

RESEARCHS / INVESTIGACIÓN

Comparación de los Niveles de Concentración de Ozono Troposférico y Dióxido de Nitrógeno en Ecuador y Otras Latitudes.

Comparison of tropospheric ozone and nitrogen dioxide concentration levels in Ecuador and other latitudes.

Manuel A. Andino-Enríquez¹, Sandra P. Hidalgo-Bonilla¹, Luis A. Ladino^{2,*}

DOI. 10.21931/RB/2018.03.02.5

Resumen: En las décadas recientes, los problemas relacionados con la actividad antropogénica han generado preocupación debido a la acumulación de contaminantes en el aire, dando como resultado cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero y el material particulado. En Ecuador y el resto del mundo, la contaminación atmosférica representa un riesgo y una amenaza para la salud y el medio ambiente. Para realizar un análisis sobre esta temática es necesario realizar un proceso dinámico, seguido de un esfuerzo permanente que permita para mejorar la calidad de la información. Los estudios realizados en Ecuador sobre emisiones de contaminantes se realizan desde 2010; sin embargo, no se ejecutan comparaciones sobre de este tema en el contexto mundial, lo que conduce a que no se pueda realizar una apreciación real de la situación de la calidad del aire en el país, así como las consecuencias que pueden conducir no hacerlo. De esta manera, surge el principal objetivo de este proyecto que es analizar los niveles de concentración de NO₂ y O₃ en Ecuador y realizar una comparación directa con distintas ciudades alrededor del mundo. Dando como resultado que la concentración de los gases de estudio varía con el número de la población de un sector además de la contaminación que esta produce. Para desarrollar la presente investigación se ha recolectado información que proviene de la Organización Mundial de Meteorología, pertenecientes a WHO WDCGG DATA SUMMARY (World Meteorological Organization World Data Centre for Greenhouse Gases) del año 2015, mientras que los datos de las ciudades de estudio de Ecuador (Ibarra y Quito) fueron proporcionados por el municipio de Ibarra y por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

Palabras clave: Contaminación antropogénica, dióxido de nitrógeno, ozono troposférico, concentración de gases atmosféricos.

Abstract: In recent decades, problems related to anthropogenic activity have generated concern due to the accumulation of pollutants in the air, resulting in changes in the concentrations of greenhouse gases and particulate matter. In Ecuador and the rest of the world, air pollution represents a risk and a threat to health and the environment. To carry out an analysis on this subject, it is necessary to develop a dynamic process, followed by a permanent effort that allows improving the quality of the information. The studies developed in Ecuador on pollutant emissions are carried out since 2010; however, there are no comparisons made on this issue in the global context, which leads to the inability to make a real assessment of the air quality situation in the country, as well as the consequences that may result from not doing it. Thus, the main objective of this project is to analyze the concentration levels of NO₂ and O₃ tropospheric in Ecuador and make a direct comparison with different cities around the world. Resulting that concentration of study gases varies with the number of the population of a sector in addition to the pollution that it produces. In order to develop this research, the information collected comes from the World Meteorological Organization, belonging to WHO WDCGG DATA SUMMARY (World Meteorological Organization World Data Center for Greenhouse Gases) of the year 2015, while the data of the study cities of Ecuador (Ibarra and Quito) were provided by the municipality of Ibarra and by the Municipality of the Metropolitan District of Quito respectively.

Keywords: Anthropogenic pollution, nitrogen dioxide, tropospheric ozone, concentration of atmospheric gases.

Introducción

En las últimas décadas, los problemas de contaminación debido al desarrollo de actividades humanas han conllevado a un incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera del planeta. La contaminación atmosférica implica cambios en las características físicas, químicas y biológicas de los componentes atmosféricos lo cual puede perjudicar la salud y supervivencia de los seres vivos¹.

La superficie de la Tierra ha tenido grandes cambios naturales de temperatura durante los últimos 10000 años, los cuales inclusive superan los valores actuales. Sin embargo, desde la Revolución Industrial (1750) se ha dado un incremento continuo y descontrolado del calentamiento de la superficie de la Tierra debido al alza de la concentración de gases de efecto de invernadero como resultado de la contaminación antropogénica².

El sol es la mayor fuente de radiación que recibe la Tierra, esta es transmitida por ondas electromagnéticas. Cuando la radiación solar entra en contacto con la atmosfera terrestre, parte de esta radiación es absorbida por la superficie terrestre y posteriormente es reemitida como radiación infrarroja (IR). Una fracción de la radiación solar y de la radiación IR es absorbida por los componentes atmosféricos lo que resulta en un incremento de la temperatura del planeta. De igual manera, parte de la radiación solar es reflejada de regreso al espacio por las nubes, partículas de aerosol, la atmósfera y por la misma superficie terrestre lo que resulta en un enfriamiento de la superficie terrestre³. Con el fin de mantener una temperatura y clima estable, la Tierra debe tener un equilibrio energético entre la radiación que recibe desde el Sol y la radiación IR que emite hacia el espacio. A este equilibrio se lo conoce como

¹ Escuela de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad de Investigación de Tecnología Experimental YachayTech, Urcuquí, Ecuador

² Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México City, México

temperatura efectiva⁴. Cuando la radiación IR emitida por la Tierra es atrapada (absorbida) por gases de efecto invernadero es irradiada de vuelta a la superficie terrestre, resultando en el calentamiento de esta. Este fenómeno es conocido como efecto invernadero⁴. La captura de radiación terrestre por gases de efecto invernadero es esencial para mantener una temperatura de la superficie terrestre sustentable para la vida, ya que de no ser así la temperatura de la Tierra se encontraría cerca del punto de congelamiento -18°C ⁴. El problema surge debido a la contaminación antropogénica ya que la emisión descontrolada de gases de efecto invernadero puede inducir a un calentamiento más rápido de la superficie de la Tierra y actualmente, los esfuerzos por reducir su velocidad o su magnitud han dado resultados moderados pero no han conseguido revertir los cambios ambientales adversos⁵.

Los gases de efecto invernadero más comunes son: Dióxido de carbono (CO_2), Ozono troposférico (O_3), Vapor de agua, y Metano (CH_4). Debido a las actividades humanas, sus concentraciones se han visto incrementadas⁶. El ejemplo más tangible lo reporta el CO_2 como se ilustra en la Figura 1.

