MODELO DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA PARA ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICO DE CALIDAD DE AIRE

Diaz J. A.^{*a*} y Berri G. J.^{*a,b*}

^a Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad de La Plata, ARGENTINA ^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA

e-mail: diazjuanaugusto@gmail.com

RESUMEN

Se presenta un sistema de modelado numérico de dispersión atmosférica que se puede utilizar tanto en estudios de diagnóstico como para el pronóstico a corto plazo de la calidad del aire a escala local y regional. El sistema emplea dos modelos numéricos de cálculo. Un modelo de capa límite atmosférica en escala regional realiza el pronóstico de los campos tridimensionales de viento, temperatura, etc., en alta resolución espacial y temporal. El modelo de dispersión atmosférica utiliza ese pronóstico para calcular la distribución espacial de las concentraciones de las sustancias modeladas. El modelo de dispersión atmosférica calcula la travectoria lagrangiana de las sustancias emitidas y luego un módulo de cálculo gaussiano determina la dispersión local y las concentraciones resultantes. El sistema realiza los cálculos con resolución espacial de hasta 100 metros y resolución temporal de hasta 30 segundos, pudiendo elegir a voluntad la duración del período de simulación, desde pocas horas hasta varios años. Se describe el sistema de modelado y se presentan diferentes ejemplos de simulaciones realizadas para la región del Gran La Plata, provincia de Buenos Aires, por periodos de tiempo variables de hasta 1 año. El sistema de modelado es de utilidad tanto para diagnósticos de situación delimitando las zonas potencialmente afectadas por emisiones industriales controladas, como así también en el caso de emisiones accidentales o incendios forestales.

Palabras Clave: Modelado numérico, Dispersión atmosférica, Pronostico, Gran La Plata

INTRODUCCIÓN

La mala calidad de aire es una problemática que afecta al 92% de la población mundial y tiene un mayor impacto en las áreas urbanas. En el año 2014, la Organización Mundial de la Salud informó que 7 millones de personas fallecieron como consecuencia de la exposición a la contaminación atmosférica (WMO 2013 y WMO 2016). La región de estudio de este trabajo, el Gran La Plata, no se encuentra exenta de este problema. Otros autores han observado la concentración de material particulado (MP10 y MP2,5) por encima de los umbrales recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Colman et al., 2014; Orte et al., 2015). Otros estudios han encontrado una variación en la acidez del agua de lluvia (Arrieta et al., 2015).

La región del Gran La Plata se conforma por 3 partidos, La Plata, Ensenada y Berisso, ubicada al noreste de la provincia de Buenos Aires y alberga una población que supera los 800 mil habitantes (INDEC, 2010) con una mayor concentración en la ciudad de La Plata. Entre estos 3 partidos se encuentra un polo petroquímico complejo que tiene a la principal refinería de petróleo del país, siendo la de mayor volumen de producción a nivel nacional (Represa et al., 2016), además de otras 6 refinerías e industrias afines. En cercanías, se halla la central termoeléctrica "Central Térmica Ensenada de Barragán" y en la costa del Rio de La Plata, se encuentra un astillero y una siderúrgica.

La presencia de estas fuentes puntuales de emisiones gaseosas de gran magnitud exige una atención especial en la calidad del aire. Debido a que no se cuenta con una red de monitoreo continuo en la región, algunos autores han empleado técnicas alternativas para estudiar la calidad del aire. En este trabajo se propone al modelado numérico como una alternativa para el estudio de calidad de aire. La extensa bibliografía sobre el tema demuestra que es una herramienta de gran potencial, con la capacidad de abarcar áreas extensas y alcanzar alta resolución en los cálculos. Sin embargo, un insumo importante para la obtención de buenos resultados, son los datos meteorológicos. El comportamiento de la atmósfera y sus condiciones definen hacia dónde se desplazarán los contaminantes una vez emitidos y en qué lugar se producirán las mayores concentraciones.

