

## Modelamiento de la atmósfera de Cochabamba, usando datos de la sonda espacial AIRS-NASA

Osmar Quispe M., Juan Carlos Terrazas V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

<sup>1</sup>jcarterrazas@gmail.com

### Resumen

El avance tecnológico en dispositivos de medición de las variables atmosféricas, como sondas espaciales (proyecto AIRS), han logrado medir variables atmosféricas, con bastante precisión y dicha información es disponible al público gracias al trabajo de la agencia espacial NASA (página web GIOVANNI-NASA). Este aporte científico, es útil para modelar la atmósfera de cada región específica, considerando sus particularidades. Esta es la meta de esta investigación, modelar la estructura vertical de la atmósfera cochabambina, considerando sus características geográficas, y que este trabajo sirva para áreas como rayos cósmicos, climatología, los cuales requieren construir una atmósfera con valores medidos y no solamente usar el modelo Atmosférico Estándar Internacional, el cual es muy general, que no considera los rasgos geográficos propios. Para lograr esto, esta investigación propuso el modelo MAVAL, el cual consiste inicialmente en descargar los datasets para Cochabamba desde GIOVANNI, luego se aplicó a estos, criterios de ciencia de datos, física de la atmósfera, y se logró obtener 22 puntos de medición de temperatura, concentración de gases, presión, densidad y altitud que corresponde. Aplicando Trazadores Cúbicos (métodos numéricos) a estos puntos para interpolar puntos y conseguir más resolución, se obtuvo 981 puntos, los cuales al ser graficados se observó que siguieron el comportamiento que predice la teoría. Así mismo se comparó la presión promedio de Cochabamba 74.575,200 Pa, con el calculado en este documento 72.900,675 Pa, dando el error del 2,2 %. Por tanto, los resultados indican que los criterios y fórmulas aplicadas con MAVAL son aceptables y confiables.

**Palabras clave:** *Dataset, GIOVANNI-NASA, Proyecto AIRS, Física de la atmósfera, Sonda espacial.*

### 1. Introducción

La atmósfera se puede definir como una capa gaseosa que envuelve la litosfera (superficie terrestre) e hidrosfera (mares, océanos, etc.) de la Tierra, está compuesta de gases y partículas sólidas y líquidas en suspensión. Los fenómenos meteorológicos y radiación cósmica se pueden encontrar en esta capa, además de ser la responsable de regular la entrada y salida de la energía de la Tierra. (UC, 2020). La función primordial, en especial para los seres vivos, es ser una capa protectora respecto a fenómenos naturales extraterrestres como: radiación electromagnética, radiación cósmica y meteoritos. Es por esta razón que se han creado áreas de estudio específicas sobre la atmósfera como la Física de la Atmósfera. Además, áreas como la Aeronáutica han desarrollado modelos atmosféricos aportando mucho conocimiento sobre la atmósfera terrestre, creando modelos como: la Atmósfera Estándar Internacional denominada ISA (por su sigla en inglés: *International Standard Atmosphere*) y Atmósfera Estándar de US (en inglés: *US standard atmosphere*). Por estas razones es importante conocer la atmósfera y modelarla en función de las características

particulares de una región en estudio y obtener modelos con valores más precisos (Viñas, 2021). En este trabajo se consideró como región de estudio la ciudad de Cochabamba con el objetivo que en el futuro se desarrollen trabajos en rayos cósmicos, climatología, y aeronáutica y sean trabajos muy precisos en el estudio y análisis. Cabe mencionar, que este estudio es parte de la investigación sobre el estudio de la detección de flujo de neutrones que llega al monte de Chacaltaya y Cochabamba y cuyo trabajo ira a aportar al proyecto LAGO (*Latin American Giant Observatory*), el cual es un proyecto de observación de astropartículas extendido a escala global.

Actualmente, gracias a los datasets que brinda la NASA en sus páginas web sobre la medición de variables climáticas y concentración de gases del planeta, hoy es posible armar una atmósfera muy particular para cada región, considerando su altitud sobre el nivel del mar y sus coordenadas geográficas. Este es el desafío de esta investigación, el de caracterizar la estructura vertical de la atmósfera cochabambina hasta los 50 km de altitud sobre el nivel del mar, para este desafío se usaron

herramientas informáticas, conocimientos de termodinámica, métodos numéricos y física de la atmósfera. la metodología que se ha seguido en este trabajo, puede ser aplicada para cualquier región, y replicar de forma precisa la estructura vertical de su atmósfera. A esta forma particular de modelar o caracterizar la atmósfera se la denominó en este estudio como MAVAL (Modelado Atmosférico Vertical Ajustado Localmente) este modelado atmosférico fue introducido en esta investigación, el cual tiene muy buena precisión y confiabilidad como se verá más adelante. Finalmente, para verificar la validez de los criterios, fórmulas aplicadas para el modelo MAVAL, se graficaron los perfiles de la temperatura, presión, densidad y gases atmosféricos, los cuales, si son correctos y confiables, deben comportarse de forma similar a la que muestra el modelo atmosférico de ISA (ver gráfica 1), y así resultó. Así también se calculó con estos datos, la presión atmosférica promedio de Cochabamba y se comparó con el valor teórico (tabulado en artículos), al aplicar el error porcentual entre ambos valores, dio un error menor al 10 % confirmando que el procedimiento aplicado fue correcto y confiable. A continuación, se menciona las características que posee la atmósfera, dicha información se generó cuando la ciencia e ingeniería propuso entregar un modelo atmosférico internacional (como el ISA) a la comunidad que requería conocer las características de la atmósfera terrestre (Viñas, 2021).

