Fondo Editorial
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA:
Conceptos, investigación y aplicaciones



Julio Miguel Ángeles Suazo
Jairo Edson Gutiérrez Collao
Jack Brando Pérez Hijar
Diana Estrella Orellana Reyes
Merly Yadira Chávez De laTorre

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO

Fondo Editorial
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA:
Conceptos, investigación y aplicaciones

Julio Miguel Ángeles Suazo
Jairo Edson Gutiérrez Collao
Jack Brando Pérez Hijar
Diana Estrella Orellana Reyes
Merly Yadira Chavez De la Torre

Ahuaycha - Tayacaja
2026

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA:
Conceptos, investigación y aplicaciones

© **Julio Miguel Ángeles Suazo**
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8327-9032

Jairo Edson Gutiérrez Collao
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8984-6245

Jack Brando Pérez Hijar
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7907-6934

Diana Estrella Orellana Reyes
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2078-6392

Merly Yadira Chavez De la Torre
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8543-7644

© Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo (UNAT) - Fondo Editorial.
Dirección: Universitaria S/N, Ahuaycha, Tayacaja, Huancavelica - Perú
E-mail: fondoeditorial@unat.edu.pe
Telf: (+51) 949 952 222
Web: https://unat.edu.pe

Primera edición digital: Julio 2026

Libro digital disponible en https://fondoeditorial.unat.edu.pe

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-08235

ISBN: 978-612-5123-41-1

Ahuaycha – Tayacaja
2026

PRÓLOGO

Este libro nace de la necesidad urgente de entender y abordar una de las problemáticas más críticas de nuestro tiempo: la contaminación del aire. Cada capítulo busca fomentar una toma de conciencia y un conocimiento profundo que nos permita no solo reconocer la magnitud del problema, sino también actuar para remediarlo. La solución no reside exclusivamente en la ciencia o la tecnología, aunque ambas son esenciales; lo verdaderamente clave está en nuestra capacidad de modificar nuestros hábitos, políticas y decisiones, tanto a nivel individual como colectivo. Si bien la contaminación atmosférica es un reto global, la lucha por un aire más limpio también representa una oportunidad para promover la innovación, la cooperación internacional y la sostenibilidad.

Por esta razón, el presente libro de investigación ofrece una visión fundamentada en estudios y conceptos clave de la ingeniería ambiental, enfocados en la contaminación atmosférica y el cambio climático, así como en las amenazas e impactos ambientales derivados de ambos fenómenos. Asimismo, se incorporan conocimientos científicos y de ingeniería, diseñados para ser accesibles a profesionales, educadores y estudiantes. Este enfoque busca también situar adecuadamente al público general en temas de contaminación del aire, proporcionando una comprensión más profunda y accesible del desafío que enfrentamos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRÓLOGO **3**

ÍNDICE DE CONTENIDO **4**

CAPITULO I **6**

LA ATMÓSFERA: ASPECTOS GENERALES **6**

DEFINICIÓN 6

CAPAS DE LA ATMÓSFERA 7

CONVERSIÓN DE UNIDADES 10

COMPOSICIÓN QUÍMICA ATMOSFÉRICA 12

Especies traza *12*

CONTAMINANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS 15

Contaminante primario (CP) *15*

Contaminante secundario (CS) *16*

FUENTES NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS 17

CAPÍTULO II **19**

VARIACIÓN TEMPORAL DE NO2 ..... **19**

SENSOR OMI 19

CAPÍTULO III **22**

VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA Y LA COLUMNA TOTAL DE OZONO EN LA PROVINCIA HUANCAYO Y LA PROVINCIA MARCAPOMACOCHA **22**

MÉTODOS Y MATERIALES 22

CAPÍTULO IV **32**

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA **32**

INTRODUCCIÓN 32

OBJETIVOS 32
INFLUENCIA DE LA LATITUD 34
CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y NUBLADAS 35
CAPÍTULO V 37
MODELO HYSPLIT 37
MATERIALES Y MÉTODOS 37
CONCLUSIONES 41
REFERENCIAS 42
APÉNDICE 01: 46
ECUACIONES DIFERENCIALES Y SUS SOLUCIONES 46
APÉNDICE 02: 51
DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TUV 51

CAPITULO I

La atmósfera: Aspectos generales

Definición

El estudio de contaminación atmosférica se refiere de manera específica a la región de la tropósfera más próxima del suelo, región en la cual realizamos habitualmente todas nuestras actividades. En términos de localización geográfica la contaminación del aire es estudiada principalmente en las ciudades o zonas rurales. Los contaminantes del aire pueden ser atendidos como formas de energía que implican riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. La cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera se viene incrementando continuamente a partir de la Revolución Industrial, evento que tuvo inicio en la segunda mitad del siglo XVIII, años en los que se vio la importancia de la producción en masa. Se desarrollaron medios de transporte (por ejemplo: industria automotriz), que obtienen energía para su locomoción a partir de combustibles, este es uno de los responsables del incremento de la cantidad de dióxido de carbono en el aire y otros gases nocivos para la salud, como el nitrógeno y los óxidos de nitrógeno. Los efectos de la contaminación atmosférica pueden tener carácter local, cuando la fuente de emisión se encuentra en áreas cercanas o próximas; o global, cuando pueden ser observados en regiones distantes a la fuente de emisión (otras regiones, países o continentes), debido a su concentración puede afectar el equilibrio del planeta (Sportisse 2010).

Existen 4 principales procesos que afectan contaminación atmosférica y la salud de la población:

- Emisión de Material particulado
- Reducción de la Capa de ozono
- Efecto Invernadero
- Formación de Lluvia Ácida

Capas de la Atmósfera

La estructura atmosférica puede ser clasificada de diversas formas, sin embargo, la clasificación más generalizada es la distinción por la temperatura, como se ve en la figura 1.1. A partir del cual se tiene la siguiente división:

Tropósfera

La troposfera recibe su nombre del griego "Tropos", que significa cambio, debido a que es una capa en constante transformación, en la que los gases se mezclan de manera continua. Su grosor varía entre 8 y 14 kilómetros (aproximadamente 5 a 9 millas) en las latitudes medias, y se hace más delgada hacia los polos, tanto en el Norte como en el Sur. En esta capa se encuentra el aire que es adecuado para la respiración humana, además de ser el lugar donde se forman las nubes. La troposfera es también la capa más densa de la atmósfera, concentrando aproximadamente tres cuartas partes de toda su masa. La composición del aire en esta región es, en su mayor parte, 78%

nitrógeno, 21% oxígeno, y el restante 1% está compuesto por argón, vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases (Liou 2002).

Estratósfera

Sobre la troposfera se encuentra la estratósfera, que recibe su nombre del griego "Strata", que significa capa, debido a la estructura en capas que presenta. Esto se debe a la ausencia de tormentas y turbulencias en esta capa, lo que impide la mezcla de los gases. Como resultado, el aire en la parte inferior de la estratósfera es frío y denso, mientras que en la parte superior es más cálido y ligero. Este fenómeno se debe a la inversión térmica, que provoca un aumento de la temperatura a medida que se asciende, lo cual es contrario a lo que ocurre en la troposfera, donde la temperatura disminuye con la altitud. Para ilustrarlo, si se ascendiera por una montaña que llegara a la estratósfera, sería necesario quitarse la ropa de abrigo a medida que se sube, en lugar de ponérsela, como ocurre en la troposfera. No obstante, no existen montañas lo suficientemente altas para alcanzar la estratósfera, por lo que no es algo de lo que debas preocuparte. Esta capa tiene un grosor aproximado de 35 kilómetros, y en ella se encuentra la capa de ozono, fundamental para la vida en la Tierra. La capa de ozono es crucial porque protege a los seres vivos de la radiación ultravioleta (UV), absorbiendo la mayor parte de la radiación UV más energética que emite el Sol (Liou 2002).

Mesósfera

La mesósfera se encuentra entre la estratósfera y la termósfera, y su nombre proviene del griego "Meso", que significa "medio". Esta capa tiene un grosor de aproximadamente 35 kilómetros. Se trata de la capa superior de la atmósfera, donde los gases están totalmente combinados, en lugar de estratificados por masas. Aunque el aire sigue siendo muy delgado, lo que haría imposible respirar en esta capa, contiene más gases que la termósfera (Liou 2002).