Para lograr una buena descripción de las condiciones meteorológicas en la baja atmósfera en la región se emplea el modelo de capa límite (MCL) desarrollado especialmente para la región del Río de La Plata. El modelo MCL se basa en una capa límite hidrostática y seca e incluye las ecuaciones básicas de conservación de cantidad de movimiento, masa y energía, con una clausura turbulenta de primer orden. Los detalles acerca de la formulación y el funcionamiento del modelo se pueden ver en Berri et al. (2010). El modelo puede inicializarse con observaciones locales (Berri and Bertossa, 2017), como así también con las salidas de modelos de pronóstico operativo a escala regional (Sraibman and Berri, 2009; Berri and Dezzutti, 2020). El modelo MCL genera los campos tridimensionales de viento, temperatura y presión atmosférica que luego emplea el modelo de dispersión atmosférica (MDA).

El objetivo de este trabajo es presentar el modelo de dispersión atmosférica que se encuentra en desarrollo y su acople con el modelo de capa limite. Se desarrollan las ecuaciones utilizadas por el modelo, además de los diferentes productos de salida obtenidos. Por último, se presentan algunos de los resultados obtenidos de una simulación del periodo 2012-2016, para la región del Gran La Plata.

EL MODELO MDA

El modelo de dispersión atmosférica tiene una resolución horizontal de 100 metros, un único nivel de cálculo de concentraciones atmosféricas definido por el usuario y una resolución temporal que puede variar entre 10 y 900 segundos. El periodo a modelar es variable y depende principalmente del insumo de datos meteorológicos. MDA está basado en el modelo HIRHYLTAD, desarrollado por Blanco and Berri (2013) y utilizado en un estudio de dispersión de plumas de humo por incendios forestales. MDA cuenta con la posibilidad de modelar varias fuentes puntuales y continuas en simultaneo, admitiendo en su versión actual un máximo de 5 fuentes. Es importante que las fuentes ingresadas emitan el mismo contaminante atmosférico, ya que por el momento no se cuenta con un modelo de reacciones químicas. La región de aplicación del modelo está centrada en La Plata con 27 km de ancho y 19,6 km de largo abarcando todo el Gran La Plata. La secuencia de cálculo consta de dos partes. En primer lugar, se calcula el movimiento de los centros de masa de las sucesivas bocanadas emitidas utilizando una metodología lagrangiana. Luego para cada paso de tiempo se calcula la dispersión local alrededor de todos los centros de masa de todas las bocanadas que se encuentran dentro de la región y se obtiene un valor de concentración para cada punto del retículo de resolución. Para el cálculo de dispersión se emplean las ecuaciones del modelo gaussiano, que se detallan más adelante.

Los datos necesarios para la ejecución se dividen en dos grupos. Un primer grupo incluye los campos meteorológicos que son generados por el modelo de capa limite. Estos campos tienen una resolución horizontal de 1 km, resolución temporal de 15 minutos y son generados para el mismo dominio que el MDA. Se trabaja con una alta resolución vertical en la baja atmósfera con 9 niveles, el primero de ellos a 1 cm y el último a 480 m de altura. El segundo grupo de datos requeridos son los parámetros que caracterizan las fuentes puntuales de emisión, es decir la altura y diámetro de la chimenea, velocidad y temperatura de salida de los gases, ubicación de la fuente y tasa de emisión. Por último, se debe ingresar el periodo de tiempo a modelar, la resolución temporal de los cálculos, la altura a la cual se quiere calcular la concentración de la sustancia emitida y cuál ecuación se utilizará para el cálculo de la altura efectiva de emisión.

