

Evaluación experimental de la corrección ionosférica y de su integridad para un sistema tipo SBAS en Centro y Sur América

Claudio BRUNINI, Francisco AZPILICUETA

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Argentina
(claudiobrunini@yahoo.com, azpi@fcaglp.unlp.edu.ar)

(Recibido, 29 febrero 2008; recibido en forma revisada, 15 abril 2008; aceptado, 23 abril 2008)

RESUMEN:

Durante los últimos cinco años, los Sistemas de Aumentación GNSS basados en Satélites (conocidos como SBAS por la sigla en inglés de Satellite Based Augmentation System) han tenido un desarrollo sostenible motorizado principalmente por la actividad de la aviación civil. En la actualidad, varias regiones del planeta cuentan con SBAS de diferentes niveles de desarrollo, siendo los ejemplos mas significativos el sistema WAAS en Estados Unidos de América, el EGNOS en Europa y el MSAS en Japón. En la región del Caribe, Centro y Sur América, la Organización de la Aviación Civil Internacional a través del proyecto SACCSA promueve el desarrollo y establecimiento de un SBAS propio para esta región.

Este artículo presenta un trabajo de investigación realizado para evaluar de forma experimental el comportamiento de la corrección ionosférica y de su integridad para un sistema tipo SBAS en la región del Caribe, Centro y Sur-América. El planteo del estudio buscó generar un escenario realista de trabajo, para lo cual se utilizaron observaciones de estaciones de monitoreo GPS permanente para dos semanas próximas a dos solsticios. Los resultados obtenidos indican que el algoritmo tiene una capacidad de predicción del 99% para los periodos analizados.

Palabras clave: Sistemas de Aumentación Basados en Satélites, SBAS, Corrección Ionosférica.

ABSTRACT:

The last five years have shown significant achievement in the development of the Satellite Based Augmentation Systems, mainly supported by the civil aviation activities. Presently, several regions of the world have SBAS with different degree of development, being the most significant examples the United States WAAS, the European EGNOS and the Japanese MSAS. In the region of Caribbean, Central and South America, the International Association of Civil Aviation is promoting the establishment of SBAS particularly customized for the region.

This paper describes a research work performed to assess the experimental behavior of the ionospheric correction and its integrity for a SBAS-type algorithm for the Caribbean, Central and South America. The study defines a realistic scenario by using observations from GPS permanent stations distributed along the region for two 1-week time periods corresponding to solstices. The obtained results are encouraging and show an algorithm prediction capacity of about 99% for the analyzed data.

Key words: Satellite Based Augmentation System, SBAS, Ionospheric correction.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la navegación y la gestión del tráfico de la aviación civil internacional se encuentran en proceso de desarrollo de nuevas tecnologías, orientadas a mejorar su eficiencia y, al mismo tiempo, mantener o elevar los ya de por sí altos niveles de seguridad. Muchos de estos nuevos desarrollos utilizan como herramienta fundamental a los Sistemas Globales de Navegación Satelital (conocidos como GNSS por su sigla en inglés – Global Navigation Satellite System). De acuerdo con el estado actual de estos desarrollos, la aplicación de los nuevos sistemas, a escala global, podría producirse en el transcurso de la próxima década.

En la actualidad el GPS (sigla en inglés para Global Positioning System, Sistema de Posicionamiento Global), es el único GNSS que se encuentra plenamente operativo y es utilizado como instrumento secundario para varias fases de vuelo por muchas de las compañías aéreas comerciales. Sin embargo, las características provistas por el servicio GPS autónomo, es decir sin soporte adicional, no alcanzan para su utilización como instrumento principal de navegación para las fases más críticas y exigentes de vuelo.

Una de las estrategias más difundidas para elevar el nivel de las prestaciones del GPS de manera de hacerlo compatible con los requerimientos para las fases intermedias de la navegación aérea sobre regiones amplias, son los denominados Sistemas de Aumentación GNSS basados en satélites (conocidos como SBAS, por su sigla del inglés Satellite Based Augmentation System). Estos sistemas permiten un rastreo permanente y continuo de las señales de las satélites GPS, mediante el despliegue de una infraestructura terrestre, que es utilizada para el cómputo en tiempo real del denominado *mensaje de aumentación*. Este mensaje contiene información sobre parámetros de la calidad del servicio, información acerca del estado de la ionosfera sobre el área de cobertura y de los relojes y efemérides de los satélites. Toda esta información es transmitida en tiempo real a cualquier usuario ubicado en el área de cobertura a partir de un satélite geoestacionario.

