



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:  
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16  
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,  
COLOMBIA



Encontro Internacional de  
Educação em Engenharia ACOFI

# **Evaluación del impacto en la salud de las partículas menores a $10 \mu\text{m}$ , con el uso del software AIRQ+. Caso: municipio de La Paz – Bolivia**

**Danielle Michel Bustillos Cárdenas, Vidfa Carolina Garvizu Auza, Freddy Soria Céspedes**

**Universidad Católica Boliviana San Pablo  
La Paz, Bolivia**

## **Resumen**

La contaminación atmosférica genera al menos siete millones de muertes anuales en todo el mundo, según la estimación de la Organización Mundial de la Salud. Actualmente, la contaminación atmosférica se constituye en una problemática latente presente principalmente en las grandes urbes, que requiere de gran atención.

Es así, que surge la necesidad de evaluar el impacto en la salud del material particulado suspendido con diámetro menor a 10 micras ( $\text{PM}_{10}$ ) en los habitantes del Municipio de La Paz – Bolivia y su relación con enfermedades respiratorias no virales, considerando la información generada por la red de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad de La Paz (Red MoniCA) y datos históricos epidemiológicos generados por instancias de salud entre las gestiones 2009 y 2019, utilizando el Software AirQ+.

De acuerdo a los periodos identificados en los que se sobrepasan los límites permisibles, se pudo determinar que el 35,45% de casos de enfermedades respiratorias no virales considerando: bronquitis crónica en adultos, mortalidad infantil post neonatal y todas las causas de bronquitis en niños menores a cinco años, son atribuibles al material particulado existente en el Municipio de La Paz.

En la evaluación de un escenario donde la concentración se mantiene por debajo de los valores umbral de efecto en la salud (límites permisibles), se podría reducir la prevalencia de enfermeda-

des no virales atribuibles a PM<sub>10</sub> en: un 2,75% en mortalidad infantil post neonatal, 4,83% en todas las causas de bronquitis en niños menores a cinco años y 16,2% en bronquitis crónica en adultos.

Los valores obtenidos al reducirse la concentración de PM<sub>10</sub>, muestran la existencia de un impacto significativo en la mejora de la calidad de la salud y vida de la población paceña.

**Palabras clave:** material particulado PM<sub>10</sub>; software AirQ+; enfermedades respiratorias no virales

### **Abstract**

*According to estimates by the World Health Organization, air pollution is responsible for at least seven million deaths annually worldwide. Nowadays air pollution is a latent problem present mainly in large cities, which requires immediatly attention.*

*In consequences, the need arises to evaluate the impact on health of suspended particulate matter with a diameter of less than 10 microns (PM<sub>10</sub>) in the population of La Paz - Bolivia and its relationship with non-viral respiratory diseases, of course it is very important to considere the information generated by the air quality monitoring network of La Paz city (Red MoniCA) and also historical epidemiological data generated by health agencies administrations between the 2009 and 2019 administrations, using the AirQ+ Software.*

*According to the identified periods, in which the permissible limits were exceeded, it was possible to determine that 35.45% of cases of non-viral respiratory diseases considering: chronic bronchitis in adults, post-neonatal infant mortality and all causes of bronchitis in minor children under five years, they are attributable to the existing particulate matter in the in La Paz city.*

*In the evaluation of a scenario where the concentration remains below the threshold values for health effects (permissible limits), the prevalence of non-viral diseases attributable to PM<sub>10</sub> could be reduced by: 2.75% in post-neonatal infant mortality, 4.83% in all causes of bronchitis in children under five years of age and 16.2% in chronic bronchitis in adults.*

*The values obtained by reducing the concentration of PM<sub>10</sub> show the existence of a significant impact on improving the quality of health and life of the population of La Paz city population.*

**Keywords:** PM<sub>10</sub> Particulate Matter; AirQ+ software; Non-viral respiratory diseases

## **1. Introducción**

Desde que la Revolución Industrial inició en la segunda mitad del siglo XVIII, los procesos de producción en las fábricas, el desarrollo del transporte y el uso de combustibles fósiles han incremen-



tado la concentración de diferentes gases y partículas en la atmósfera que degradan la calidad del aire que respiramos.