Cuando los contaminantes atmosféricos son emitidos se desplazan en la vertical una determinada altura hasta que su eje de desplazamiento se dispone en forma horizontal. Esta altura final, que depende de la temperatura y velocidad de salida de los gases, además de las condiciones atmosféricas, se denomina altura efectiva de emisión. Para obtener dicha altura se han propuesto diferentes métodos y ecuaciones. Debido a que la confiabilidad en el resultado del cálculo depende del contaminante, el modelo incluye dos métodos diferentes y se deja a elección del usuario cual utilizar. La ecuación de Holland "ver Ec. (1)", es uno de los métodos más utilizados debido a su sencillez en la formulación (Holland, 1953). Debe prestarse atención a que la fórmula de Holland calcula la diferencia de altura entre la chimenea y la altura efectiva, por lo que es necesario emplear la "Ec. 2". El otro método posible es la formulación para elevación de la pluma elaborado por Briggs "ver Ec. (3)" (Chico y Catalano, 1986). Es una secuencia de cálculo más compleja, que analiza el mecanismo dominante en la elevación de la pluma. Para ello se definen dos condiciones de atmosfera, estable o neutra-inestable a través de la velocidad del viento y la diferencia entre la temperatura de salida de los gases y la ambiente. Dependiendo de la condición atmosférica el ascenso puede ser por flotabilidad, cuando los gases tienen una temperatura mucho mayor que la ambiente, o debido a la cantidad de movimiento, asociado a la velocidad de salida de los gases. Por lo tanto, se recomienda esta metodología cuando se trabaja con temperaturas de salida de gases cercanas a las ambientales, ya que se han encontrado diferencias considerables con la ecuación de Holland.

$$\begin{split} \Delta h &= \frac{d \cdot V_{s}}{u} \left[1,5+2,68 \times 10^{-3} \, P_{d} \left(\frac{T_{s}-T_{a}}{T_{s}} \right) \right] \quad Ec. \, (1) \\ V_{s} &= Velocidad \, de \, salidad \, de \, los \, gases \, [m/s] \\ d &= Diametro \, de \, la \, chimenea \, [m] \\ u &= velocidad \, del \, viento \, a \, la \, altura \, de \, la \, chimenea \, [m/s] \\ T_{a} &= Temperatura \, del \, aire \, a \, la \, altura \, de \, la \, chimenea \, [K] \\ T_{s} &= Temperatura \, de \, salida \, de \, los \, gases \, [K] \\ P_{d} &= Presión \, atmosferica \, a \, la \, altura \, de \, la \, chimenea \, [hpa] \end{split}$$

 $h_e = h + \Delta h \quad Ec.(2)$ $h_e = Altura \ efectiva \ de \ emisión \ [m]$ $h = Altura \ de \ la \ chimenea \ [m]$ $\Delta h = Ascenso \ o \ descenso \ según \ Ec.(1) \ [m]$

Método de Brig	gs
Fluctuación por Flotabilidad	Fluctuación por Momento
$F_b = gV_s d_s^2 \left(\frac{\Delta T}{4T_s}\right)$	$F_m = gV_s^2 d_s^2 \left(\frac{T_a}{4T_s}\right)$

$$h' = \begin{cases} h, & V_s \ge 1.5u \\ h + 2d \left[\frac{V_s}{u} - 1.5\right], & V_s < 1.5u \end{cases}$$

$$Si T_s \ge T_a \ Casos \ Inestables \qquad Si T_s < T_a \ Casos \ Estables \qquad Parametro \ de \ estabilidad \\ S = g \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z}\right) T_a^{-1} \qquad \Delta T_c = \begin{cases} h' + 21.45 \frac{\sqrt[4]{V_b}^3}{u}, & F_b \ge 55 \\ h' + 38.71 \frac{\sqrt[5]{V_b}^3}{u}, & F_b \ge 55, \Delta T \ge \Delta T_c \\ h' + 3d \cdot \frac{V_s}{u}, & \Delta T < \Delta T_c \end{cases}$$

$$h_c = \begin{cases} h' + 2.6 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F_m}{u \cdot S}\right)}, & \Delta T \ge \Delta T_c \\ h' + 1.5 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F_m}{u \sqrt[3]{S}}\right)}, & \Delta T \ge \Delta T_c \\ h' + 1.5 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{F_m}{u \sqrt[3]{S}}\right)}, & \Delta T < \Delta T_c \end{cases}$$

Una vez obtenida la altura efectiva de emisión, se simula la emisión de una bocanada de sustancia. El modelo, a partir de las condiciones atmosféricas, calcula el desplazamiento de los centros de masa de las bocanadas y, empleando la ecuación gaussiana de dispersión atmosférica, calcula parámetros auxiliares de dispersión "ver Ec. (4)".