Las regiones económicamente más desarrolladas del planeta promueven varias y diferentes iniciativas para el desarrollo y consolidación de sistemas de aumentación para sus respectivas regiones de interés. El ejemplo más claro, y el que muestra el mayor grado de desarrollo, es el sistema denominado WAAS (sigla en inglés para Wide Area Augmentation System – Sistema de Aumentación de Área Ampliada), coordinado y financiado por la Agencia Federal de Aviación de los Estados Unidos (conocida por su sigla en inglés FAA, Federal Aviation Agency) con cobertura en toda el área continental de Estados Unidos de América, Canadá y México (http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/). En lo que respecta a Europa, la Comunidad Europea juntamente con la Agencia Espacial Europea, coordinan y financian el proyecto EGNOS (sigla de European Geostationary Navigation Overlay Service, Servicio Europeo de Navegación Ampliada) (<http://www.esa.int/esaNA/egnos.html>), cuya cobertura incluye Europa continental, el Reino Unido y gran parte del Mediterráneo. Es importante mencionar que este tipo de desarrollo no es exclusivo

del mundo occidental, ya que China e India, han lanzado desarrollos similares para sus propios sistemas de aumentación, con diferentes grados de avance.

En el contexto latinoamericano, la Organización de la Aviación Civil Internacional promueve el desarrollo de un sistema que provea servicios de aumentación en la región comprendida por el Caribe, Centro y Sur América, que sea coordinado por una agencia supranacional en la que todos los estados de la región estén representando (<http://www.rlasacsa.com/>).

Como se mencionó anteriormente, una componente importante del mensaje de aumentación es la información ionosférica. Cuando esta información es provista en tiempo real, la exactitud en la posición determinada por un usuario mejora significativamente, al mismo tiempo que puede calcular una cota al error que comete. Para que esto sea posible, el sistema de aumentación debe tener la capacidad de monitorear y predecir el comportamiento de la ionosfera en la región de interés. Esta capacidad está directamente relacionada con la infraestructura de monitoreo desplegada en la zona de interés. Sin embargo, la complejidad del comportamiento geográfico y temporal de la ionosfera sobre la zona de cobertura es un obstáculo natural en la calidad de la predicción.

A este respecto es importante recordar que el término ionosfera designa a un medio compuesto por un gas de electrones y elementos ionizados sometidos a diferentes condiciones físicas como la radiación solar, la gravedad terrestre, el campo geomagnético, campos eléctricos, vientos, etc., por lo que el problema de modelar o predecir su comportamiento depende significativamente de la región geográfica que se analiza; el tiempo medido a escalar solar, es decir en qué etapa del período de aproximadamente 11 años de radiación se encuentra el sol; el tiempo a escala diaria; etc. La región comprendida por el Caribe, Centro y Sur América posiblemente presenta las mayores dificultades del planeta para modelar y predecir el comportamiento de la ionosfera, ya que a la complejidad de la Anomalía Ecuatorial se suma la del Océano Atlántico, que produce un comportamiento irregular en el campo magnético de la tierra y, consecuentemente, en la distribución de los electrones en la ionosfera.

Este artículo presenta un trabajo de investigación cuyo objetivo fue analizar y evaluar el desempeño y la exactitud de la corrección ionosférica para un sistema tipo SBAS para la región del Caribe, Centro y Sur América. Un aspecto destacado del estudio es que para su realización se utilizaron datos medidos por estaciones GPS de monitoreo permanente, es decir datos similares a los que un futuro SBAS en la región deberá procesar, con todas sus potenciales fuentes de error, sin ninguna simulación.

2. ESCENARIO DE TRABAJO

Como fue mencionado en la Sección 1, el objetivo de este estudio es la evaluación del comportamiento de la corrección ionosférica, para un sistema tipo SBAS en la región del Caribe, Centro y Sur América. Con el propósito de que el escenario de trabajo reprodujera de forma realista las condiciones en las que debería funcionar un SBAS, el trabajo se basó en observaciones crudas de un conjunto de estaciones GPS

de medición continua distribuidas en la región de estudio, perteneciente principalmente al Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) (Fortes et al., 2006).

La Fig. 1 muestra la distribución de las estaciones GPS utilizadas en este trabajo. Los cuadrados corresponden a las estaciones que conformaron la red de control del SBAS, mientras que los triángulos corresponden a las que conformaron la red de evaluación que fue utilizada para la verificación de los resultados (esas estaciones jugaron, en el contexto de este trabajo, el rol de los usuarios del sistema de aumentación). Las líneas discontinuas superpuestas muestran la ubicación aproximada de los paralelos de igual latitud geomagnética para $+30^\circ$, 0° y -30° . A partir de estas, se puede ver que la región objeto de análisis se extiende desde regiones de latitud geomagnética altas hasta latitudes ecuatoriales.