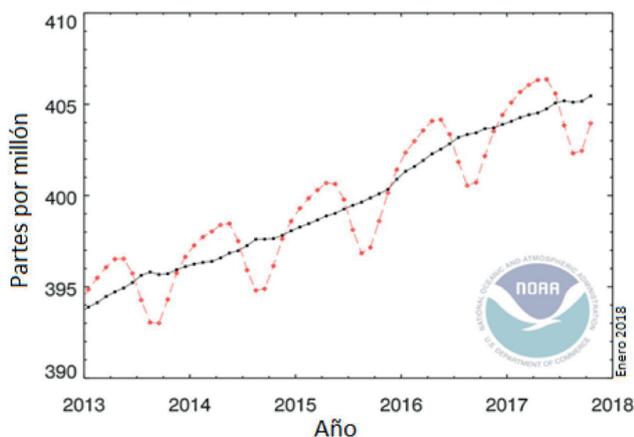


Figura 1. Incremento de la concentración de CO_2 con el tiempo ⁷.

Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

El dióxido de nitrógeno es un gas tóxico, no inflamable de color rojizo. Es un compuesto químico constituido por dos átomos de oxígeno y un átomo de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno no es un gas de efecto invernadero, pero en la atmósfera contribuye a la formación fotoquímica del ozono troposférico, además de ser uno de los mayores enemigos de las ciudades ya que envenena a sus habitantes como se explica a continuación⁸. Los óxidos de nitrógeno (NO_2 y NO) son creados a partir de rayos, la actividad microbiana del suelo, quema de biomasa (tanto naturales como incendios antropogénicos) al igual que la combustión de derivados de petróleo⁹.

El NO_2 se genera principalmente en el aire quemando combustible a partir de emisiones de automóviles, camiones, autobuses, plantas de energía, entre otros. Junto con otros NO_x , el gas NO_2 reacciona con otros productos químicos en el aire para formar tanto O_3 troposférico y material particulado (PM)¹⁰.

Debido a la contaminación humana mencionada anteriormente, se ha producido un incremento de las concentraciones de NO_2 , principalmente en los sectores urbanos e industriales¹¹. El ciclo diario del NO_2 empieza en las primeras horas del día donde la máxima concentración se observa entre las 8 y 9 de la mañana. Seguidamente, como este gas es un precursor del ozono troposférico, reacciona químicamente en presencia

de radiación solar ($290\text{ nm} < \lambda < 400\text{ nm}$) con otros gases, contribuyendo a la formación de O_3 troposférico, reduciendo su concentración en la atmósfera. Según vaya disminuyendo la intensidad de la radiación solar, la concentración de O_3 troposférico disminuirá y la concentración de NO_2 volverá a aumentar (8-9 pm), pero este pico de concentración no es tan elevado como el máximo en las primeras horas de la mañana¹².

El dióxido de nitrógeno produce un gran riesgo en el medio ambiente, ya que se oxida fácilmente en el vapor de agua de las nubes formando ácido nítrico (HNO_3), uno de los principales constituyentes de la lluvia ácida¹¹. Las gotas de lluvia que contienen estos ácidos, al precipitarse reaccionan fácilmente con sustancias orgánicas e inorgánicas y las modifican, perjudicando o destruyendo el suelo, agua, plantas, animales y edificios¹³. La precipitación de lluvia ácida logra sustraer nutrientes esenciales del suelo y liberar aluminio, lo que dificulta la absorción de agua por parte de los árboles. Asimismo, también dañan las agujas de las coníferas y las hojas de los árboles¹⁴.

Los efectos perjudiciales del NO_2 en la salud humana se centran en el aparato respiratorio. Según la Consejería de Sanidad de la Región de Murcia, se ha comprobado que el NO_2 provoca daños al parénquima pulmonar. Además, determina la inhibición de la depuración mucociliar, la fagocitosis y la respuesta inmunológica en el pulmón, produciendo una disminución de la resistencia del pulmón ante las infecciones. Igualmente, incrementa la sensibilidad pulmonar a los broncoconstrictores, afectando, por lo tanto, especialmente a las personas asmáticas¹⁵.

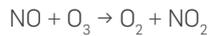
La Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció el valor guía de 20 ppb ($40\ \mu\text{g m}^{-3}$) perteneciente a la media anual de NO_2 , todo esto para proteger a la población de los efectos negativos de este gas en la salud (Valor guía: valor numérico relacionado con la concentración de partículas presentes en el aire que indica que, si este es sobrepasado, existe la posibilidad de poseer efectos adversos en la salud). El fundamento de esto es debido a que la mayoría de los métodos de reducción de la concentración son específicos para los NO_x (NO_2 y NO) y no están concebidos para controlar otros contaminantes que los acompañan aumentando sus emisiones¹⁶.

Ozono Troposférico (O_3)

El ozono es un gas incoloro, cuya fórmula molecular es O_3 , se encuentra en dos capas de la atmósfera: en la estratósfera y en la tropósfera. El ozono en la estratósfera actúa como una capa protectora contra los efectos negativos en la salud y el medio ambiente, ya que es capaz de absorber la radiación ultravioleta emanada del Sol evitando así que llegue a la superficie terrestre¹⁷. De la concentración total de ozono presente en la atmósfera, en la tropósfera se encuentra menos del 10%. Sin embargo, el ozono troposférico juega un rol importante en el ambiente debido a su participación en diferentes procesos químicos. Entre el espacio geográfico comprendido por el Trópico de Cáncer (20°N) y el Círculo Polar Ártico (60°N), el ozono troposférico fue el mayor contribuyente del calentamiento global durante el siglo XX².

El ozono troposférico es un contaminante secundario, esto significa que no se emite directamente a la atmósfera, sino que es el resultado de reacciones químicas, en condiciones adecuadas de radiación solar acompañada de otros contaminantes primarios como: compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), y en menor medida de metano (CH_4). Uno de los mecanismos de formación es a través de la interacción entre la radiación solar $\lambda < 400$ y NO_2 producen. Esta interacción produce O^{\bullet} , el

mismo que actúa como intermedio en la reacción. Esta especie química reacciona con O_2 y produce O_3 troposférico¹⁸. De igual manera es su destrucción, el O_3 troposférico reacciona con NO formando O_2 y NO_2 bajando la concentración de O_3 en la atmósfera¹⁹.



El ciclo diario de este contaminante comienza durante las primeras horas de la mañana, en las que comienzan las actividades antropogénicas, emitiendo principalmente: NO_x , CH_4 y CO_2 . Seguidamente, mientras el planeta recibe radiación solar, la concentración de ozono va aumentando según la presencia de los compuestos que lo forman. Ya en horas de la tarde, la radiación solar no es tan intensa provocando que la concentración de ozono troposférico disminuya hasta regresar a su concentración base¹².