$$Q_{c} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot u \cdot \sigma_{y} \sigma_{z}}; \ \sigma_{y}(x) = \frac{S_{y1}}{\sqrt{1 + S_{y2} \cdot x}}; \ \sigma_{z}(x) = S_{z1} \cdot x \cdot (1 + S_{z2})^{S_{z3}} \quad Ec. (4)$$

$$Q_{c} = Concentración \ en \ el \ centro \ [m/s^{3}]$$

$$Q = Tasa \ de \ emisión \ [g/s]$$

$$\sigma_{y} = Coeficiente \ de \ dispersión \ horizontal \ [m]$$

$$\sigma_{z} = Coeficiente \ de \ dispersión \ vertical \ [m]$$

$$x = Distancia \ recorrida \ por \ el \ centro \ de \ masa \ [m]$$

Los coeficientes S_{y1} , S_{y2} , S_{z1} , S_{z2} y S_{z3} varían de acuerdo con la condición de estabilidad atmosférica, teniendo en cuenta las 6 clases definidas por Pasquill (Pasquill F. 1974, Briggs 1973). La forma propuesta por Pasquill para el cálculo de la estabilidad requiere datos de radiación solar directa, velocidad del viento a 10m de altura y fracción nubosa. Debido a que no se cuenta con esos datos y teniendo en cuenta que la nubosidad aún hoy en día es difícil de modelar incluso con los mejores modelos de pronóstico meteorológicos operativos, se decidió utilizar un método alternativo. Se siguió la idea propuesta por Golder (Golder, D. 1972 y Sharan et al. 2005) para definir una relación entre las clases de Pasquill y la longitud de Monin-Obukhov (L) que se obtiene a partir de la "Ec. (5)". Se definieron 3 curvas que relacionan los valores de 1/L y las clases de Pasquill teniendo en cuenta la rigurosidad del suelo, estableciendo diferencias entre zonas urbanas, rurales o rio.

$$Ri = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^{-2}; \frac{1}{L} = \begin{cases} \frac{Ri}{z \cdot (1 - \beta \cdot Ri)} & \text{si } Ri \ge 0\\ \frac{Ri}{z} & \text{si } Ri < 0 \end{cases} \qquad Ec(5)$$

$$Ri = N \text{úmero } de \text{ Richardson}$$

$$L = \text{Longitud } de \text{ Monin } Obukhov[m^{-1}]$$

$$g = \text{aceleración gravitatoria, aproximada } a 9,80616 \text{ [m/s^2]}$$

$$\theta = \text{Temperatura potencial } del \text{ aire } [K]$$

$$\beta = \text{Coeficiente auxiliar constante, igual } a 5$$

$$z = \text{Altura } del \text{ centro } de \text{ masa} [m]$$

Por último, una vez obtenidos los parámetros Q_c , σ_y , σ_z se generan los datos de salida del modelo con una resolución temporal de una hora. Para eso se identifica la ubicación del centro de masa de cada bocanada emitida y se definen los puntos de retículo afectados de acuerdo con el coeficiente de dispersión horizontal, asignando a los mismos un único valor de concentración a partir de la "Ec. (6)". Los campos generados son luego post procesados con el software R obteniendo las salidas graficas usando las librerías Ggplot2 (H. Wickham 2016), Ggmap (D. Kahle and H. Wickham 2013) y Dplyr (H. Wickham et al. 2020). A su vez, con frecuencia de una hora, se almacenan las variables meteorológicas auxiliares lo que permite analizar el entorno atmosférico, a fin de determinar de qué manera puede influir en la concentración resultante. Un ejemplo de ello es estudiando la influencia de la dirección del viento en eventos de máxima concentración o la presencia de una inversión térmica en la capa limite.