La selección de la red de control buscó maximizar la cobertura de la región; mientras que para la red de evaluación, se buscó principalmente tener una buena cobertura en la coordenada latitud geomagnética. Las mediciones utilizadas corresponden a dos semanas: la primera semana (S1) abarca desde 20/06/06 hasta 26/06/06 y la segunda (S2) va desde 26/12/06 hasta 02/01/07, correspondiendo aproximadamente a los solsticios de invierno y de verano para el hemisferio sur respectivamente. La comparación de los resultados obtenidos permite caracterizar las diferencias en el comportamiento del sistema para dos configuraciones del sistema Sol-Tierra bien diferentes. El intervalo de muestreo de las mediciones es de 30 segundos, que es el estándar de SIRGAS.



Figura 1.- Distribución de las estaciones permanentes de monitoreo GPS utilizadas en este trabajo. La red de control está representada por cuadrados, mientras que la red de evaluación está representada por triángulos. Las líneas discontinuas corresponden a líneas de igual latitud geomagnética para $+30^\circ$, 0° y -30° .

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TEC EN LA REGIÓN

El parámetro fundamental para caracterizar y estudiar el efecto que la ionosfera produce sobre los usuarios de los GNSS es el denominado Contenido Total de Electrones (conocido como TEC, por la sigla en inglés de Total Electron Content). Este parámetro se define según la Ec. 1, y es la integral de la densidad de electrones libres, a lo largo del camino que recorre la señal desde el satélite GNSS hasta el receptor.

$$TEC = \int_S Ne(s) ds \quad (1)$$

La unidad de medición del TEC se denomina TECu y equivale a 1×10^{16} *electrones/m²*. Cuando el camino S coincide con la dirección radial del punto de observación, es decir apunta en la dirección vertical, a la integral se la denomina $vTEC$, en cualquier otro caso la integral se denomina $sTEC$. En la Sección 4 se presentará una de las maneras en la que estos dos parámetros se vinculan entre sí a partir de la suposición de un modelo. A partir de las observaciones obtenidas por las estaciones GPS y siguiendo el procedimiento que se describirá en la próxima sección, se pueden calcular los valores de $sTEC$ desde cada estación a cada satélite que se encuentre sobre su horizonte.

Como se explicará en la Sección 5, el principio de posicionamiento utilizando satélites GNSS se basa en la determinación de la distancia entre los satélites y el receptor GNSS; y en este proceso intervienen varios factores cada uno de los cuales produce un error de variada magnitud. La resultante de estos errores es luego propagada a las coordenadas calculadas. Precisamente, el error inducido en las coordenadas debido a la ionosfera, que es proporcional al $sTEC$, es el error de mayor magnitud y el que muestra la mayor complejidad para su eliminación o reducción. Como se mencionó en la introducción, un SBAS genera un mensaje de aumentación con información ionosférica que se actualiza a intervalos regulares, generalmente cada 5 minutos. La idea detrás del algoritmo de corrección ionosférica es calcular una función que represente la distribución del $vTEC$ en la región de cobertura a partir de la combinación de mediciones de $sTEC$ con modelos matemáticos y algoritmos eficientes de procesamiento de datos.

La Fig.2 muestra dos mapas con la distribución de $vTEC$ presente sobre la región del Caribe, Centro y Sur América para dos momentos del día. El mapa de la izquierda corresponde a las 18:00 horas de tiempo universal y el de la derecha a las 20:00, para un día representativo. Los mapas fueron calculados a partir del Modelo Ionosférico de La Plata (conocido como LPIM por la sigla en inglés de La Plata Ionospheric Model). Para el lector interesado en la formulación detallada del LPIM, se recomienda consultar (Brunini, 1998; Azpilicueta et al., 2005). Esta figura resulta importante para evidenciar la complejidad de la función que un SBAS debe manejar.

4. ALGORITMO PARA EL PRE-PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El algoritmo que calcula la corrección ionosférica utilizado en este trabajo se puede dividir en etapas o fases. En la primera de éstas los observables GPS se com-