El ozono troposférico se origina principalmente en las áreas urbanas por varias fuentes de emisión (automóviles y la industria). Las concentraciones elevadas de ozono troposférico provocan que este gas reaccione rápidamente destruyendo o alterando otras moléculas y posteriormente actúa como un contaminante tóxico, causando muchos problemas para la salud humana (daños respiratorios y pulmonares, dolores de pecho, etc.)¹².

La exposición al ozono se ha relacionado con la mortalidad prematura y una gama de cuestiones de morbilidad y síntomas de asma²⁰. La OMS estableció el valor guía de niveles de concentración de ozono en $100 \mu\text{g m}^{-3}$ para un promedio diario de ocho horas; sin embargo, los datos recolectados no son suficientes para recomendar un valor guía anual. La unidad de medida que se utiliza en este trabajo de investigación es ppb (partes por billón), el valor guía presentado equivaldría a 50 ppb¹⁶.

Recopilación de datos

La Global Atmosphere Watch (GAW) es un programa de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) que posee un centro de datos que archiva y proporciona observaciones de la composición química de la atmósfera, su cambio natural y antropogénico gracias a las más de 400 estaciones de monitoreo alrededor de todo el mundo²¹.

Ibarra es la capital de la provincia de Imbabura. Está ubicada al norte de Ecuador, específicamente a 115 km al noroeste de Quito, a 125 km al sur de la ciudad de Tulcán, con una altitud de 2225 m.s.n.m. Según el censo nacional de población realizado en el 2010, Ibarra posee una población aproximada de 181175 habitantes. Posee una variedad de climas con un promedio de temperatura de 18°C , estos van desde el frío de las elevaciones andinas, pasando por el cálido húmedo de la zona de Lita y la Carolina, hasta el tropical seco del valle del Chota²².

La ciudad de Ibarra se encuentra dentro de dos subcuencas hidrográficas: Río Chorlaví y Río Tahuando. La topografía de su suelo corresponde a pendientes que oscilan entre el 5 y el 15% en las estribaciones del cerro Imbabura²². La actividad industrial de la ciudad de Ibarra está conformado por: la industria manufacturera, la construcción, la minera, y la energética. Esta última se centra en la producción de electricidad, de gas y de agua²³. En relación a la actividad vehicular, cada año se da

un incremento de el 8% hasta 11% de el número de vehículos de circulan la ciudad²⁴.

Quito es la capital política de la Republica de Ecuador, actualmente cuenta con 2644145 habitantes, se encuentra a 2700 m.s.n.m. La ciudad se encuentra ubicada principalmente sobre el valle de Quito, formando parte de la Hoya de Guayllabamba. Su clima corresponde al clima subtropical de tierras altas, van desde climas áridos y templados hasta húmedos y fríos. Quito se divide en 3 zonas: sur, centro, y norte; donde el sur es el lugar más frío de la ciudad ya que es la zona más alta, el centro es caliente; donde se dan siempre las temperaturas más altas, y el norte es templado. Quito, siendo la capital de la República del Ecuador, alberga la mayor cantidad de industrias del país, constituyéndose en una de las principales fuentes de desarrollo del país. Esto ha provocado serios impactos ambientales en la ciudad y consecuentemente problemas en la salud de sus habitantes²⁵. En el año 2014, el parque automotor de la ciudad de Quito fue de 468777 vehículos. Los niveles de ocupación de los vehículos han disminuido de 1.7 personas en el 2013 a 1.2 personas en el año 2014, lo que representa un incremento en la congestión vehicular de la ciudad²⁶. En este momento, existen 10450 empresas instaladas en la capital ecuatoriana, de las cuales 372 son industrias y se encuentran ubicadas en zonas urbanas. Debido a este problema, se está realizando reordenamiento de parques y zonas industriales, con el objetivo de que las empresas se ubiquen en un sector específico, mediante la creación de tres parques industriales. Las industrias en la ciudad de Quito se relacionan con productos estructurales, maquinaria pesada para el sector eléctrico, el sector agrícola, la construcción, los textiles, industrias metalmeccánicas, etc²⁷.

Materiales y métodos

La WHO WDCGG (World Meteorological Organization World Data Centre for Greenhouse Gases) DATA SUMMARY del año 2015 pertenecientes a la Organización Mundial de Meteorología (WMO), proporcionó los datos de las concentraciones de NO_2 y O_3 de las diferentes estaciones que posee, con el fin de ayudar al desarrollo de este trabajo de investigación. Además, el Municipio de la ciudad de Ibarra y la Secretaria de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito facilitaron los datos de sus respectivas ciudades.

La selección de las estaciones de la GAW se realizó con la finalidad de poder elaborar una comparación directa de la concentración de NO_2 y O_3 de las estaciones ecuatorianas con distintas ciudades de alrededor del mundo cubriendo diferentes latitudes y longitudes.

Se realizó una selección del tiempo de estudio mediante una revisión de los datos proporcionados por las diferentes instituciones, verificando que en el tiempo seleccionado existan datos de Ecuador, de las ciudades de estudio (no todas las estaciones pertenecientes a la (WMO) poseen datos recientes de concentraciones de gases de efecto invernadero) y que posea el mayor tiempo de duración posible. Lo anterior dio como resultado que el tiempo de estudio sea desde enero del 2013 hasta diciembre del mismo año para el NO_2 , mientras que para O_3 troposférico el periodo de estudio fue entre abril del 2013 y septiembre del 2014. Una vez obtenidas las ciudades de estudio y los datos de concentraciones de gases de interés, se procedió a recopilar información acerca de su población con la finalidad de poseer una visión más general de la capacidad de emisión de contaminantes atmosféricos. Mediante la formulación de hipótesis, finalmente se realizó la comparación de

Figura 2. Mapa de las estaciones de O₃ troposférico en Ibarra.



la concentración de los gases de estudio y la población de las ciudades de estudio, obteniendo así los siguientes resultados.

La Figura 2 muestra la ubicación de las estaciones en la ciudad de Ibarra, ellas están ubicadas en las afueras y en el centro de la ciudad. La distancia más corta entre estaciones es de aproximadamente 2 km, mientras que la distancia más lejana es de 4 km aproximadamente. Lamentablemente los datos proporcionados por el Municipio de Ibarra no detallan los equipos utilizados para la toma de datos de O₃ troposférico.