Termósfera

La termósfera se encuentra entre la exosfera y la mesosfera. Su nombre proviene del griego "Thermo", que significa calor, y en esta capa la temperatura puede llegar a alcanzar los 2000°C. Sin embargo, si estuvieras en la termósfera, sentirías un frío extremo, ya que hay escasez de moléculas para transmitir el calor a tu cuerpo. Esto también implica que no hay suficientes moléculas para que las ondas sonoras viajen en esta capa. La termósfera tiene un grosor de aproximadamente 513 kilómetros (319 millas), lo que la hace mucho más extensa que las capas internas de la atmósfera, aunque no tan gruesa como la exósfera (Liou 2002).

Exósfera

La exosfera es la capa más externa de la atmósfera terrestre. El prefijo “Exo” significa “externo” y es el mismo que se utiliza para referirse a insectos como los saltamontes, que tienen una estructura rígida llamada «exoesqueleto» en la parte exterior de su cuerpo. La exósfera

marca el límite final de nuestra atmósfera, separándola del espacio exterior. Su grosor es de aproximadamente 10,000 kilómetros (6,200 millas), lo que la hace comparable en tamaño al diámetro de la Tierra (12,742 km), un valor realmente grande. Esta capa está compuesta principalmente por gases como el hidrógeno y el helio, aunque su concentración es extremadamente baja (Liou 2002).

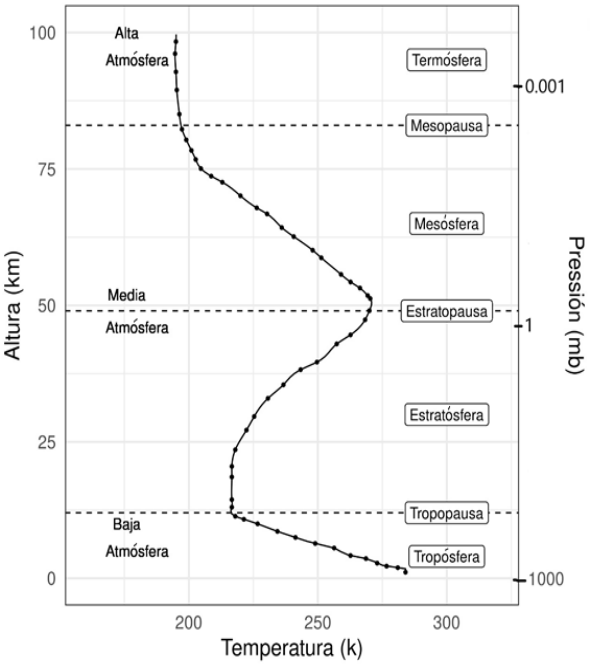


Figura 1.1 Capas de la Atmósfera. Fuente: Adaptado de Liou 2002**.**

Conversión de unidades

Es importante establecer las unidades de medidas de la concentración de un contaminante atmosférico, ya que nos permite homogeneizar y

comparar con los estándares de calidad ambiental (establecido por el Ministerio del Ambiente) o guías de calidad ambiental (establecido por la Organización Mundial de la Salud), para posteriormente determinar el daño en la salud de la población humana; por ello se presenta las siguientes ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3; en las cuales se establece la conversión de mol*mol-1 a unidades de partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) y partes por trillón (ppt).

$$\mathbf{1ppm} = \mathbf{10^{-6}}\,\frac{\mathbf{mol\ de\ contaminante}}{\mathbf{mol\ de\ aire}} \qquad (1.1)$$

$$\mathbf{1ppb} = \mathbf{10^{-9}}\,\frac{\mathbf{mol\ de\ contaminante}}{\mathbf{mol\ de\ aire}} \qquad (1.2)$$

$$\mathbf{1ppt} = \mathbf{10^{-12}}\,\frac{\mathbf{mol\ de\ contaminante}}{\mathbf{mol\ de\ aire}} \qquad (1.3)$$

Así mismo, se denota la conversión de unidades de microgramos por metros cúbicos a ppm y viceversa (ecuación 1.4):

$$\frac{\boldsymbol{\mu g}}{\mathbf{m^3}} = \mathbf{M} * \mathbf{ppm} * \mathbf{273.15} * \frac{\mathbf{p(atm)}}{\mathbf{22.414} * \mathbf{T(K)}} \qquad (1.4)$$

Donde, M, es el peso molecular del contaminante atmosférico, ppm es la concentración del contaminante atmosférico en partes por millón, p es la presión del lugar en unidad de atmósfera y T es la temperatura en grados Kelvin (Sportisse 2010).

Por otro lado, para convertir de Unidad Dobson (equivalente a 1 mili atmósfera por centímetro) a ppb, para un perfil vertical, según Ziemke, Chandra & Bhartia, (2001), se establece que:

$$\Omega = A \int_{Pinf}^{Psup} dP\, X \qquad (1.5)$$

Donde Ω; son la concentración de un contaminante atmosférico en 0.01*atm*cm (Unidad Dobson) que esta entre dos presiones Pinf(presión inferior) y Psup (presión superior), donde $P_{inf}<P_{sup}$, P presión en hecto pascales, X concentración de un contaminante atmosférico en ppm y A es una constante. Cabe señalar que la ecuación 1.5 se puede utilizar para cualquier conversión de unidades en función del perfil vertical de la atmosfera. Un claro ejemplo es para el ozono troposférico, donde se da la relación de $X = 1.27 * \frac{\Delta\Omega}{\Delta P}$.

Composición Química atmosférica

Especies traza

Proporción de mezcla

La fracción molar de una especie X, CX, se define como la relación del número de moles de X respecto al número de moles de aire. También se conoce como la proporción de mezcla.

El aire está compuesto principalmente por nitrógeno molecular (N2) y de oxígeno molecular (O2). En el aire, CN2= 0.78 mol*mol-1, CO2=

0.21 mol*mol-1, el argón es la tercera especie con CAr = 0.0093 molmol-1.

Sus fracciones molares se miden en ppmv (10-6 mol*mol-1, parte por millón de volumen), ppbv (10-9 mol*mol-1, parte por mil millones de volumen) o pptv (10-12 mol*mol-1, parte por trillón de volumen). La notación "v" se omite a menudo, de forma más explícita se muestra la tabla 1.1 para los principales gases que componen la atmósfera (Sportisse 2010).

Tabla 1.1 Resumen de la composición química del aire seco (con algunos de los principales componentes de la atmósfera): Unidades: 1 ppmv equivale 10^{-6} mol.mo^{1} y 1 ppbv equivale 10^{-9} mol.mol^{-1}. Fuente: (Sportisse 2010).

Especies	Símbolo	Fracción de mezcla
Nitrógeno	N_2	780 000 ppmv
Oxigeno	O_2	210 000 ppmv
Argon	Ar	9300 ppmv
Dióxido de carbono	CO_2	355 ppmv
Ozono	O_3	1 ppmv – 10 ppmv
Metano	CH_4	1.8 ppmv
Oxido nitros	N_2O	314 ppmv

Ley de Gas ideal

El aire puede ser visto como un gas ideal, satisfaciendo la relación:

$$P = NRT \quad (1.6)$$

Siendo, P la presión (en Pa), T la temperatura (en K), $R = 8.314 Jmol^{-1}K^{-1}$ la constante universal de los gases y N el numero de moles por volumen de aire. Una formulación alternativa es:

$$P = nk_BT \quad (1.7)$$

Con n, el número de moléculas por volumen de aire y $k_B = 1.38 * 10^{-23} JK^{-1}$ la constante de Boltzmann, definida como R/A_v donde A_v es el numero de Avogadro ($6.02 * 10^{23} molecula * mol^{-1}$).

Una equivalente ecuación es, para aire seco,

$$P = \rho r_{air} T \quad (1.8)$$

Con ρ la densidad del aire (en Kgm^{-3}) y $r_{air} = R/M_{air}$, donde M_{air} es la masa molar (peso molecular) del aire seco (Sportisse 2010).

Ejercicio 1: Calcule la masa molar del aire seco.

Datos: $M_{N2} = 28g * mol^{-1}, M_{O2} = 32g * mol^{-1}$ y $M_{Ar} = 40g * mol^{-1}$

Solución:

M_{Xi} Es la masa molar de las especies X_i, con $M_{air} = \sum_i C_{Xi} M_{Xi}$ manteniendo las 3 especies más abundantes en la atmósfera, obtenemos:

$$M_{air} \approx 28 * 0.78 + 32 * 0.21 + 40 * 0.01 = 28.9 gmol^{-1}.$$

Las condiciones estándar termodinámicas son definidos por:

$$P = 1.013 * 10^5 Pa \ (1013 \ hPa \ o \ 1atm, valor \ medido \ a \ nivel \ del \ mar) \text{ y } T = 273.15K.$$

Contaminantes primarios y secundarios

Contaminante primario (CP)

Los contaminantes primarios son aquellos que no han sufrido ningún proceso o cambio en su estructura física y química después de ser emitidos o liberados a la atmósfera. Tal como el dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2), responsables por producir lluvia ácida y ozono troposférico, que son considerados contaminantes secundarios. Para tener una idea general sobre la distribución de los contaminantes emitidos en diversas regiones del mundo, podemos usar diversas plataformas de imágenes de satélites, por ejemplo, en la figura 1.2 se muestra la distribución espacial de la concentración del NO_2.