### 1.1 Composición gaseosa

A esa disolución de gases que compone la atmósfera terrestre se la denomina aire, el cuál permanecen dentro del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad. Cuando se habla de aire seco, se refiere al aire que no tiene vapor de agua, así que al hablar de los gases que componen la atmósfera, lo que indirectamente se habla es del aire atmosférico. En la actualidad, la atmósfera está compuesta por tres gases fundamentales: nitrógeno, oxígeno y argón, los cuales constituyen el 99.95 % del volumen atmosférico, los restantes componentes del aire están presentes en cantidades muy pequeñas y se expresan en volumen en partes por millón por volumen (ppmv) (UC, 2019), ver tabla 1.

Tabla 1

Composición de la Atmósfera Terrestre

Elemento	Aire Seco (ppmv)
Nitrógeno ( $N_2$ )	780.900,0*
Oxígeno ( $O_2$ )	209.360,0*
Argón ( $Ar$ )	9.300,0*
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	413,0
Neón ( $Ne$ )	18,0*
Helio ( $He$ )	5,0*
Metano $CH_4$	2,0*
Criptón ( $Kr$ )	1,0*
Otros gases (< a 1.0)	1,0*
Total	1.000.000,0

\*Este valor constante por debajo de 80 km

Fuente: NOAA, 2020

### 1.2 Estructura de la atmósfera

La estructura vertical atmosférica se divide en capas, pero además de esta división, existe otra división de denominadas como regiones, las cuales son la homósfera y heterósfera. Esta división es muy importante conocer al momento de hacer cálculos físicos y químicos. Se describe muy brevemente las características de cada región (UC, 2019) antes de pasar a describir la tradicional división por capas que se muestra en cualquier literatura.

**Homósfera.** Se encuentra en los primeros 80 km de la atmósfera. Su composición química es uniforme y en ella se cumplen las leyes de los gases perfectos, su estructura física se divide en tres capas según presión, densidad y temperatura, estas son tropósfera, estratósfera y mesósfera.

**Heterósfera.** Se encuentra a partir de los 80 km de altitud para arriba, en ella no se cumplen las leyes generales de la hidrostática. Su principal característica es la disposición de capas altitudinalmente definidas más por la composición química que por sus características físicas. Estas son: 1. capa de nitrógeno molecular, ubicada entre los 80 y los 200 km de altitud, 2. capa de oxígeno atómico, ubicada entre los 200 y 1.000 km de altitud y la capa de helio, ubicada entre los 1.000 km y los 3.000 km de altitud.

### 1.3 Capas de la atmósfera

Las capas se dividen según su altitud y donde varía la presión, temperatura, densidad, composición química, estado molecular, eléctrico y magnético. Sin embargo,

hasta ahora no hay definiciones universalmente aceptadas para los distintos niveles. Según el criterio de temperatura, la atmósfera se divide en las siguientes capas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera (ver figura 1), las cuales presentan distintas características (Marshall & Alan, 2008).

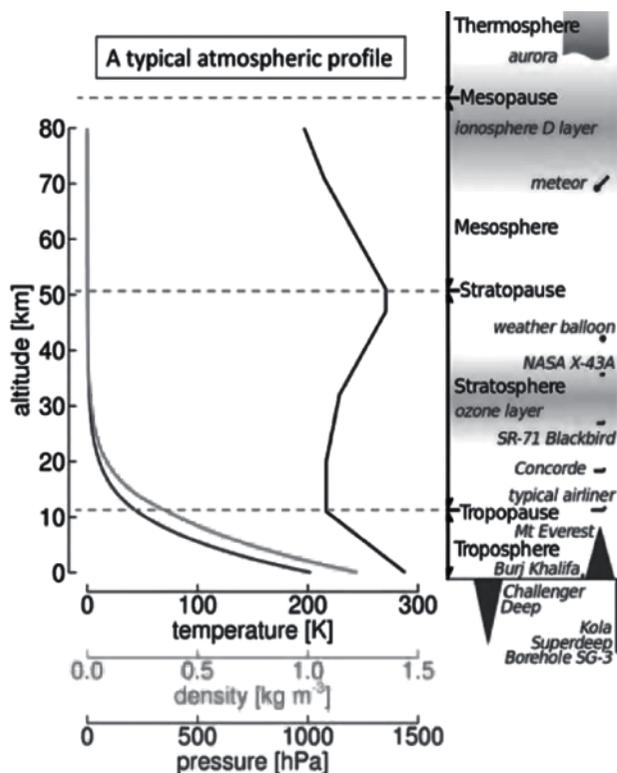


Figura 1. Perfiles de presión, densidad y temperatura (Harvey, 2021)

**Troposfera.** Aproximadamente entre 80 y 90 % de la masa de la atmósfera está contenida desde la superficie terrestre hasta unos 10 km - 15 km de altura sobre el nivel del mar. Es en esta capa, donde se da la vida y está contenida la mayor parte del vapor de agua y donde se dan los fenómenos meteorológicos, es decir, los ciclos de evaporación y precipitación del agua. El límite de esta capa atmosférica se llama tropopausa y se caracteriza porque es una mezcla prácticamente homogénea y no hay procesos químicos ni fotoquímicos, con excepción de zonas contaminadas. Finalmente, es en esta capa y la estratosfera donde regularmente se desarrollan en forma los chubascos atmosféricos de radiación cósmica.

**Estratosfera.** Después de la tropopausa hay un incremento de la temperatura, debido a que la capa de

ozono absorbe la energía de la radiación solar ultravioleta, ubicada desde la superficie terrestre entre los 20 km - 50 km de altura sobre el nivel del mar, es uno de los componentes más importantes para la conservación de la vida terrestre. Una disminución en la concentración de ozono estratosférico involucra un aumento en la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre y es en la estratosfera donde se concentra aproximadamente 90 % del ozono atmosférico, también es la primera capa que entra en contacto y protege a la Tierra de meteoros, asteroides y rayos cósmicos.

**Mesosfera.** Sobre la estratosfera entre los 50 km - 80 km, la temperatura decrece con la altura. La actividad química es muy importante debido a que la radiación solar alcanza esta capa atmosférica.

