



ESTUDIO COMPARATIVO DEL MODELO DE LA ATMÓSFERA ESTÁNDAR APLICADO AL CASO PARTICULAR DE LA TROPÓSFERA EN LA REGIÓN DE EL CERRO, LAS TABLAS, PANAMÁ

N. M. Correa¹, A. Pino², A. Maturel³

¹Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Centro de Investigaciones con Técnicas Nucleares, Departamento de Física, Panamá. noriel.correa@up.ac.pa 

²Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Laboratorio de Física de la Atmósfera, Departamento de Física, Panamá. alfonso.pinog@up.ac.pa 

³Universidad de Panamá, Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación, Panamá. alvaro.maturell@up.ac.pa 

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2022

Fecha de aceptación: 25 de octubre de 2022

RESUMEN

Se realizó una comparación entre el modelo estándar de la atmósfera, desarrollado en sus inicios por los Estados Unidos de Norte América y el modelo de la atmósfera en la región de El Cerro en la provincia de los Santos, localizado en la latitud $7,75^\circ$ y una longitud $-80,25^\circ$. Se seleccionó esta región por su alta convección. El estudio se llevó a cabo entre la NASA, la Universidad de Costa Rica y la Universidad de Panamá en el período comprendido entre los meses de julio y agosto del año 2007. Los datos fueron tomados con equipos de medición de última generación y utilizando Globo Sondas, para obtener, algunos parámetros atmosféricos, utilizados para predecir el cambio climático y su comportamiento en el tiempo. La comparación con el modelo estándar, del comportamiento de los parámetros atmosféricos, en la región objeto de estudio, se realizó a través de los perfiles de temperatura del aire, presión, humedad relativa y concentración de ozono mixto, y su variación con la altura. El comportamiento experimental de los parámetros atmosféricos medidos en la región de El Cerro, Provincia de Los Santos, se ajustan bastante bien a lo que predice el Modelo Estándar de la atmósfera, sin embargo, para el caso del perfil de temperatura-altitud, se manifiesta una doble pendiente, indicando que a la altura donde ocurre la inflexión, se tiene un proceso de inversión térmica por subsidencia en el cual el aire más frío se

ubica por debajo de la zona de condensación mientras que el aire caliente se ubica sobre esta región. El comportamiento experimental de los resultados de los perfiles de presión-altitud, son interpretados mediante un modelo matemático con una variación exponencial, como lo indica en modelo estándar.

PALABRAS CLAVES

Temperatura, humedad relativa, ozono mixto, tc4, perfiles de temperatura, presión atmosférica.

COMPARATIVE STUDY OF THE MODEL OF THE STANDARD ATMOSPHERE APPLIED TO THE PARTICULAR CASE OF THE TROPÓSHERE IN THE REGION OF EL CERRO, LAS TABLAS, PANAMA

ABSTRACT

A comparison was made between the standard model of the atmosphere, developed in its beginnings by the United States of North America and the model of the atmosphere in the El Cerro region in the province of Los Santos, located at latitude 7.75° and a length -80.25° . This region was selected for its high convection. The study was carried out between NASA, the University of Costa Rica and the University of Panama in the period between July and August of 2007. The data was taken with state-of-the-art measurement equipment and using Globo Sondes, to obtain, some atmospheric parameters, used to predict climate change and its behavior over time. The comparison with the standard model, of the behavior of the atmospheric parameters, in the region under study, was made through the profiles of air temperature, pressure, relative humidity and mixed ozone concentration, and its variation with height. The experimental behavior of the atmospheric parameters measured in the region of El Cerro, Province of Los Santos, fits quite well to what the Standard Model of the atmosphere predicts, however, in the case of the temperature-altitude profile, it manifests itself a double slope, indicating that at the height where the inflection occurs, there is a process of thermal inversion by subsidence in which the coldest air is located below the condensation zone while hot air is located on this region. The experimental behavior of the results of the pressure-altitude profiles are interpreted by means of a mathematical model with an exponential variation, as indicated in the standard model.

KEYWORDS

Temperature, relative humidity, mixed ozone, tc4, temperature profiles, atmospheric pressure

INTRODUCCION

El Cerro es un pueblo ubicado a 3,4 km de la comunidad de Las Tablas y a 35 km de la comunidad de Chitré en la provincia de Los Santos localizado en la latitud $7,75^{\circ}$ y una longitud $-80,25^{\circ}$. La provincia de Los Santos se encuentra ubicada a unos 275 km de la capital de la República de Panamá.

