

Workshop/Seminar for the implementation of
Navigation Infrastructure to support PBN and GNSS precision
approach operations in the NAM CAR SAM region
Lima, Perú 15 to 17 August 2016

Efectos de la ionosfera y la troposfera en GNSS

Francisco Azpilicueta y Claudio Brunini

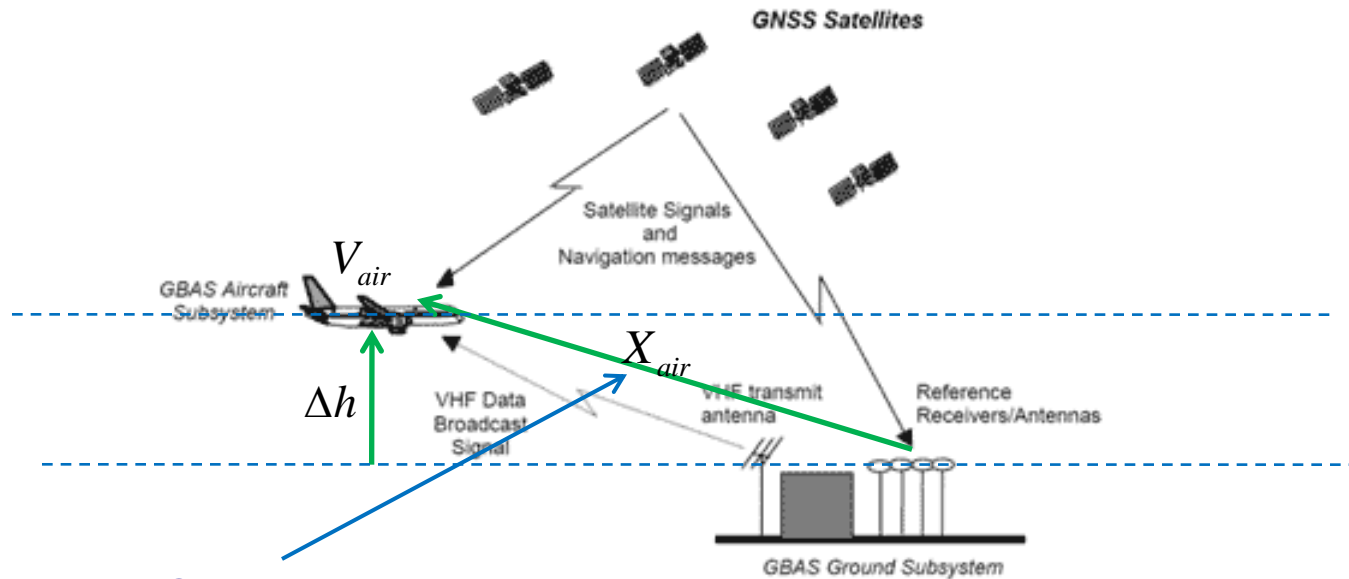


GESA - Facultad de Cs. Astronómica y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata-CONICET
Paseo del bosque s/n, La Plata, Argentina

Temas de la presentación

- I. Introducción a los efectos ionosféricos y troposféricos en un esquema GBAS.
- II. Caracterización de la ionosfera sobre Argentina, regiones de diferentes comportamientos.
- III. Descripción del método basado en LPIM para la determinación del parámetro de de-correlación.
- IV. Determinación de parámetros troposféricos. Ejemplos.
- V. Presentación de resultados del algoritmo implementado. Ejemplos.

I. Introducción a los efectos ionosféricos y troposféricos en un esquema GBAS.



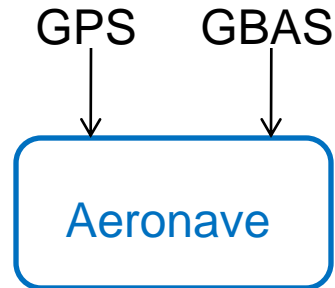
Mens. Tipo 1: PRCK

Mens. Tipo 2: Param. Ionosféricos, troposféricos y coord.

Las PRCs se calculan en la posición del GBAS pero se aplican en la posición de la aeronave:

- La corrección ionosférica se de-correlaciona (es menos válida) a medida que aumenta X_{air}
- La corrección troposférica se de-correlaciona (es menos válida) a medida que aumenta Δh

Imagen: <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1086172037298/>



La aeronave realiza las siguientes operaciones:

- estima la corrección y sigma troposférico (Mens. Tipo 2)
- estima el sigma ionosférico (Mens. Tipo 2)
- estima los niveles de protección
- aplica las PRCs y las correcciones troposféricas (Mens. Tipo 1)

Sistema de ecuaciones para estimar la posición de la aeronave

$$\Delta y = G \Delta X + \varepsilon$$

Δx es el vector 4x1 (posición/reloj) que representa la corrección respecto de los valores de linealización

Δy es el vector Nx1 que contiene las pseudodistancias medidas corregidas por las PRCs

G es la matriz de diseño Nx4,

$$G_i = \begin{bmatrix} -\cos \vartheta^i \times \cos Az^i & -\cos \vartheta^i \times \sin Az^i & -\sin Az^i & 1 \end{bmatrix}$$

ε es el vector Nx1 que contiene los vectores en el vector y

- RTCA (2004) DO-245: Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS).
- RTCA (2008) DO-253C: Minimum Operation Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment.
- RTCA (2008) DO-246D: GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Single-in-Space Interface Control Document (ICD).