A raíz de la identificación de la contaminación atmosférica como un problema que impacta de manera significativa en la salud, se inicia el estudio de la calidad de aire en los Estados Unidos en 1945 y 1969 (Ugarte, 2013). En el contexto Latinoamericano, desde el año 1950, se observó una preocupación por la contaminación del aire; las universidades y dependencias de los ministerios de salud fueron los organismos que realizaron las primeras mediciones de contaminación de aire. En 1965, el concejo directivo de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) recomendó el establecimiento de programas de investigación de la contaminación de agua y aire, con el objetivo de colaborar con los gobiernos miembros en el desarrollo de políticas adecuadas de control (Kore,2014).

Existen diferentes agentes que pueden llegar a determinar la calidad del aire, las partículas suspendidas se constituyen en uno de los principales. Estas pueden ser producto de una gran cantidad de procesos naturales o antropogénicos (Suarez,2012). El diámetro de las partículas que pueden estar presentes en aire oscila entre una milésima de micra y 500 micras. Desde el punto de vista de la salud, en los seres humanos, las partículas cuyo tamaño no excede las 10 micras ( $\text{PM}_{10}$ ) son las más dañinas (Portal Ambiental Andalucía , 2004). Debido al tamaño en que estas partículas pueden presentarse en la atmósfera, presentan la potencialidad de penetrar profundamente en los pulmones, esto induce la reacción de la superficie en las células de defensa en los pulmones y estos efectos pueden ser percibidos a corto o largo plazo en la salud. (OPS, 2021) Según lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la exposición a estas partículas puede afectar principalmente a los pulmones como al corazón, destacándose entre las principales afecciones: muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, infartos de miocardio, latidos irregulares, asma agravada, función pulmonar reducida, irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar.

La preocupación sobre los efectos de este y otros contaminantes sobre la salud humana, busca en el contexto boliviano, el establecer acciones claras respecto a la gestión de la calidad del aire. Es en este sentido que, surge la necesidad de conocer los niveles de contaminación del aire, por lo que se establece la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (Red MoniCA) en la gestión 2000, gracias al apoyo del Proyecto "Aire Limpio" financiado por Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación (COSUDE) e implementado por Swisscontact.

## 2. Metodología

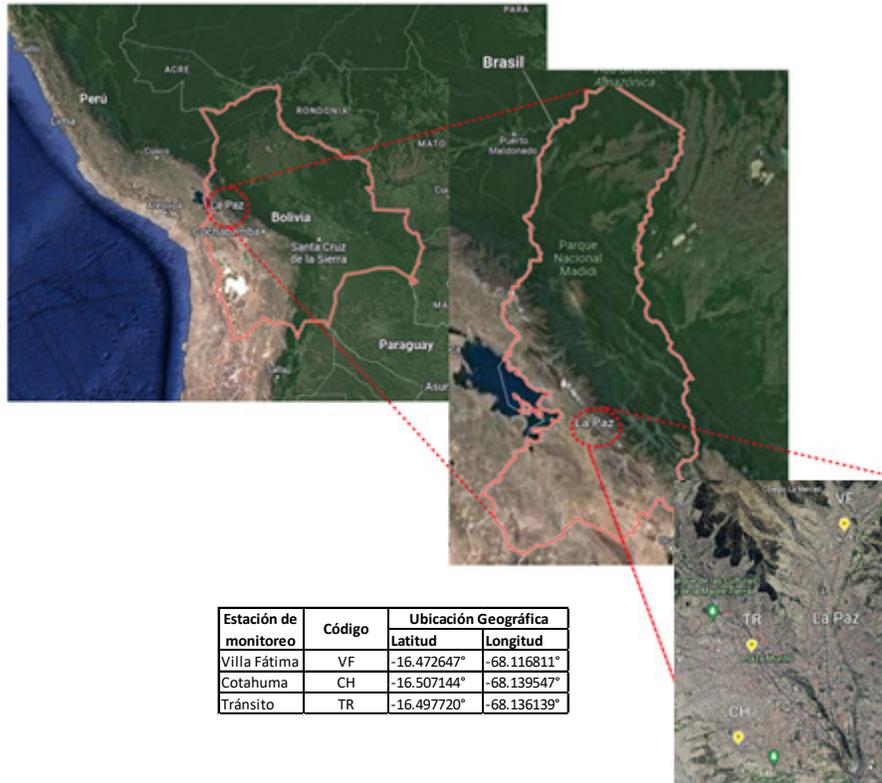
El área de estudio seleccionada fue el Municipio de La Paz, sede de Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia y Capital del Departamento del mismo nombre. Actualmente, cuenta con una población de 1.999.570 habitantes hasta el 2019 con una extensión de 476  $\text{km}^2$  (GAML, 2021).