### 1.4 Perfil atmosférico de los gases

Los gases químicos que componen la atmósfera son denominados Perfiles Atmosféricos de los Gases, ellos describen el comportamiento y la evolución de la concentración de los gases atmosféricos. En la siguiente figura se muestran algunos de los gases presentes en la atmósfera, como el  $N_2$  y  $O_2$ , estos permanecen constantes hasta los 80 km sobre el nivel del mar, a diferencia de los otros gases que sí varían con la altura (ver figura 2).

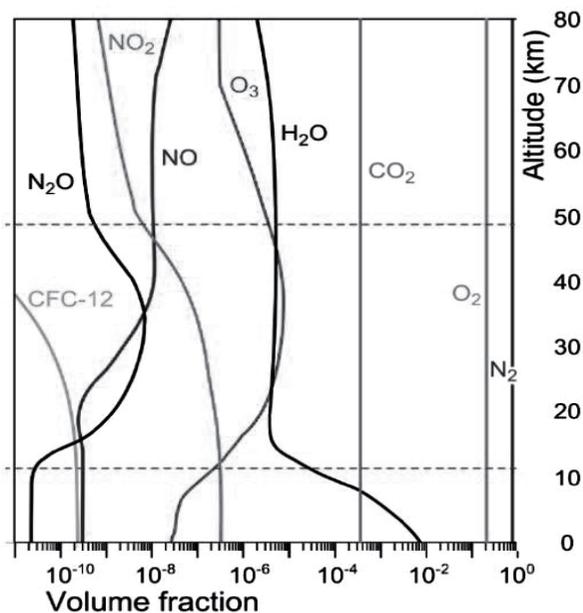


Figura 2. Perfil atmosférico de los gases (Generalic, 2018)

Estos perfiles para el caso de Cochabamba son recreados usando datos de sondas atmosféricas AIRS, generalmente los perfiles atmosféricos se generan en términos de fracción de volumen y/o fracciones de masa para distintas alturas. Pero generalmente las sondas atmosféricas no miden todos los gases presentados en la figura, ya que algunos laboratorios se especializan en ciertos estudios atmosféricos (Generalic, 2018).

### 1.5 Sonda infrarroja atmosférica AIRS

La sonda infrarroja atmosférica AIRS (por su sigla en inglés *Atmospheric Infra-Red Sounder*) es un conjunto de instrumentos que están a bordo del satélite Aqua del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA, utiliza tecnología infrarroja para generar mapas tridimensionales de la temperatura del aire y de la superficie, el vapor de agua y las propiedades de las nubes. Así mismo, gracias a los otros dispositivos que tiene el proyecto que lleva el mismo nombre (Proyecto AIRS), se puede medir trazas de gases como el ozono, monóxido de carbono, metano y dióxido de carbono. Para tener mayor información técnica del proyecto visitar (NASA, 2020) y buscar *AIRS Project Instrument Suite*.

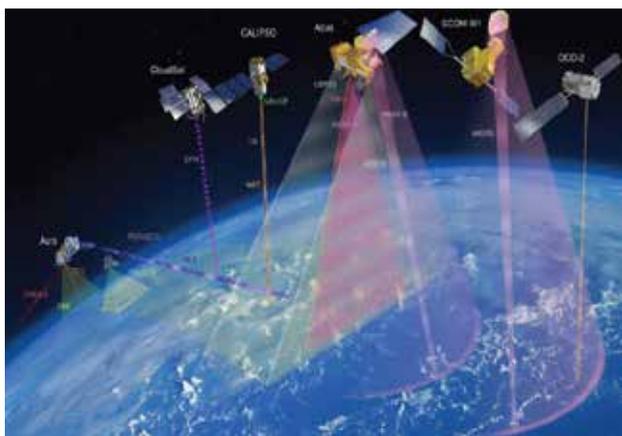


Figura 3. Satélite Aqua, es un satélite de investigación científica (NASA, 2020)

Los datasets de AIRS se pueden descargar desde la página web GIOVANNI (NASA). Los datasets de GIOVANNI que se extraerán para este estudio, tienen una resolución temporal mensual, en cuanto a la resolución espacial es de  $1 \times 1$  grados, (es decir, 1 grado de latitud por 1 grado longitud). Los datos son registrados en función de la altitud geopotencial, para más información revisar la página web GIOVANNI (Earthdata, 2021).

Los gases que registra AIRS y cuáles serán utilizadas en este trabajo son:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $A_1$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  y  $H_2O$  en estado de gaseoso, y también se registra mediciones de temperatura, dichos valores están en tabulados en función de variación de la altura geopotencial, existe también otras variables medidas, sin embargo, solo estas mencionadas anteriormente se ha considerado en este estudio para caracterizar la atmósfera. Cada dataset es almacenado en formato HDF y están almacenados por fechas y características geográficas.

## 2. Métodos y materiales

Para lograr modelar computacionalmente la estructura vertical de la atmósfera de la ciudad de Cochabamba en forma ascendente, se propuso el modelo MAVAL, un nuevo método para modelar la atmósfera, en el cual trabaja con los datos reales de medición de las variables atmosféricas locales de cada región de estudio, este modelo actualmente se está usando para modelar la atmósfera de Chacaltaya, Testa Grigia (Italia) y Inuvik (Canada) y otras regiones del mundo, dentro de la investigación del campo de rayos cósmicos, obteniéndose excelentes resultados. Para iniciar la aplicación del modelo MAVAL para Cochabamba, primero se ha seguido los pasos que determina la ciencia de datos los cuales son las etapas de extracción, procesamiento, limpieza, y EDA (en inglés *Exploratory Data Analysis*) (datahack, 2021). Luego, se ha continuado con la etapa de verificación, los datos obtenidos se graficaron y se observó que la distribución que siguen es similar a las curvas que se observan en la figura 1, y un dato importante, se comparó el valor de la presión atmosférica promedio de la ciudad de Cochabamba, con el valor calculado en este estudio, y el error porcentual entre ambos dio un valor menor al 10 %. Finalmente, con estos resultados se concluyó que los criterios usados con MAVAL son precisos y confiables.

