

# ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE VARIABLES ATMOSFÉRICAS OBTENIDAS A TRAVÉS DE POSICIONAMIENTO GNSS Y TÉCNICAS METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES



## Simposio SIRGAS 2016

Quito, Ecuador  
Noviembre 16 - 18, 2016

<sup>1,2,3</sup> Christian Pilapanta A., <sup>1,2</sup> Claudia P. Krueger & <sup>3</sup> Alfonso Tierra C.

<sup>1</sup> Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia. Universidade Federal do Paraná.  
Curitiba – Brasil

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná.  
Curitiba – Brasil

<sup>3</sup> Grupo de Investigación Geoespacial. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.  
Sangolquí - Ecuador



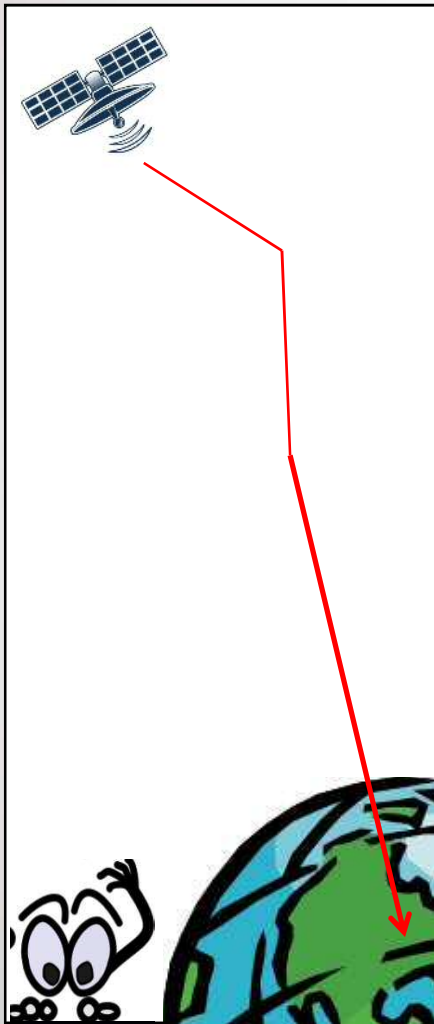


# GENERALIDADES

---

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL



### Errores instrumentales en el satélite

- ✓ Reloj
- ✓ Variaciones del centro de fase
- Posicionamiento Diferencial. Parametrización
- Calibración de antenas emisoras

### Propagación de la señal

- ✓ **Tropósfera**
- ✓ **Ionósfera**
- ✓ Multicamino (satélite y receptor)
- **Modelamiento. Efecto Troposférico**
- **Modelamiento. Efecto Ionosférico**
- Selección del lugar. Parametrización

### Variaciones de la posición del receptor

- ✓ **Mareas Atmosféricas** e Terrestres
- ✓ **Cargas Atmosféricas** e Oceánicas
- ✓ Movimientos Tectónicos
- **Modelamiento de variaciones**
- **Modelamiento de cargas**
- Aplicación de velocidades lineales

### Errores instrumentales en el receptor

- ✓ Reloj
- ✓ Variaciones del centro de fase
- Posicionamiento Diferencial. Parametrización
- Calibración de antenas receptoras

### Ruidos

- ✓ Saltos de Ciclo
- ✓ Propagación entre canales
- ✓ Interferencias y otros
- Resolución de ambigüedades
- Mejoramiento de los equipos
- Medidas prácticas

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

### ✓ CONSIDERACIONES PRINCIPALES

1. Modelamiento atmosférico se basa en el análisis de los fenómenos interactuantes sobre la señal GPS, a través del **establecimiento de una relación proporcional** entre la cantidad de señal distorsionada y valores promedios de constituyentes (presión, temperatura y humedad relativa medias)
2. Su definición contempla el **establecimiento de un sistema físico – químico idealizado** (sistema cerrado, aislado), el cual en la mayoría de los casos, **no toma a consideración la variabilidad de sus entidades** (estado físico e interacción química de sus constituyentes sujeto a evolución temporal).

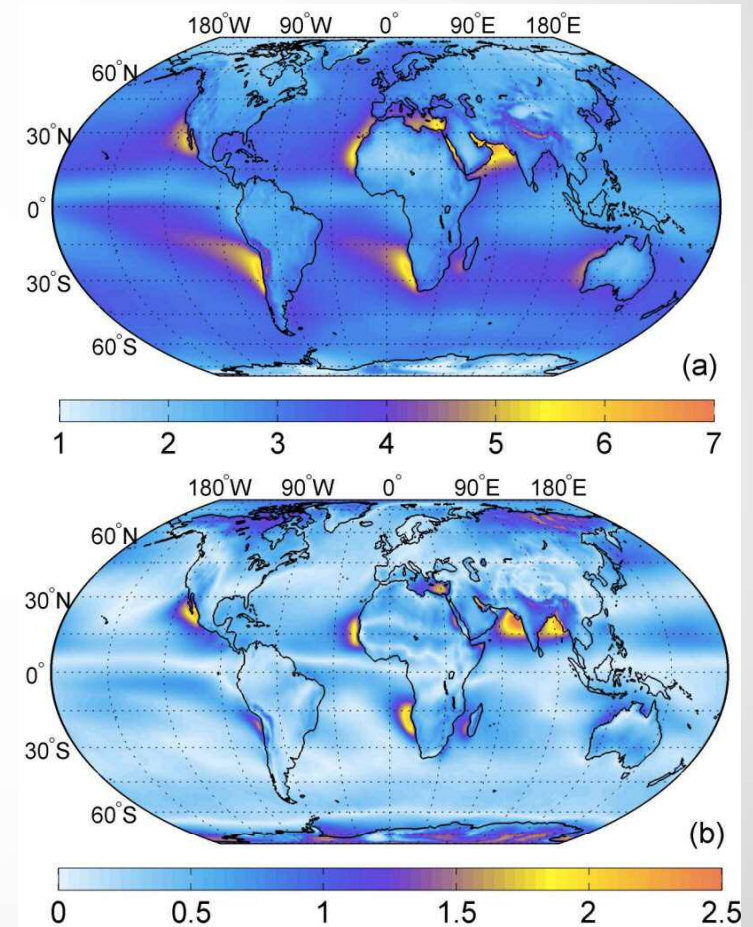


Figura 1. Modelo GPT2w. Global Pressure and Temperature  
Fuente. Böhm, J., et. al. 2015

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

### ✓ ASÍ, POR EJEMPLO ...

Modelos principales definidos en la IERS Conventions 2010 (Gérard & Luzum, 2010)

- ✓ GPT2w. Global Pressure and Temperature. (Böhm, J., et. al. 2015).
- ✓ GMF. Global Mapping Function (Boehm, Niell, Tregoning, & Schuh, 2006)
- ✓ VMF1. Vienna Mapping Function (Boehm, J., & Schuh, H. 2004)

Se definen a través de parámetros medios, obtenidos in-situ o a través de modelos numéricos (ERA-Interim) interpolados:

- ✓ GRP. Global Pressure Reference Model (Schuh, Schindelegger, Wijaya, & Salstein, 2010)