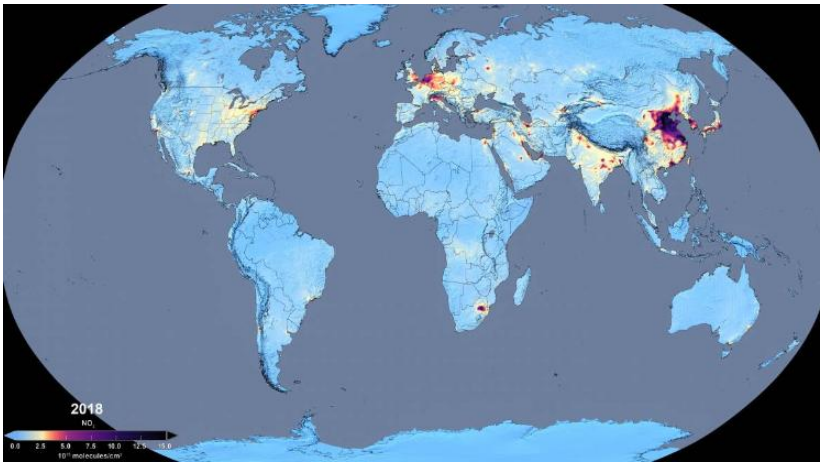


Figura 1.2 Concentración global de dióxido de Nitrógeno, media mensual, 2018.

Fuente: https://airquality.gsfc.nasa.gov/no2

Contaminante secundario (CS)

Estos son formados mediante procesos químicos y tienen lugar en la atmósfera, provienen especialmente de contaminantes primarios y algunas son especies no contaminantes dispersos en la atmósfera.

Algunos de los contaminantes secundarios de mayor importancia debido a sus efectos son: el ácido sulfúrico (H_2SO_4) formado por la oxidación del dióxido de azufre (SO_2); el dióxido de nitrógeno (NO_2) formado por la oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) y el ozono O_3 que se forma a partir del oxígeno y del NO_2.

De manera resumida la formación de contaminantes secundarios puede ser esquematizada según la Ecuación 1.9:

$$CS = CP + TRANSFORMACIÓN\ FISICO\text{-}QUÍMICA \quad (1.9)$$

Un efecto de la contaminación atmosférica claramente percibidos en las ciudades, es la formación de smog fotoquímico, compuesto por contaminantes secundarios entre los cuales podemos destacar el ozono troposférico. A nivel global la variación espacial de ozono troposférico mensualmente (ver Figura 1.4), depende de la cantidad de dióxido de nitrógeno (Ver Figura 1.2) y radiación solar ultravioleta disponible (Figura 1.3), en consecuencia, es posible observar mayores concentraciones en regiones de latitud media y bosques densamente poblados.

Fuentes naturales y antropogénicas

Cuando se trata de esclarecer las fuentes de contaminación es necesario hacer una distinción entre las fuentes naturales y antropogénicas (es decir, emisiones que provienen de las actividades humanas). Las fuentes naturales que provocan la contaminación atmosférica son producto de emisiones de: volcanes, biogénicas, sales marinas a través de burbujas o estallidos productos del oleaje del mar. Por otra parte, las fuentes Antropogénicas son producto de las actividades desarrollados por el hombre como, por ejemplo; producto de la combustión de motores (que produce emisiones de dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno y otros).



Figura 1.5 Fuente Antropogénico, emisión de gases por parte de chimeneas industriales

Fuente: https://science.nasa.gov/climate-change/causes/

CAPÍTULO II

Variación temporal de NO2

Sensor OMI

El Monitor de Ozono (OMI) es un instrumento instalado en la nave espacial Aura de la NASA, que está en órbita desde el 14 de julio de 2004. El satélite Aura sigue una órbita polar sincronizada con el sol, cruzando el ecuador a las 13:45 hora local. El OMI es un espectrómetro de observación en el nadir, capaz de medir la luz solar reflejada y dispersa dentro de un rango específico de los espectros ultravioleta y visible. Su resolución es de unos 0,63 nm en el canal visible (349-504 nm) y de 0,42 nm en el canal ultravioleta (307-383 nm). Además, el OMI permite medir columnas y perfiles de ozono, así como aerosoles, nubes, irradiancia UV en la superficie y gases traza como NO2, SO2, HCHO, BrO y OClO (Levelt et al. 2006).

Resultados

Variación anual de NO_2

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un contaminante atmosférico clave que proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles en vehículos de motor, plantas de energía y procesos industriales. La concentración de NO_2 en la atmósfera muestra variaciones estacionales que pueden tener implicaciones importantes tanto para la salud pública como para el medio ambiente. En esta discusión, se

abordarán los factores que influyen en las fluctuaciones estacionales del NO_2, las implicaciones para la calidad del aire y las políticas de gestión ambiental.

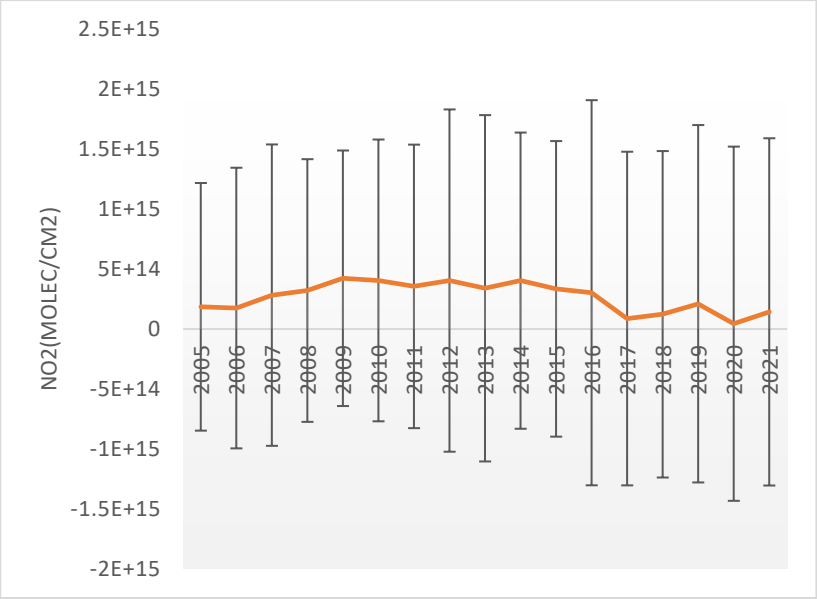


Figura 2.1 Variación anual de NO_2.

Conclusiones

La variabilidad estacional de las concentraciones de NO_2 es un fenómeno complejo, determinado por una interacción de factores tanto naturales como antropogénicos. Las emisiones de NO_2, el comportamiento del tráfico, las condiciones meteorológicas y las actividades humanas influyen directamente en la calidad del aire y en la salud pública. Es esencial considerar las fluctuaciones estacionales

al diseñar políticas de gestión ambiental, con el fin de mitigar los efectos perjudiciales de este contaminante. La adopción de políticas enfocadas en reducir las emisiones de NO_2 y promover tecnologías más limpias puede tener un impacto significativo en la mejora de la calidad del aire y, a su vez, en la salud humana y la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

CAPÍTULO III

Variación de la radiación ultravioleta y la columna total de ozono en la provincia Huancayo y la provincia Marcapomacocha

Sabemos que en la región de Junín se evidencia altos niveles de radiación solar y por ende radiación ultravioleta del tipo UV-B ya que estamos en una zona tropical de baja concentración de columna total de ozono y por el cual alta radiación ultravioleta del tipo b especialmente, ya que esta presenta un riesgo para la salud y la vida de los seres vivos .en el cual este trabajo consiste en saber la variabilidad de la columna total de ozono desde el año 2004 hasta 2012(mes de enero) y también la variabilidad de la radiación ultravioleta en las siguiente longitudes de onda 305, 310, 324, 380nm para la ciudad de Huancayo y Marcapomacocha mensual y anual.