### 2.1 Modelado o caracterización de la atmósfera cochabambina

**Datos de ingreso.** La región de estudio será la ciudad de Cochabamba:

Latitud:  $17,4161^\circ$  S. Longitud:  $66,1744^\circ$  O. Altitud: 2548 msnm (SENAMHI, 2019).

Presión atmosférica: 74575,200 (0,739 atm) (Velasco & Velasco, 2014).

Periodo: Julio-2014.

Los datos geográficos exactamente corresponden a la Estación Meteorológica ubicado en el Aeropuerto de

Cochabamba, esta estación trabaja con varias páginas web (SENAMHI) que registran datos meteorológicos anuales y mensuales (SENAMHI, 2019).

**Extracción de datos de GIOVANNI.** Se ha utilizado los registros del AIRS que están localizados en la página web de GIOVANNI(ver figura 4). Los datos

están almacenados en formato HDF (*Hierarchical Data Format*), para abrir y extraer los datos se ha utilizado el lenguaje de programación Python, además de sus librerías muy útiles para analizar datos, como Pandas, NumPy, etc.

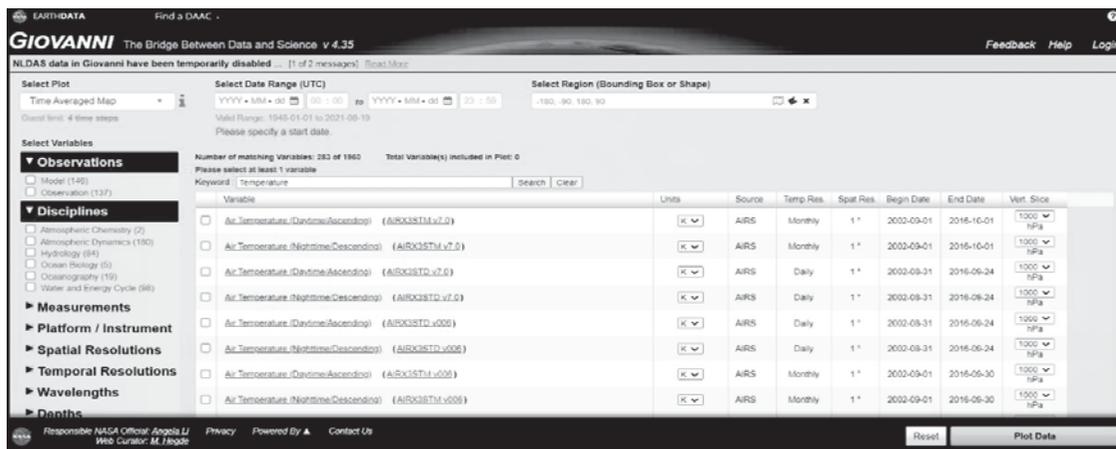


Figura 4. Página web de GIOVANNI (Earthdata, 2021)

**Procesamiento de datos.** Se utilizó la herramienta computacional de entorno de programación gratuita el Google Colab, que ofrece *Google Research*. Este permite que todos puedan escribir y ejecutar código de

Python en el navegador (ver figura 5). Es ideal para aplicarlo en proyectos de aprendizaje automático y análisis de datos (Google Research, 2020).

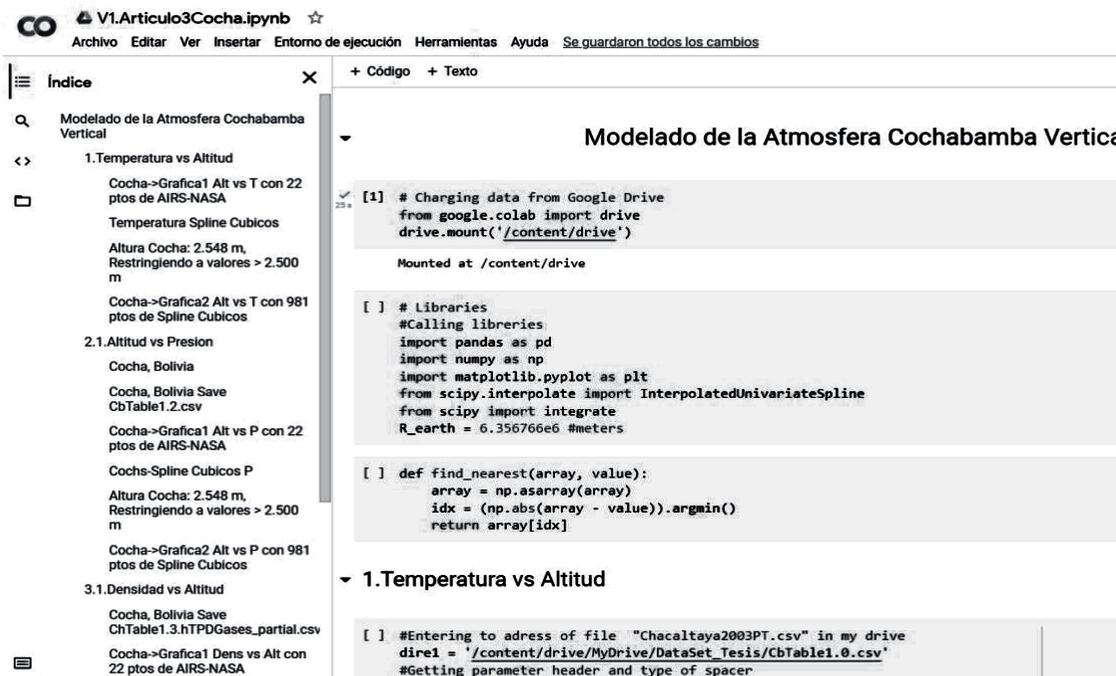


Figura 5. Código de programación elaborado en este estudio, que modela los perfiles característicos de la atmósfera y hace lectura de formatos HDF.