Se consideraron los datos de concentración de material particulado menor a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), monitoreados en una media de 24 horas a través de metodología activa, por la Red MoniCA del Go-



bierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP) entre las gestiones 2009 y 2019. Los puntos de monitoreo considerados para el presente trabajo fueron: Cotahuma (CH), Villa Fátima (VF) y Tránsito (TR), los cuales se encuentran en zonas de importante afluencia vehicular dentro del área Municipal.

**Figura 1 Estaciones de monitoreo activo de PM<sub>10</sub> Red MoniCA, La Paz – Bolivia**



Fuente: Adaptación de Google Earth, 2022

La metodología activa para la determinación de la concentración de material particulado, se centra en el empleo del Impactador Harvard MiniVol, que permite la retención de las partículas en un papel filtro y posteriormente por gravimetría, determinar la concentración de PM<sub>10</sub>. Este equipo fue creado en el año 1986 en la universidad de Harvard y desde entonces fue utilizado para la medición de material particulado, tanto en Latinoamérica, como en Bolivia.

Los indicadores de salud relacionados a enfermedades respiratorias no virales considerados fueron proporcionados por el Ministerio de Salud en Bolivia, ente encargado de recopilar los casos reportados en todos los centros de salud tanto a nivel Municipal como nacional.

Para realizar el análisis del impacto en la salud de PM<sub>10</sub>, se utilizó el software AirQ+, el cual fue desarrollado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), siendo gratuito para los sistemas operativos Windows y Linux. El software realiza la estimación del impacto en la salud en base al cálculo del porcentaje atribuible (AP), para un determinado efecto a largo y corto plazo en la salud, asociado a la exposición de un contaminante específico.

En el caso de PM<sub>10</sub>, se determina la incidencia de bronquitis crónica en adultos, mortalidad infantil post neonatal, todas las causas de bronquitis en niños e incidencia de asma en niños menores de 5 años, todas estas consideradas patologías que pueden ir desde afectar las vías respiratorias o la capacidad de oxigenación de las personas.

Para la determinación del porcentaje atribuible del impacto en la salud por PM<sub>10</sub>, el software AirQ+ utiliza la ecuación propuesta por Krzyzanowski (WHO, 2001)