Resultados

Dióxido de Nitrógeno

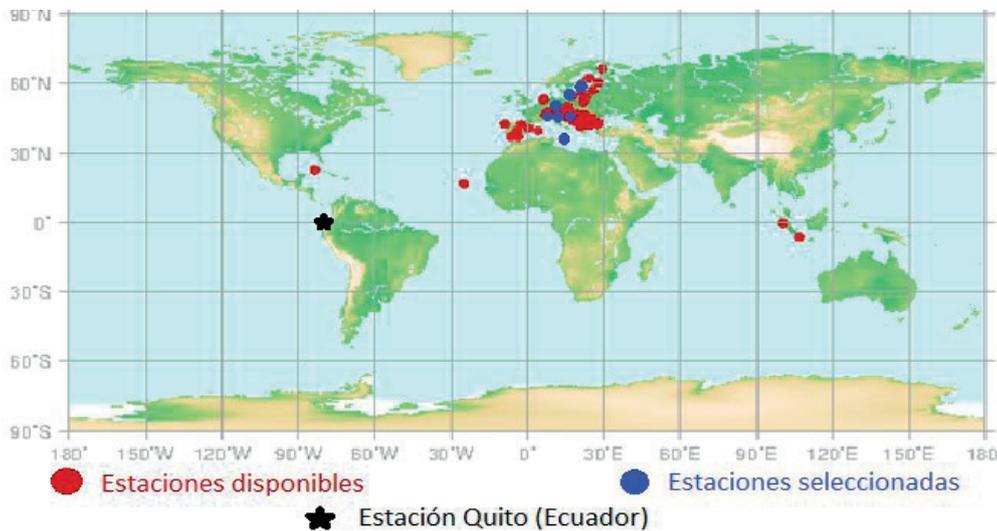


Figura 3. Estaciones de NO₂ seleccionadas².

La Figura 3 muestra las estaciones seleccionadas para el dióxido de nitrógeno. Las marcas en rojo representan todas las estaciones disponibles de NO₂ de la WDCGG (World Data Centre for Greenhouse Gases). De estas estaciones se seleccionaron las estaciones para el estudio de este gas (marcas en azul). Con la excepción de que la estación de Ecuador (Quito e Ibarra) que no es parte de la WDCGG. Las hipótesis planteadas fueron:

Las corrientes de aire influyen la concentración de dióxido de nitrógeno de una ciudad/región.

La concentración de dióxido de nitrógeno es proporcional al aumento de la población de una ciudad/región.

Como se puede apreciar en la Figura 3, Entre estas estaciones escogidas, se encuentran las de ciudades de los siguientes países: Latvia, Suiza, Polonia, Hungría, República Checa, Eslovenia, Malta y Ecuador.

Tal como se puede apreciar en la Figura 4, la ciudad de Quito posee la densidad de población más elevada de las ciudades de estudio, en concordancia con los niveles de NO₂, los cuales son los más altos (Figura 5 y Tabla 1). Uno de los principales motivos de este nivel de concentración es debido a la densidad poblacional que existe en esta ciudad y por la contaminación que produce (contaminación vehicular e industrial principalmente), como también se lo puede apreciar en las diferentes ciudades en donde la densidad poblacional es alta (ciudad de Guayaquil, en 2017 estimó una población de 2644891 habitantes)²⁹. Esto indica que la densidad poblacional es directamente proporcional al nivel de concentración de NO₂.

Otro factor que influye en la concentración de este gas son las corrientes de viento. Las corrientes de aire influyen en la dispersión de los contaminantes, específicamente la dirección y velocidad del viento. La concentración de contaminantes es inversamente proporcional a la velocidad del viento. La dispersión de contaminantes en la atmósfera está influenciada por la dirección del viento. Si la dirección del viento es constante, la misma área estará continuamente expuesta a niveles relativamente altos de contaminación. Si la dirección del viento varía, las concentraciones resultarán relativamente menores debido a que los contaminantes serán dispersados sobre un área mayor³⁰. Debido a estos motivos, las concentraciones de un contaminante pueden variar por: densidad poblacional, corrientes de aire, topografía, altitud, radiación solar, altura de la

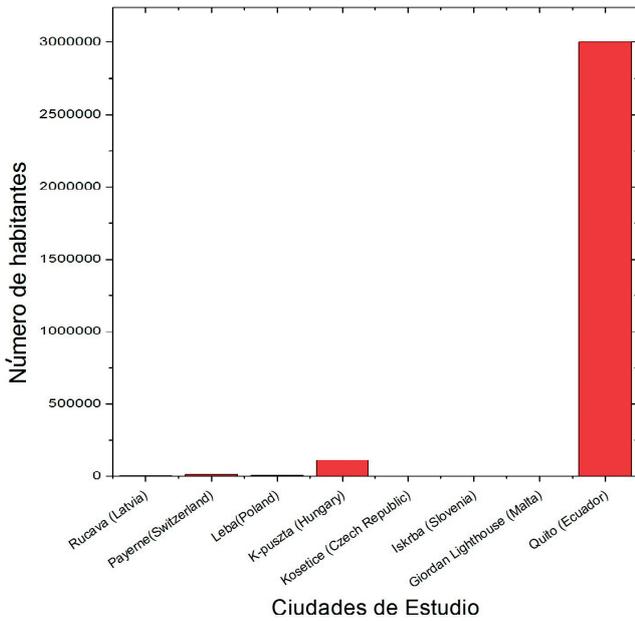
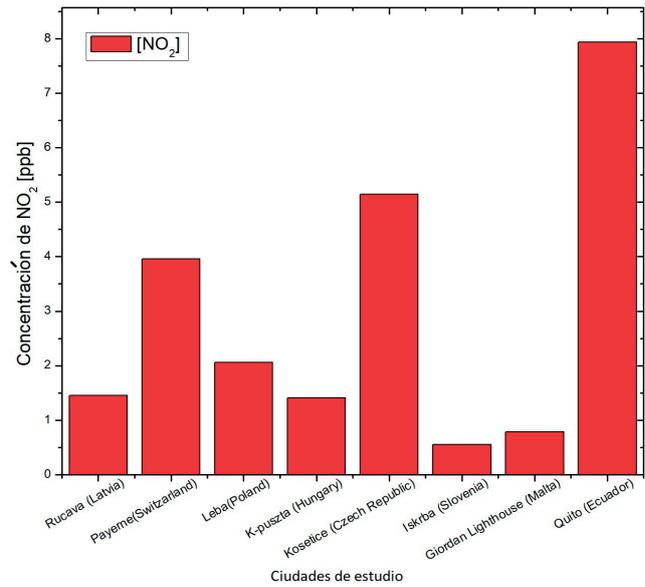


Figura 4. Población en las ciudades de estudio para NO₂²⁸.