**Limpieza de datos.** Consiste en eliminar valor que no tienen sentido físico, o valores que no fueron registrados por la sonda.

**EDA y cálculos de los datos.** Para el interés del estudio, se consideró la altura geométrica y no la altura geopotencial, y la altura geométrica a partir de ahora se la denominó altitud, la cual es la elevación medida desde el nivel del mar, donde cada valor es medido verticalmente por la sonda espacial. La base de altitud para Cochabamba, está a 2.500 msnm aproximadamente, sobre esta base están los puntos que se han contemplado en esta investigación, es decir solamente los valores mayores medidos a partir de los 2500 msnm son considerados para caracterizar la estructura de la atmósfera cochabambina.

Tabla 2

Datos extraídos y procesados para Cochabamba

item	Altura Geopotencial [m]	Temperatura [K]	H2O [g/kg dry air]	O3 [ppv]	CO [ppv]	CH4 [ppv]
1	-9999	9999,000	-9,999E+03	-9,999E+03	-9,999E+03	-9,999E+03
2	-9999	9999,000	-9,999E+03	-9,999E+03	-9,999E+03	-9,999E+03
3	1.633	289,563	1,314E+01	3,449E-08	8,720E-08	-9,999E+03
4	3.160	287,656	5,094E+00	4,120E-08	9,613E-08	1,790E-06
5	4.424	278,375	2,792E+00	4,446E-08	8,982E-08	1,781E-06
6	5.879	266,375	1,391E+00	4,694E-08	8,028E-08	1,781E-06
7	7.577	253,105	3,844E-01	5,063E-08	7,097E-08	1,781E-06
8	9.641	237,488	9,133E-02	5,423E-08	6,145E-08	1,784E-06
9	10.884	228,082	4,991E-02	5,741E-08	5,613E-08	1,785E-06
10	12.339	217,512	1,669E-02	6,487E-08	4,996E-08	1,784E-06
11	14.121	206,059	5,018E-03	8,594E-08	4,248E-08	1,778E-06
12	16.513	199,047	2,438E-03	1,992E-07	3,342E-08	1,756E-06
13	18.617	205,313	*nan	6,005E-07	2,758E-08	1,717E-06
14	20.682	212,941	nan	1,680E-06	2,393E-08	1,660E-06
15	23.901	216,918	nan	4,526E-06	2,081E-08	1,539E-06
16	26.502	221,211	nan	6,679E-06	1,988E-08	1,423E-06
17	28.381	225,039	nan	7,682E-06	1,996E-08	1,337E-06
18	31.080	228,617	nan	8,201E-06	2,104E-08	1,220E-06
19	33.468	231,758	nan	7,983E-06	2,275E-08	1,129E-06
20	35.779	236,445	nan	7,391E-06	2,496E-08	1,057E-06
21	39.413	245,898	nan	6,029E-06	2,948E-08	9,766E-07
22	42398	256,047	nan	4,815E-06	3,422E-08	9,355E-07
23	44.593	260,805	nan	4,011E-06	3,838E-08	9,165E-07
24	47.668	264,594	nan	3,040E-06	4,569E-08	9,008E-07

\* nan significa que no existe valor medido, así mismo los valores negativos indican lo mismo  
Fuente: Elaboración propia

**Métodos numéricos.** Para tener más resolución o valores intermedios entre los puntos obtenidos, se ha aplicado el método de Trazadores cúbicos (TC), los cuales son una función definida por partes de polinomios para hacer interpolaciones entre puntos. Matemáticamente se expresa (Chapra & Canale, 2015):

$$f_{(i)} = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (1)$$

$f_{(i)}$  Función buscada, que para este trabajo será la función temperatura, presión, etc.

$a_i, b_i \dots d_i$  Coeficientes del polinomio encontrados con el método TC.

X Variable independiente, que en este trabajo serán valores de altitud con límites entre 2.500 m y 48.000 m aprox.

En este caso se obtuvo 22 valores (con sentido físico) ver la tabla 2. Se aplicó la librería de *Scipy* importando el método *Interpolated Univariate Spline*, el cual proporciona la función () de los TC de forma inmediata. Y en esta función se introdujo 1.000 valores de altitud (valores equidistantes y con límites entre 1.600 m y 48.000 m aprox.) para obtener 1.000 valores de temperatura, si la función sería relacionada a la temperatura.

Se desprecia los valores que correspondan a una altitud menor de 2.500 msnm, este mismo procedimiento se aplicó para obtener 1.000 valores de presión, densidad y así sucesivamente. A continuación, se redacta las fórmulas usadas en este trabajo, para lograr graficar los perfiles atmosféricos característicos.

**Cálculo de la altura geométrica o altitud (z)** (Rodríguez, 2020)

$$h_G = \frac{R_o h_{gp}}{R_o - h_{gp}} \quad (2)$$

$h_G$  Altura geométrica en m

$R_o$  Radio de la esfera denominada nivel medio del mar, valor  $6,356766 \times 10^6$  m

$h_{gp}$  Altura geopotencial en m

De ahora en adelante a la altura geométrica se la ha denominado altitud.