$$C = Q_c \cdot e^{\left(-\frac{D_h}{2 \cdot \sigma_y}\right)^2} \cdot e^{\left(-\frac{D_z}{2 \cdot \sigma_z}\right)^2} \quad Ec. (6)$$

$$C = Concentración de sustancia modelada a la altura elegida [\mu g/m^3]$$

$$D_h = Distancia horizontal a la fuente [m]$$

$$D_z = Distancia vertical respecto a la altura de cálculo [m]$$

EXPERIMENTO

A continuación, se describen las principales características del diseño de un experimento realizado con el modelo de dispersión atmosférica. Se decidió trabajar con un periodo de 5 años del 01/01/2012 al 31/12/2016. Como datos de entrada al modelo de capa limite se utilizó el radiosondeo de 12UTC y las observaciones trihorarias de temperatura de la estación Ezeiza Aero, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional. Se decidió trabajar con 3 fuentes de emisión con parámetros descriptos en la Tabla I. Los mismos fueron adaptados de otros trabajos y bibliografía sobre la temática, por lo que no representan condiciones específicas de la región (Orille Fernández 1996, Jacobson 2005, Humán Pio 2017, Myllyvirta 2020). Esto se debe a que los datos de emisiones gaseosas no son de acceso público, lo cual dificulta el estudio de calidad de aire, ya que las tasas de emisión utilizadas son estimadas mediante técnicas de inventario de emisiones. La sustancia a modelar es el material particulado, fracción de 10 μm (PM10). Es un contaminante atmosférico emitido en todo proceso de combustión y que afecta a las vías respiratorias disminuyendo la capacidad pulmonar de las personas expuestas al mismo (Porta 2018).

Fuente	Latitud	Longitud	Altura [<i>m</i>]	Diámetro [<i>m</i>]	Temperatura de salida [K]	Velocidad de salida [m/s]	Tasa de emisión PM10 [<i>mg/s</i>]
Polo petroquímico	34°53'11.04''S	57°54'51.12''O	90	5,13	514	9,1	1.178,9
Central termoeléctrica	34°51'35.25''S	57°57'20.88''O	45	7	395,2	19,4	246,1
Parque Industrial	34°59'27.6''S	58°6'20.5''O	20	1	358	7,3	43,86

Tabla I: Descripción de fuentes modeladas

RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos con la simulación del periodo 2012 al 2016 con 3 fuentes en simultáneo. Los resultados se expresan como la probabilidad de que los valores de concentración en la atmosfera sean mayores a cero. Para generar estos mapas se calcula en primer lugar la cantidad de veces que se obtiene una concentración mayor que cero, en cada punto de retícula, con una resolución temporal de una hora. Luego se calcula la probabilidad empírica, dividiendo los valores de la matriz de frecuencias obtenidas por el número de horas transcurridas desde el inicio de la simulación.

La Figura 1 muestra el mapa de probabilidades anual y de cada estación del año. Se puede observar en la "Fig. 1-a" que los valores de probabilidad más altos se encuentran al oeste, suroeste de las fuentes de emisión, cubriendo casi en su totalidad al casco urbano y alrededores de la ciudad de La Plata. La presencia de un máximo en cercanías del Parque Industrial se debe a la baja altura de la chimenea y la menor temperatura de salida de los gases, que resultan en una emisión con poca elevación y mayor impacto en superficie. En cambio, las otras dos fuentes, al tener alturas más elevadas y mayores temperaturas de salida de los gases, distribuyen el material emitido en áreas más extensas y alejadas de las fuentes.

Al observar la "Fig. 1 b-e" vemos que las estaciones de otoño y verano presentan los mayores valores de probabilidad dentro del casco urbano. En contraposición, es la temporada invernal la que presenta los valores más bajos de las cuatro estaciones del año. En la Figura 2 se muestran los mapas de probabilidades que las concentraciones sean mayor que cero, para el promedio anual de los años 2013 y 2016, respectivamente. Se pueden apreciar diferencias entre ambos casos que demuestran que puede haber una importante variabilidad entre diferentes años en la distribución de las concentraciones en la región. Podemos observar en la "Fig. 2.a" un resultado similar al del promedio del periodo 2012-2016, mientras que en la "Fig. 2.b" se aprecian mayores probabilidades hacia la parte oeste de la región y valores de probabilidad menores en el sector sur del casco urbano.