Nota: El gráfico de barras representa un promedio de concentración desde enero de 2013 hasta el mes de diciembre del mismo año.

Figura 5. Comparación de la concentración de NO₂ en las estaciones seleccionadas.

Estaciones	Promedio de Concentración de NO ₂ (ppb)	Desviación Estándar
Rucava	1.45212766	0.7366
Payeme	3.958156028	1.7789
Leba	2.061170213	0.6061
K-pusztza	1.404833333	0.5284
Kosetice	5.141843972	1.7148
Iskrba	0.556028369	0.2653
Giordan Lighthouse	0.785505319	0.7855
Quito	7.935436126	1.0798

Tabla 1. Desviación estándar de la concentración de NO₂ y O₃ en cada estación de estudio.

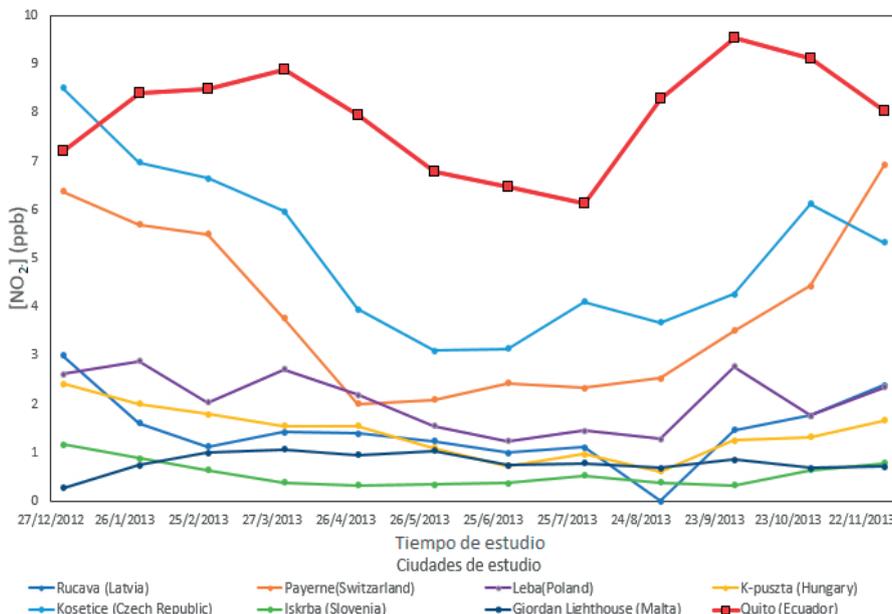


Figura 6. Comparación de niveles de NO₂ en Ecuador con otras latitudes, año 2013

Nota: Cada punto en la gráfica hace referencia a promedios mensuales

de estudio produce una considerable emisión de NO_2 independientemente del número de habitantes que esta posee, como por ejemplo la ciudad de Kosetice (República Checa) que tiene poca densidad de población (Figura 4) pero produce una alta cantidad de NO_2 que emana a la atmósfera. La línea de tendencia de la ciudad de Quito muestra valores más bajos a mitad de año y los valores más altos al final e inicio de año. Esto es debido a que a mitad de año existe más radiación en Ecuador por lo que, el NO_2 con la radiación solar forman O_3 troposférico, bajando la concentración de NO_2 presente en la ciudad de Quito. Por lo contrario, a final e inicio de año, la radiación solar no es tan intensa en comparación a los meses de mitad de año, lo que permite que no se produzca tanto O_3 troposférico, subiendo la concentración de NO_2 .

Según la OMS, los niveles permitidos de concentración de dióxido de nitrógeno corresponden a $40 \mu\text{g m}^{-3}$ (21.27 ppb), por lo que la concentración de dióxido de nitrógeno en la ciudad de Quito está por debajo del valor límite según los estándares de la OMS. Sin embargo, según los datos obtenidos, la concentración de este gas en la ciudad de Quito es la más alta de todas, por lo que se recomienda reducir la quema de biomasa (tanto naturales como incendios antropogénicos) al igual que la quema de combustibles ya que estas actividades son muy probablemente las principales responsables del nivel de concentración de este gas.

Ozono troposférico

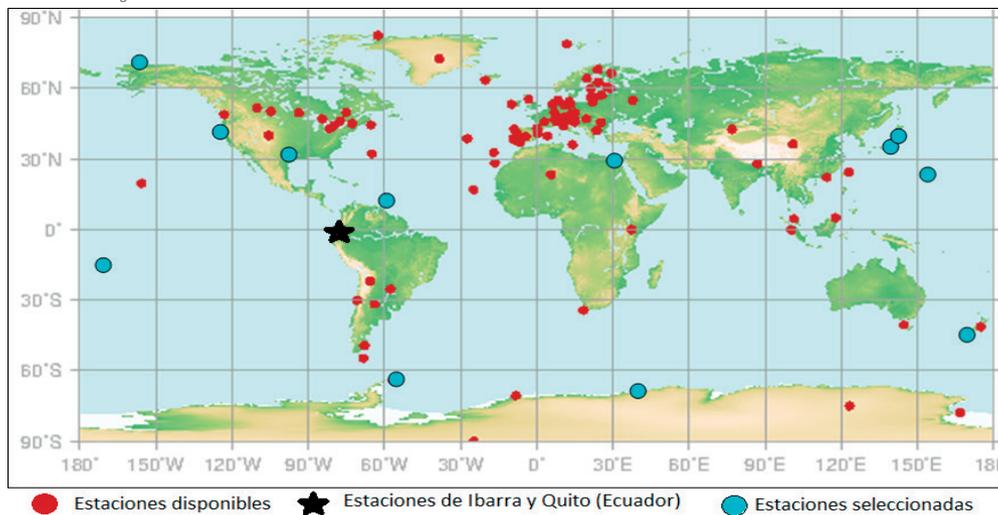
Al igual que durante el análisis de la concentración de NO_2 , primeramente, se presentará las estaciones seleccionadas para el análisis de este gas de efecto invernadero.

A diferencia del dióxido de nitrógeno, para el análisis del

Se puede observar en la Figura 8 que la población de El Cairo supera por mucho a las demás ciudades. La Figura 9 y Tabla 2 muestra que las concentraciones de ozono troposférico de EL Cairo son mucho menores a lo esperado, tomando en cuenta su población (muy alta) y su posición geográfica (propensa a una alta radiación solar). La concentración de este gas en Ecuador es la más baja de todas las ciudades de estudio a pesar de que, sumando la población de las dos estaciones ecuatorianas, son la segunda más alta población entre las ciudades de estudio (Figura 8).