**Cálculo de la presión en función de la altitud** (Marshall & Alan, 2008)

$$H = \frac{RT_o}{g_o} \quad (3)$$

H	Constante denomina “escala de altura” en m
R	Constante del gas ideal, valor 287,05 J/kg K
T <sub>o</sub>	Temperatura media de la estructura vertical de <i>US standard atmosphere</i> , valor 250 K
g <sub>o</sub>	Aceleración de gravedad a nivel del mar, valor 9,80665 m/s <sup>2</sup>
	$p_z = \left(p_o e^{-\frac{z}{H}}\right) * 10^2 \quad (4)$
p <sub>z</sub>	Presion en funcion de z en Pa
p <sub>o</sub>	Presion medida a nivel del mar, valor 1013,25 mbar
z	Altitud medida desde el nivel del mar en m

**Cálculo de la Densidad** (Marshall & Alan, 2008)

Se considera la atmósfera como un gas ideal, usando la ecuación de estado PV = nRT, y unas cuantas operaciones algebraicas se llega a la siguiente expresión:

$$\rho = \left(\frac{p_z}{RT}\right) * 10^{-3} \quad (5)$$

ρ	Densidad en g/cm <sup>3</sup> o g/cc
T	Temperatura medida en cada nivel de altitud z, en K

**Cálculo de los valores de Fracción de Masa para los Perfiles de los Gases**

De los datos extraídos, se obtiene valores de medición de: H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, y sabiendo que los gases N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y permanecen constantes hasta los 80 km estos reflejaran una línea vertical sin cambios a medida que aumente la altitud. Por tanto, para modelado de la atmósfera se ha contemplado que está formado por ocho gases, esto debido a que no se tiene datos de los otros gases restantes que conforma la atmósfera.

Para el cálculo se necesita que los datos estén en

fracción de masa (F<sub>m</sub>) y no de volumen (ppmv) (como los de la tabla 1). Bajo el modelo del gas ideal se calcula la de la siguiente forma (Poma, 2020). Primero calculamos la fracción de volumen (F<sub>v</sub>) que se expresa como:

$$F_v = \frac{V_i}{\sum V_i} \quad (6)$$

i Subíndice referido a los ocho gases que se consideran en este trabajo (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, etc).

F<sub>v</sub> Fracción en Volumen

V<sub>i</sub> Volumen de cada gas que contiene la atmósfera en ppmv (partes por millón de volumen)

∑ V<sub>i</sub> Sumatoria de todos los valores de volumen

$$m_i = \frac{F_v M_i}{22,4} \quad (7)$$

m<sub>i</sub> Masa de cada gas en g

M<sub>i</sub> Masa molar de cada gas en g/mol

22,4 Volumen que ocupa un mol

Por último, calculamos F<sub>m</sub> con:

$$F_m = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (8)$$

Y usando los TC se generan 1.000 puntos para realizar las gráficas, sin embargo, solo valores correspondientes a una altitud mayor a 2.500 m fueron contemplados, finalmente se consiguió 981 valores para graficar.

**Cálculo de la presión atmosférica a nivel de Cochabamba, 2548 msnm**

Se utilizo la gráfica de Densidad vs Altitud (ver figura 5) y el método de integración numérica trapezoidal, es decir se sumó el área bajo la curva, matemáticamente se expresa como:

$$p_{cal} = \int_{2.515 \text{ m}}^{48.000 \text{ m}} \rho_{(z)} dz \quad (9)$$

ρ<sub>(z)</sub> Función de densidad en g/cc

z variable independiente, altitud en [cm]. Con límites entre 2.515 m - 48.000 m

p<sub>cal</sub> Cantidad de masa que ejerce presión sobre una determinada región, es decir la presión

Por tanto es la presión atmosférica calculada ejercida sobre la región de Cochabamba.

### Cálculo del error porcentual

$$E_{\%} = \frac{|p_{teo} - p_{cal}|}{p_{teo}} * 100\% \quad (10)$$

$E_{\%}$  Error porcentual entre la presión calculado por este trabajo y el tabulado en tablas en %

$p_{teo}$  Presión atmosférica promedio de la ciudad de Cochabamba, valor 0,736 atm o 74.575,200 Pa (Velasco & Velasco, 2014)

### 3. Resultados y discusión

Aplicando las fórmulas anteriores para cada nivel de altitud o ítems (ver tabla 2). Se obtuvo 1.000 valores, de los cuales solo se consideraron los valores medidos sobre los 2.500 m, y aplicando esta condición se obtuvo 981 valores, los cuales se utilizaron para graficar los perfiles característicos de la atmósfera cochabambina.

#### 3.1 Perfil de la temperatura

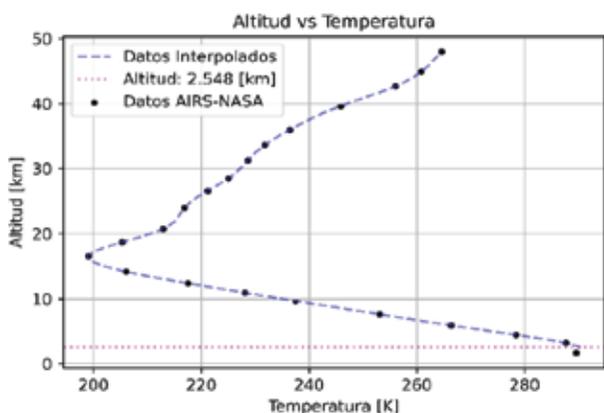


Figura 6. Perfil de temperatura

Los círculos oscuros en la figura 6 representan los 22 datos medidos por AIRS, y la línea discontinua es la interpolación generada usando los TC. La distribución vertical de la temperatura sigue el comportamiento que refleja la figura 1. Se observa dos comportamientos, los cuales se han dividido para su explicación en dos tramos. El primer tramo, desde los 2.548 km -17 km aproximadamente, a medida que va aumentando la altitud, la temperatura va disminuyendo, teniendo una tendencia de lineal, el otro tramo, 17 km – 48 km aproximadamente, los valores de temperatura van aumentando de forma progresiva y no siguen una tendencia lineal, el aumento de temperatura es debido al

aumento de la concentración de ozono ( $O_3$ ), a medida que aumenta la altitud, el  $O_3$  absorbe la energía de la radiación solar ultravioleta y provoca que la temperatura aumente.