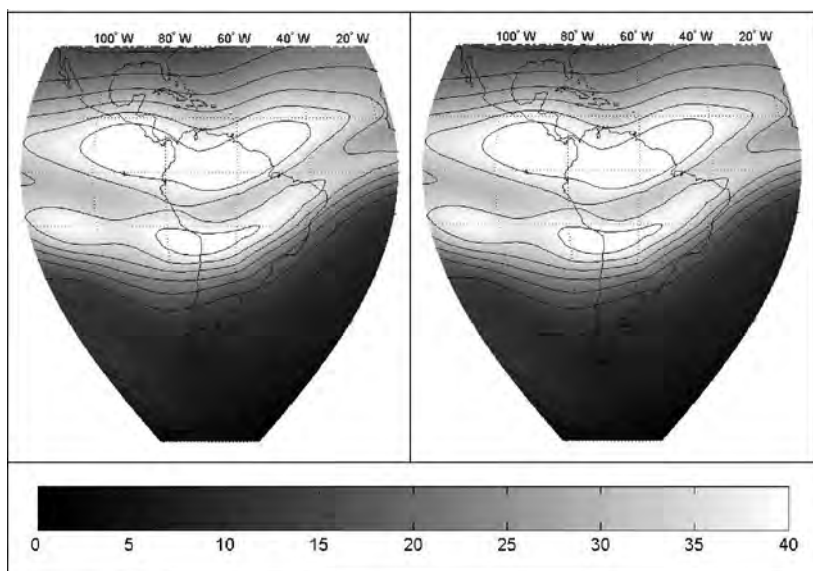


Figura 2.- Mapas con la distribución de $vTEC$ para el día 21/06/06 en TECu. El mapa de la derecha corresponde a las 18:00 horas de tiempo universal, el de la derecha a las 20:00 horas.

binan para calcular el observable ionosférico de código y de fase, también denominado *combinación libre de geometría*. Las Ecs. 2 y 3 muestran las expresiones para el observable ionosférico del código y de la fase respectivamente para cada instante de medición :

$$P_1(t) = P_1(t) - P_2(t) = k sTEC(t) + b_r + b^s + \varepsilon_{P_1} \quad (2)$$

$$L_1(t) = L_2(t) - L_1(t) = k sTEC(t) + B_r + B^s + \beta + \varepsilon_{L_1} \quad (3)$$

donde P_1 y P_2 son las observaciones de código; L_1 y L_2 las observaciones de fase; b_r y b^s son los retardos instrumentales del código del receptor y del satélite respectivamente; B_r y B^s son los retardos instrumentales de fase del receptor y del satélite respectivamente; β es el término que contiene a las ambigüedades de fase; ε_{P_1} y ε_{L_1} son los errores resultantes de la combinación de los errores de medición para el código y la fase respectivamente; k es una constante y los subíndices 1 y 2 refieren a las dos frecuencias $f_1 \sim 1.5 \text{ GHz}$ y $f_2 \sim 1.2 \text{ GHz}$ utilizadas por los satélites GPS. Siguiendo a Schaer (1999), los retardos instrumentales se asumen como constantes para un periodo de algunos días.

Los observables de código y fase contienen la misma información ionosférica pero sus propiedades son diferentes. El de código tiene la ventaja de no estar afectado por las ambigüedades que sí afectan al de fase. Sin embargo, este observable está contaminado por un alto ruido de medición y por el efecto del multi-camino de las señales satelitales. El observable de fase tiene la ventaja de que los niveles de

ruido y multi-camino son unas 100 veces menores, pero su mayor desventaja es la presencia del término β que contiene a las ambigüedades de fase. Ese término permanece constante toda vez la señal del satélite sea rastreada sin saltos de ciclo (Blewitt, 1990); en otras palabras: β permanece constante para todo arco continuo de un satélite dado.

El algoritmo implementado en este trabajo saca provecho de la combinación de ambos observables, utilizando un procedimiento conocido como ‘nivelación de la fase al código’ (Schaer, 1999; Brunini, 1998) que consiste en combinar los observables L_I y P_I para arcos de mediciones continuas, de manera que se genera un nuevo observable \hat{L}_I , cuya expresión está dada por la Ec. 4, que no posee término de ambigüedad y al mismo tiempo tiene una precisión similar a la de las observaciones de fase. La referencia al tiempo de medición ha sido suprimida para simplificar las expresiones.

$$\hat{L} = k \text{ sTEC} + b_r + b^s + \varepsilon_L \quad (4)$$

El paso siguiente consiste en estimar los valores de las constantes b_r y b^s . Para esto se hace uso del Modelo Ionosférico de Capa Simple (conocido como SLM, por su sigla en inglés de Single Layer Model) que consiste en asumir a la ionosfera comprimida en una capa esférica de espesor infinitesimal de radio aproximado a los 6821 Km, es decir ubicada a aproximadamente 450 Km desde la superficie de la tierra. Esta aproximación es ampliamente utilizada en este tipo de estudios y permite convertir la observación de sTEC en vTEC , y asignar este valor a un determinado punto en el espacio (el denominado IPP del inglés Ionospheric Piercing Point o Punto de Penetración Ionosférica), que es el punto donde la línea de la visual entre el satélite y el receptor corta a la capa esférica. La Fig. 3 muestra una representación esquemática de los principales elementos que intervienen en la definición del SLM.