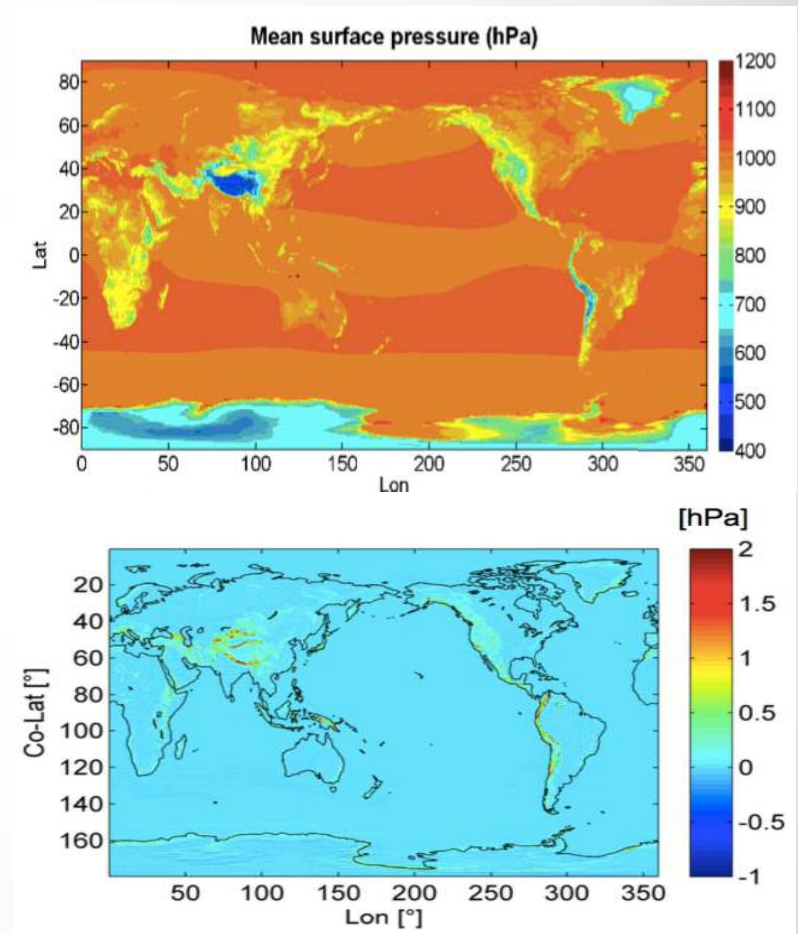


Figura 2. Modelo ERA-Interim da ECMWF

Fuente: Plag et al., 2007

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

✓ ASÍ, POR EJEMPLO ...

✓ GRP. Global Pressure Reference Model (Schuh, Schindelegger, Wijaya, & Salstein, 2010)

**Modelo base. ERA-40 (Datos mensuales promedio)**

1. Resolución horizontal.

1° x 1° (equidistante)

2. Resolución vertical.

23 niveles de presión constituido por 3 variables principales:

a. Geopotencial Z

b. Humedad Específica Q

c. Temperatura T (o Temperatura Virtual  $T_v$ )

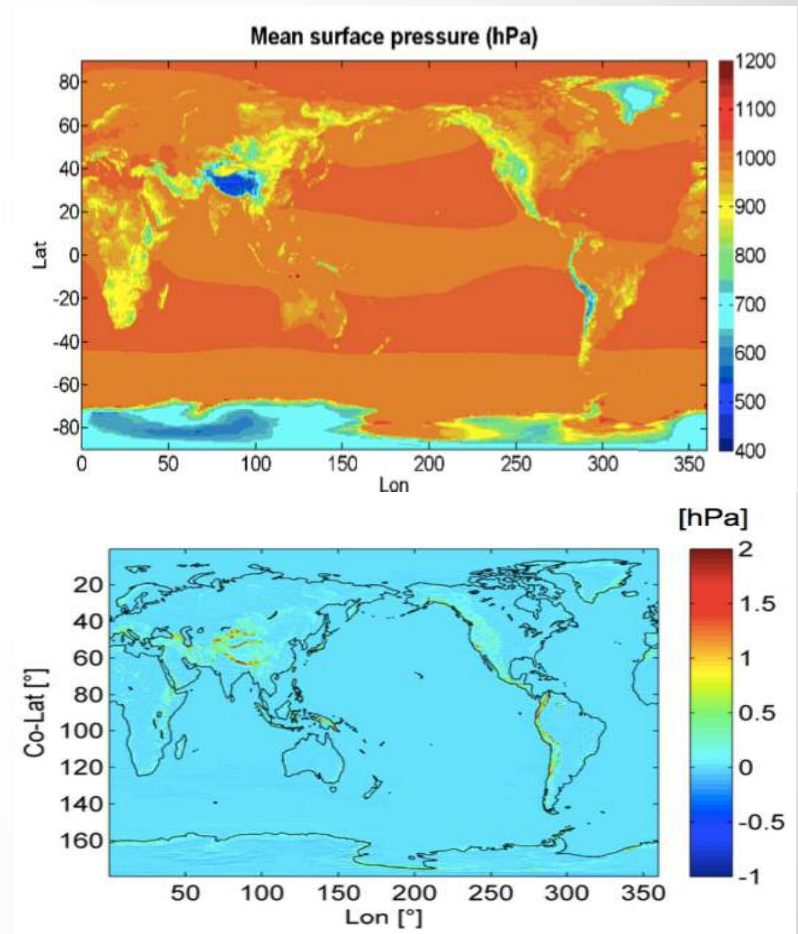


Figura 2. Modelo ERA-Interim da ECMWF

Fuente: Plag et al., 2007

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

- ✓ **PRINCIPALES PROBLEMAS DE ESTE CONCEPTO ...**
  - ✓ Los modelos no representan en su totalidad la dinámica atmosférica influyente en el posicionamiento satelital (principalmente en zonas con una alta actividad climática), lo cual puede llegar a ser decisivo en el análisis de procesos complejos como son: los procesos de carga de presión atmosférica y mareas atmosféricas.

Ejemplo.

### ➤ **Modelo de Carga de Presión Atmosférica**

Principio Fundamental. Tierra Sólida como medio elástico que deforma su superficie. (Farrell, 1972).

Consideraciones necesarias. Simetría esférica, Superficie Elástica, Sistema no-rotacional.

Principio Teórico. Modelamiento por Funciones de Green e Armónicos Esféricos

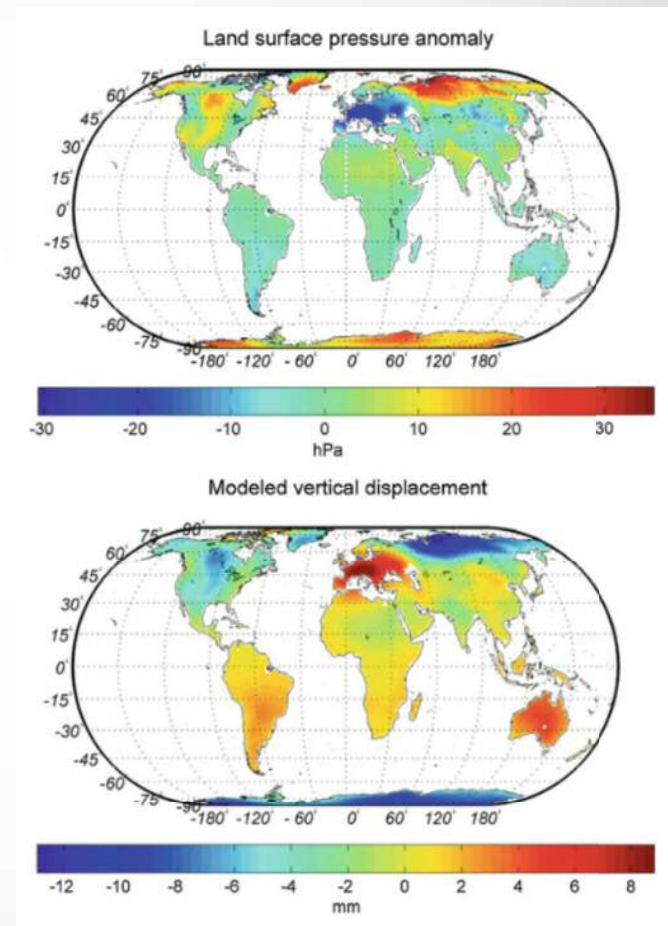


Figura 3. Anomalía de Presión de Superficie y Deslizamientos verticales modelados (01.01.2010)