La identificación y cuantificación de procesos clave en esta región es esencial para progresar en temas que involucran el cambio climático, la reducción del ozono y la química troposférica (Mike Craig, 2008).

La NASA llevó a cabo medidas terrestres y aéreas en una misión denominada TC4 (Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling), para obtener información que se pudiera utilizar en los modelos climáticos globales, en especial en la formación de nubes. (Chirica, NASA-ESPO Tropical Compositio Cloud and Climate Coupling, 2008)

En total, más de 400 científicos, ingenieros, personal de la misión y de apoyo estuvieron destacados en Costa Rica y Panamá desde mediados de julio hasta mediados de agosto de 2007. (Owen B. Toon, 2007)

Este gran experimento internacional reunió a investigadores de ocho centros de la NASA, más de 14 universidades y más de 20 agencias estadounidenses e internacionales, siendo un estudio muy bien estructurado de nuestro ambiente.

La misión fue patrocinada por el Área Enfocada en la Composición Atmosférica de la División de Ciencia Terrestre de la NASA, conformada por el Programa de Investigación Atmosférica Superior, el Programa Científico de Radiación y el Programa de Química Troposférica.

La misión TC4 de la NASA investigaba la estructura, las propiedades y procesos en el pacífico oriental del trópico. La química, la dinámica y los procesos físicos que ocurren en la baja tropósfera tropical no están muy estudiados. El estudio se llevó a cabo en el Golfo de Panamá y

lugares circundantes, ya que, es en esta región, en donde la convección es muy persistente. (L Pfister, 2009)

La Atmósfera Estándar ICAO o ISA es un estándar contra el cual se compara la atmósfera actual en cualquier punto y tiempo. Los parámetros utilizados por ISA para su estandarización, a nivel del mar, son (Lhotellier, 2017):

- Presión: 1013,25 hPa
- Temperatura: +15°C.

Cada uno de estos parámetros decrece cuando aumenta la altitud de referencia del nivel medio del mar:

- 1hPa perdido cada 8 metros
- 6,5°C perdido cada kilómetro
- Cuando la altitud está sobre los 11 km, la temperatura es de -56,6°C y constante hasta alcanzar los 20 km.

MATERIALES Y METODOS

Para realizar el estudio se utilizaron tres aviones de la NASA (DC-8, WB-57 y ER-2) que volaron desde el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, en Costa Rica (Chirica, TC4 Gallery, 2017). Se utilizaron más de 66 instrumentos, altamente especializados, que recolectaron información en el sitio, mediante sensores remotos. Complementos terrestres como un radar banda C, instalado en el aeropuerto en Costa Rica brindó información del clima local, así como un gran radar Polarimétrico de banda S y un remolque de investigación atmosférica localizado en Las Tablas, cerca al Golfo de Panamá (Fig. 1). En el cuadro 1, detallamos el listado de la instrumentación empleada en esta investigación.



Fig. 1 Radar Polarimétrico de banda S utilizado por la NASA para el proyecto TC4 ubicado en la región de El Cerro, Las Tablas, provincia de Los Santos (Toon, Starr, & Jensen, 2010) Fig. 1 Radar Polarimétrico de banda S utilizado por la NASA para el proyecto TC4 ubicado en la región de El Cerro, Las Tablas, provincia de Los Santos (Toon, Starr, & Jensen, 2010).

Cuadro 1. Instrumentación utilizada en la investigación por la NASA en el estudio sobre TC4 (Toon, Starr, & Jensen, 2010).

Instrumentos satelitales	
Instrumento	satélite
OMI	A (Toon, Starr, & Jensen, 2010)ura
TES	Aura
HIRDLS	Aura
MLS	Aura
CALIOP	CALIPSO
Radar de perfilado de nubes	CloudSat
MODIS	Terra
MODIS	Aqua
Radar de precipitaciones, generador de imágenes de microondas	TRMM
Generador de imágenes visible e infrarroja	GOES 10/12
Instrumentos en el NASA ER-2	
CPL	Lidar de física de nubes (532, 1064 nm)
CRS	Sistema de radar en la nube (94 GHz)
EDOP	ER-2 Radar Doppler (X band)
AMPR	Radiómetro de precipitación de microondas avanzado (10.7, 19.4, 37, 89 GHz)
MAS/MASTER	MODIS, MODIS-ASTER Simulador aerotransportado (VIS/NIR/SWIR/IR espectrómetro)
CoSSIR	Escaneo cónico sub-mm Radiómetro de imágenes de ondas (183–874 GHz)
S-HIS	Escaneo de alta resolución Sonda de interferómetro (3–18 mm)
BB IR	Radiómetro de banda ancha (4–42 mm)
SSFR	Radiómetro de flujo espectral solar (VIS-SWIR)
MTP	Perfilador de temperatura de microondas
MVIS	Video Cámara
Instrumentos en tierra para medición de Agua e instrumentos de partículas	
CLH	Higrómetro láser de trayectoria cerrada
Frostpoint (FP)	Higrómetro de punto de escarcha
H2Ov	Vapor de agua
HOxotope	HOx/Isotopo
ICOS	Espectrómetro de cavidad integrada