Métodos y materiales

Los datos obtenidos se tomaron del satélite EOS AURA OMI desde el 2004-2012(enero). Para el manejo de datos se utilizó Microsoft Excel, Matlab en el cual se tomó los datos de columna total de ozono y de la irradiación a 305, 310, 324, 380nm

Resultados

Variación mensual de la radiación uv y la columna total de ozono

En la figura se muestran los valores promedios de la radiación UV espectral (305, 320, 340, 380nm) en Huancayo y Marcapomacocha en los últimos 7 años y 2012(enero) y respecto a los meses.

A longitud de onda 305nm

$$y = o3^{0.0027x^2\ -0.0371x+\ 0.9761} \qquad (3.1)$$

Donde:

Y=irradiación a 305nm

O_3=columna total de ozono

X=tiempo

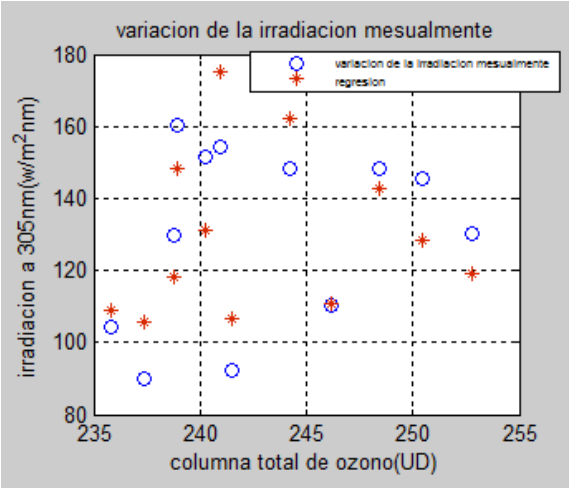


Figura 3.1 Irradiación a 305nm vs Columna total de ozono

A longitud de onda de 324nm

$$y = o3^{\,0.0016\,x^2\; -0.0221\,x+\; 1.1983} \qquad (3.2)$$

Donde:

Y=irradiación a 324nm

O_3=columna total de ozono

X=tiempo

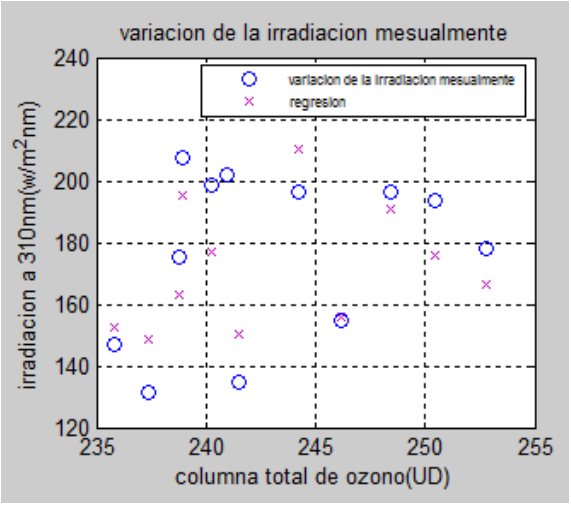


Figura 3.2 Irradiación a 310nm vs Columna total de ozono

A longitud de onda de 380nm

$$y = o3^{\,0.0014x^2\; -0.0196x+\; 1.2881} \qquad (3.3)$$

Donde:

Y=irradiación a 380nm

O_3=columna total de ozono

X=tiempo(meses)

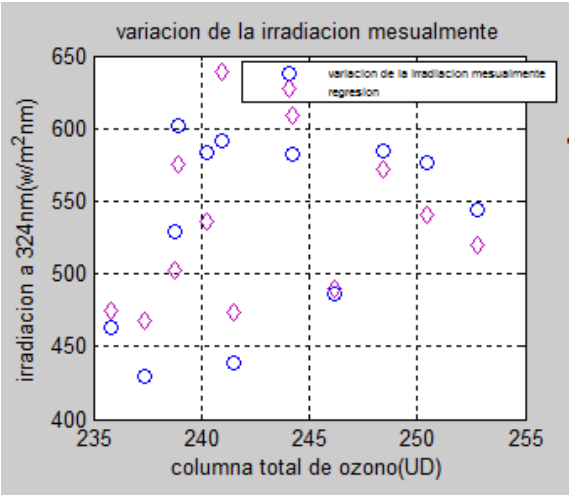


Figura 3.3 Irradiación a 340nm vs Columna total de ozono

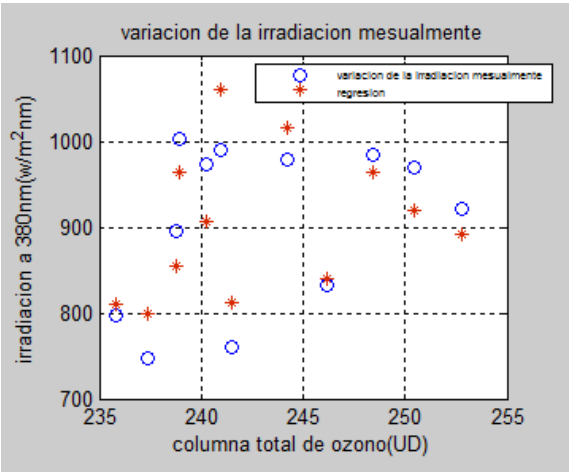


Figura 3.4 Irradiación a 380nm vs Columna total de ozono

Se estableció las siguientes ecuaciones mediante el programa Matlab, y se ajustó a interpolar linealmente:

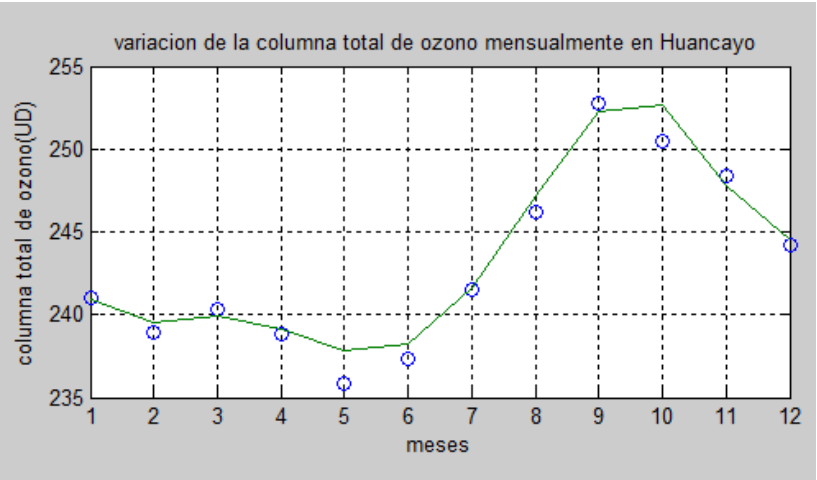


Figura 3.5 Variación temporal de columna total de ozono

$$
\begin{aligned}
yo3 = (&0.0024 * x^6 - 0.0883 * x^5 + 1.2402 * x^4 \\
&- 8.3901 * x^3 + 28.8567x^2 \\
&- 48.0312x + 271.0026) \\
&* sen((0.0001x^6 - 0.0037x^5 \\
&+ 0.0559x^4 - 0.4338x^3 + 1.8067x^2 \\
&- 3.8617x + 3.4947)x \\
&+ (-0.0013x^6 + 0.0441x^5 \\
&- 0.6062x^4 + 4.3093x^3 - 17.0062x^2 \\
&+ 34.2197x + 579895))
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

Donde:

yo3: columna total de ozono en Huancayo (UD)