Fuente: Boehm, J & Schuh, H. 2013

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

### ✓ PRINCIPALES PROBLEMAS DE ESTE CONCEPTO ...

#### ✓ Modelo de Carga de Presión Atmosférica

$$U_r(r, t) = \iint_S [P(r', t) - P_{ref}(r')] G_r(\psi) \cos \vartheta' d\vartheta' d\lambda',$$

$$U_e(r, t) = \iint_S [P(r', t) - P_{ref}(r')] G_h(\psi) \sin \alpha_{rr'} \cos \vartheta' d\vartheta' d\lambda',$$

$$U_n(r, t) = \iint_S [P(r', t) - P_{ref}(r')] G_h(\psi) \cos \alpha_{rr'} \cos \vartheta' d\vartheta' d\lambda'.$$

Importante:

$P_{ref}$  es definida teniendo a consideración una atmósfera no perturbada. Wijaya, et. al. (2013)

Por consiguiente:

El modelo se vuelve inconsistente al analizar las características particulares del medio.

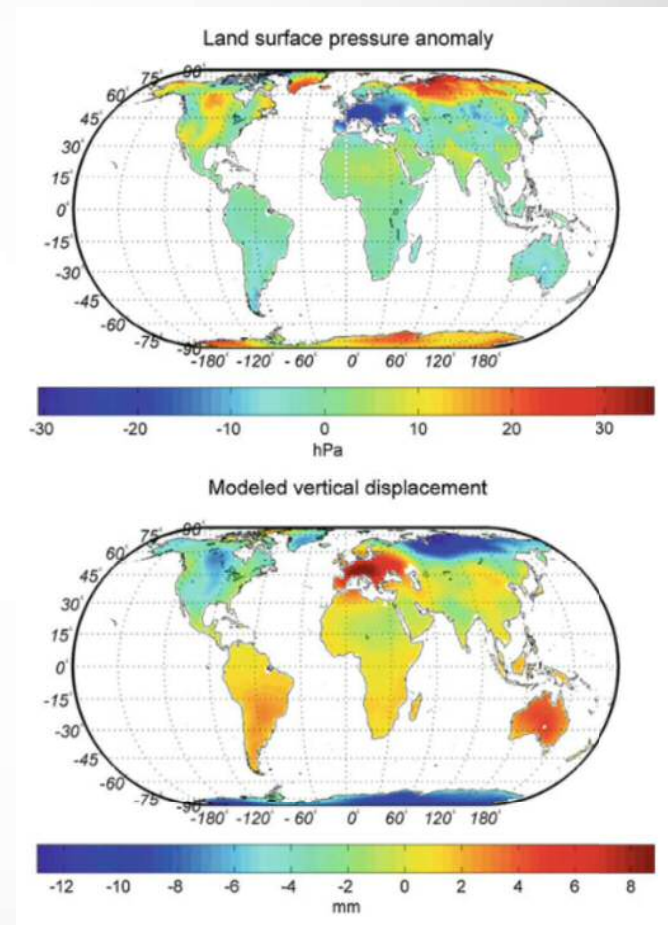


Figura 3. Anomalía de Presión de Superficie y Deslizamientos verticales modelados (01.01.2010)

Fuente: Boehm, J & Schuh, H. 2013



# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

- ✓ **PRINCIPALES PROBLEMAS DE ESTE CONCEPTO ...**
  - ✓ Los modelos no representan en su totalidad la dinámica atmosférica influyente en el posicionamiento satelital, principalmente en zonas con una alta actividad climática, lo cual puede llegar a ser decisivo en el análisis de procesos complejos como son: los procesos de carga de presión atmosférica y mareas atmosféricas.
  - ✓ El establecimiento de un sistema idealizado, no permite incluir en el proceso de definición de variables, fuerzas o constituyentes que no se ajusten al manejo de un sistema físico-químico cerrado (termodinámicamente)

Ejemplo.

Efecto del Barómetro Invertido

Respuesta real de la superficie oceánica a las variaciones de presión atmosférica.



$$\zeta_{IB} = -\frac{\delta P_a}{\rho_0 \cdot g}$$
$$-\int_{\zeta}^h \rho \cdot g \cdot dz = -\int_{\zeta - \zeta_{IB}}^h \rho \cdot g \cdot dz + \delta P_a$$

Figura 4. Efeito do Barômetro Invertido

Fuente: <http://www.nature.com/>. 2015

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

### ✓ PRINCIPALES PROBLEMAS DE ESTE CONCEPTO ...

- ✓ Los modelos no representan en su totalidad la dinámica atmosférica influyente en el posicionamiento satelital, principalmente en zonas con una alta actividad climática, lo cual puede llegar a ser decisivo en el análisis de procesos complejos como son: los procesos de carga de presión atmosférica y mareas atmosféricas.
- ✓ El establecimiento de un sistema idealizado, no permite incluir en el proceso de definición de variables, fuerzas o constituyentes que no se ajusten al manejo de un sistema físico-químico cerrado (termodinámicamente) (Ejemplo. Principio del Barómetro Invertido)
- ✓ El uso aislado de técnicas numéricas propias para el análisis de los efectos interactuantes en el posicionamiento satelital, no permite correlacionar sus resultados con información provenientes de fuentes externas de mayor contraste (técnicas atmosféricas)

$$\Delta L = 10^{-6} \int_S N_h(s) ds + 10^{-6} \int_S N_w(s) ds + S - G = \Delta L_h + \Delta L_w + S - G,$$

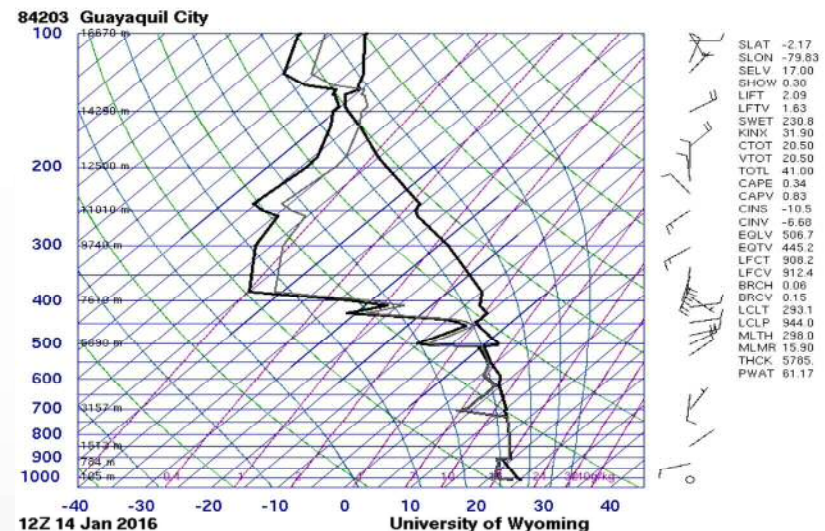
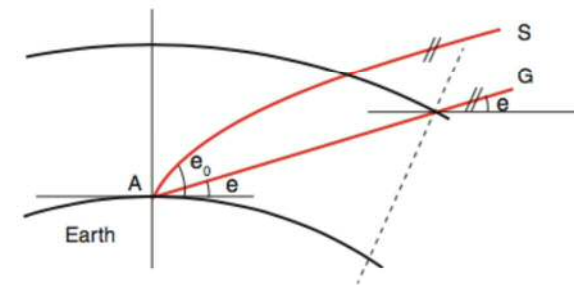


Figura 5. Perfil de Radiosondeo para la Estación GYEC  
Fuente. Wyoming University, 2016

# GENERALIDADES

## EFFECTOS Y VARIABLES ATMOSFÉRICAS INFLUYENTES EN EL POSICIONAMIENTO SATELITAL

### ✓ SURGEN LAS PREGUNTAS ...

- ✓ ¿Cómo afecta al posicionamiento satelital (en términos de precisión), el uso de modelos numéricos poco congruentes con la realidad del entorno analizado? (Ejemplo. Zonas intertropicales-andinas)
- ✓ Es posible acoplar a los modelos existentes, características climatológicas inherentes de cada sector, excluidas del análisis general del sistema? (Ejemplo. Viento, Radiación solar, no-asimetría de la atmósfera)
- ✓ Si es posible, cuáles son los mecanismos necesarios para correlacionar la información, ya sea esta, observaciones, resultados, intervalos, entre otros, y cuanto aporta a la mejora del modelo establecido?
- ✓ En términos de recursos computacionales, es rentable generar modelos mucho más complejos que los existentes?