JLH	JPL Higrómetro láser
2DS	Sonda 2D-S
CAPS	Espectrómetro de nubes, aerosoles y precipitaciones
CDP	Sonda de gota de nube
CEM	Transmisómetro
CPI	Generador de imágenes de partículas en la nube
CSI	Impactador de espectrómetro de nubes
FCAS	Espectrómetro de aerosol de cavidad focalizada
NMASS	Espectrómetro de tamaño de aerosol en modo núcleo
SP2	Fotómetro de partículas individuales
Instrumentos para la medición de trazas de gas, estado atmosférico e instrumentos de censado remoto	
Argus	Espectrómetro láser de diodo
NO/NO_y	Quimioluminiscencia de óxido nítrico/NO _y
O3	Ozono
PANTHER	Cromatógrafo de gas
CO₂	Harvard CO ₂
UAS O3	Ozono
WAS	Muestreador de aire completo
MMS	Transductor de presión y sonda de temperatura Paul Bui, NASA ARC
P/T	Presión y temperatura
CAFS	Espectrómetro de flujo actínico
ACAM	Cámara digital
Instrumentos a bordo del DC-8	
DLH	TDL de ruta abierta
2D-S, CPI	Sondas en la nube
LARGE	Espectrómetros de aerosoles
PALMS	Espectrómetro de masas de composición de partículas
CAPS, PIP	Sondas en la nube
CVI	Impactador virtual de contraflujo
CIMS	Espectrómetro de masas de iones químicos
DACOM	TDL (DACOM)
FAST OZ	Sonda de ozono de quimioluminiscencia
MACDON-NA SAGA	Cámara de niebla del analizador de gases IR
NO	Óxido nítrico de quimioluminiscencia
TD-LIF	Láser de diodo sintonizable
WAS	Muestreador de aire completo

Dropsondes	Sonda atmosférica
MMS	Sonda de presión y temperatura
APR-2	Radar de precipitación
LASE	IR Lidar
DIAL	UV Lidar
BB IR	Radiómetro de banda ancha
CAFS	Flujo actínico UV-Vis
SSFR	Radiómetro de flujo espectral solar
Instrumentos en tierra y Balones	
Ticosonde	
CFH-ozonesondes	
NATIVE	
SMART	
NPOL	
NATIVE	

Para el estudio, se tomó la información, disponible, desde el sitio <http://www.espo.nasa.gov/tc4>, la cual está en formato de texto y se creó una base de datos en Microsoft Structured Query Language (MSSQL). Esta base de datos nos permitió el manejo más ágil y preciso, de los diferentes parámetros atmosféricos medidos en dicho estudio.

Los datos originales utilizados son los correspondientes al acrónimo TC4, Sonde (<http://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/tc4/Sonde> (Drdla, 2017)). Una vez obtenido los archivos planos, se procedió a ubicar aquellos correspondientes a la región de Las Tablas. En la base de datos se creó una tabla con los nombres de los parámetros atmosféricos registrados (tiempo, presión, altitud, temperatura, humedad relativa, ozono parcial, mezcla de ozono, dirección del viento, rapidez del viento, latitud, longitud, ubicación, fecha data).

RESULTADOS

Al estudiar y catalogar la información disponible para realizar el estudio se procedió a obtener los perfiles de temperatura para la región en estudio, este caso la troposfera.

Se puede apreciar de la Fig. 2 que existe un cambio de pendiente alrededor de los 8 km de altitud. Debido a que en el ISA no se prevé este tipo de comportamiento en la troposfera, se decidió realizar un estudio detallado de los perfiles antes de los 8 km de altitud y después de los 8 km de altitud.