Sistema de ecuaciones para estimar la posición de la aeronave (cont.)

$$C = W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_N \end{bmatrix}$$

N es la cant. de satélites

Troposfera

Ionosfera

$$\sigma_i^2 = \sigma_{pr_gnd,i}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 + \sigma_{air,i}^2 + \sigma_{iono,i}^2$$

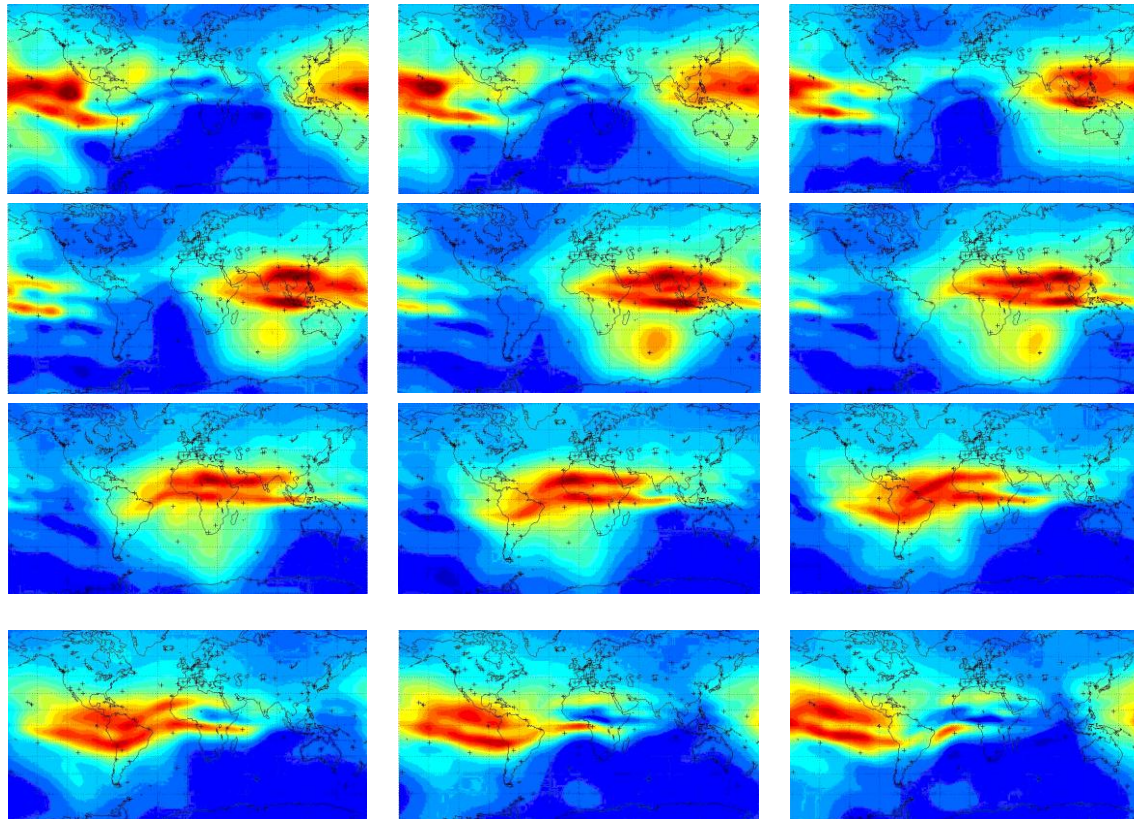
$$S = (G^T W G)^{-1} G^T W$$

$$VPL_{H0} = K_{ffmd} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{Apr_vert,i}^2 \times \sigma_i^2} \longleftarrow \text{Límite de Protección Lateral}$$

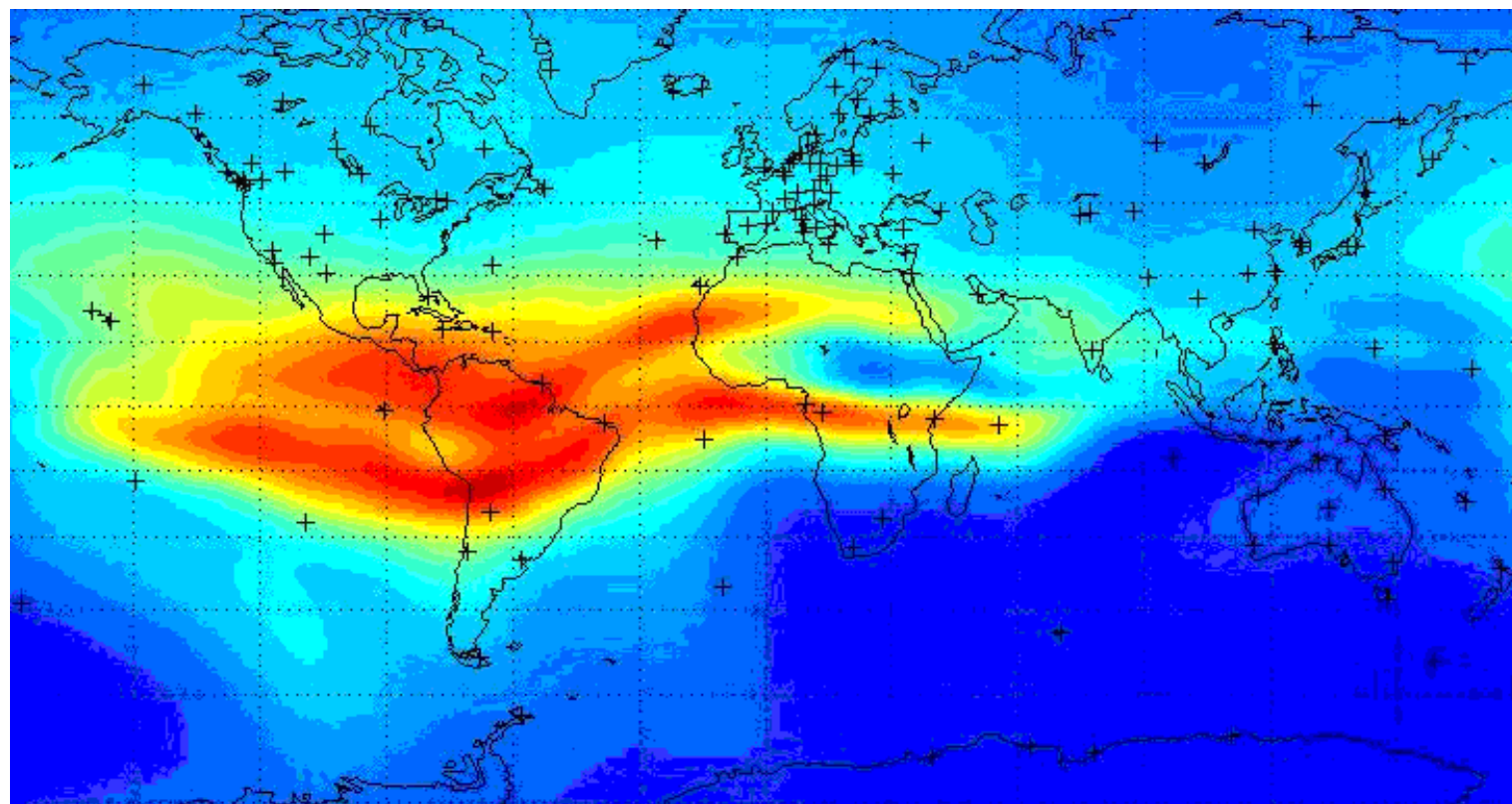
$$LPL_{H0} = K_{ffmd} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{Apr_lat,i}^2 \times \sigma_i^2} \longleftarrow \text{Límite de Protección Vertical}$$