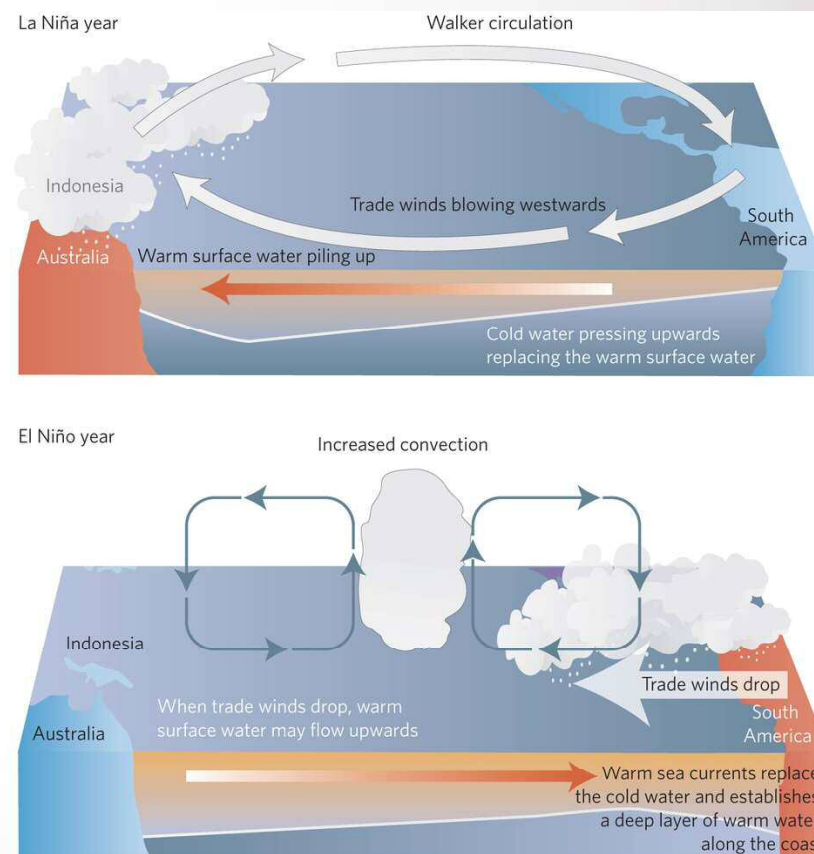


Figura 6. Fenómenos de Oscilación Sul-El Niño e La Niña

Fuente: <http://www.nature.com/>. 2015

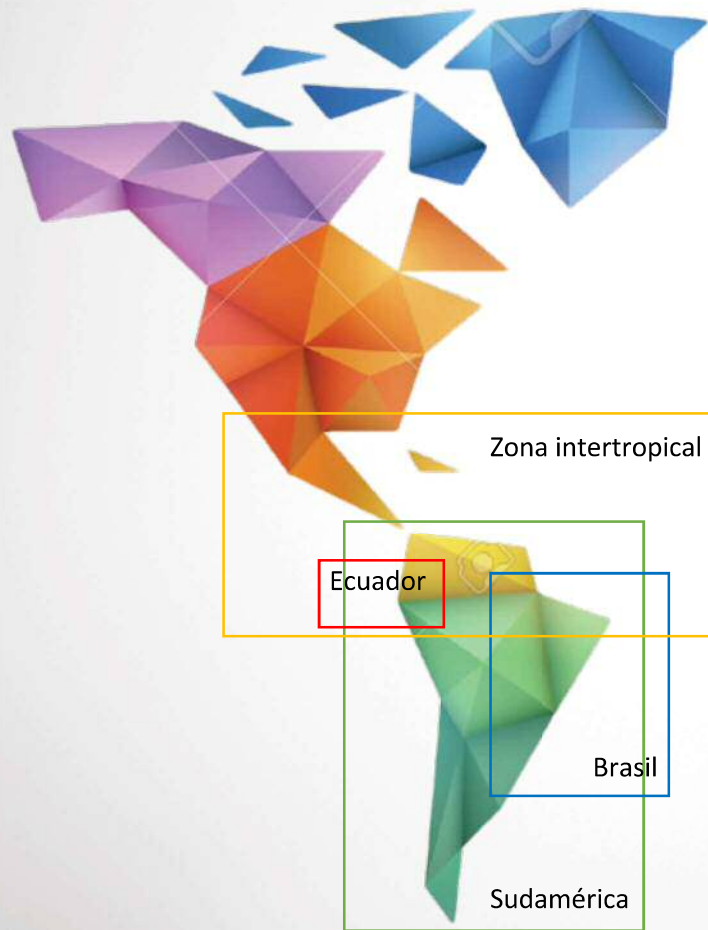


# DESARROLLO

---

# DESARROLLO

## ZONAS DE ESTUDIO Y DE APLICACIÓN DEFINIDAS



### ✓ ZONA DE ESTUDIO

Región sudamericana (principalmente zona intertropical andina)

### ✓ FUENTES DE OBSERVACIÓN

1. Estaciones GNSS-MET. (Red IGS / SIRGAS / REGME, RMBC)
2. Información de Radiosondeos (IGRA, Wyoming University)
3. Información Adicional (Raman Lidar, MODIS Atmosphere Products, GNSS Remote Sensing)

### ✓ PERIODO DE ANÁLISIS

Mínimo. Últimos 10 años

# DESARROLLO

## ETAPAS DE ESTUDIO. ESQUEMA GENERAL



1

Establecimiento del sistema físico – químico (sistema termodinámico) para la definición de las variables atmosféricas de interés. (Especificación del sistema climático y de agentes externos. Ej. Esfericidad Terrestre)

2

1. Análisis, evaluación y definición de técnicas de correlacionamiento de información.
2. Establecimiento de criterios y procesos de interconexión entre variables.

3

1. Definición de los modelos más adaptables a las condiciones particulares del entorno (espacio-temporal).
2. Análisis del sis. en términos de entradas y salidas. (Modelo de Variable o M. Efecto)

4

1. Generación de modelos numéricos con características dinámicas.
2. Análisis de su influencia en el posicionamiento satelital y en el ámbito meteorológico.