X: tiempo en meses

Variación anual de la radiación UV y la columna total de ozono

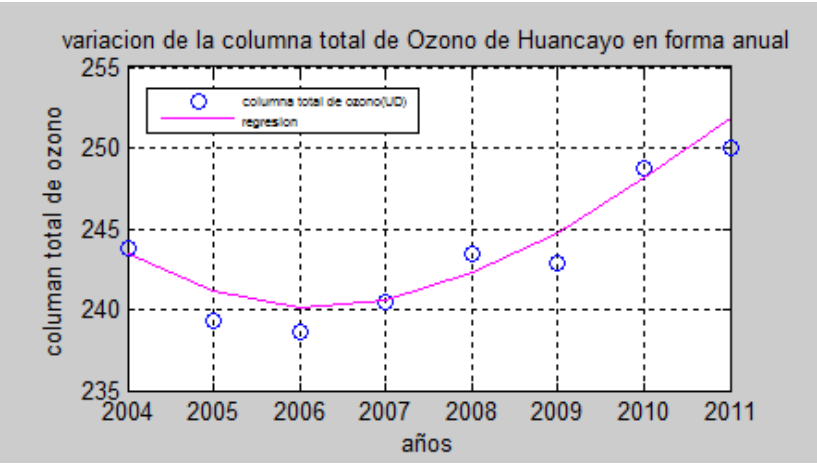


Figura 3.6 Variación annual de Columna total de ozono en Huancayo

$$
\begin{aligned}
yo3 = (&-0.0183 * x\text{^}5 + 0.3981 * x\text{^}4 - 3.4083 \\
&* x\text{^}3 + 15.4142x\text{^}2 - 35.7721x \\
&+ 271.8491) * sen((0.0008x^5 \\
&- 0.0152x^4 + 0.1057x^3 - 0.3122x^2 \\
&+ 0.3495x + 0.0381)x + (0.0088x^5 \\
&- 0.2575x^4 + 2.7617x^3 - 14.2268x^2 \\
&+ 34.5884x + 55.6968))
\end{aligned}
\tag{3.5}
$$

Donde:

yo3: columna total de ozono en Huancayo (UD)

x: tiempo en años

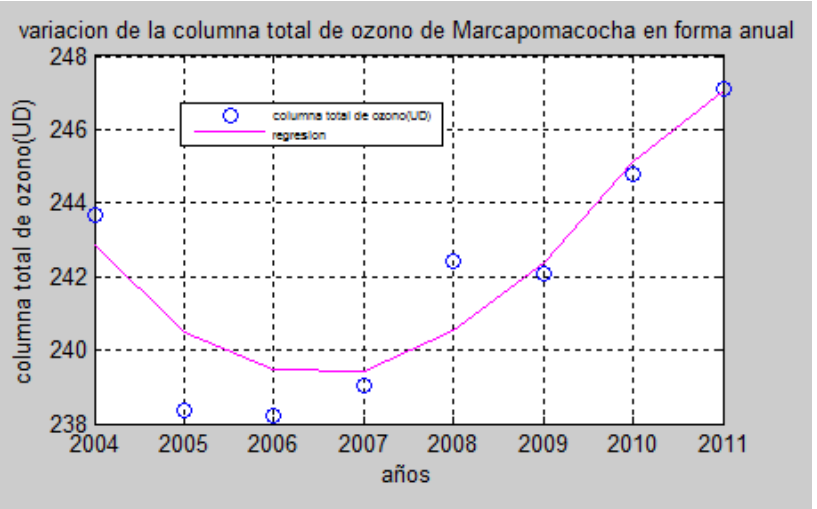


Figura 3.7 Variación anual de la columna total de ozono en Marcapomacocha

$$
\begin{aligned}
yo3 = (&-0.0216 * x\text{^}5 + 0.5554 * x\text{^}4 - 5.4965 \\
&* x\text{^}3 + 29.2932x\text{^}2 - 58.9558x \\
&+ 287.1121) * sen((0.0007x^5 \\
&- 0.0123x^4 + 0.0795x^3 - 0.1943x^2 \\
&+ 0.0859x + 0.2582)x + (0.0061x^5 \\
&- 0.245x^4 + 3.2181x^3 - 18.5405x^2 \\
&+ 46.5896x + 46.6064))
\end{aligned}
\qquad (3.6)
$$

Donde:

yo3: columna ozono total en Marcapomacocha(UD)

x: tiempo en años

Observamos en la gráfica un incremento por año de 0.83 UD en Huancayo ósea hay un aumento 2.38% de la columna total de ozono del 2004 al 2011 ósea se incrementa anualmente un 0.00083cm de

espesor en la columna total de ozono, y la irradiación UV de 305nm disminuyo en un -4.3856 w/m^{2}nm anualmente ha disminuido del 2004 al 2011 en un 20.07% y la irradiación UV a 310nm hay una disminución de 4.68 w/m^2 anualmente y una disminución del 2004 al 2011 en 16.31%, en la irradiación UV a 324nm disminuyo en 10.40 w/m^{2}nm anualmente y del 2004 al 2011 disminuyo en 12.29%, a una irradiación UV a 380nm disminuye 15.91 w/m^{2}nm anualmente y del 2004 al 2011 disminuye un 11.21%. Hay un incremento en relación de la zona de Huancayo respecto a la zona de Marcapomacocha en 0.62 en cada año anual y 1.77% de incremento del 2004 al 2011

Asimismo, se realiza la interpolación lineal de ozono cuantificado en Marcapomacocha

$$
\begin{aligned}
Y = (0.0186x^5 \ &- 0.6103x^4 + 7.1396\,x^3 - 35.6133x^2 \\
&+ 71.1177x + 206.5803) \\
&* sen((-0.0001x^5 + 0.0035\,x^4 - 0.0614\,x^3 \\
&+ 0.4680\,x^2 - 1.5952x + 2.0720) * x \\
&+ -0.0165x^5 + 0.5146x^4 - 5.6995\,x^3 \\
&+ 26.6599x^2 - 47.7558x + 101.8279)
\end{aligned}
$$

Donde:

y=columna total de ozono(UD)

X=meses

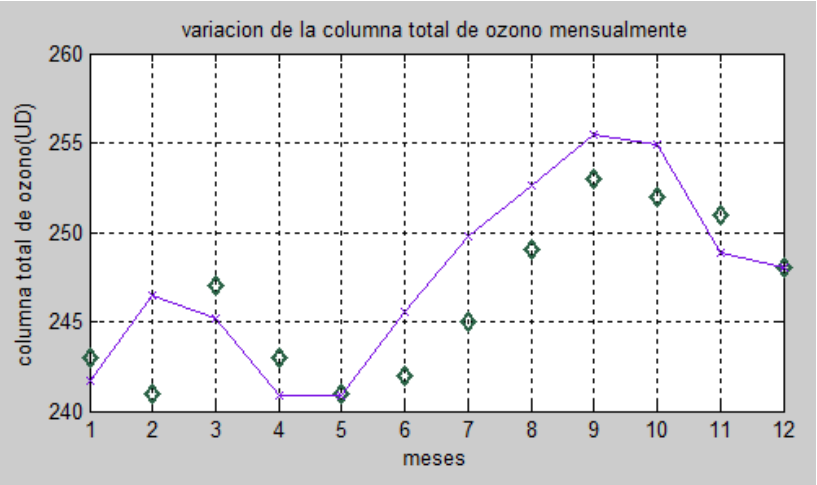


Figura 3.8. Variación mensual de columna total de ozono en Marcapomacocha

Conclusiones

La relación entre la radiación UV y el ozono total es compleja y está influenciada por múltiples factores, tanto naturales como antropogénicos. La reducción de la capa de ozono estratosférico permite un mayor paso de radiación UV-B hacia la superficie, con graves consecuencias para la salud humana, los ecosistemas y los materiales. Aunque los esfuerzos para mitigar la destrucción del ozono han logrado avances significativos, la recuperación completa de la capa de ozono aún es un proceso largo. La monitorización constante de las concentraciones de ozono y la implementación de políticas ambientales y de salud pública siguen siendo esenciales para reducir

los riesgos asociados con la radiación UV y proteger la vida en la Tierra.

CAPÍTULO IV

Radiación ultravioleta

Introducción

Se sabe que la radiación solar ultravioleta (UV) que llega a la superficie de la Tierra tiene un impacto pronunciado en la salud humana. La radiación ultravioleta (UV) es una pequeña parte del espectro electromagnético y cubre la longitud de onda de 100-400 nm dividida en tres bandas UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (100-280 nm) (WHO, 2017). La radiación ultravioleta se libera naturalmente del sol, ya que alrededor del 90% de los rayos UV-B y todos los rayos UV-C son absorbidos por el ozono, el dióxido de carbono, el oxígeno y el vapor de agua (Aun et al., 2019). Así, la radiación UV que llega a la superficie terrestre está compuesta principalmente por radiación UV-A y UV-B (pequeñas cantidades) (Serrano et al. 2006).

Objetivos

Estimar e interpretar la variación promedio anual del Índice de Radiación UV en la ciudad de Huancayo para el año 2020

Materiales y Métodos

Modelo TUV

El modelo de transferencia radiactiva TUV fue desarrollado por Madronich, (1993) y colaboradores del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (disponible en http://cprm.acd.ucar.edu/Models/TUV/), se aplicó la Versión 5.3.1 para el cálculo de irradiancias espectrales y tasas de fluencia. Los perfiles de aerosol y altitud para el ozono se tomaron de Elterman y de la atmósfera estándar de EE. UU.