- RTCA (2004) DO-245: Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System (LAAS).
- RTCA (2008) DO-253C: Minimum Operation Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment.
- RTCA (2008) DO-246D: GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Single-in-Space Interface Control Document (ICD).

II. Caracterización de la ionosfera sobre Argentina, regiones de diferentes comportamientos



Serie de mapas de VTEC obtenidos con el LPIM (rango de valores: 0 – 120 TECu)



La mayor parte del país se encuentra bajo una condición ionosférica moderada y baja.

III.a Decorrelación del error ionosférico

$$\sigma_i^2 = \sigma_{pr_gnd,i}^2 + \sigma_{tropo,i}^2 + \sigma_{air,i}^2 + \sigma_{iono,i}^2$$

$$\sigma_{iono,i} = \sigma_{Vert_Iono_Gradient} \times MP(\theta_i) \times (X_{air} + 2 \times V_{air} \times \tau)$$

$$MP(\theta_i) = \left[1 - \left(\frac{R_E \times \cos(\theta_i)}{R_E + h_I} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$\sigma_{Vert_Iono_Gradient}$

X_{air}

V_{air}

τ

θ_i

R_E

h_I

función de mapeo para el satélite k (convierte vertical en oblicuo)

sigma de gradiente vertical

distancia oblicua entre el GBAS y la aeronave

velocidad de la aeronave respecto al suelo

constante temporal del filtro de suavizado

ángulo de elevación del satélite k

radio de la tierra = 6378.1363 km

altura de la capa ionosférica = 350 km

- RTCA (2008) DO-253C: Minimum Operation Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment.
- RTCA (2008) DO-246D: GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Single-in-Space Interface Control Document (ICD).

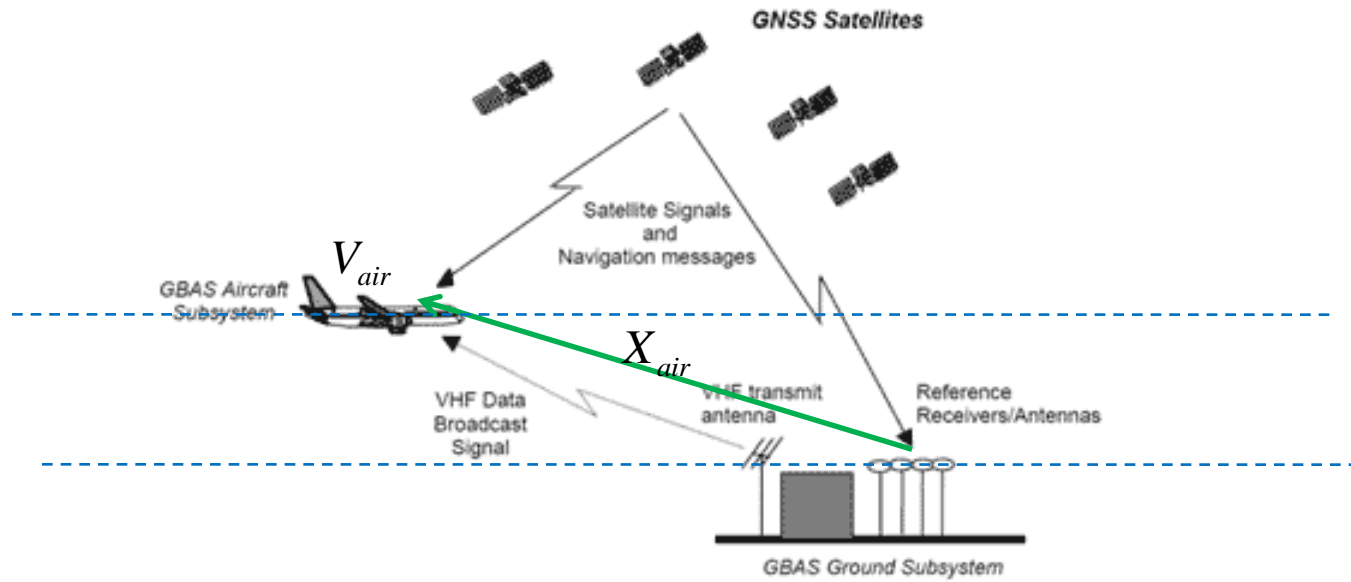
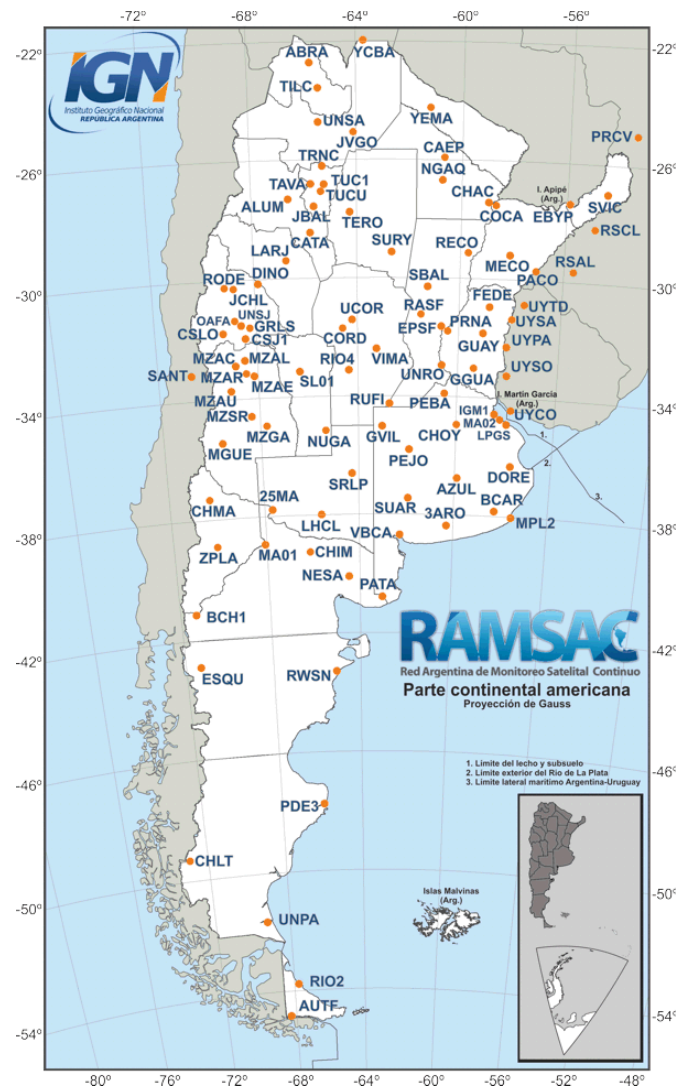