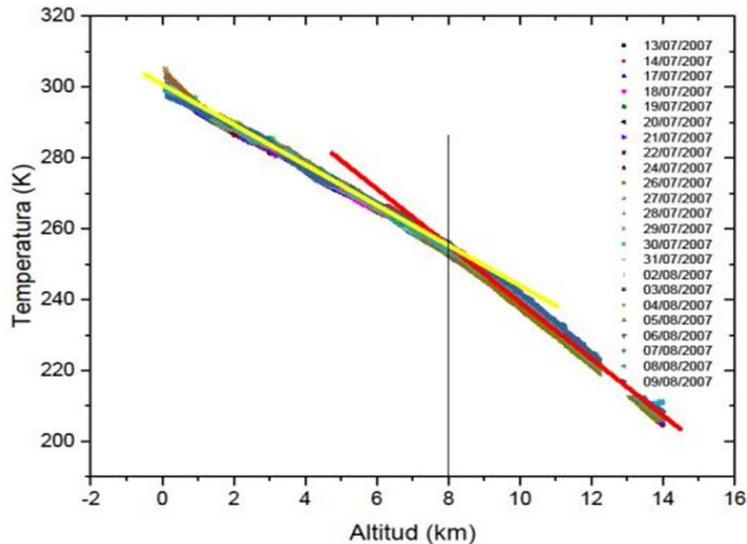


Fig. 2 Perfil de temperatura para los días en que se llevó a cabo el estudio en la región de Los Santos por parte de la NASA, Física de la Atmósfera (UP) y la Universidad de Costa Rica.

Al utilizar un modelo matemático lineal, se puede apreciar que los perfiles correspondientes a la primera sección, antes de los 8 km, se comportan como lo establece el ISA, Fig. 3

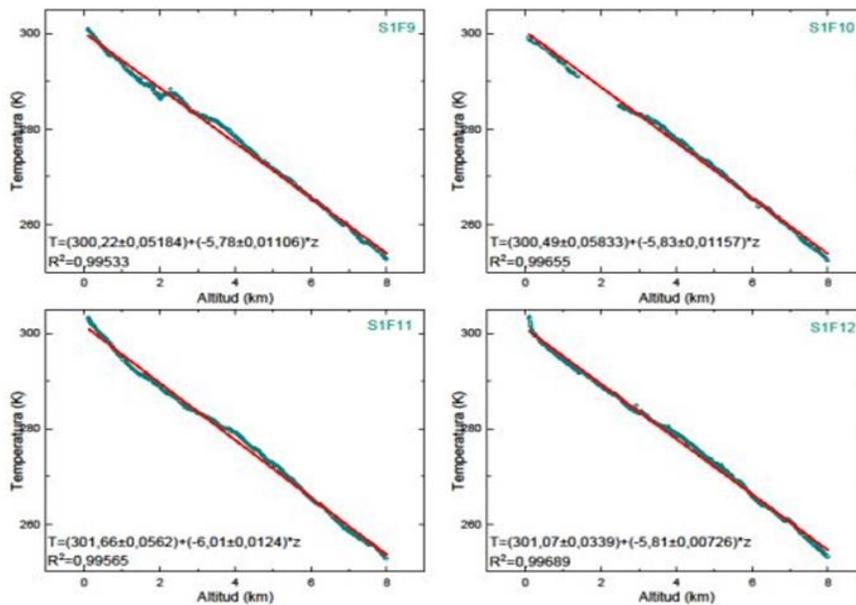


Fig. 3 Ajuste de la primera parte de los espectros de temperatura-altitud, para los días de estudio.

En el cuadro 2, se observan los comportamientos para los perfiles de temperatura en las diferentes fechas, y en la Fig. 4 podemos observar que la media de dichas pendientes es de -5,65 K/km.

Cuadro 2. Valores de pendiente, error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de la primera parte de los perfiles correspondientes a las fechas de estudio.

Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación	Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación
1	-5,69	0,01	0,998	13	-5,95	0,01	0,995
2	-5,33	0,01	0,997	14	-5,73	0,01	0,998
3	-5,65	0,01	0,999	15	-5,64	0,01	0,997
4	-5,69	0,01	0,998	16	-5,68	0,01	0,998
5	-5,48	0,01	0,996	17	-5,72	0,01	0,999
6	-5,42	0,01	0,999	18	-5,69	0,01	0,998
7	-5,41	0,01	0,999	19	-5,78	0,01	0,987
8	-5,47	0,01	0,999	20	-5,61	0,01	0,997
9	-5,78	0,01	0,995	21	-5,56	0,01	0,994
10	-5,83	0,01	0,997	22	-5,62	0,01	0,999
11	-6,01	0,01	0,996	23	-5,45	0,01	0,989
12	-5,81	0,01	0,997				

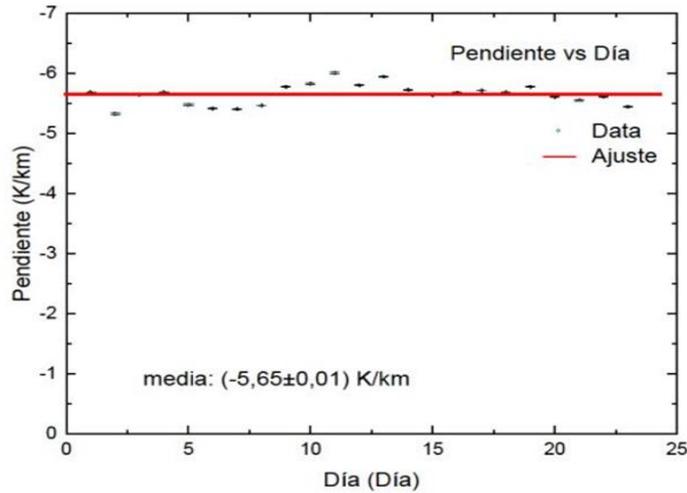


Fig. 4 Gráfico de las pendientes de la primera parte de los perfiles temperatura-altitud en función de los días de estudio.

En la Fig. 5 tenemos una muestra de los perfiles de temperatura para los días en estudio correspondientes a las altitudes entre 8 km y 14 km, y en el cual también se puede apreciar un comportamiento lineal.

Todos los valores de los ajustes obtenidos para cada perfil se observan en el cuadro 3, y en la Fig. 6 se obtiene una media de $-8,16 \text{ K/km}$ para los perfiles de la Fig. 5.

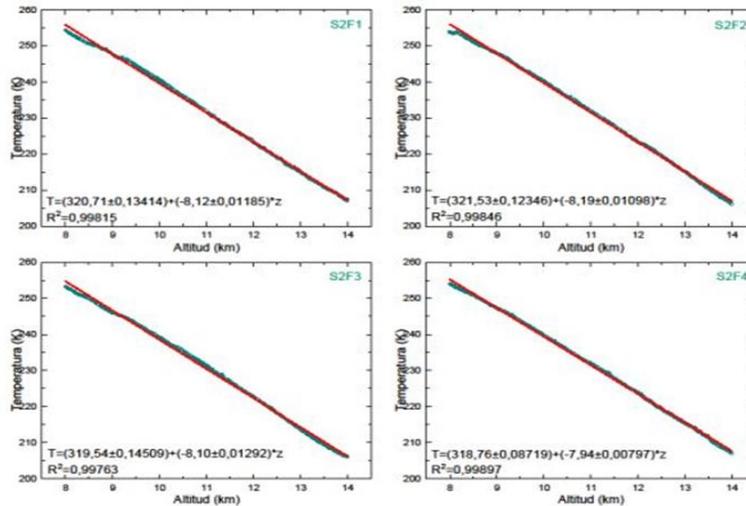


Fig. 5 Ajuste de la segunda parte de los espectros de temperatura-altitud, para los días de estudio.

Cuadro 3. Valores de pendiente, error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de la segunda parte de los perfiles correspondientes a las fechas de estudio.

Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación	Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar	Coefficiente de correlación
1	- 8,12	0,01	0,998	13	-7,91	0,01	0,999
2	-8,19	0,01	0,998	14	-8,04	0,01	0,997
3	-8,10	0,01	0,998	15	-8,08	0,01	0,997
4	-7,94	0,01	0,999	16	-8,05	0,01	0,999
5	-8,19	0,01	0,999	17	-8,13	0,01	0,996
6	-8,42	0,01	0,998	18	-8,27	0,01	0,998
7	-8,41	0,01	0,998	19	-8,25	0,01	0,998
8	-8,46	0,01	0,999	20	-8,23	0,01	0,998
9	-8,9	0,01	0,999	21	-8,10	0,01	0,998
10	-8,04	0,01	0,999	22	-7,91	0,01	0,997
11	-8,01	0,01	0,997	23	-8,19	0,01	0,997
12	-7,82	0,01	0,999				