Los valores estimados del índice UV fueron evaluados y categorizados según la Organización Mundial de la Salud (Tabla 1) y la nueva propuesta por Zaratti et al. (2014). Esta evaluación se realizó para proponer un calendario de índice UV para el Área Metropolitana de Huancayo.

Table 1. WHO UV index categorization

Ratings	UV index
Low	<2
Medium	3 a 5
High	6 a 7
Very high	8 a 10
Extremely high	>11

Table 2. UV index categorization por Zaratti et al., 2014

Colores	UV index
	1-3
	4-6
	7-9

	10-12
	13-15
	16-18
	19-21
	22-25

Resultados

A lo largo del día, la radiación UV también varía, alcanzando su máxima intensidad alrededor del mediodía solar. Esto se debe a que, en ese momento, el Sol está en su punto más alto en el cielo, lo que resulta en una menor cantidad de atmósfera que los rayos UV deben atravesar antes de llegar a la superficie.

- **Mediodía**: Entre las 10 a.m. y las 4 p.m., los niveles de radiación UV son mucho más altos debido a la posición más directa del Sol.

Influencia de la Latitud

La latitud geográfica es un factor clave que influye en la cantidad de radiación UV que alcanza la superficie de la Tierra. Las regiones cercanas al ecuador reciben una mayor cantidad de radiación UV a lo largo del año debido a la posición más alta del Sol en el cielo y la trayectoria más directa de los rayos solares.

- **Zonas ecuatoriales**: En las latitudes cercanas al ecuador, la radiación UV es más intensa durante todo el año, con pocas variaciones estacionales.

- **Zonas polares**: En las latitudes cercanas a los polos, la radiación UV es considerablemente menor.

Condiciones meteorológicas y nubladas

El clima también desempeña un papel importante en la variación de la radiación UV a lo largo del tiempo. Factores como las nubes, el humo y el polvo en la atmósfera pueden reducir parcialmente la cantidad de radiación UV que llega al suelo.

- **Nubes**: Las nubes funcionan como una barrera que puede disminuir significativamente los niveles de radiación UV.

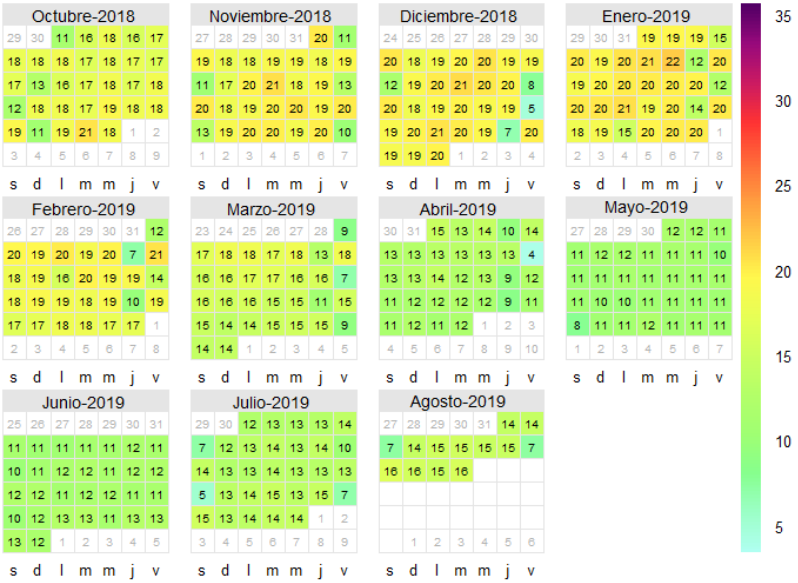


Figura 4.1. Variación temporal de índice UV utilizando la metodología de Zarrati e tal., 2014

Conclusiones

La variación temporal de la radiación UV resulta de la interacción de diversos factores, como la estacionalidad, el clima, la latitud geográfica y el estado de la capa de ozono. A lo largo del año, la intensidad de la radiación UV fluctúa considerablemente, siendo más alta en verano y cerca del ecuador, y más baja en invierno o en las regiones polares. Además, fenómenos como el agujero de ozono y las condiciones meteorológicas pueden generar variaciones adicionales en los niveles de radiación UV.

Comprender estas fluctuaciones es fundamental para adoptar medidas de protección adecuadas, como el uso de protector solar, gafas de sol y ropa adecuada, especialmente durante las horas de mayor intensidad de radiación UV y en zonas con niveles elevados de radiación. Las políticas de protección y monitoreo de la capa de ozono siguen siendo esenciales para reducir los riesgos asociados con la exposición prolongada a la radiación UV.

CAPÍTULO V
Modelo Hysplit

Materiales y métodos

HYSPLIT es una herramienta de modelado de recursos atmosféricos desarrollada por la NOAA, y se encuentra entre las más utilizadas para calcular trayectorias atmosféricas tanto hacia adelante como hacia atrás, así como para simular la dispersión de contaminantes en el aire. También permite modelar la deposición de contaminantes y materiales peligrosos. Además, se utiliza para monitorear y predecir la propagación de contaminantes provenientes de diversas fuentes, tanto fijas como móviles (del Águila-Villar et al. 2017). Los usuarios pueden emplear HYSPLIT para modelar la dispersión de contaminantes mediante el seguimiento de miles de partículas lagrangianas dentro de un dominio de modelo que incluye la turbulencia, a diferencia de tratar una sola partícula con un trayecto único. Esto permite simular la propagación de plumes contaminantes generados por fuentes como incendios forestales (Glen et al., 2017).