Imagen: <http://www.enaire.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1086172037298/>

III.b Descripción del método basado en LPIM para la determinación del parámetro de de-correlación sobre BCHE

Criterios utilizados para el procesamiento:

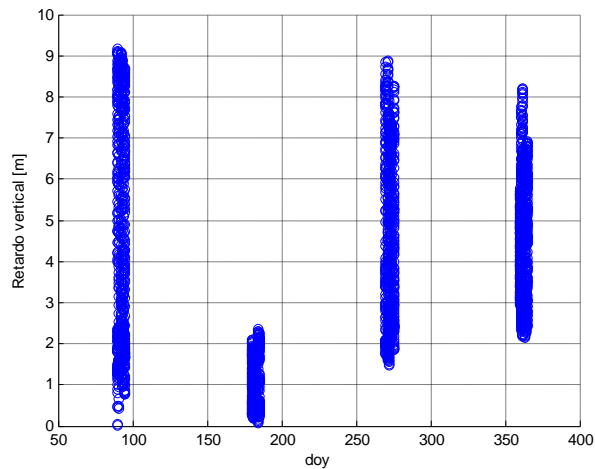
- Mediciones doble frecuencia del receptor de la estación BCHE de la red RAMSAC*
- Año: 2014 porque corresponde al máximo de radiación UV del último ciclo solar
- se procesaron en total 20 archivos RINEX de días del año 2014
- 5 días por cada equinoccio y solsticio.(condiciones más extremas, máximos valores esperables del retardo ionosférico)
- Intervalo de muestreo: 15 segundos



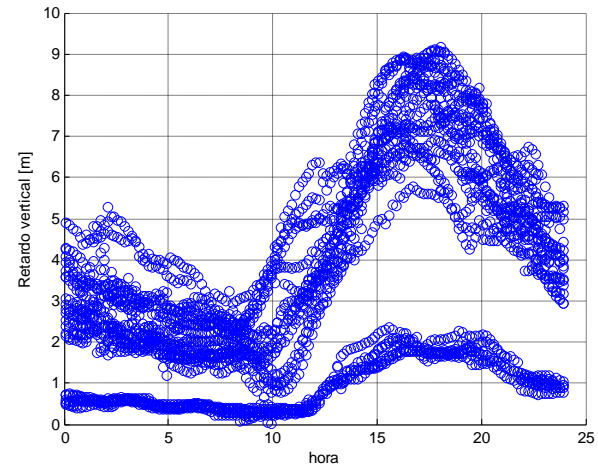
* RAMSAC: Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo.- (<http://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac>)

$$VTEC(\lambda, \varphi) = VTEC_0 + gO \times (\lambda - \lambda_0) + gN \times FC \times (\varphi - \varphi_0)$$

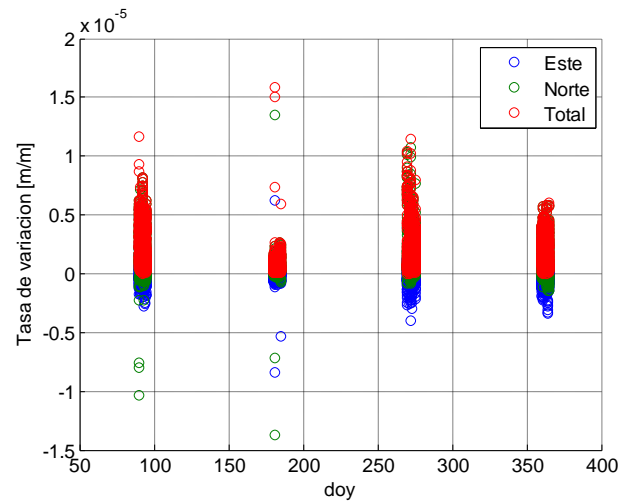
- $VTEC_0$ retardo vertical sobre la estación
 gO gradiente en dirección Oeste
 gN gradiente en dirección Norte
 FC factor de conversión de grados a metros