La Figura 10 muestra las mediciones mensuales de este gas de efecto invernadero de las estaciones escogidas durante el tiempo de estudio. Sin embargo, algunas estaciones no cuentan con datos a partir del mes de febrero debido a que en esa fecha suspendieron sus actividades. Las tendencias de concentración de O_3 troposférico de las estaciones ecuatorianas muestran los valores más bajos de las diferentes ciudades analizadas. Esto es algo sorprendente dada la su ubicación geográfica. Ecuador recibe altos niveles de radiación solar con muy pocas fluctuaciones a lo largo del año debido a su Latitud. Sin embargo, la radiación solar no es el único componente necesario para la formación de O_3 troposférico. De estos datos se puede concluir que la concentración de precursores de O_3 (COVs, NO_x , y aerosoles orgánicos secundarios o SOA) es muy baja o que es mucho menor que en las otras ciudades estudiadas. Respecto a las diferentes estaciones estudiadas, no existe una clara tendencia anual del O_3 . Esto debido a que las ciudades de estudio se encuentran ubicadas a diferentes Latitudes, donde dependiendo de la época del año reciben más o menos radiación. En el caso de Ecuador se observa una concentración cuasi constante de 10 ppb.

Figura 7. Estaciones de O_3 troposférico seleccionadas.



de ozono troposférico se contó con una estación adicional en Ecuador, la estación de Ibarra.

Igual que en la Figura 3, en la Figura 7 las marcas en azul son las estaciones que se utilizaron para el análisis de ozono troposférico. Las hipótesis planteadas para este gas son las siguientes:

· Mientras la población de una ciudad/región aumenta, incrementará la concentración de Ozono Troposférico.

· La concentración de Ozono Troposférico será más alta en una ciudad/región si esta recibe una mayor radiación solar.

Tendencias de O_3 en Ibarra

La Figura 11 representa a la concentración de O_3 troposférico de la ciudad de Ibarra donde cada línea representa una estación de dicha ciudad. La tendencia de todas líneas de concentración de O_3 troposférico están muy relacionadas entre sí, aunque se puede notar algunas diferencias entre ellas, las cuales pueden ser debido a un incremento en la actividad antropogénica en el sector donde se encuentra la estación de estudio. En el mes de agosto de 2013 y en el mes de agosto del 2014 se encuentra un incremento en la concentración del gas de estudio probablemente debido a un aumento en la radiación solar en la ciudad de Ibarra, lo que explica que las líneas de

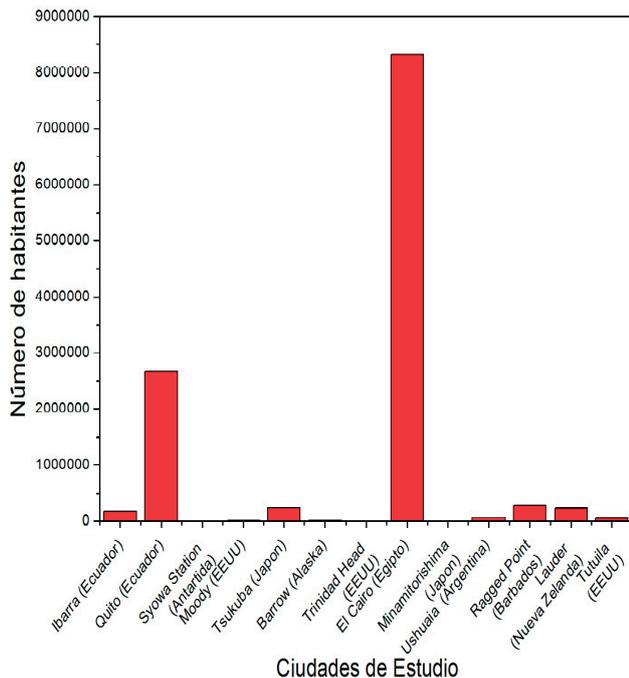


Figura 8. Coblaciones en las diferentes ciudades de estudio²⁸.

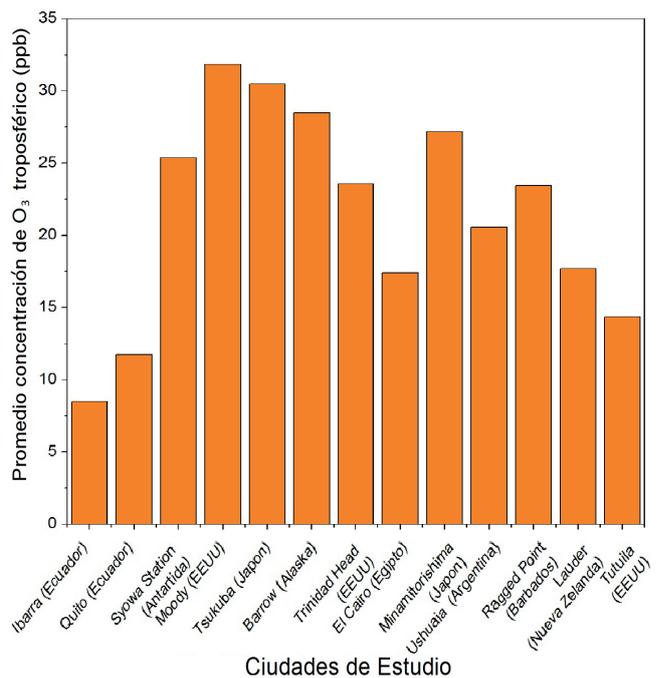


Figura 9. Promedio de Concentración O₃ de troposférico en las ciudades de estudio.

Estación	Promedio concentración O ₃ troposférico (ppb)	Desviación estándar
Ibarra	8.50	5.4037
Quito	11.72	2.7678
Syowa Station	25.34	7.5212
Moody	31.85	3.5982
Tsukuba	30.47	8.4660
Barrow	28.48	5.8622
Trinidad Head	23.57	3.9847
El Cairo	17.37	9.6961
Minamitorishima	27.17	13.5452
Ushuaia	20.54	4.9282
Ragged Point	23.41	5.0043
Lauder	17.71	3.8685
Tutulia	14.36	4.1540

Tabla 2. Desviación estándar de la concentración de O₃ troposférico en cada estación de estudio.

tendencia de todas las estaciones poseen un ascenso en su valor durante los meses mencionados.