#### 3.2 Perfil de la presión

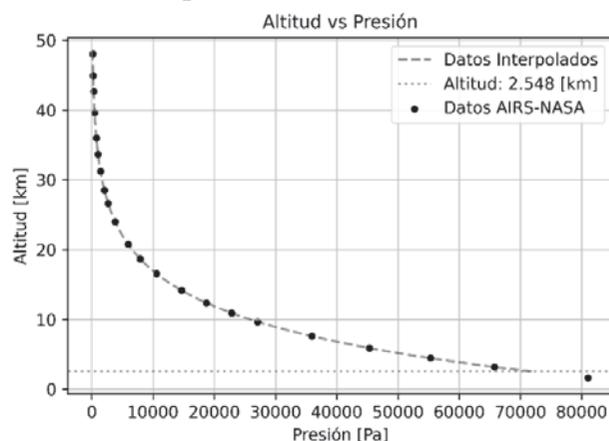


Figura 7. Perfil de la presión

La distribución vertical de la presión mostrada en la figura 7, sigue el comportamiento que refleja la figura 1, tiene un descenso de presión de forma exponencial, a medida que se sube la altitud, siendo los valores mínimos de presión, a partir de los 40 km, esto es debido a que la concentración de los algunos gases disminuye a medida que sube de altitud, e incluso desaparecen, es el caso del que desaparece a partir de los 17 km (ver figura 9).

#### 3.3 Perfil de la densidad

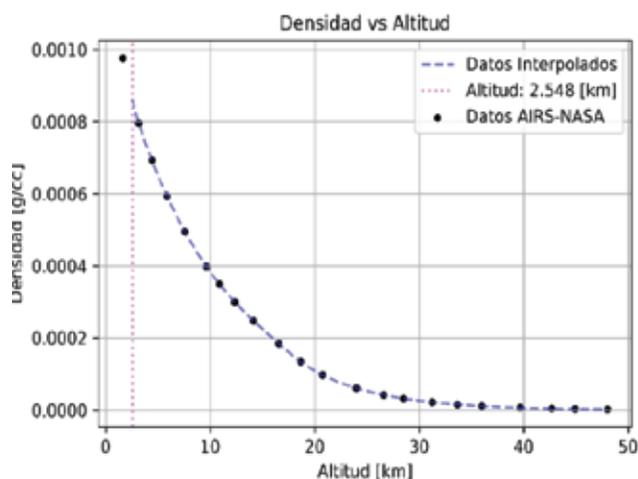


Figura 8. Perfil de la densidad

La tendencia de la curva de la figura 8 refleja similar comportamiento como en la figura 1, tiene un descenso de la densidad en forma exponencial a medida que se

sube la altitud, siendo los valores mínimos a partir de los 40 km. Esto es debido a que la concentración de los algunos gases disminuye a medida aumenta la altitud (ver la figura 9).

### 3.4 Presión atmosférica promedio de Cochabamba calculada

Integrando numéricamente (método *integrate* de Python) la curva de la figura 8, y usando la ecuación 9,

se obtuvo 743,380 o 72.900,675 Pa.

### 3.5 Error porcentual

Usando la ecuación 10, se comparó el valor de la presión atmosférica promedio de Cochabamba, con el valor calculado en este estudio, se logró obtener un error porcentual del 2,2 %.

### 3.4 Perfil de los gases

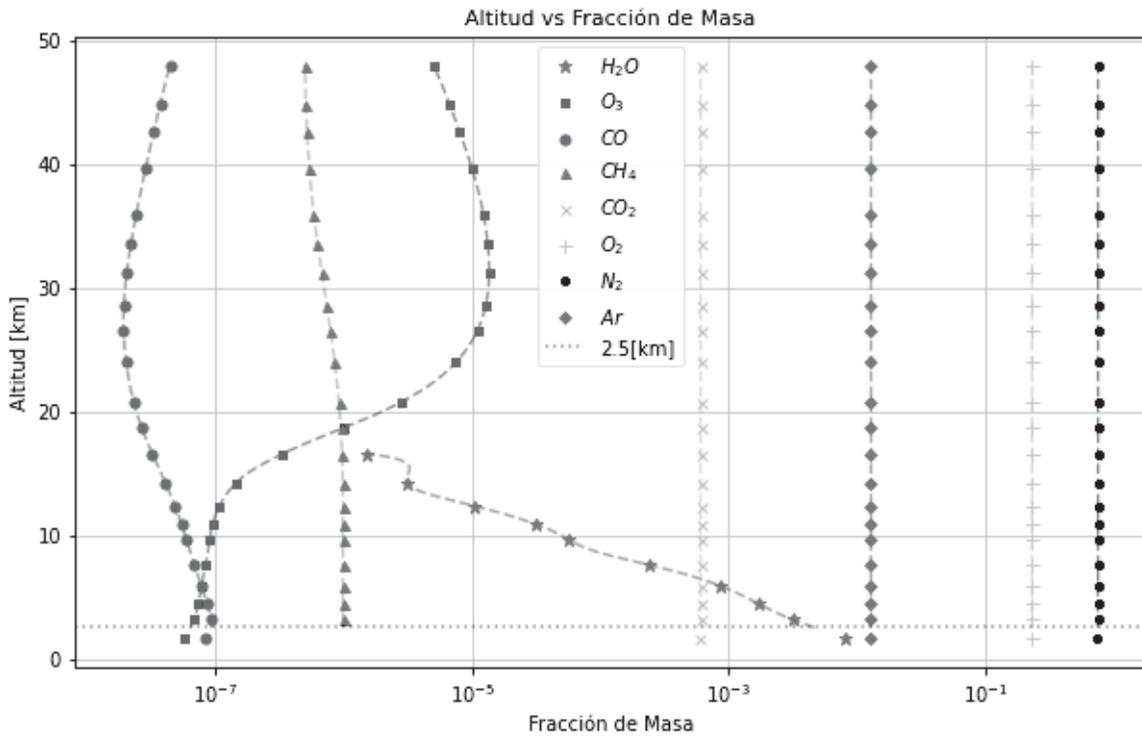


Figura 9. Perfil de los gases atmosféricos.