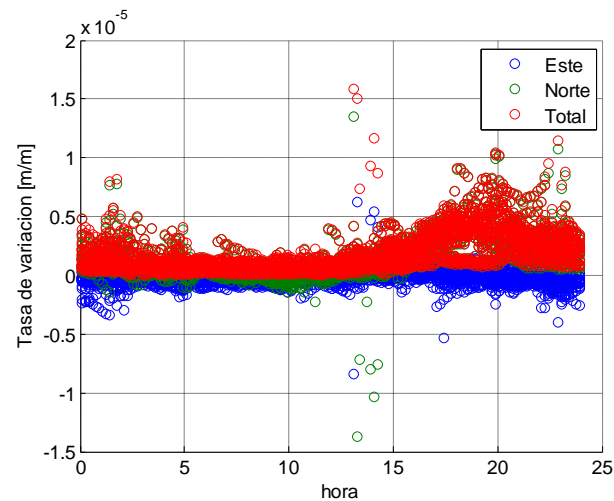
Retardo ionosférico vertical (en metros) sobre la estación BCHE en función del día del año del año 2014.



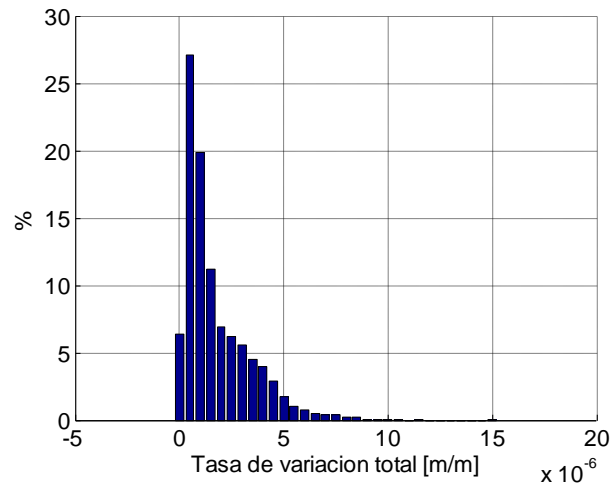
Retardo ionosférico vertical (en metros) sobre la estación BCHE en función de tiempo GPS (en horas) para los 20 días analizados del año 2014.



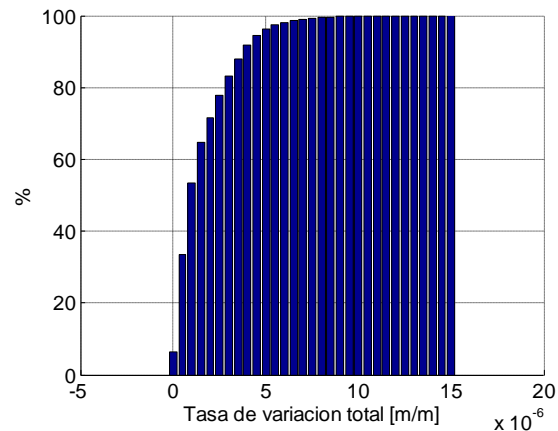
Tasa de de-correlación (Este, Norte y Total) del retardo ionosférico vertical (en m/m) sobre la estación BCHE en función del doy del 2014.



Tasa de de-correlación (Este, Norte y Total) del retardo ionosférico vertical (en m/m) sobre la estación BCHE en función del tiempo GPS (en horas) para los 20 días analizados del 2014.



Histograma para la tasa de de-correlación total del retardo ionosférico vertical (en m/m) sobre estación BCHE, para los 20 días analizados del año 2014.



Histograma acumulativo para la tasa de de-correlación total del retardo ionosférico vertical (en m/m) sobre la estación BCHE, para los 20 días analizados del año 2014.

Resumiendo:

- la desviación estándar de la tasa de de-correlación total es: $\sigma_c = 1.6 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
- el percentil del 90% es aprox. $4 \times 10^{-6} \text{ m/m}$
- el percentil del 99% es aprox. $7 \times 10^{-6} \text{ m/m}$

A partir de este se puede estimar la dispersión del gradiente vertical como:

$$\sigma_{\text{Vert_Iono_Gradient}} = k * \sigma_c$$

, donde k es un factor que debe estimarse a partir de experimentos. Desde un punto de vista estadístico puro, se podría aplicar un criterio de 2 sigmas, lo que haría

$$\sigma_{\text{Vert_Iono_Gradient}} = 3.2 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

IV a Corrección troposférica y decorrelación del error

$$TC_i = \frac{1.001 \times 10^{-6} \times N_r \times h_0}{\sqrt{0.002 + \sin^2(\theta_i)}} \times \left(1 - e^{-\Delta h/h_0}\right)$$

$$\sigma_{tropo,i} = \frac{1.001 \times 10^{-6} \times \sigma_{N_r} \times h_0}{\sqrt{0.002 + \sin^2(\theta_i)}} \times \left(1 - e^{-\Delta h/h_0}\right)$$