Debido a que las estaciones de la ciudad de Ibarra no se realizan la medición de radiación solar, se usaron los datos de radiación solar de la ciudad de Quito asumiendo que este valor no varía mucho entre ambas ciudades. Sin embargo, cabe notar que las dos ciudades se encuentran separadas por una distancia de 116 km y que la altura de Ibarra y Quito son 2215 y 2700 m.s.n.m., respectivamente. El r^2 (0.0032) encontrado en este análisis indica que la radiación solar no es el factor determinante en la formación de O₃ troposférico en Ibarra. Esto debido a que sus valores son relativamente constantes a lo largo del año, día tras día. Es muy probable que quienes con-

trolen la formación y concentración de O₃ son sus precursores. Desafortunadamente, el único precursor que se mide en Ibarra es el NO₂ el cual tampoco muestra una buena correlación con O₃ troposférico ($r^2 = 0.0136$).

La Oscilación Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) consiste en patrones a gran escala acoplados en la circulación atmosférica y la convección profunda. Estas se propagan lentamente hacia el este ($\sim 5 \text{ m s}^{-1}$) a través de la porción de los océanos Índico y Pacífico donde la superficie del mar es cálida. La MJO interactúa constantemente con el océano subyacente e influye en muchos sistemas meteorológicos y climáticos³¹. Las concentraciones de ozono troposférico se pueden ver disminuidas o aumentadas por la MJO; sin embargo, dada la falta de estudios en esta dirección en Ecuador, no se puede afirmar que la MJO tiene un efecto directo en los niveles de O₃ en Ibarra.

Tendencias de O₃ en Quito

Como se mencionó anteriormente, la cantidad de radiación solar puede afectar la concentración de ozono troposférico, por lo que las siguientes ilustraciones se basarán en la relación de estos dos factores. Para el caso de Quito el r^2 (0.4793) encontrado muestra que la radiación solar posee relación en la formación de O₃ troposférico en esta ciudad. La cantidad de radiación solar se adapta de una manera adecuada con la concentración de O₃ troposférico, generando una posible tendencia. Al igual que en Ibarra se encontró que el dióxido de nitrógeno a pesar de ser un precursor de ozono troposférico no es un factor que influye de gran medida ya que su r^2 (0.0045) es muy bajo.

Según la OMS, existe un valor fijo en las directrices de ozono troposférico de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 8h equivalente a 50 ppb, lamentablemente no existe un valor anual reportado por la OMS para este gas³². A pesar de la ausencia de este dato, varias instituciones otorgan valores aproximados en el cual 60 ppb de valor objetivo año no debe ser superado para la protección de la salud humana³³.

Siguiendo este dato y la Figura 9, la concentración de

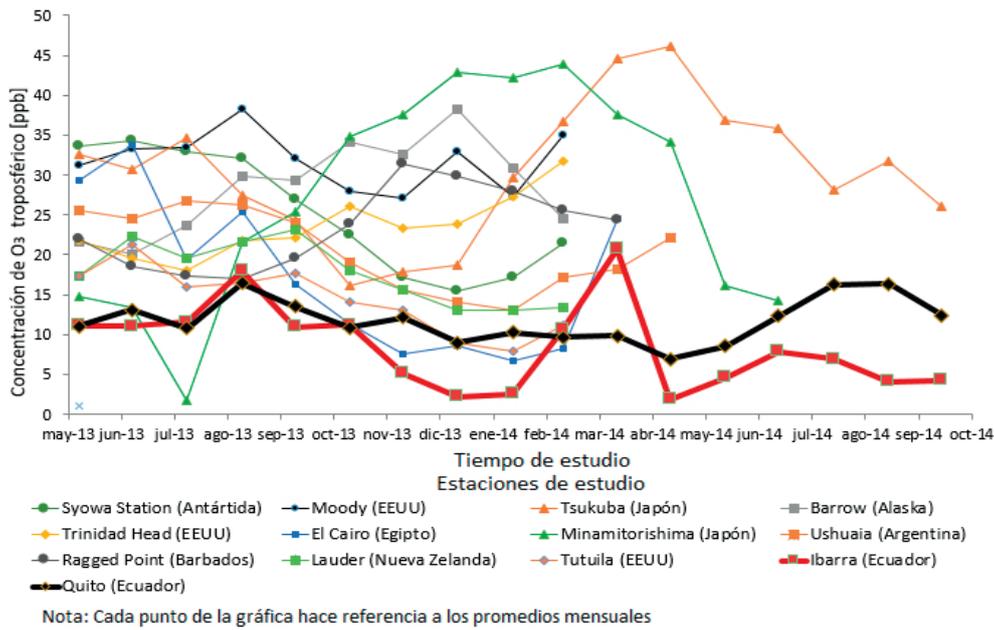


Figura 10. Comparación de niveles de concentración de O_3 troposférico en Ecuador y las ciudades de estudio, año 2013.

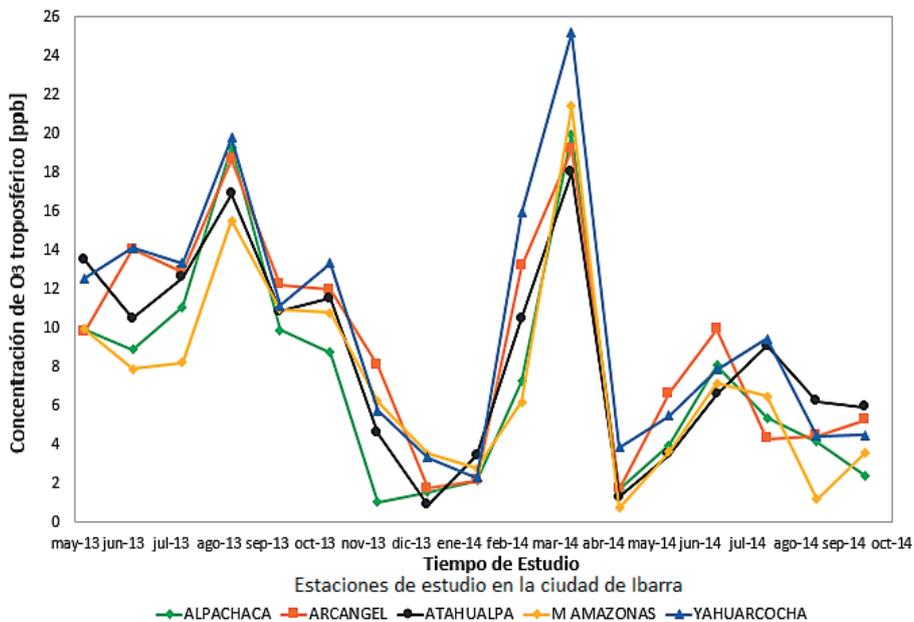


Figura 11. Mediciones de O_3 troposférico en la ciudad de Ibarra

ozono troposférico de las dos estaciones en Ecuador (Quito e Ibarra) se encuentra bajo el valor permitido. Sin embargo, se recomienda que, no solo las autoridades ayuden a reducir la concentración de este gas, sino a la comunidad en general debido a que, por más que se encuentre bajo el valor autorizado, puede ser perjudicial para la salud humana.