# DESARROLLO

## ETAPAS DE ESTUDIO. ESTABLECIMIENTO DEL MODELO FÍSICO – QUÍMICO

### ✓ CONSIDERACIONES PRINCIPALES

1. Análisis del sistema Tierra, como un sistema en equilibrio termodinámico.
2. Establecimiento del sistema físico basados en las Leyes Principales de los Gases. (Termodinámica)
3. Propiedades no asimétricas interactuantes. (Gradientes atmosféricos)
4. Análisis definido de cada una de las capas atmosféricas con sus propiedades. (Circulación general, fuerzas actuantes, corrientes en chorro, entre otros)
5. Análisis de efectos (sesionales) particulares (Fenómeno El Niño – Oscilación del Sur)

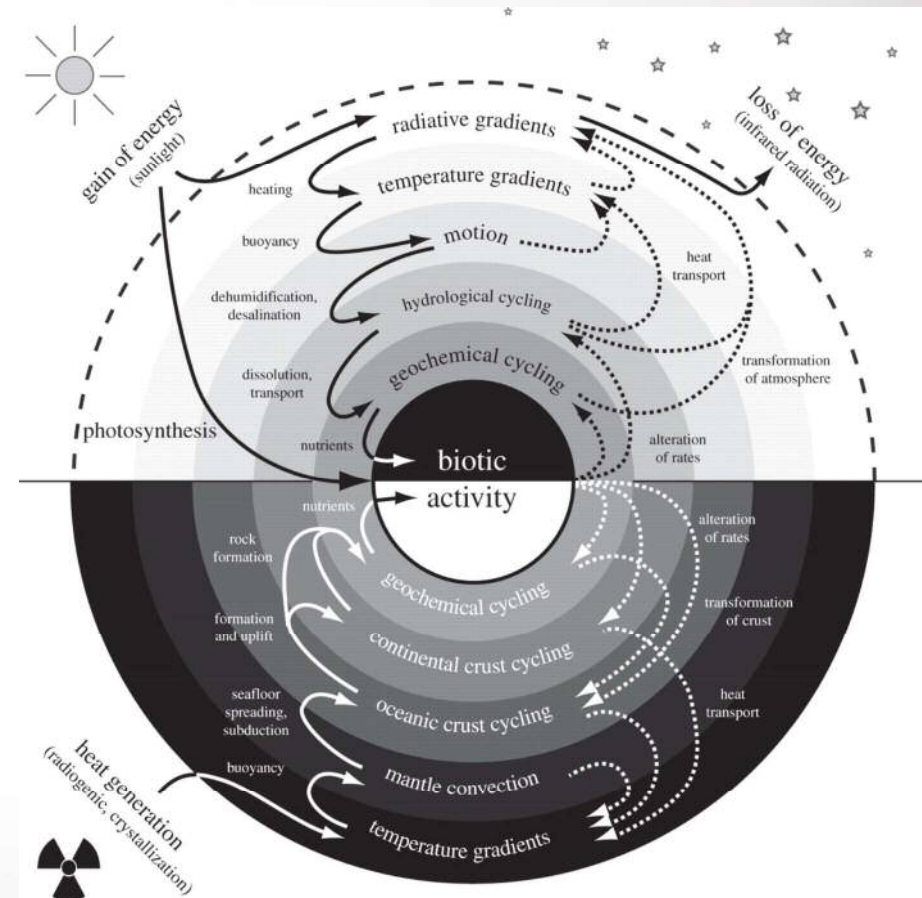


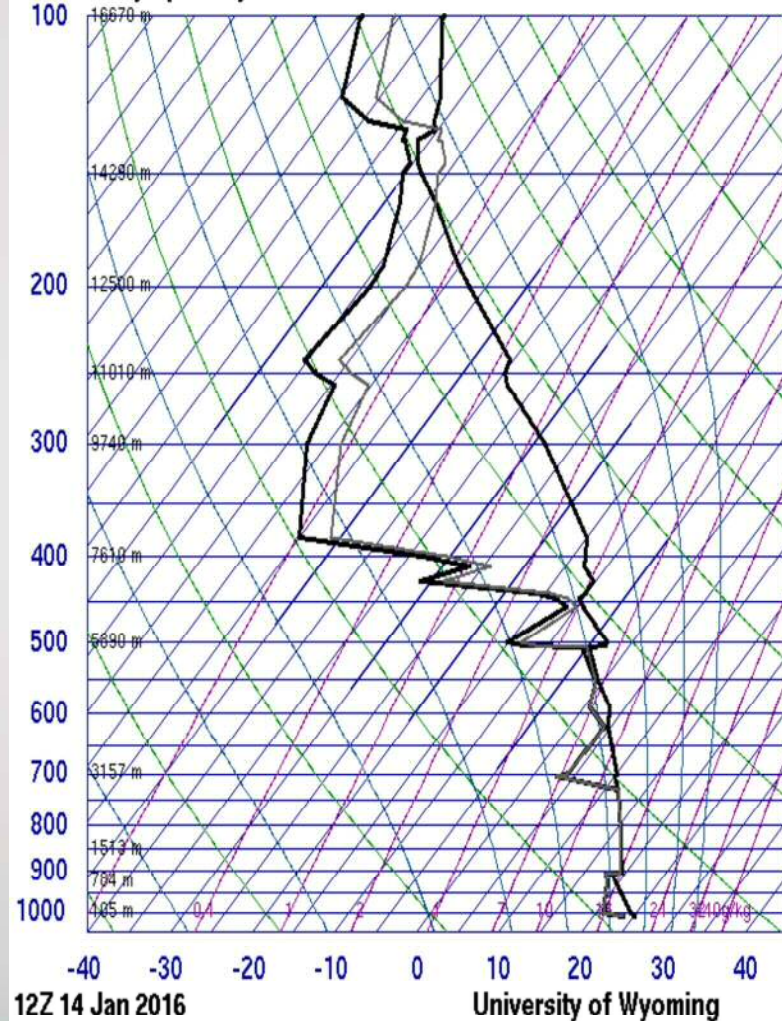
Figura 7. Esquema del Sistema Tierra (Termodinámico)

Fuente: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/>. 2015

# DESARROLLO

## ETAPAS DE ESTUDIO. CORRELACIÓN DE MODELOS Y VARIABLES

84203 Guayaquil City



SLAT -2.17  
SLON -79.83  
SELV 17.00  
SHOW 0.30  
LIFT 2.09  
LFTV 1.63  
SWET 230.8  
KINX 31.90  
CTOT 20.50  
VTOT 20.50  
TOTL 41.00  
CAPE 0.34  
CAPV 0.83  
CINS -10.5  
CINV -6.66  
EQLV 506.7  
EQTV 445.2  
LFCT 908.2  
LFCV 912.4  
BRCH 0.06  
BRCV 0.15  
LCLT 293.1  
LCLP 944.0  
MLTH 298.0  
MLMR 15.90  
THCK 5785.  
PWAT 61.17

1

ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS  
PROPIAS DE CADA VARIABLE  
(INTERACCIÓN INDIVIDUAL)

2

ANÁLISIS DE DISCREPANCIAS  
ENTRE VARIABLES Y/O  
MODELOS

3

CÁLCULO DE FUNCIÓN  
MATEMÁTICA DE CORRELACIÓN  
(DE ACUERDO AL OBJETIVO DE  
ESTUDIO)

4

ANÁLISIS DE RESULTADOS.  
PORCENTAJE DE CORRELACIÓN



# DESARROLLO

## ETAPAS DE ESTUDIO. CORRELACIÓN DE MODELOS Y VARIABLES

### ✓ POR EJEMPLO ...

1. Para correlacionar información proveniente de un radio-sondeo, se debe determinar la altura de medición con características físicas (conforme al sistema Tierra), para lo cual se puede utilizar (Boehm, J., et. al. 2015):

$$h_d = \frac{C}{g_n} = \frac{1}{g_n} \cdot \int_0^h g(\varphi, h) \cdot dh$$

$$h_d \approx \frac{1}{g_n} \cdot g\left(\varphi, \frac{h}{2}\right) \cdot h$$

Donde:

$$h = \frac{h_d \cdot g_n}{g\left(\varphi, \frac{h}{2}\right)}$$

Y,

$$g(\varphi, h) = g_n \left(1 - 0.0026373 \cos(2\varphi) + 0.0000059 \cos^2(2\varphi)\right) \cdot \left(1 - 3.14 \cdot 10^{-7} \cdot h\right)$$