N_r

refractividad en el GBAS

σ_{N_r}

incerteza (desviación estándar) del N_r

h_0

altura escala troposférica

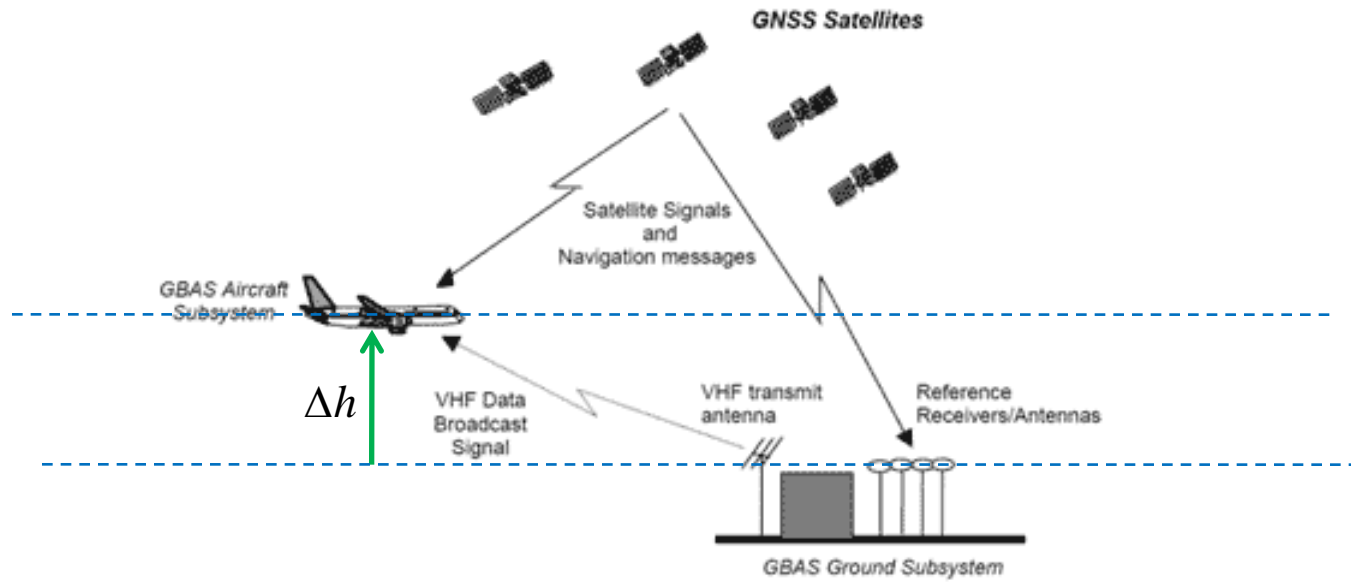
Δh

diferencia de alturas entre la aeronave y el GBAS

θ^k

ángulo de elevación del satélite k

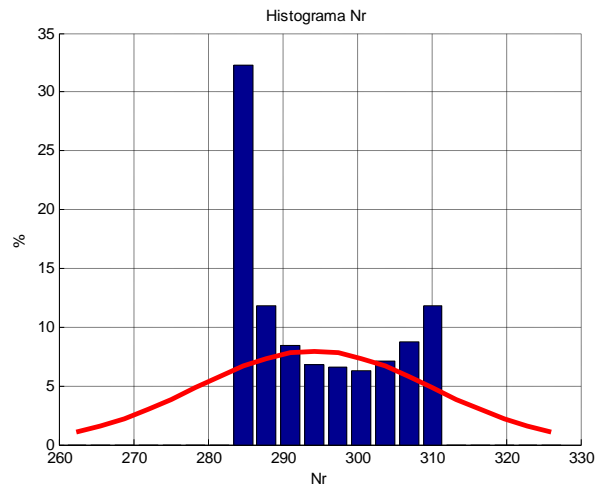
- RTCA (2008) DO-253C: *Minimum Operation Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment.*
- RTCA (2008) DO-246D: *GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Single-in-Space Interface Control Document (ICD).*



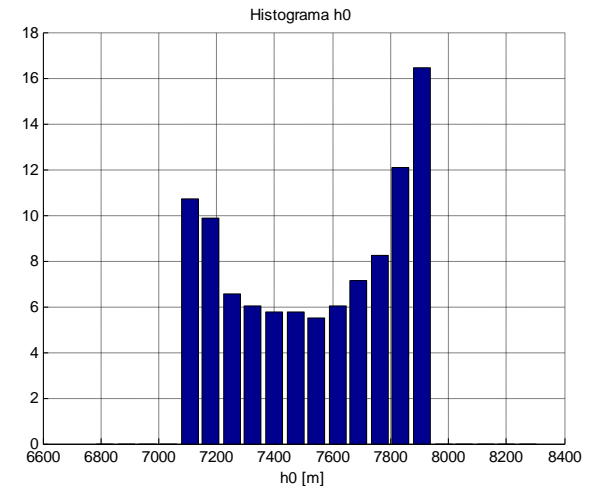
IV.b Descripción del método para determinación de parámetros troposféricos.

Usando el modelo UNB

A partir del modelo UNB Neutral Atmospheric Model de la Universidad de New Brunswick (UNB) [1] [2], se generó una serie anual de estimaciones de temperatura, presión y humedad relativa para las coordenadas del sitio WTZA. En base a la serie y utilizando expresiones analíticas [2], se calcularon los valores de N_r h_0



Histograma del N_r para el sitio Bariloche. La línea roja representa la distribución Gaussiana de media 294 y desv. 16.



Histograma del h_0 para el sitio Bariloche.