b

d

e

a Estacion otoño, periodo 2012-2016



c Estacion verano, periodo 2012-2016







Figura 2. Probabilidad que la concentración resultante sea mayor que cero para el promedio anual a) año 2013 y b) año 2016

CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Al observar de la "Fig. 1" es evidente que la región del Gran La Plata se ve afectada por las emisiones de material particulado desde el Polo Petroquímico y la Central Termoeléctrica. El trabajo de Berri et al. 2012, ha demostrado que el viento en la región se ve dominado por la circulación de brisa mar-tierra, con una mayor frecuencia de vientos del sector Este. Debido a esta condición meteorológica las bocanadas, que son transportadas a sotavento de las fuentes, impactan en el casco urbano y alrededores, en las zonas más pobladas. El viento es una variable meteorológica de gran variabilidad, por lo cual es de esperarse que se encuentren diferencias interanuales como el ejemplo de los años 2013 y 2016 (ver Fig. 2). Es por eso importante que los estudios de calidad de aire cuenten con una buena base de datos meteorológicos para garantizar resultados más representativos.

Se han encontrado diferencias considerables en la extensión del área de incidencia de las fuentes de acuerdo a su altura. Si bien no es posible distinguir en los mapas el aporte del Polo Petroquímico y la Central Termoeléctrica, es evidente que el Parque Industrial tiene una zona de impacto muy cercana y contribuye con frecuencias más altas.

El empleo de los modelos numéricos para el estudio de calidad del aire es una buena práctica. Como muestran los resultados del trabajo, es posible abarcar áreas extensas y periodos de tiempo prolongados, lo que permite realizar análisis detallados de las condiciones medias a escala regional. Los modelos deben realizar diferentes suposiciones acerca del comportamiento atmosférico, el transporte y la dispersión de los contaminantes para poder funcionar. Por lo tanto, es recomendable validar los resultados que proporcionan los modelos para lo cual es necesario disponer de mediciones de redes de monitoreo, como así también los parámetros de emisión de las fuentes consideradas

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha recibido apoyo parcial del proyecto PICT2017-1670. Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar las observaciones de la estación Ezeiza Aero. J.A. Diaz agradece a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata el otorgamiento de una Beca de Incentivo a la Investigación.

REFERENCIAS

- Arrieta, N., Bazán, J. M., Sacheto, V., Reyna Almandos, J., & Salas, E. M., Calidad de las aguas de Lluvia en la region del Gran La Plata. Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina, Tomo III. PROIMCA-PRODECA. E. Puliafito et al. (Eds.). Universidad Tecnológica Nacional. ISBN 978-950-42-0163-2. (2015)
- Berri, G.J., Sraibmam, L., Tanco R., and Bertossa G., Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, doi: 10.1175/2010JAMC2370.1. (2010)
- Berri, G. J., Nuin, J. S. G., Sraibman, L., and Bertossa, G. Verification of a synthesized method for the calculation of low-level climatological wind fields using a mesoscale boundary-layer model. *Boundary-layer meteorology*, 142(2). (2012)
- Berri, G.J., and Bertossa, G., Initializing a mesoscale boundary layer model with radiosonde observations. *Boundary Layer Meteorology*, 166, doi: 10.1007/s10546-017-0295-5. (2017)
- Berri, G.J., and Dezzutti, M., A sea breeze case study in the La Plata River region using local observations, satellite images and model simulations. *Boundary Layer Meteorology*, 177, doi: 10.1007/s10546-020-00548-3. (2020)
- Blanco, J. and Berri, G. New indices for the spatial validation of plume forecasts with observations of smoke plumes from grassfires, Atmospheric Environment, 67, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.10.061 (2013)
- Briggs, G. A. Diffusion estimation for small emissions. *Preliminary report* (No. TID-28289). National Oceanic and Atmospheric Administration. Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab. (1973)
- Chico, T., and Catalano, J. Addendum to the User's Guide for MPTER (No. PB-86-217163/XAB). Aerocomp, Inc., Costa Mesa, CA (USA). (1986)
- Colman Lerner, J. E., Morales, A., Aguilar, M., Giuliani, D., Ditondo, J., Dodero, V.I., Massolo, L., Sánchez, E. Y., Matamoros, N., and Porta, A. The effect of Air Pollution on Children's