$$AP = \frac{\sum\{(RR(C)-1)\times P(C)\}}{\sum[RR(C)\times P(C)]}$$

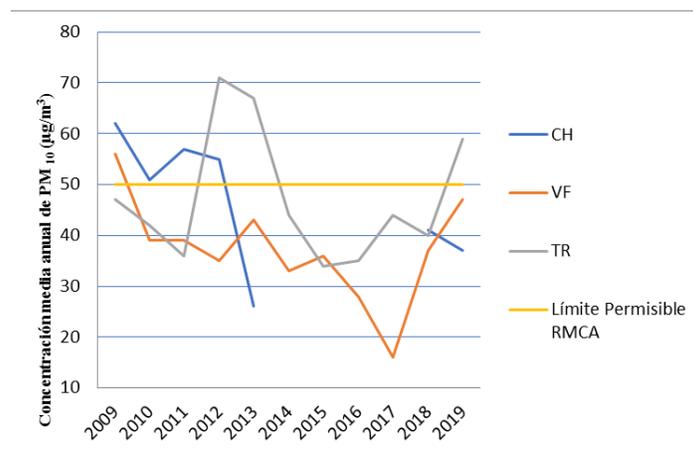
Dónde: AP es el porcentaje atribuible de población que podría ser afectada por los contaminantes, RR es el riesgo relativo que existente de un cierto efecto sobre la salud y (C) es la población en contacto con un contaminante.

Cabe resaltar que el modelo no puede establecer una relación de causalidad directa y tampoco puede analizar efectos sinérgicos que se pueden producir por la presencia de varios contaminantes en la atmósfera (Luján, 2008).

### 3. Resultados

Para el uso del software AirQ+, se procedió a analizar el porcentaje atribuible (PA) de las concentraciones medias anuales del periodo considerado que sobrepasaban el límite permisible de exposición a PM<sub>10</sub> en una media anual de 50 (µg/m<sup>3</sup>), en las tres estaciones de monitoreo, según lo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RCMA) de la Ley 1333 del Estado Plurinacional de Bolivia. En cada caso, el PA de población afectada, se determina con el rango de variación considerando un intervalo de confianza (IC) del 95%.

**Gráfica 1 Concentración media anual de PM<sub>10</sub>**



Fuente: Elaboración propia, en base a registros de la Red MoniCA de La Paz

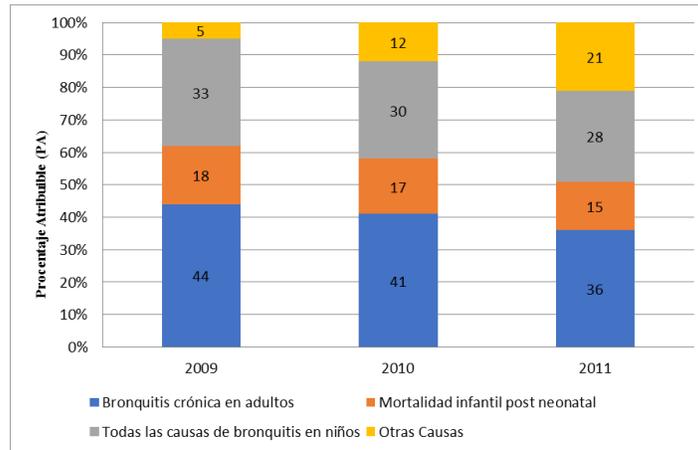


Es así que, las gestiones seleccionadas para cada una de las estaciones de monitoreo fueron: CH (2009 -2010 -2011), VF (2009) y TR (2012- 2013-2019).

Para las gestiones analizadas en la estación de monitoreo de CH, la concentración media anual registrada de PM<sub>10</sub> en cada caso fue: 62 µg/m<sup>3</sup> en el año 2009, 51 µg/m<sup>3</sup> en el año 2010 y 57 µg/m<sup>3</sup> en el año 2011.

Los resultados obtenidos en este caso aplicando el software AirQ+, se muestran en la Gráfica 2 para las afecciones a la salud consideradas.

**Gráfica 2 Porcentaje atribuible (PA) – Estación de monitoreo CH**



Para las gestiones analizadas, es mayor el porcentaje atribuible a la generación de bronquitis crónica en adultos en comparación de las otras afecciones, siendo el valor más alto el de la gestión 2009 con un 41%.