Conclusiones y recomendaciones

Con estas consideraciones se concluye en el presente trabajo de investigación que quienes controlan la formación y concentración de O_3 son sus precursores. Desafortunadamente, el único precursor que se mide en Ibarra y Quito es el NO_2 el cual no muestra una buena correlación con O_3 troposférico. La cantidad de radiación solar también es un factor que influye en

la concentración de ozono troposférico; sin embargo, aunque se encontró una buena correlación con los niveles de O_3 en Quito, este no parece ser quien controle los niveles de O_3 . Es necesario poder medir los demás precursores del O_3 para poder entender sus fuentes y la influencia de estos en la calidad del aire local.

Los niveles de concentración de dióxido de nitrógeno y ozono troposférico en las dos estaciones de Ecuador (Quito – Ibarra) poseen valores por debajo a los permitidos según la Organización Mundial de la Salud y la Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental respectivamente, por lo que, la calidad de aire de Ecuador cuenta con valores adecuados en concentración de NO_2 y ozono troposférico en comparación de las diferentes ciudades tomadas en cuenta para este estudio.

Según los resultados obtenidos en la presente investigación, para la concentración de NO_2 sí existe una influencia del

número de habitantes de la ciudad/región ya que una población mayor producirá un aumento de contaminación. Tomando el mismo factor (número de habitantes), la concentración de O₃ troposférico no se ve influenciada por la población de un sector, ya que el principal factor de influencia en la concentración de este gas es la cantidad de radiación solar reportada. Por último, las concentraciones de ambos gases se pueden ver alteradas por densidad poblacional, corrientes de aire, topografía, altitud, radiación solar, altura de la capa de la mezcla³⁰.

A pesar de que, como ya se mencionó, las concentraciones de NO₂ y ozono troposférico se encuentran por debajo de los permitidos según la ONU, se recomienda que las industrias y la sociedad en general tomen conciencia sobre la gran problemática de la contaminación atmosférica ya que está en nuestras manos que las siguientes generaciones puedan gozar de un aire limpio y consecuentemente una calidad de vida digna como todos nos merecemos. De igual manera, se recomienda que los municipios y los gobiernos propongan mejoren el monitoreo tanto de gases como de partículas atmosféricas para tener una mejor incertidumbre sobre la calidad del aire que respiramos y de esta manera generar leyes que permitan reducir la emisión de estos contaminantes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Global Atmosphere Watch por proveer gran parte de los datos que fueron usados en este estudio. De igual manera se agradece el apoyo económico por parte de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM a través del proyecto PAPIIT IA108417.

Bibliografía

1. Silva Arroyave SM, Correa Restrepo FJ. Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semest Económico* 2009; 12: 13-34.
2. Centro mundial de datos para gases de efecto invernadero. WMO WDCGG DATA SUMMARY. 39th ed. Japan Meteorological Agency: Tokyo, 2015.
3. Restrepo C. ¿Cómo el deshielo del Ártico afecta el desarrollo ambiental y humano? Col. MARYMOUNT. 2014; : 28.
4. Jacob D. Introducción a la Química Atmosférica. Princeton University: Princeton, 1999.
5. United Nations Environment Programme. GEO5 (Global Environment Outlook). Nairobi, 2012.
6. Fox S. The Top Ten Greenhouse Gases. *Pop. Sci.* 2009.
7. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recent Global Monthly Mean CO₂. *Glob. Monit. Div.* 2018.
8. Martín B. Qué es el dióxido de nitrógeno y por qué afecta tanto a la salud y el medio ambiente. *D. La Inf.* 2016.
9. U.S. Greenhouse Gas Inventory Program. Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values. Washington D. C., 2002.
10. United State Environmental Protection Agency. Basic Information about NO₂. Nitrogen Dioxide Pollut.
11. Fundación Crana. Óxidos de nitrógeno (NOX = NO + NO₂). *Fund. Crana.* .
12. IDEAM. OZONO TROPOSFÉRICO. .
13. Universidad Complutense de Madrid. Lluvia ácida. .
14. Redacción National Geographic. Lluvia ácida. *Natl. Geogr. Mag.* 2010.
15. Consejería de Salud de la Región de Murcia. Dióxido de Nitrógeno. *Cons. Salud la Región Murcia.* .
16. Organización Mundial de la Salud. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. 2005.
17. GreenFacts. Ozono. *GreenFacts.* .
18. González Kirchner B. Ozono troposférico. 2009.
19. Consejería de Sanidad y Consumo de la Región de Murcia. El ozono troposférico y sus efectos sobre la salud. *Cons Sanid y Consum la Región Murcia;* : 26.
20. Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. Ozono troposférico. El mosaico América del Norte Panor los Probl Ambient más Relev.
21. Organización Mundial de Meteorología. GAW stations network and other measurements. *Glob. Atmos. Watch.* .
22. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra. Ibarra, ciudad a la que siempre se vuelve. .
23. Gobierno Autónomo Descentralizado de San Miguel de Ibarra. PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN IBARRA. .
24. Bolaños C. Cada año aumenta un 8 % el parque automotor en Ibarra. 2016.
25. Rosero M. Actividades profesionales y comercios hacen que Quito sea la capital económica. *El Comer.* 2014.
26. Pacheco M. 50 000 automotores nuevos circulan en las vías de Quito. *El Comer.* 2014.
27. Redacción Quito. La nueva zona industrial de Quito empieza a edificarse. *Rev. Líderes.* 2013.
28. Population.City. Poblaciones de países y ciudades en todo el mundo. *Population.City.* .
29. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Guayaquil en cifras. .
30. Venegas LE, Mazzeo NA. LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA. .
31. Zhang C. Madden-Julian Oscillation. Miami, Florida, USA, 2005.
32. World Health Organization. Ambient (outdoor) air quality and health. *World Heal. Organ.* 2016.
33. Dirección general de sostenibilidad y control ambiental. Calidad del Aire 2016. 2016.

Recibido: 20 febrero 2018

Aprobado: 21 mayo 2018