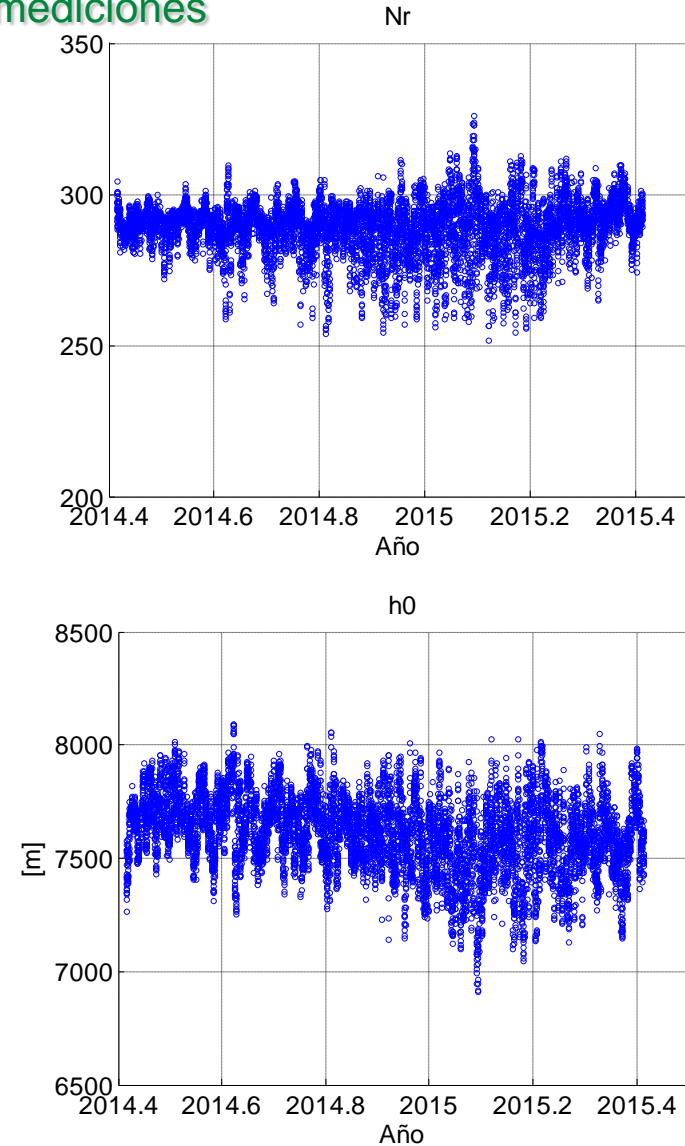
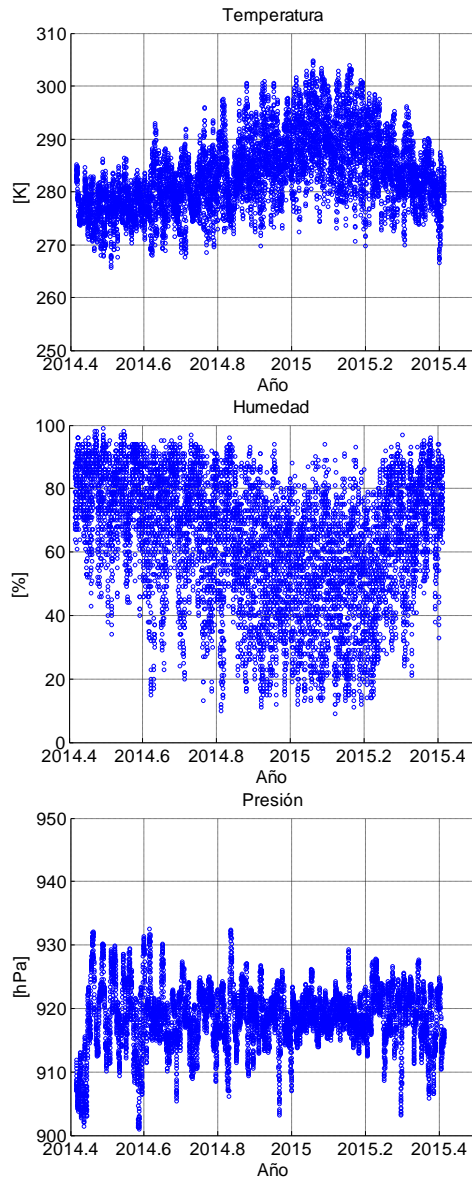
[1] Mendes, V. B. (1999). "Modeling the Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques", Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 353 pp.

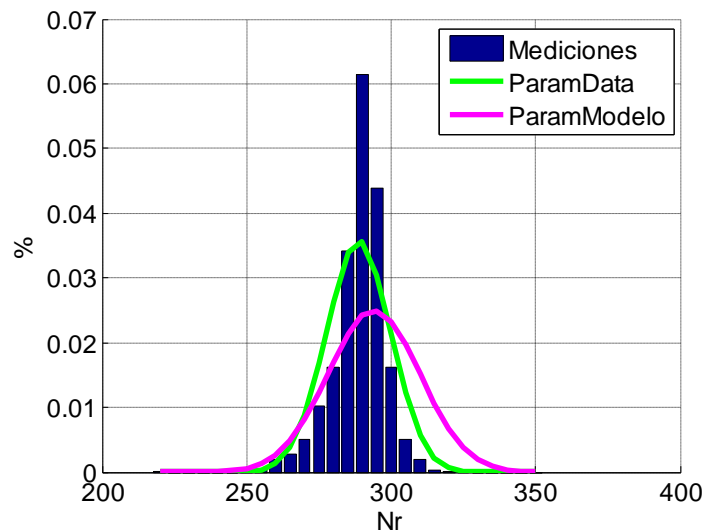
[2] Leandro R., M. Santos, R. Langley (2006). "UNB Neutral Atmosphere Models: Development and performance", Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, Monterey, California, January, 2006

[3] McGraw G. (2012). "Tropospheric Error Modeling for High Integrity Airborne GNSS Navigation", 978-1-4673-0387-3/12, 2012 IEEE.

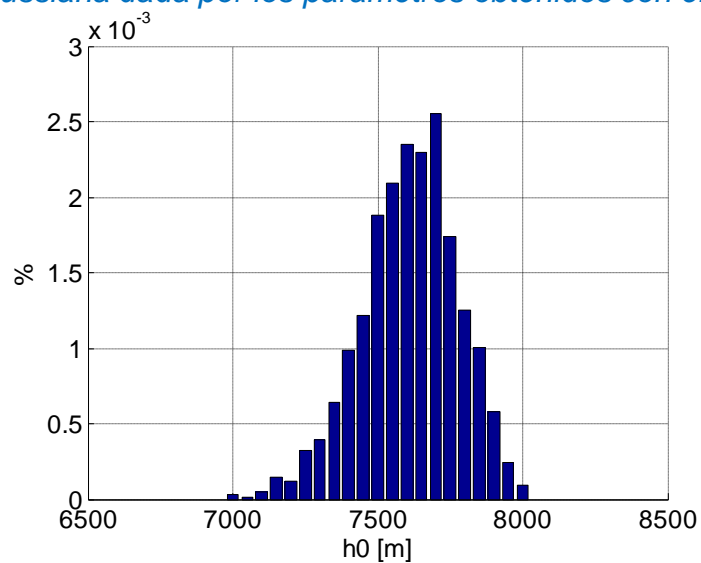
IV.b Descripción del método para determinación de parámetros troposféricos.