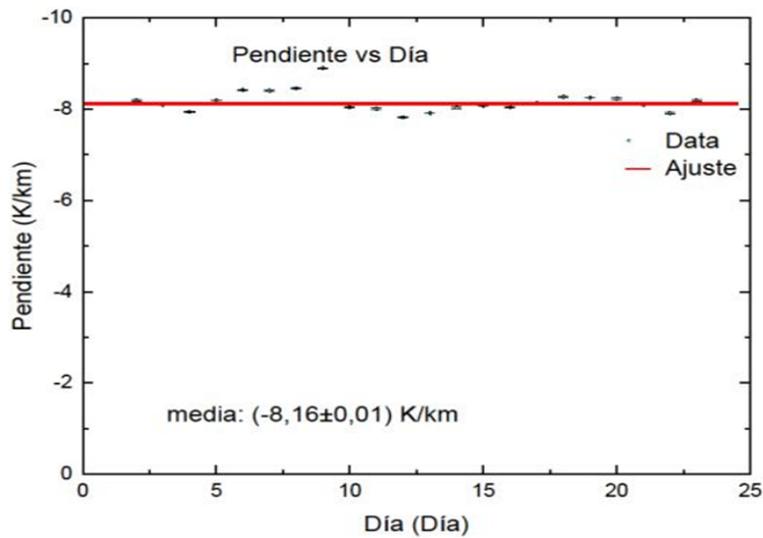


Fig. 6 Gráfico de las pendientes de la segunda parte de los perfiles temperatura-altitud en función de los días de estudio.

Con estos resultados podemos decir que existe un marcado cambio de pendiente en los perfiles de temperatura para la región en estudio y el mismo se puede apreciar en la Fig. 7

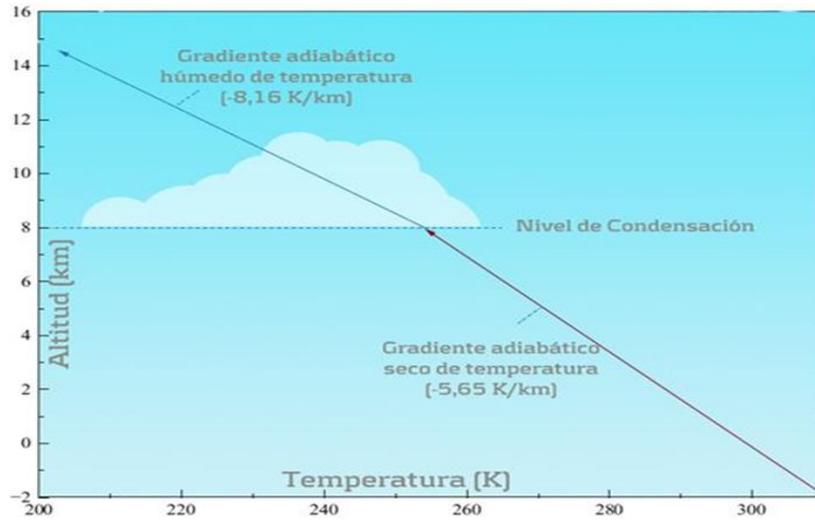


Fig. 7 Explicación probable a la presencia de la doble pendiente en los perfiles de temperatura en función de la altitud.

Al observar la Fig. 8 se tiene una muestra de los perfiles de presión que se obtuvieron durante el muestreo realizado durante la ejecución del proyecto TC4. En los mismos se puede apreciar que el comportamiento es el que nos indica la ISA.

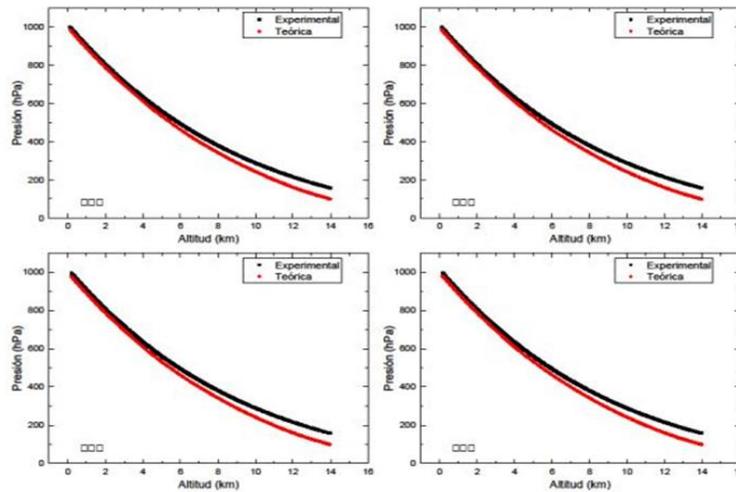


Fig. 8 Perfiles de presión en función de la altitud para algunas fechas del estudio realizado.