En esta figura 9 los puntos (círculos, cuadrados, triángulos, rombos y demás) representan los 22 datos extraídos de AIRS, y las líneas discontinuas es la interpolación, el comportamiento de los datos refleja similar comportamiento que la figura 2. Al aumentar la altitud, las concentraciones de ozono van aumentando, en contraste los otros gases van disminuyendo, incluso van desapareciendo como el vapor de agua, que hasta los 17 km ya no se encuentra, y los gases como argón, nitrógeno, oxígeno, y dióxido de carbono son constantes.

### 4. Conclusiones

A través de la conjunción de herramienta computacionales de programación, análisis datos, métodos numéricos, conocimientos de termodinámica y física de la atmósfera, se ha logrado modelar de manera

óptima, la estructura vertical de la atmósfera cochabambina, y para su verificación y cuan desfasado este del modelo atmosférico ISA, se ha graficado los perfiles de temperatura, presión, densidad y gases, los cuales resultan tener similar comportamiento a los modelos teóricos. Así mismo se calculó con dichos valores obtenidos (981 valores), la presión atmosférica promedio de Cochabamba, integrando de forma numérica el área bajo la curva de la figura 8, resultando el valor de 72.900,675 Pa.

Calculando el error porcentual con respecto al valor promedio, resultó un valor de 2,2 %, un error muy bajo. Por tanto, el modelado de la atmósfera cochabambina con MAVAL, propuesto en esta investigación demuestra un buen manejo de criterios y confiabilidad alta.

## 5. Recomendaciones

Para un modelado más completo de la atmósfera cochabambina, añadir más variables físicas, como los valores del campo geomagnético, es decir la intensidad de flujo magnético que se encuentra en Cochabamba y como varía con la altitud.

## 6. Referencias bibliográficas

- Chapra, S., & Canale, R. (2015). *Metodos numericos para Ingenieros*. Mexico D.F.: McGraw-Hill Education.
- datahack. (2021). *datahack*. Recuperado el 10 de 1 de 2021, de Analizando datos con python: <https://www.datahack.es/blog/big-data/analizando-datos-python/>
- Earthdata. (2021). Recuperado el 10 de Diciembre de 2020, de Giovanni-NASA: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Garcia, P. (s.f.). *Rayos cósmicos*. Recuperado el 10 de 1 de 2020, de Rayos cósmicos: <https://indico.cern.ch/event/572737/contributions/2612066/attachments/1482662/2299945/PGA-Rayos-cosmicos.pdf>
- Generalic. (2018). *Croatian-English Chemistry Dictionary & Glossary*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2019, de atmosphere: <https://glossary.periodni.com/glossary.php?en=atmosphere>
- Google Research. (2020). *Google Research*. Recuperado el 10 de Enero de 2020, de COLAB: <https://research.google.com/colaboratory/faq.html>
- GoogleMyMaps. (2020). *GoogleMyMaps*. Recuperado el 10 de Enero de 2020, de Google My Maps: <https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?msa=0&gl=bo&hl=es&ie=UTF8&ll=-17.02053583533204%2C-64.05224687143141&spn=0.005037%2C0.006856&t=h&z=5&mid=1jzqaSmRI7Aj6WAwuE0wb4e9AbnA>
- Harvey, B. (10 de Noviembre de 2021). *Atmospheric Thermodynamics*. Obtenido de National Centre for Atmospheric Science: <https://slideplayer.com/slide/11831728/>
- Marshall, J., & Alan, R. (2008). *Atmophere, Ocean, and Climate Dynamics. An Introductory Text*. Massachusetts: Elsevier.
- Mendoza, B. (2013). *Introducción a la Física Espacial*. México, D.F.: universidad nacional autónoma de méxico.
- NASA. (2020). *Jet Propulsion Laboratory-NASA*. Recuperado el 14 de Marzo de 2020, de AIRS Project Instrument Suite: <https://airs.jpl.nasa.gov/mission/airs-project-instrument-suite/eos-aqua-satellite/>
- NOAA. (2020). *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de Global Monitoring Laboratory: [https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2\\_measurements.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2_measurements.html)
- Poma, F. (2020). *Estudio del Flujo de Neutrones en Alta Montaña Producidos por Rayos cósmicos a través De Simulaciones Monte CARLO*. Recuperado el 10 de Enero de 2021, de Departamento de Investigación-UMSA: <http://sicyt.umsa.bo/investigaumsa/proyecto/featuredPdfFile/10>
- Rodriguez, C. (2020). *Academia*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2020, de Estándar Internacional de la Atmósfera Terrestre: [https://www.academia.edu/5075793/Est%C3%A1ndar\\_Internacional\\_de\\_la\\_At%C3%B3sfera\\_Terrestre](https://www.academia.edu/5075793/Est%C3%A1ndar_Internacional_de_la_At%C3%B3sfera_Terrestre)
- SENAMHI. (2019). *Ministerio de Medio Ambiente y Agua*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2019, de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología: <http://senamhi.gob.bo/administracion/audiencia/2019/18%20-%20Listado%20de%20Estaciones%20en%20Funcionamiento.pdf>
- UC. (2019). *Pontificia Universidad Catolica de Chile*. Recuperado el 10 de 12 de 2019, de Atmósfera: [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/contam/fratmosf.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/fratmosf.htm)
- Velasco, C., & Velasco, J. (2014). Efectos de la altitud sobre la combustión. *Revista Metalúrgica UTO*.
- Viñas, J. (2021). *Meteored*. Recuperado el 1 de Junio de 2021, de ISA, un modelo de atmósfera teórica para comprender la real: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/el-modelo-atmosfera-teorica-isa-para-estudiar-el-comportamiento-de-la-atmosfera-real.html>