Health: a Comparative Study between La Plata and Bahía Blanca, Buenos Aires Province, Argentina. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 181, 978-1-84564-762-9. (2014a)

- Colman Lerner, J. E., Kohajda, T., Aguilar, M. E., Massolo, L. A., Sánchez, E. Y., Porta, A. A., Opitz, P., Wichmann, G., Herbarth, O., and Mueller. A. Improvement of health risk factors after reduction of VOC concentrations in industrial and urban areas. *Environmental Science* and Pollution Research International 21, 9676-9688. (2014b)
- Golder, D. Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 3. (1972)
- Holland, J. Z., A meteorological survey of the Oak Ridge area, USAEC Report 0110-99. Oak Ridge National Laboratory, pp. 554-559 (1953).
- Huamán Pio, J. M. Modelamiento de La Dispersión del Material Particulado de La Chimenea de Fundición de La Refinería de Estaño. (2017)
- Jacobson, M. Z., Fundamentals of atmospheric modeling. *Cambridge university press*. (2005)
- Kahle D. and Wickham H. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. *The R Journal*, 5, 144-161. URL <u>http://journal.r-project.org/archive/2013-1/kahle-wickham.pdf</u>
- Myllyvirta, L., Farrow, A., Fuentes, C., y Fernández, A. Impactos de las emisiones de las termoeléctricas a carbon en la calidad del aire en las comunas de Huasco y Puchuncaví. (2020)
- Orille Fernández, A. L. Centrales eléctricas: introducción al sector eléctrico y al sistema de energía eléctrica, centrales hidroeléctricas, centrales térmicas. (1996)
- Orte, M. A., Coman Lerner, J., Gutiérrez, M., Elordi, L., Matamoros, N., Reyna Almandos, & J., Porta, A. Estudio de hidrocarburos aromáticos policíclicos asociados al material particulado y en fase gaseosa en la ciudad de La Plata y alrededores. *Libro de Actas de PROIMCA*. (2015)
- Pasquill F., Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources, Ellis Horwood Lt., 2nd. Edition. New York. (1974)
- Porta, A., Sanchez, E. Y., & Colman Lerner, J. E. Calidad del aire. Series: Libros de Cátedra. (2018)
- Represa, S., Mellado, D., Bali, L., Lerner, C., Esteban, J., Sánchez, Y., & Porta, A. A. Aplicación de tecnologías de sistemas de información geográfica (SIG) para la estimación del riesgo por exposición a compuestos orgánicos volátiles (COVs). III Congreso de la Sociedad de Análisis de Riesgo Latinoamericana (SRA-LA). (2016)
- Represa, N. S. Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos (Doctoral dissertation). (2020)
- Sharan, M., Krishna, T. R., and Panda, J., Relations among stability parameters in the stable surface layer: Golder curves revisited. *Atmospheric Environment*, 39, 5619-5623. (2005)
- Sraibman, L., and G.J.Berri., Low level wind forecast over La Plata River region with a mesoscale boundary layer model forced by regional operational forecasts, *Boundary Layer Meteorology*, 130, doi: 10.1007/s10546-009-9350-1. (2009)
- Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. (2016)
- Wickham H., Francois R., Henry L., and Miller K. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.8.5. <u>https://CRAN.R-project.org/package=dplyr</u> (2020)
- World Health Organization (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution REVIHAAP Project. WHO European Centre for Environment and Health, Bonn, WHO 2013. 309 pp.
- World Health Organization. Global report on urban health: equitable, healthier cities for sustainable development. (2016 a)
- World Health Organization. Health as the pulse of the new urban agenda: United Nations conference on housing and sustainable urban development. (2016 b)