Utilizando un modelo matemático exponencial se obtuvieron los ajustes de los perfiles de presión mostrados en la Fig. 9 y mostrados en el cuadro 4. Luego de ello, y utilizando un software para el tratamiento de datos experimentales, se obtiene una presión media de $1,119 \times 10^3$ hPa.

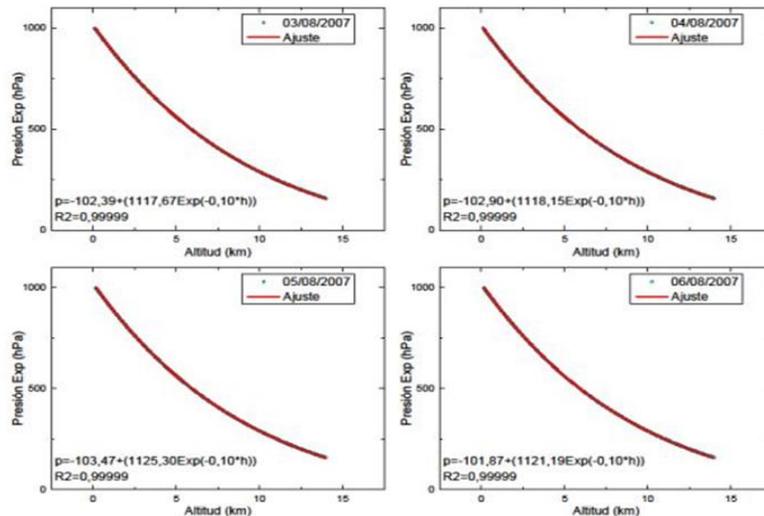


Fig. 9 Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para algunas fechas del estudio.

Cuadro 4. Valores del intercepto, presión inicial y coeficiente de correlación de los perfiles de presión en función de la altitud para el área de estudio en las fechas asignadas, correspondiente al mes de julio-agosto de 2007

Día	Intercepto (hPa)	P0 (x 10 ³) (hPa)	Coefficiente de correlación	Día	Intercepto (hPa)	P0 (x 10 ³) (hPa)	Coefficiente de correlación
1	100,8	1,111	0,999	12	107,3	1,120	0,999
2	100,1	1,116	0,999	13	101,8	1,116	0,999
3	102,0	1,119	0,999	14	103,6	1,119	0,999
4	102,2	1,121	0,999	15	102,4	1,118	0,999
5	102,1	1,118	0,999	16	102,9	1,118	0,999
6	101,0	1,126	0,999	17	103,5	1,125	0,999
7	101,5	1,118	0,999	18	101,9	1,121	0,999
8	102,8	1,122	0,999	19	101,8	1,120	0,999
9	106,0	1,116	0,999	20	102,7	1,115	0,999
10	106,0	1,121	0,999	21	101,0	1,117	0,999
11	106,7	1,121	0,999				
Media del Intercepto = 102,8 x 10 ³ hPa				Media de P0 = 1,119 x 10 ³ hPa			

CONCLUSIONES

Esta investigación se llevó a cabo, en la región de la atmósfera, denominada tropósfera, ya que, es aquí, en donde se dan la mayoría de los procesos atmosféricos que inciden directamente con los seres humanos.

Los perfiles de temperatura en función de la altitud, para las fechas del 13 de julio del 2007 al 8 de agosto del 2007, muestran la presencia de una doble pendiente, alrededor de los ocho kilómetros (8 km), en contraste con lo expuesto por el modelo de la atmósfera estándar, que indica, que esta es una zona en la cual se da un comportamiento lineal. El comportamiento en cada una de las regiones, antes y después de los 8 km, es lineal.

Ésta doble pendiente puede ser entendida observando el pico relativo que se presenta en los perfiles de humedad relativa – altitud debido a los procesos convectivos que se presentan en la región comprendida entre los 6 km y 8 km; con esto se tiene un proceso de inversión térmica por subsidencia en el cual el aire más frío se ubica por debajo de la zona de condensación mientras que el aire caliente se ubica sobre esta región. El comportamiento de la atmosfera para altitudes inferiores a los 8 km, en el área de estudio es lineal entre la temperatura y la altitud; la tasa de variación de la temperatura con la altitud determina el gradiente adiabático seco. En nuestro estudio obtuvimos un valor para este gradiente de $(-5,65 \pm 0,01)$ K/km.