Usando el modelo mediciones





Histograma de Nr en Bariloche. La línea verde corresponde a la Gaussiana dada por los parámetros característicos obtenidos con las mediciones (Tabla 5). La línea magenta corresponde a la Gaussiana dada por los parámetros obtenidos con el modelo UNB .



Histograma de h0 en Bariloche.

Resumiendo:

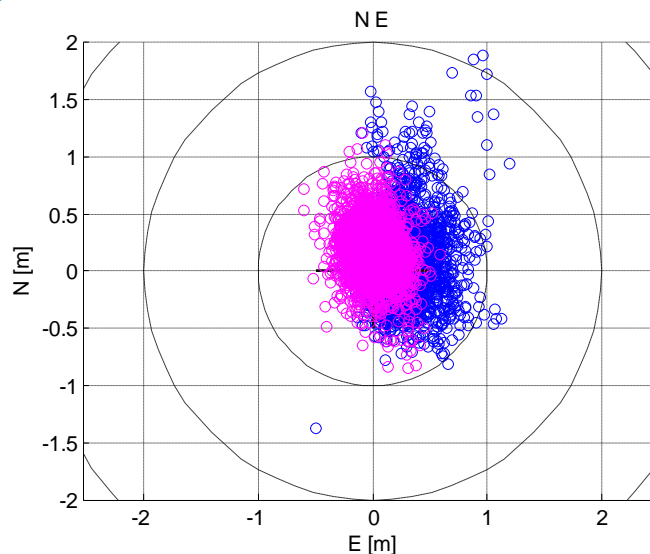
	MEDICIONES	MODELO
Nr	288	294
Sigma Nr	11	16
h0	7606m	7544 m

•La diferencia obtenida entre los valores de para Nr es del orden del 2% y no es estadísticamente significativa ya que un test-t de Student de 99% da de no-rechazo de la hipótesis. La diferencia entre los valores de h0 es menor al 1%.

V. Presentación de resultados del algoritmo implementado.

Los puntos 'usuarios' fueron:

- WTZZ, quinto receptor ubicado en el sitio Wetzell ubicado a una distancia de pocos metros del centro geométrico del GBAS.
- GOPE, receptor independiente del sitio Wetzell ubicado a una distancia de 162 km del centro geométrico del GBAS. Este punto está a más de 5 veces el radio del volumen del servicio GBAS por lo que debe considerarse un caso ultra-extremo.
- Los parámetros atmosféricos utilizados para el cálculo de las límites de protección fueron: $\text{Sigma Vert_Iono_Grad} = 0.3e-6 \text{ m/m}$; $N_r = 298$ y $h_0 = 7748 \text{ m}$.
- Para el Sigma_air se aplicó el modelo detallado en la Sección 2.3.12.1 del documento aplicable, con $\text{Sigma Noise} = 0.11\text{m}$ y $\text{Sigma Div} = 0$



Plano Este-Norte que representa los apartamientos del posicionamiento diferencial respecto de las coordenadas de control en metros. Azul corresponde a GOPE y magenta a WTZZ.

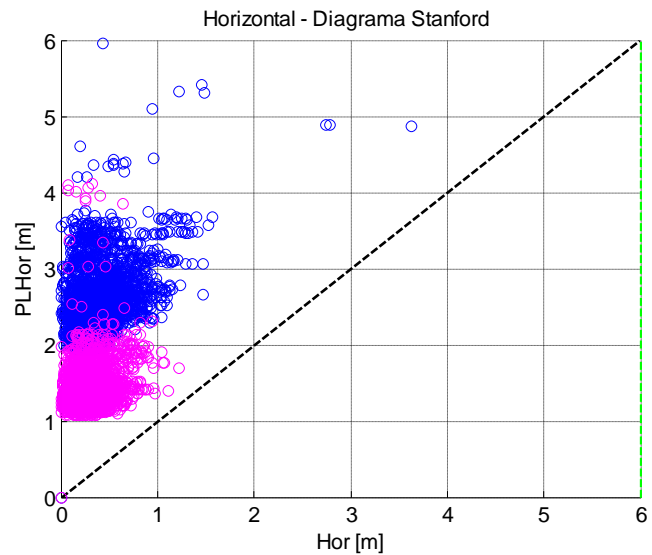


Diagrama de Stanford para el apartamento horizontal. Azul corresponde a GOPE y magenta a WTZZ.

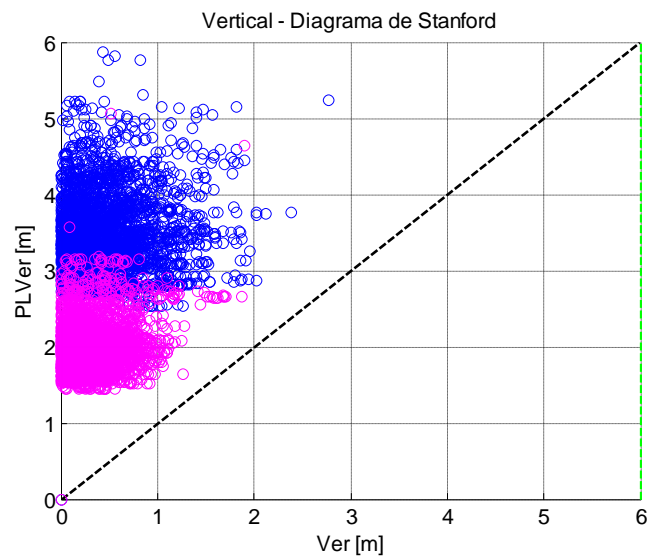


Diagrama de Stanford para el apartamento vertical. Azul corresponde a GOPE y magenta a WTZZ.