**Ecuación de Gravedad Normal**

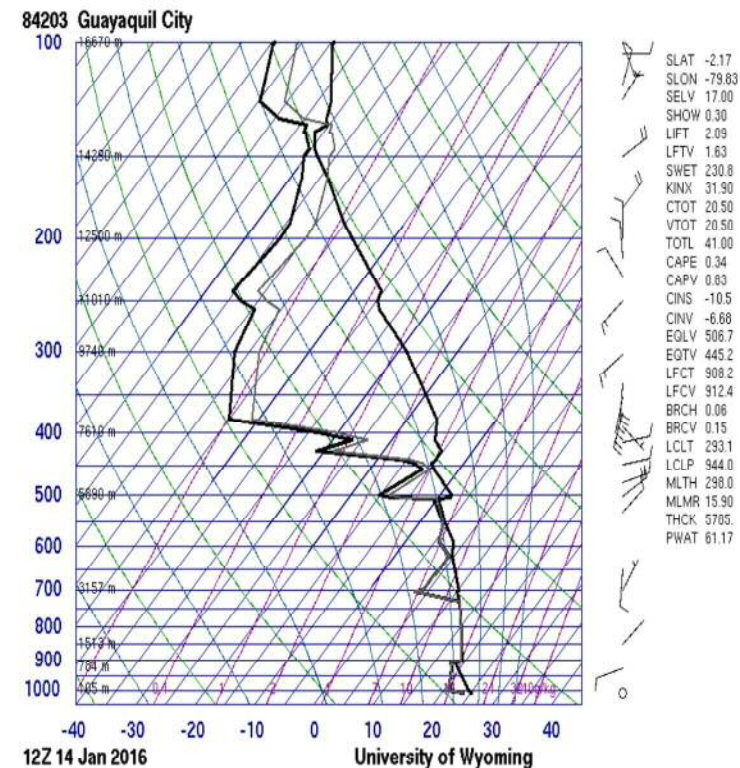


Figura 8. Perfil de Radiosondeo para la Estación GYEC  
Fuente. Wyoming University, 2016

# DESARROLLO

## ETAPAS DE ESTUDIO. CORRELACIÓN DE MODELOS Y VARIABLES

### ✓ POR EJEMPLO ...

1. Una vez realizado el cálculo de altura, se procede a la reducción de valores. Así:

a. Presión Total

$$h - h_0 = \frac{R'_d \cdot T_v}{g} \frac{p_0}{p}$$

b. Presión de Vapor de Agua

$$e = e_0 \cdot e^{(h-h_0)c}$$

c. Humedad (Hobiger et al. 2008)

$$p_v = \frac{RH}{100} p_w$$

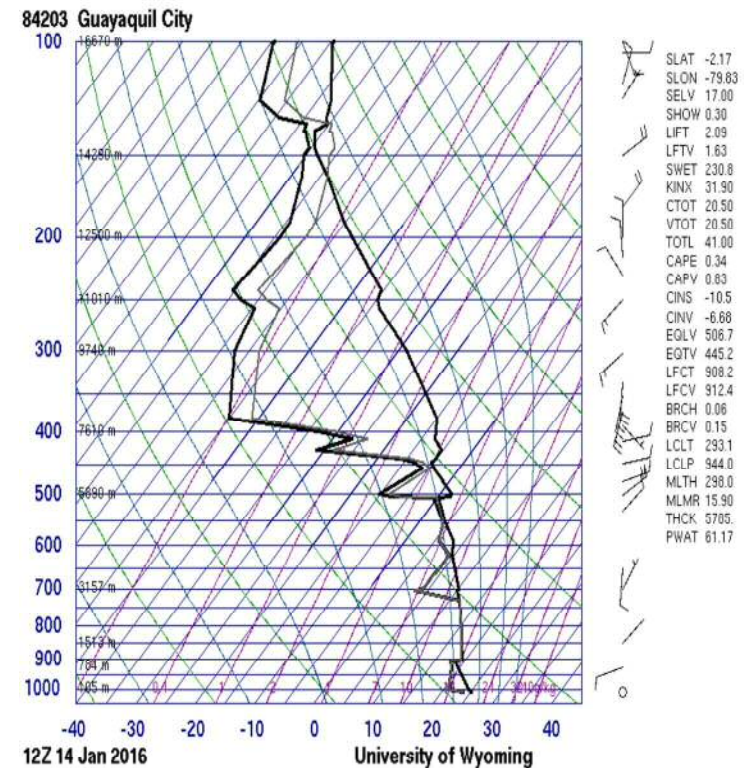


Figura 8. Perfil de Radiosondeo para la Estación GYEC  
Fuente. Wyoming University, 2016

# DESARROLLO

## ETAPAS DE ESTUDIO. ANÁLISIS, SELECCIÓN Y GENERACIÓN DE MODELOS

### PROCESOS PRINCIPALES DE SELECCIÓN





# PRIMEROS RESULTADOS

---

# RESULTADOS PRELIMINARES

## SISTEMA TERMODINÁMICO ATMOSFÉRICO

(basado en Boehm, J., Salstein, D., Alizadeh, M. & Wijaya, D. 2013)

### ✓ CONSIDERACIONES PRINCIPALES

1. Se asume el Sistema Tierra como una esfera concéntrica.
2. La dinámica de partículas se define sin influencia termodinámica
3. El movimiento de partículas se distribuye uniformemente a través de un proceso de difusión.
4. Gravedad es tomada a consideración, dada su influencia en la condensación de partículas cerca de la superficie terrestre
5. Los gases se encuentran en estado de equilibrio hidrostático, por lo cual la suma de fuerzas en el sistema físico – químico es igual a cero. (**Sistema no aislado**)

### 1. LEY DE GASES

$$p = \sum_i p_i \quad p = \rho \frac{R \cdot T}{M_m}$$

$$\frac{p}{\rho} = R' T \quad \longrightarrow \quad R' = \frac{R}{M_m}$$

$$\frac{p_d}{\rho_d} = R'_d \cdot T \quad \frac{p_w}{\rho_w} = R'_w \cdot T$$

$$R' T = T \left( \frac{p_d}{\rho} R'_d + \frac{p_w}{\rho} R'_w \right)$$

# RESULTADOS PRELIMINARES

## SISTEMA TERMODINÁMICO ATMOSFÉRICO

(basado en Boehm, J., Salstein, D., Alizadeh, M. & Wijaya, D. 2013)

### ✓ CONSIDERACIONES PRINCIPALES

1. Se asume el Sistema Tierra como una esfera concéntrica.
2. La dinámica de partículas se define sin influencia termodinámica
3. El movimiento de partículas se distribuye uniformemente a través de un proceso de difusión.
4. Gravedad es tomada a consideración, dada su influencia en la condensación de partículas cerca de la superficie terrestre
5. Los gases se encuentran en estado de equilibrio hidrostático, por lo cual la suma de fuerzas en el sistema físico – químico es igual a cero. (**Sistema no aislado**)