A partir de los 8 km hacia arriba, se inicia el proceso de condensación; en este punto se determina la elevación del nivel de condensación (LCL), por sus siglas en inglés. De aquí en adelante se puede llevar a cabo la formación de las nubes; para ello la parcela de aire inicia su proceso de saturación, que trae como consecuencia, la condensación. Para este estudio se pudo determinar que a partir de los 8 km hacia arriba se tiene un valor de $(-8,16 \pm 0,01)$ K/km para el gradiente adiabático húmedo.

Sí obtenemos el valor medio de los valores del gradiente adiabático húmedo y el gradiente adiabático seco obtenemos un valor de 6,86 K/km, lo que está próximo al del modelo estándar de la atmósfera, 6,5

°C/km, con un error porcentual de aproximadamente 5%.

Desarrollando la matemática para una parcela de aire, con los alrededores a la misma temperatura, y utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron se puede obtener que el gradiente adiabático húmedo, siempre es menor que el gradiente adiabático seco; esto explica la existencia de una aparente doble pendiente en el gráfico de temperatura en función de la altitud para la troposfera de la región en estudio.

Al estudiar los perfiles de presión en función de la temperatura, se muestra que los datos experimentales, pueden ser ajustados, con una buena aproximación, utilizando un modelo matemático, dado por la ecuación de la ISA. Además, se observa que, a medida que se va incrementando la altitud, la densidad de aire decrece (Ahrens, 2011).

Así mismo, se puede concluir, que los perfiles de presión en función de la altitud, para la región de estudio, se comportan de la siguiente forma $p = (-102,85 + 1119,36e^{-0,10h}) \text{ hPa}$. Lo que está de acuerdo con lo predicho por el modelo de la atmósfera estándar.

Al comparar el modelo experimental y el teórico de la presión en función de la temperatura, se observa que las curvas inician unidas, pero al ir incrementándose la altitud las mismas se van separando. Esto se debe a que, según el modelo estándar, la presión decrece con la altitud y, además, depende la constante de los gases; a medida que se va aumentando la altitud, las moléculas se van haciendo más pesadas, lo que trae como consecuencia un menor valor para la constante de los gases. En otras palabras, a altas temperaturas, tenemos moléculas más energéticas.

REFERENCIAS

Ahrens, C. (2011). *Essentials of Meteorology An Introduction to the Atmosphere*. Belmont, CA: Brooks Cole, Cengage Learning.

Chirica, D. (2008, Julio 8). *NASA-ESPO Tropical Compositio Cloud and Climate Coupling*. Retrieved from NASA-ESPO: https://cloud1.arc.nasa.gov/tc4_esp/

Chirica, D. (2017, Abril 22). *TC4 Gallery*. Retrieved from TC4 Science: <https://espo.nasa.gov/tc4/mission-gallery>

Drdla, K. (2017, Abril 22). *TC4 Sonde files*. Retrieved from TC4 Science: <https://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/tc4/Sonde>

L Pfister, H. B. (2009, Septiembre 17). *TC4 Science Papers*. Retrieved from https://cloud1.arc.nasa.gov/tc4/docs/papers/Selkirk_et_al-Tropical_UTLS_water_vapor_and_ozone-Submission.pdf

Lhotellier, E. (2017, Diciembre 16). *International Standard Atmosphere*. Retrieved Octubre 9, 2018, from https://www.iviao.aero/training/documentation/books/Student_ISA.pdf

Mike Craig. (2008, Julio 8). *ESPO-TC4-Mapas*. Retrieved from NASA-ESPO; Tropical Composition Cloud and Climate Coupling: http://www.espo.nasa.gov/tc4/map_panama.php

Owen B. Toon, D. O. (2007). *Planning and Implementation of the Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling Experiment (TC4)*.

Retrieved from TC4 Science Papers: https://cloud1.arc.nasa.gov/tc4/docs/papers/TC4_mission_overview-1.pdf

Toon, O. B., Starr, D. O., & Jensen, E. J. (2010). Planning, implementation, and first results of the Tropical Composition, Cloud and Climate Coupling Experiment (TC4). *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 1-33.