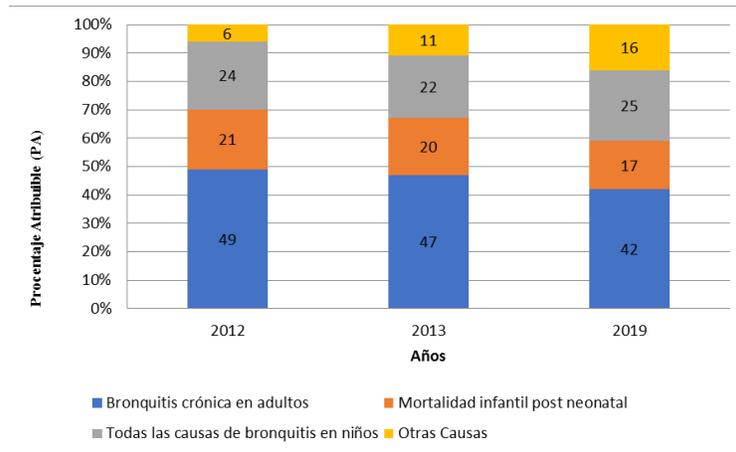
En cuanto al análisis correspondiente de las causas que generan bronquitis en niños, se atribuye a la contaminación por PM<sub>10</sub>, un 33% en la gestión 2009, 30% en el año 2010 y 28% en el 2011.

El 18%, 17% y 15% de las muertes infantiles post natales generadas en las gestiones 2009, 2010 y 2011 respectivamente, pueden ser atribuibles a la contaminación atmosférica por material particulado menor a 10 micrómetros.

En lo que concierne a la estación de monitoreo de TR, las concentraciones promedio anuales de PM<sub>10</sub> consideradas, fueron: 71 µg/m<sup>3</sup> en el año 2012, 67 µg/m<sup>3</sup> en el año 2013 y 59 µg/m<sup>3</sup> en el año 2019. Los resultados de la determinación del PA, se muestran en la Gráfica 3.



**Gráfica 3 Porcentaje atribuible (PA) – Estación de monitoreo TR**



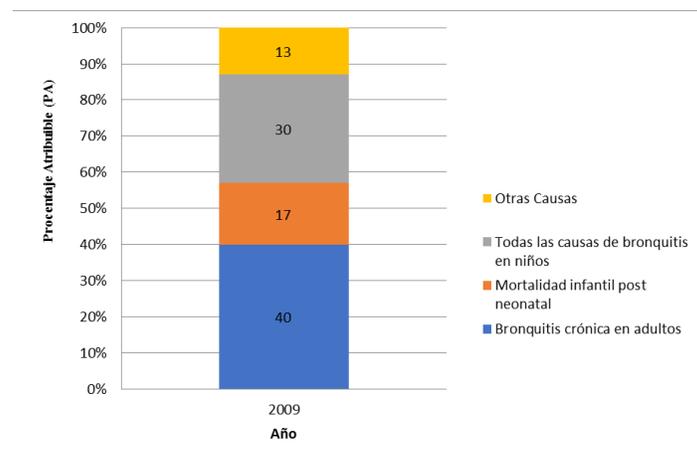
Luego de la aplicación del software, al igual que en la estación CH, el mayor porcentaje de prevalencia es para la bronquitis crónica en adultos para las gestiones analizadas. Siendo el año 2012 que presenta el porcentaje más elevado (49%).

La mayor incidencia de la contaminación atmosférica por PM<sub>10</sub> en las causas de bronquitis en niños, se registra en el año 2019 con un 25%, seguido de un 24% en el 2012 y finalmente 22% en la gestión 2013.

En lo que respecta a la mortalidad infantil post natal, se identifica el mayor porcentaje (21%) en la gestión 2012, atribuible a la exposición a PM<sub>10</sub>.

Para la estación de VF, solamente se consideró la concentración media anual de la gestión 2009 que sobrepasó el límite permisible del RMCA con un valor de 56 µg/m<sup>3</sup>. Los resultados, se muestran en la figura a continuación:

**Gráfica 4 Porcentaje atribuible (PA) – Estación de monitoreo VF**



En este caso, el 40% de los casos reportados de bronquitis crónica en adultos, 17% de los casos de mortalidad infantil post neonatal y el 30% de todas las causas de bronquitis en niños pueden ser atribuidos a la contaminación por material particulado.