### 1. LEY DE GASES

$$R'T = T \left( \frac{p_d}{\rho} R'_d + \frac{p_w}{\rho} R'_w \right)$$

$$s = \frac{\rho_w}{\rho} \quad l = \frac{\rho_d}{\rho} = 1 - s$$

$$R' = l.R'_d + s.R'_w = R'_d \left[ 1 + s \left( \frac{R'_w}{R'_d} - 1 \right) \right]$$

$$R' = R'_d (1 + 0.608.s)$$

$$\frac{p}{\rho} = R'T = R'_d (1 + 0.608.s) .T = R'_d .T_v$$

# RESULTADOS PRELIMINARES

## SISTEMA TERMODINÁMICO ATMOSFÉRICO

(basado en Boehm, J., Salstein, D., Alizadeh, M. & Wijaya, D. 2013)

### ✓ CONSIDERACIONES PRINCIPALES

1. Se asume el Sistema Tierra como una esfera concéntrica.
2. La dinámica de partículas se define sin influencia termodinámica
3. El movimiento de partículas se distribuye uniformemente a través de un proceso de difusión.
4. Gravedad es tomada a consideración, dada su influencia en la condensación de partículas cerca de la superficie terrestre
5. Los gases se encuentran en estado de equilibrio hidrostático, por lo cual la suma de fuerzas en el sistema físico – químico es igual a cero. (**Sistema no aislado**)

### 2. ANÁLISIS DE FUERZAS

$$f = -\vec{\nabla} \rho \quad f + \rho g = 0$$

$$\vec{\nabla} p = \rho \vec{\nabla} U$$

$$dp = \rho dU$$

$$dU = -g \cdot dh$$

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{g}{R'_d \cdot T_v} dh$$

# RESULTADOS PRELIMINARES

## CORRELACIÓN DE OBSERVACIONES METEOROLÓGICAS

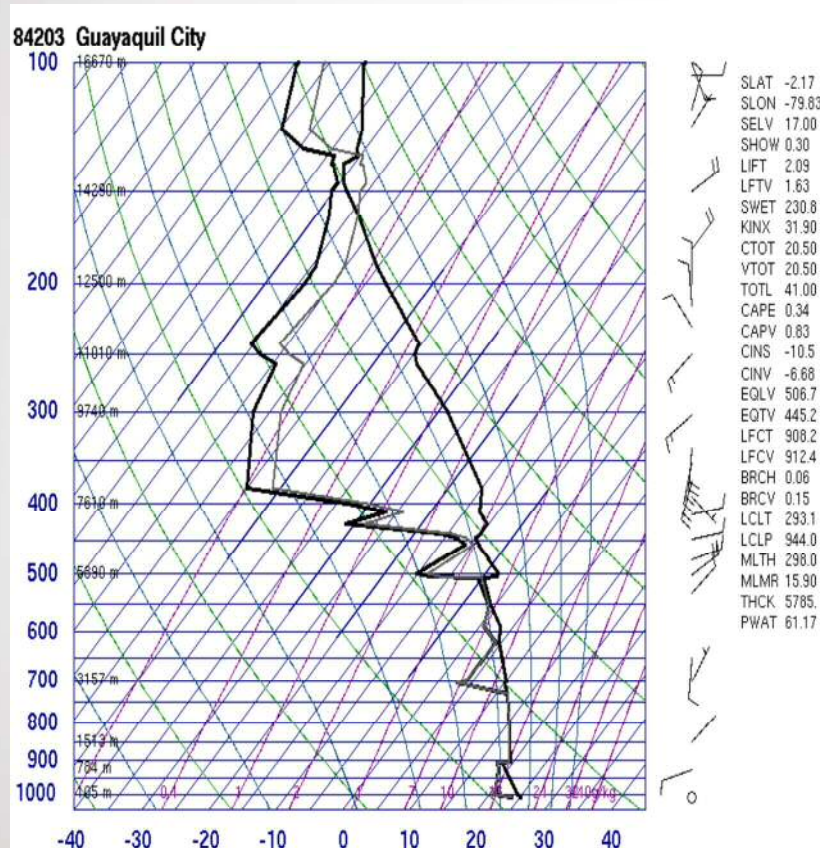


Figura 9. Perfil de Radiosondeo. Estación GYEC  
Fuente. Wyoming University, 2016

### ✓ PROCESO GENERAL

#### 1. Reducción de alturas:

$$h_d = \frac{C}{g_n} = \frac{1}{g_n} \cdot \int_0^h g(\varphi, h) \cdot dh \approx \frac{1}{g_n} \cdot g\left(\varphi, \frac{h}{2}\right) \cdot h$$

#### a. Presión Total

$$h - h_0 = \frac{R'_d \cdot T_v}{g} \frac{p_0}{p}$$

#### b. Presión de Vapor de Agua

$$e = e_0 \cdot e^{(h-h_0)c}$$

#### c. Cálculo de retrasos troposféricos

$$\Delta L_w = c_b \left[ \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 T'_B(v_1) - T'_B(v_2) - T_{bg,ox} \right]$$

Fuente: (Nilsson, T. 2013)



