Para los casos evitados de morbilidad, se trabajó con la elasticidad de 1,75 y se obtuvieron los valores de 182 914 126,05, 151 141 469,85 y 77 005 272,04 de dólares en cada escenario sumando todas las causas (bronquitis crónica y asma). Al sumar la valoración de mortalidad y morbilidad evitadas, se obtienen los valores de 414 060 805,28, 342 309 172,89 y 174 888 697,32 de dólares para cada escenario. Así se concluye que al reducir la concentración de PM_{10} en el aire, se logra disminuir la incidencia de enfermedades y los costos asociados a la mortalidad y morbilidad atribuibles a la contaminación atmosférica, lo que resalta la importancia de implementar medidas efectivas para reducir la contaminación del aire en Arequipa, tanto para mejorar la calidad de vida de las personas como también de nuestra economía.

REFERENCIAS

- [1] "Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao", MINAM, Lima, Perú, 2019. [Online]. Available: https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/diagnostico_calidad_aire_0.pdf
- [2] M. Lozano and S. Rodríguez, "La imperiosa necesidad de programar la asistencia a urgencias, atendiendo al cambio climático y las crisis de calidad del aire", *REUE*, vol. 2, pp. 194-197, 2023. [Online]. Available: https://digital.csic.es/bitstream/10261/339047/1/Imperiosa-Benito_et_al-2023-Revista_espa%C3%B1ola_urgencias_emergencias.pdf
- [3] M. Gascon and J. Sunyer, "Contaminación del aire y salud respiratoria en niños", *Archivos de Bronconeumología*, vol. 51, pp. 371-372, 2015, doi: 10.1016/j.arbres.2015.03.001
- [4] M. Oyarzún and G. Valdivia, "Impactos en la salud de la contaminación del aire", *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, vol. 37, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-3482021000200103>
- [5] World Health Organization (WHO). OMS: Respira la Vida-Cómo la contaminación del aire afecta a tu cuerpo. (March 13, 2018). Accessed: Feb. 7, 2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vdhDnYdBDhQ+>
- [6] Z. Madariaga, M. Vargas, V. Escobedo and Y. Isasi, "Monitoreo de aire de la ciudad de Arequipa Área Metropolitana", Gerencia Regional de Salud de Arequipa. Accessed: Feb. 7, 2024. [Online]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-arequipa/archivos/public/docs/93.doc>
- [7] J. Miranda, Impacto económico en la salud por contaminación del aire en Lima Metropolitana. presentada en el Programa de Investigaciones ACIDI-IDRC 2005. Accessed: Feb. 8, 2024. [Online]. Available: <https://cies.org.pe/wp-content/uploads/2016/07/impacto-economico-en-la-salud-por-contaminacion-del-aire-en-lima-metropolitana.pdf>
- [8] V. Tapia et al., "Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú", *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, vol. 35, pp. 190, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3250>
- [9] F. Alpizar, M. Piaggio and E. Pacay, "Valoración económica de los beneficios en la salud asociados a la reducción de la contaminación del aire", CEPAL, Costa Rica. Accessed: Feb. 1, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/fe42aa4e-61d7-4766-a84f-a40c2bdabb4e/content>

- [10] T. Pinzón, J. Martínez and S. Valera, “Valoración económica del efecto sobre la salud de la contaminación atmosférica por fuentes móviles en Pereira”, *Scientia Et Technica*, 2012. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84925149032>
- [11] C. Wong, N. Vichit-Vadakan, H. Kan and Z. Qian, “Public Health and Air Pollution in Asia (PAPA): A Multicity Study of Short-Term Effects of Air Pollution on Mortality”, *Environmental Health Perspectives*, vol. 116, pp. 1195-1202, 2008, doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.11257>
- [12] MINAM. *Manual de valoración económica del Patrimonio Cultural*, 1 ed. (2015). Accessed: Feb. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/09/MANUAL-VALORACI%C3%93N-14-10-15-OK.pdf>
- [13] D. Tomasini, “Valoración económica del ambiente”, Departamento de Economía, Desarrollo y Planeamiento Agrícola, Universidad de Buenos Aires, Argentina. [Online]. Available: <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Equidad-Desarrollo-Social/136.pdf>
- [14] WHO, 2006, “Air quality guidelines. global update”, World Health Organization [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/341712/WHO-EURO-2013-4101-43860-61757-eng.pdf?sequence=1>
- [15] L. Perez et al., “ Size fractionate particulate matter, vehicle traffic, and case-specific daily mortality in Barcelona, Spain”, *Environmental Science and Technology*, Jul, 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/es8031488>
- [16] GTZ, 2011, “Gestión de calidad del aire módulo 5a transporte sostenible: texto de referencia para formuladores de políticas públicas de ciudades en desarrollo”, GTZ [Online]. Available: https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/sites/ppp.worldbank.org/files/documents/GTZ_Gender-and-Urban-Transport_ES.pdf
- [17] WHO, “Air quality guidelines global update 2005”, WHO, Regional Office for Europe. Accessed: Feb. 5, 2024. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf?sequence=1>
- [18] J. Lelieveld, J. Evans, M. Fains, D. Giannadaki and A. Pozzer, “The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale”, *Nature*, vol. 525, pp. 367-371. 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1038/nature15371>
- [19] “Informe Nacional de Calidad del Aire 2013-2014”, MINAM. Accessed: Feb. 02. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>
- [20] N. Künzli and L. Perez, “The public health benefits of reducing air pollution in the Barcelona metropolitan area”, *Barcelona: Centre Recerca en Epidemiologia ambiental*, sep. 2007. [Online]. Available: <https://intranet.imim.es/files/news/BCNHIAeng19-09-07.pdf>
- [21] Rabl et al.. *How Much Is Clean Air Worth?*, Cambridge University Press, 2014, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107337831>
- [22] D. Watson and G. Philip, “A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation”, *Journal of Geographic Information System*, vol. 2, pp. 315-327. 1985. [Online]. Available: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=435000>
- [23] “Análisis de la situación actual de salud”, GRSA. Accessed: Feb. 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.saludarequipa.gob.pe/epidemiologia/enlac/asis.htm>
- [24] “Morbilidad en la provincia de Arequipa”, GRSA. Accessed: Feb 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.saludarequipa.gob.pe/oei-morbilidad/>
- [25] “Boletín de Mortalidad”, GRSA. Accessed: Feb 1, 2024. [Online]. Available: <https://www.saludarequipa.gob.pe/oei-mortalidad/>
- [26] “Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report”, WHO, Regional Office for Europe. Accessed: Feb. 1, 2024. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/341712/WHO-EURO-2013-4101-43860-61757-eng.pdf?sequence=1>
- [27] “Compendio de la legislación ambiental peruana”, MINAM. Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/10/compendio_05_-_calidad_ambiental_2.pdf
- [28] W. Viscusi, W. Magat and J. Huber, “Pricing environmental health risks: survey assessments of risk-risk and risk-dollar trade-offs for chronic bronchitis”, *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 2, pp. 32-51. 1991, doi: [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(91\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0095-0696(91)90003-2)
- [29] J. Hammit and L. Robinson, *The Income Elasticity of the Value per Statistical Life: Transferring Estimates between High and Low Income Populations*. Cambridge University Press, 2021, doi: <https://doi.org/10.2202/2152-2812.1009>
- [30] R. Ready, J. Buzby and D. Hu, “Differences between Continuous and Discrete Contingent Value Estimates”, *Land Economics*, 2005. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stabl/3147205>