De acuerdo al análisis de los periodos identificados en los que se sobrepasan los límites permisibles, se pudo determinar que el 35,45% de casos de enfermedades respiratorias no virales considerando: bronquitis crónica en adultos, mortalidad infantil post neonatal y todas las causas de bronquitis en niños menores a cinco años, son atribuibles al material particulado existente en el Municipio de La Paz.

En la evaluación de un escenario donde la concentración se mantiene por debajo de los valores umbral de efecto en la salud (límites permisibles) de manera global en cada una de las estaciones de monitoreo consideradas, se podría reducir la prevalencia de enfermedades no virales atribuibles a PM<sub>10</sub> en: un 2,75% en mortalidad infantil post neonatal, 4,83% en todas las causas de bronquitis en niños menores a cinco años y 16,2% en bronquitis crónica en adultos. Esto significa la mejora de la calidad de la salud de la población expuesta.

#### **4. Conclusiones**

En los resultados obtenidos, se puede atribuir al material particulado menor a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) un impacto significativo a la salud sobre todo en lo que se refiere a las enfermedades respiratorias no virales. Según lo establecido por la Contraloría General del Estado (2019) en la Gaceta Informativa titulada "Auditorías ambientales sobre la contaminación del aire", la influencia en la salud de la población expuesta a este contaminante, es inminente.

Así también, según la OPS (2021), 9 de cada 10 personas respiran aire que contiene altos niveles de contaminantes. Es por esa razón que la contaminación del aire es un problema que hoy en día pasa desapercibido para la mayoría de la población. A diferencia de sus efectos, cada año mueren 7 millones de personas en el mundo al exponerse a contaminantes atmosféricos.

Lo que ocurre en el contexto del municipio de La Paz, no es diferente. Según los periodos analizados con el uso del software AirQ+ y las concentraciones medias anuales de PM<sub>10</sub> registradas en las tres estaciones de monitoreo activo de la Red MoniCA, generan un impacto significativo en la salud de la población paceña, considerándose en un 35,45% en cuanto al análisis global a este contaminante, como la causa para la epidemiología de las enfermedades respiratorias no virales.

Con la reducción de la emisión de PM<sub>10</sub>, alcanzando a cumplir con los valores límites permisibles establecidos por el RMCA, se puede llegar a reducir hasta en un 16,2% la bronquitis crónica en adultos, que según lo analizado es la enfermedad con más prevalencia.



## 5. Referencias

### Artículos de revistas

- Suarez, C. A. (2012). Revista Luna Azul. DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10, Vol. 24, No. 34, pp. 195-213.
- Ministerio de Salud, Estado Plurinacional de Bolivia. (2018). Revista informativa. Calidad de aire y salud, Vol. 1, No. 1, pp. 1-4.

### Libros

- Ugarte, R. (2013). "MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL SECTOR TAM, DE LA CIUDAD DE EL ALTO. - PROPUESTA DE UN MÉTODO DE MONITOREO DE AIRE CON MATERIAL PARTICULADO. La Paz – Bolivia, pp. 13.