# RESULTADOS PRELIMINARES

## CORRELACIÓN DE OBSERVACIONES METEOROLÓGICAS

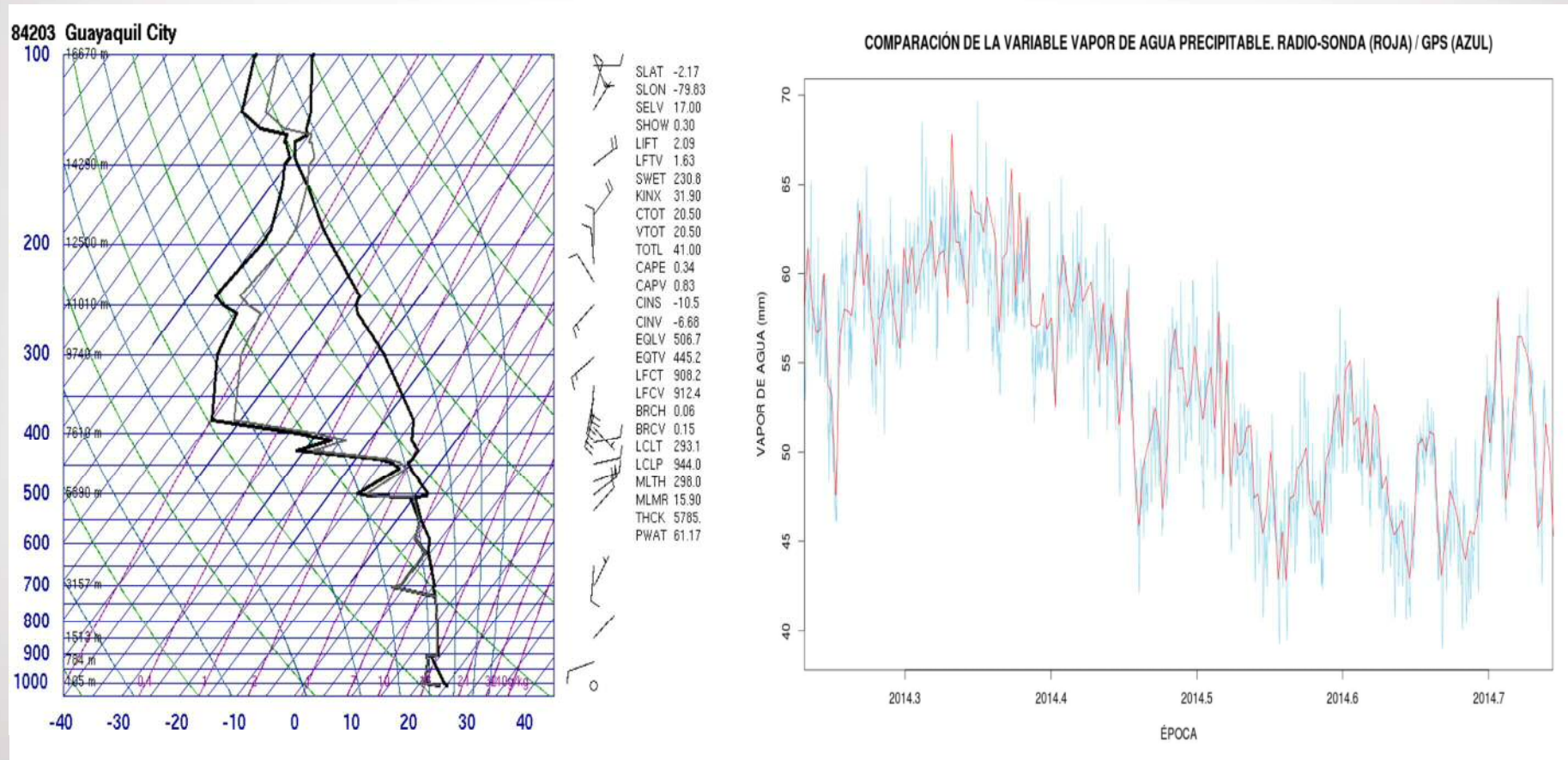


Figura 9. Perfil de Radiosondeo y Modelamiento de la Serie Temporal para la Estación GYEC (Año 2014)

Fuente. Wyoming University, 2016

# RESULTADOS PRELIMINARES

## CORRELACIÓN DE OBSERVACIONES METEOROLÓGICAS

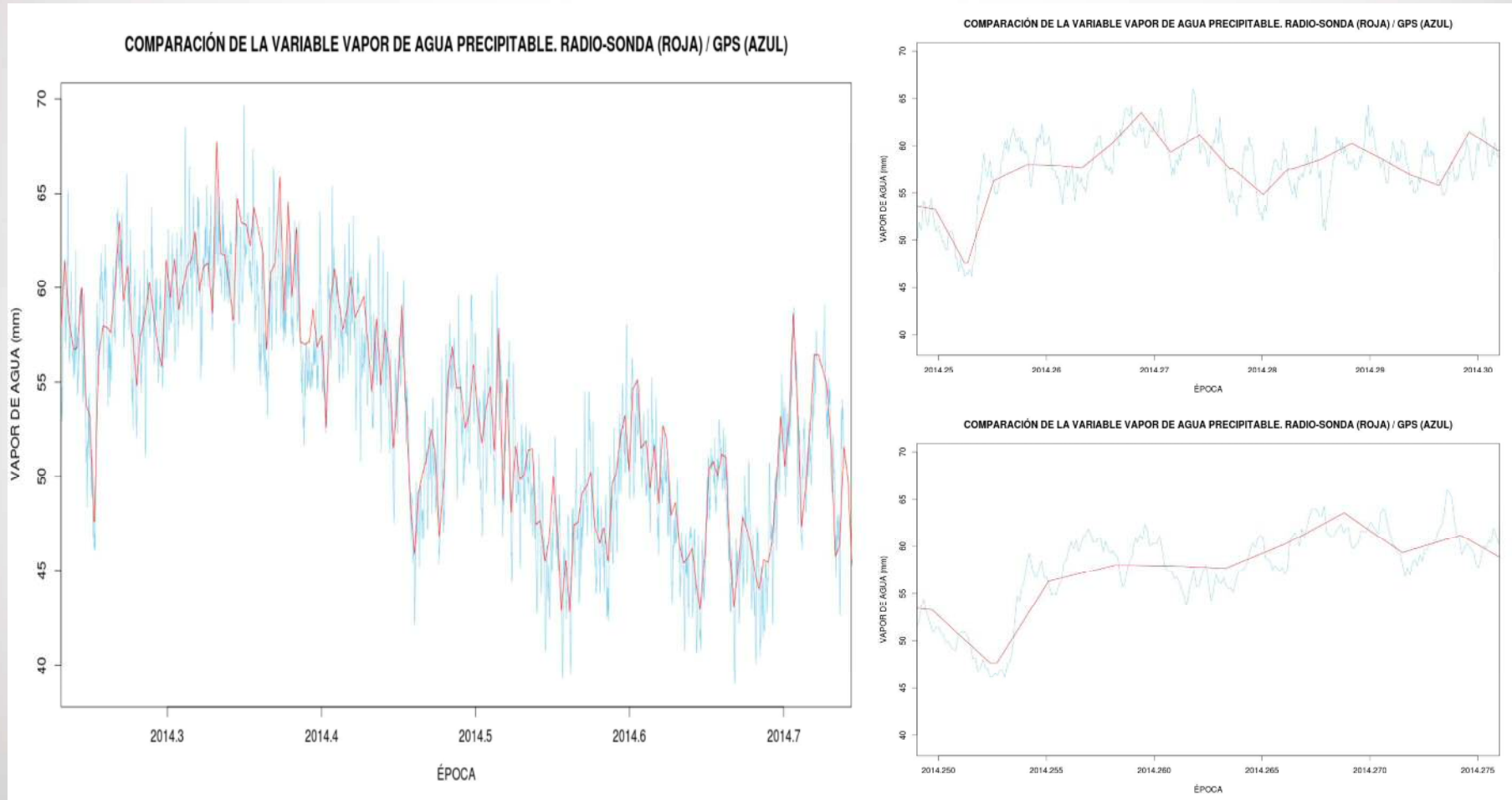


Figura 10. Serie Temporal de Vapor de Agua para la Estación GYEC (Año 2014)  
Fuente. Wyoming University, 2016



# ALGUNAS CONCLUSIONES

---

# ALGUNAS CONCLUSIONES

1

El presente estudio busca establecer mecanismos necesarios para evaluar técnica y estadísticamente el uso de modelos atmosféricos con escalas espacio-temporales incongruentes con la realidad de ciertos sectores del continente sudamericano, así como robustecer el desarrollo de los mismos, mediante el análisis físico-químico de sus constituyentes.

2

Pese a que los resultados obtenidos, aún no demuestran una sinergia entre su funcionalidad y su aplicabilidad en el posicionamiento satelital, si demuestran una correlación marcada entre las diversas técnicas evaluadas para la región de estudio, siendo predominante la correlación existente entre los modelos obtenidos a través de posicionamiento GPS, sistema LIDAR RAMAN (IPEN. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) y Sondas Aerostáticas.

3

Dada la complejidad del presente proyecto, se invita a todas aquellas personas e instituciones que deseen colaborar con el análisis de los procesos, a fin de obtener resultados en toda la región, basados en los procesos meteorológicos particulares de cada zona.





# AGRADECIMIENTOS

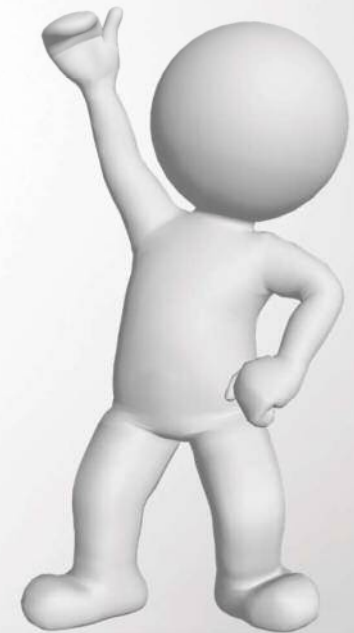
---

# AGRADECIMIENTOS

## ✓ UN AGRADECIMIENTO ESPECIAL A ...

1. SIRGAS.
2. LAGEH (Laboratorio de Geodesia Espacial e Hidrografía de la UFPR.)
3. CAPES (Coordinación de perfeccionamiento de personal de nivel superior de Brasil)
4. IGM (Instituto Geográfico Militar del Ecuador)

*Gracias*





**GRACIAS POR  
SU ATENCIÓN**

---