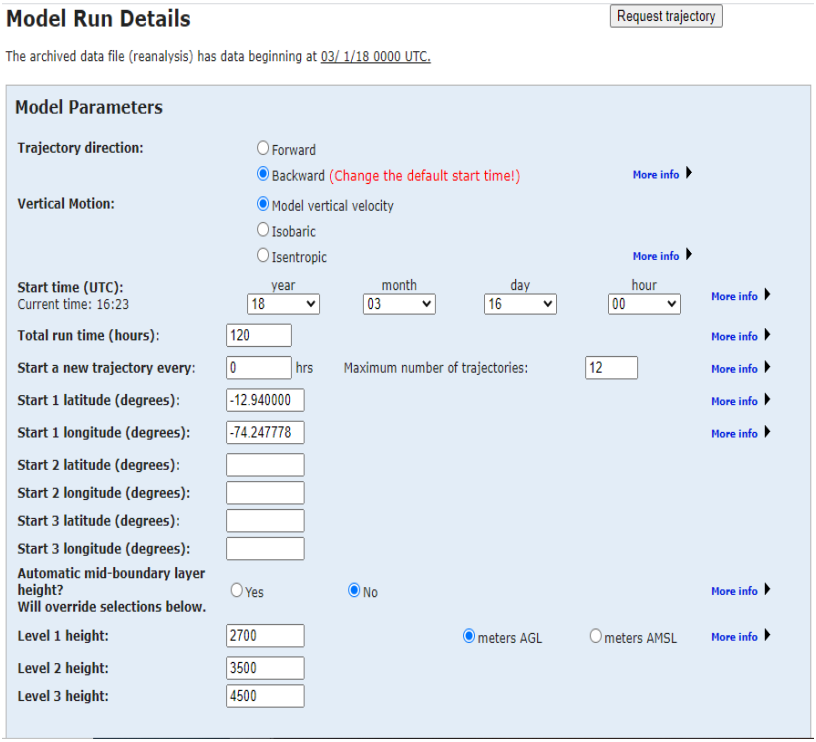


Figura 5.1 Plataforma del modeo Hysplit

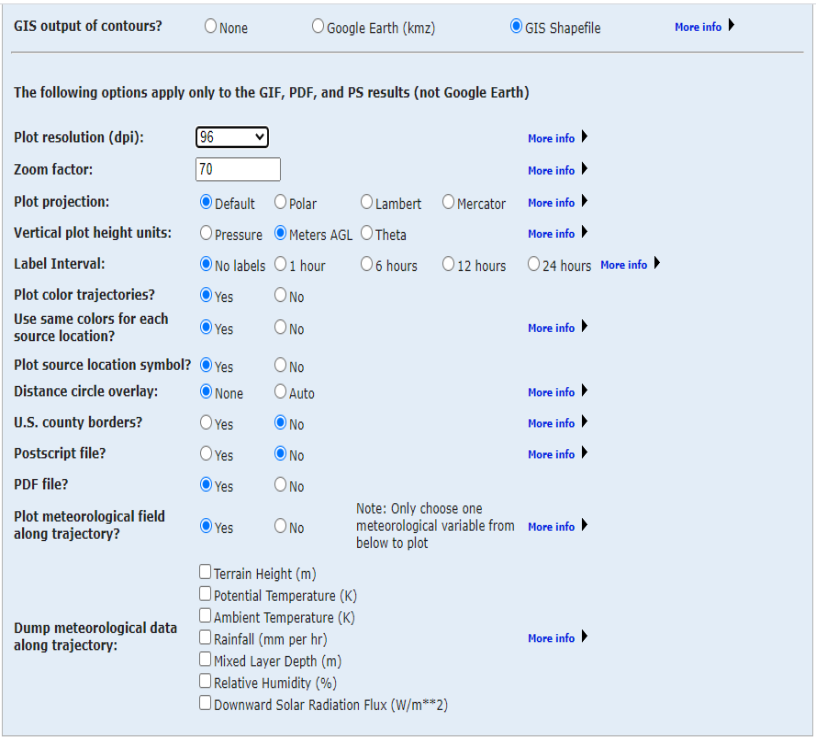


Figura 5.2 Interfaz gráfica del Modelo Hysplit

Resultados

Las trayectorias de vientos se refieren al camino que siguen las partículas de aire a medida que se desplazan en la atmósfera. Estas trayectorias son fundamentales para entender la dinámica atmosférica, los patrones climáticos y fenómenos como la dispersión de contaminantes, el transporte de aerosoles, las condiciones meteorológicas locales y las variaciones del clima global. El estudio de las trayectorias de vientos es esencial en una amplia gama de

disciplinas, desde la meteorología y el cambio climático hasta la gestión de riesgos por contaminación y la predicción de eventos extremos.

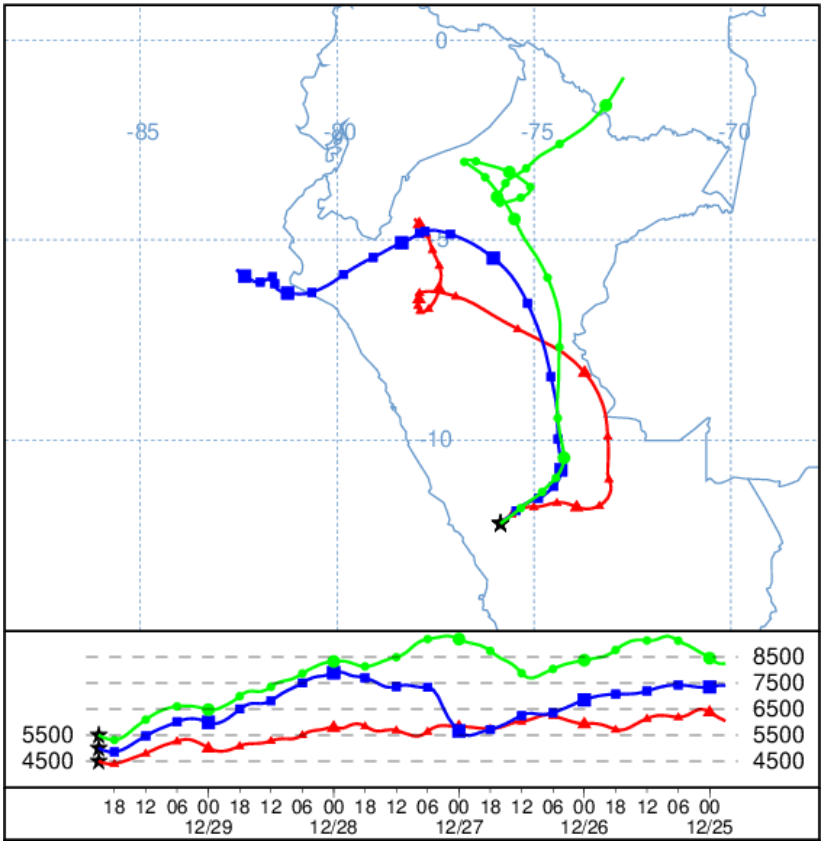


Figura 5.3. Trayectorias de Vientos

Conclusiones

El modelo HYSPLIT es una herramienta eficaz para simular trayectorias de vientos y el transporte de partículas y contaminantes en la atmósfera. Su capacidad para simular el movimiento de partículas en función de las condiciones meteorológicas ofrece una comprensión detallada de los procesos de dispersión atmosférica, lo que es esencial en estudios de calidad del aire, cambio climático, y situaciones de emergencia. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones del modelo y complementar sus resultados con otras observaciones y modelos para obtener una imagen más completa de la dinámica atmosférica.

REFERENCIAS

Enlaces Webs

https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/cloud_slice/#pddi

https://spaceplace.nasa.gov/exosphere/en/

Nasa: https://earthobservatory.nasa.gov/features/ContributionPollution

Guía de calidad de aire de la OMS: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=39E0E7A0902DC7DB8BEF36F50DBCB652?sequence=1

Estándares de calidad ambiental-Aire establecido por el MINAM: https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones

https://s3-us-west-2.amazonaws.com/courses-images-archive-read-only/wp-content/uploads/sites/650/2016/04/26003409/GOME.uviecclimyear_lr.gif

https://www2.acom.ucar.edu/modeling/tropospheric-ultraviolet-and-visible-tuv-radiation-model.

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/SH.html

http://files.cie.co.at/724_cie209_2014.pdf

NASA-Ocean, 2009: reason .gsfc. nasa.gov/ops/Giovanni/ocean.agua.shtml, https://aeronet.gsfc. nasa.gov/cgibin/draw_map_display_aod_v3?long1=180&long2 =180&lat1=90&lat2=90&multiplier=2&what_map=4&nachal= 1&formatter=0&level=3&place_code=10&place_limit=0

Red AERONET-NASA:(http://aeronet.gsfc.nasa.gov)

Libros, Tesis o textos académicos

Finlayson- Pitts, B.J., Pitts, J.N. Jr. 2000. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere, Academic press. USA. p 5, 15, 35.

Plan Nacional de Calidad del Aire 2017-2019, https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/planaire2017-2019_tcm30-436347.pdf

Reyes P Análisis y descripción general de la Plataforma GIOVANNI: Universidad de Granada; 2010.

OMS. Global Solar UV Index: a practical guide, WHO/SDE/OEH/02.2, disponible en español en: http://www.who.int/uv/publications/en/uvispa.pdf,inebra, Suiza; 2002.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). AERMOD description of model formulation. EPA-454/R-03-004. 2004a.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Users guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET). EPA-454/B-03-002. 2004b.

SEINFELD, J. H., Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Wiley & Sons. New York, 1986.

STULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers. 7ª ed., 1988.

Badescu, V. (2008). Modeling solar radiation at the Earth's surface (1st ed.). Bucharest: Springer.

Muhammad Iqbal, 1983. An introduction to solar Radiation. Academic Press. 1-392p

Boucher, O. 2015. Atmospheric Aerosols. Editorial Springer.

Rojas J. (2009). Variabilidad especial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre Perú usando imágenes de satélites. Facultad de ciencias físicas. UNMSM

Artículos Científicos

Del Águila-Villar, C., Chávez-Tejada, E., Romero-Guzmán, A.,

Román-Blas, Z. & Núñez-Almache, O. 2017, 'Anemia En La Población Pediátrica Del Perú', Revista De La Facultad De Medicina Humana, Vol. 16, No. 2, Pp. 72–5.

Levelt, P.F., Hilsenrath, E., Leppelmeier, G.W., Van Den Oord, G.H.J., Bhartia, P.K., Tamminen, J., De Haan, J.F. & Veefkind, J.P. 2006, 'Science Objectives Of The Ozone Monitoring Instrument', Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing.

Liou, K.N. 2002, An Introduction To Atmospheric Radiation (Second Edition), International Geophysics, Vol. 84.

Serrano, A., Antón, M., Cancillo, M.L. & Mateos, V.L. 2006, 'Daily And Annual Variations Of Erythemal Ultraviolet Radiation In Southwestern Spain', Annales Geophysicae, Vol. 24, No. 2, Pp. 427–41.

Sportisse, B. 2010, Fundamentals In Air Pollution, Fundamentals In Air Pollution.