### Fuentes electrónicas

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente División de Salud y Ambiente. (2014, junio). Final report: MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN AMÉRICA LATINA. Consultado el 8 de mayo 2021 en [https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Korc/publication/238739661\\_MONITOREO\\_DE\\_LA\\_CALIDAD\\_DEL\\_AIRE\\_EN\\_AMERICA\\_LATINA/links/02e7e53a85b76bf4bc000000/MONITOREO-DE-LA-CALIDAD-DEL-AIRE-EN-AMERICA-LATINA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Korc/publication/238739661_MONITOREO_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_EN_AMERICA_LATINA/links/02e7e53a85b76bf4bc000000/MONITOREO-DE-LA-CALIDAD-DEL-AIRE-EN-AMERICA-LATINA.pdf)
- Contraloría General de Estado. (2019, junio). Gaceta Informativa - Final report: Auditorías ambientales sobre la contaminación del aire. Consultado el 25 de mayo de 2021 en [https://www.contraloria.gob.bo/portal/Portals/0/upload/BOLETIN\\_CONTAMINACION%CC%81N\\_AMBIENTAL\\_compressed.pdf](https://www.contraloria.gob.bo/portal/Portals/0/upload/BOLETIN_CONTAMINACION%CC%81N_AMBIENTAL_compressed.pdf)
- Luján Pérez, Marcos (2008, diciembre). Evaluación preliminar del impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población de la ciudad de Cochabamba. Consultado el 3 de junio de 2022 en [http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v4n1/v4n1\\_a05.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v4n1/v4n1_a05.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). Final report: Guías de calidad de aire de la OMS. Consultado el 27 de mayo de 2021 en [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?jsessionid=6945A9A385590E0E7F2BF6A03A997544?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?jsessionid=6945A9A385590E0E7F2BF6A03A997544?sequence=1)
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2021). Final report: OPS. Consultado el 9 de mayo de 2021 en [https://www.paho.org/bol/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2094:nueve-de-cada-10-personas-en-todo-el-mundo-respiran-aire-contaminado-pero-mas-paises-estan-tomando-acciones&Itemid=481](https://www.paho.org/bol/index.php?option=com_content&view=article&id=2094:nueve-de-cada-10-personas-en-todo-el-mundo-respiran-aire-contaminado-pero-mas-paises-estan-tomando-acciones&Itemid=481)
- Portal Andalucía. (2004). Final report: Material Particulado Atmosférico. Consultado el 9 de mayo de 2021 en [https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page/-/asset\\_publisher/4V1kD5gIjKq/content/material-particulado-atmosf-c3-a9rico/20151?categoryVal=](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page/-/asset_publisher/4V1kD5gIjKq/content/material-particulado-atmosf-c3-a9rico/20151?categoryVal=)
- Programa Nacional de Gestión de Calidad del Aire. (2021, enero). Final report: Contaminación Atmosférica Gestión 2020. Consultado el 8 de mayo de 2021 en <http://snia.mmaya.gob.bo/web/modulos/PNGCA/#>



- Swisscontact (2001, agosto). Manual de Laboratorio. Final report: Swisscontact. Consultado el 20 de mayo de 2021 en <http://www.ingenieroambiental.com/Manual-laboratorio-analisis-aire.pdf>
- World Health Organization (WHO). (2001). AirQ Versión 1.2: Air Quality and Health Impact Assessment Tool. User's Manual. European Centre for Environment and Health. Bonn, Alemania. Consultado el 3 de enero de 2022 en <https://www.who.int/europe/home?v=welcome>
- World Health Organization (WHO). (2020, diciembre). Final report: Health impact assessment of air pollution: Introductory manual to AirQ+. Consultado el 23 de mayo de 2021 en <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/337681/WHO-EURO-2020-1557-41308-56210-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## Sobre los autores

- **Danielle Michel Bustillos Cárdenas**, estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica Boliviana "San Pablo". [danielle.bustillos@ucb.edu.bo](mailto:danielle.bustillos@ucb.edu.bo)
- **Vidfa Carolina Garvizu Auza**, Ingeniera Ambiental, Máster en Investigación en tecnología del Agua. Investigadora del Centro de Investigación en Agua, Energía y Sostenibilidad (CINAES). Universidad Católica Boliviana "San Pablo". [vgarvizu@ucb.edu.bo](mailto:vgarvizu@ucb.edu.bo)
- **Freddy Ángel Soria Céspedes**, Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Ambiental. Director del Centro de Investigación en Agua, Energía y Sostenibilidad (CINAES). Universidad Católica Boliviana "San Pablo". [fsoria@ucb.edu.bo](mailto:fsoria@ucb.edu.bo)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