Ziemke, J.R., Chandra, S. & Bhartia, P.K. 2001, '"Cloud Slicing": A New Technique To Derive Upper Tropospheric Ozone From Satellite Measurements', *Journal Of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 106, No. D9.

Apéndice 01:

ECUACIONES DIFERENCIALES Y SUS SOLUCIONES

Una ecuación diferencial ordinaria es una relación de la forma:

$$F\left(x, y'(x), y''(x), \ldots\ , y^{(n)}(x)\right) = 0$$

O en la forma normal

$$y^{(n)} = f\left(x, y'(x), y''(x), \ldots\ , y^{(n-1)}(x)\right)$$

Para resolver estas ecuaciones diferenciales existen diversos métodos o procedimientos. En esta sección solo veremos los casos más simples y que se utilizan en una asignatura de atmosferas.

Integración simple

Si la ecuación es de la forma: $y'(x) = f(x)$ 0 $\frac{dy}{dx} = f(x)$ se utiliza el teorema del diferencial y se procede a integrar

$$dy = y'(x)dx = f(x)dx$$

$$\int dy = \int f(x)dx$$

Luego la solución es:

$$y(x) = \int f(x)dx + C$$

Donde C es una constante que se determina utilizando las condiciones iniciales del problema. Por ejemplo $y(x_0) = y_0$. Así obtenemos la solución:

$$y(x) = \int_{x_0}^{x} f(x)dx + y_0$$

Ecuación diferencial de primer orden lineal

Es de la forma:

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = h(x)$$

Multiplicamos por el factor integrante $\mu(x) = e^{\int p(x)dx}$

Entonces tenemos:

$$e^{\int p(x)dx}\frac{dy}{dx} + e^{\int p(x)dx}p(x)y = h(x)e^{\int p(x)dx}$$

el primer miembro es posible escribirlo como:

$$\frac{d}{dx}\left[e^{\int p(x)dx}y\right] = h(x)e^{\int p(x)dx}$$

Integrando:

$$e^{\int p(x)dx}y = \int \left(h(x)e^{\int p(x)dx}\right)dx + C$$

obteniendo la solución:

$$y = e^{-\int p(x)dx}\left[\int \left(h(x)e^{\int p(x)dx}\right)dx + C\right]$$

Donde C se determina con las condiciones iniciales de la forma $y(x_0) = y_0$

Ecuaciones deferenciales ordinarias de segundo orden con coeficientes constantes

Una ecuación deferencial ordinaria de segundo orden en forma normal es de la forma:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + b\frac{dy}{dx} + cy(x) = f(x) \qquad (A1.1)$$

Donde: $b, c \in \mathbb{R}$

Esta ecuación se resuelve siguiendo el siguiente procedimiento:

(1) Se resuelve la ecuación característica:

$$r^2 + br + c = 0$$

(2) Se presentan 3 casos:

(2.1) las raíces son reales distintos, digamos r_1, r_2 entonces la solución de la ecuación complementaria

$y'' + by' + cy = 0$ es:

$$y = c_1 e^{r_1 x} + c_2 e^{r_2 x}$$

(2.2) las raíces son reales iguales; digamos r de multiplicidad 2 entonces la solución de la ecuación complementaria es de la forma:

$$y = c_1 e^{rx} + c_2 x e^{rx}$$

(2.3) las raíces son complejas conjugadas, digamos $r_1 = \propto + i\beta$, $r_2 = \propto - i\beta$, la solución de la ecuación complementaria es de la forma:

$$y = e^{\propto x}(c_1 cos\beta x + c_2 sen\beta x)$$

La solución de la ecuación (1) es de la forma:

$$y = y_c + y_p$$

Donde y_c es la solución de la ecuación complementaria, que hemos obtenido arriba. y_p es una solución particular que se puede obtener de "cualquier manera" digamos por ensayo y error o mediante operadores inversos, o coeficientes indeterminados.

Como ejemplos consideremos dos ecuaciones deferenciales de la forma:

$$(3.1) \quad y''(x) - \omega^2 y(x) = 0$$

$$(3.2) \quad y''(x) + \omega^2 y(x) = 0$$

Siguiendo el procedimiento indicado anteriormente la ecuación característica de (3.1) es:

$$r^2 - \omega^2 = 0 \quad \Longrightarrow \quad r_1 = \omega \quad \text{y} \quad r_2 = -\omega$$

La solución es:

$$y(x) = c_1 e^{\omega x} + c_2 e^{-\omega x}$$

La ecuación característica de (3.2) es:

$$r^2 + \omega^2 = 0 \implies r_1 = i\omega \quad \text{Y} \quad r_2 = -i\omega$$

Y la solución es:

$$y(x) = c_1 sen\omega x + c_2 cos\omega x$$

Apéndice 02:

Descripción de los parámetros del modelo TUV

Parámetro	Descripción
inpfil	Nombre del archivo de entrada
outfil	Nombre del archivo de salida
nstr	Número de líneas para la transferencia radiactiva
Lat	Latitud del local de estudio en grados decimales
Lon	Longitud del local de estudio en grados decimales
tmzone	Diferencia en horas del horario universal (UT o GMT)
Iyear	Año de simulación
imonth	mes de simulación
iday	Día de simulación
zstart	Altitud de relación a la superficie del mar en km
zstop	Altitud de la parte superior de la atmosfera en km
nz	Niveles verticales espaciados igualmente
wstart	Menor longitud de onda en nm y debe ser mayor que 100mm
wstop	Mayor longitud de onda en nm y debe ser menor que 100mm
nwint	Número de intervalos de longitud de onda igualmente espaciados entre el wstart y wstop. El valor 01556 es para el cálculo de las tazas de fotolisis en la troposfera y estratosfera (120-730nm); -7 es para el grado de TUV rápido y solamente son calculadas las tazas de fotolisis para la troposfera (289,9-743,6 nm).
tstart	Hora de inicio de la simulación
tstop	Hora final de la simulación
nt	Número de pasos de tiempo de la simulación
lzerut	Si es verdadero (T) ejecuta un loop sobre diferentes ángulos solar, si es falso (F) ejecuta un loop sobe diferentes tiempos del día y el ángulo cenital será calculado

alsurf	Reflectividad de la superficie (albedo), asumido independiente de la longitud de onda
psurf	Presión en la superficie en mbar
o3col	Concentración de ozono en la columna en unidades de Dobson
so2col	Concentración de SO2 en la columna en unidades de Dobson (valor de default=0)
no2col	Concentración de NO2 en la columna en unidades de Dobson (valor de default=0)
taucld	Profundidad óptica total de una nube
zbase	Altitud de la base de la nube en km (encima del nivel del mar) y debe ser igual o mayor que zstart
ztop	Altitud de la parte superior de la nube en km
tauaer	Profundidad óptica del aerosol en 550nm. Si -999 usa valor de default de 0,235 para aerosol continental.
ssaaer	Dispersión por los aerosoles - albedo simples (0significa total de adsorción y 1 total de dispersión)
alpha	Coeficiente de Angstrom para la longitud de onda (w) dependiente de la profundidad óptica del aerosol (tauaer), siendo que: tauaes1/tauaer2=(w2/w1)**alpha
dirsun	Factor de peso para la componente directa del sol. Debe estar entre -1 y +1
difdn	Factor de peso para la radiación difusa hacia bajo. Debe estar entre -1 y +1
difud	Factor de peso para la radiación difusa hacia arriba. Debe estar entre -1 y +1
zout	Altitud para la salida. Para la salida en la superficie zout=zstart
zaird	Densidad del aire (molec. Cm-3), si el valor es negativo usa default de atmosfera estándar
ztemp	Temperatura de salida en Kelvin. Si el valor es negativo usa default de atmosfera estándar
lirrad	Conduce la salida de irradiancias espectrales
laflux	Conduce la salida de flujo actinio espectral

lmmech	Conduce la salida estándar para uso con el NCAR Master mechanism
lrates	Conduce la salida de irradiancias en ciertas tazas
Isfix	Índice para una función espectral seleccionada para la salida detallada
Nms	Número total de función espectral, peso seleccionado para la salida
Ljvals	Conduce la salida de los coeficientes de fotolisis (valores de j)
Ijfix	Índice de las reacciones de fotolisis seleccionadas para salida detallada
Nmj	Número total de reacciones de fotolisis seleccionadas para la salida
Iwfix	Índice para la salida en una longitud de onda fijo
Itfix	Índice para la salida en un tiempo fijo (o ángulo solar cenital, Izenith=true)
Izfix	Índice para la salida en una altitud fija