Luego, asumiendo que la distribución del en torno a cada estación es relativamente simple, se plantea una función bi-cuadrática en la coordenada modip (Rawer, 1984) y la longitud geográfica del IPP. La función bi-cuadrática tiene un intervalo de actualización de 5 minutos. La Ec. 5 sintetiza lo expresado anteriormente.

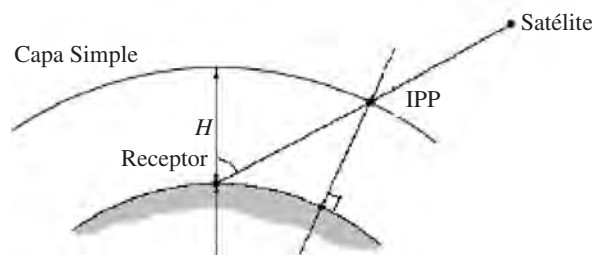


Figura 3.- Representación esquemática de los principales elementos que intervienen en el Modelo de Capa Simple (SLM).

$$\hat{L} = k \sec(z') vTEC(\lambda, m) + b_r + b^s + \varepsilon_{\hat{L}} \quad (4)$$

$$vTEC(\lambda, m) = \gamma_0 + \gamma_{10}(\lambda - \lambda_r) + \gamma_{01}(m - m_r) + \gamma_{20}(\lambda - \lambda_r)^2 + \gamma_{11}(\lambda - \lambda_r)(m - m_r) + \gamma_{02}(m + m_r)^2$$

donde $m_i = \arctan\left(\frac{I}{\sqrt{\cos\varphi_i}}\right)$ es la coordenada modip, I es el dip del campo geomagnético en el IPP y φ_i es la latitud geográfica; λ es la longitud geográfica y el subíndice r alude a la posición del receptor; $\sec(z') = vTEC / sTEC$ es la función de mapeo y z' es el ángulo entre el camino de la señal y la vertical que pasa por el IPP; γ_0 y γ_{lm} son los coeficientes del desarrollo bi-cuadrático.

Utilizando las observaciones recolectadas por cada estación a lo largo de varios días de medición, es posible estimar las constantes \hat{b}_k y \hat{b}^s que intervienen en la Ec. 5 para, luego, calcular los valores de $s\hat{TEC} = \hat{L} - \hat{b}_r - \hat{b}^s$, es decir los estimadores de $sTEC$ libres de efectos de instrumentales.

El procedimiento presentado en esta sección se aplica a todas las estaciones GPS involucradas en el estudio de manera que se obtiene una serie temporal de valores de $s\hat{TEC}$ para cada una de ellas, que luego es utilizada en la etapa siguiente de procesamiento.

5. ALGORITMO PARA LA CORRECCIÓN IONOSFÉRICA Y SU ERROR ESTIMADO

La etapa siguiente del algoritmo de procesamiento permite calcular una función que represente la distribución del $vTEC$, es decir una función que represente a la corrección ionosférica para toda el área de cobertura del sistema. De forma específica, ésta queda definida principalmente por el alcance espacial de los datos provistos por las estaciones de la red de control (ver Fig. 1).

La forma algebraica de la función que representa al $vTEC$ en la región responde a las siguientes características: la variabilidad espacial está representada por un desarrollo en Armónicos Esféricos de grado 6 y orden 2; mientras que la variación temporal la aportan funciones constantes a tramo, a intervalos de 5 minutos, que modelan a los coeficientes del desarrollo. La Ec. 6 resume las características para la distribución regional del $vTEC$.

$$vTEC(\lambda, m) = \sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^i \left\{ a_{ij} \cos\left(2\pi \frac{j\lambda}{24}\right) + b_{ij} \sin\left(2\pi \frac{j\lambda}{24}\right) \right\} P_{ij}(\sin m); \quad (6)$$

donde λ y m son la longitud geográfica y la coordenada modip del IPP; a_{ij} y b_{ij} son los coeficientes del desarrollo en Armónicos Esféricos que se actualizan cada 5 minutos; $P_{ij}()$ es el polinomio de Legendre de grado i y orden j . Los coeficientes del desarrollo se estiman a partir de bloques de datos de toda la red de control.

La formulación anterior se combina con un procedimiento de resolución de los coeficientes del desarrollo basado en un Filtro Kalman (Brown and Hwang, 1991). La Fig.4 muestra el esquema de procesamiento de esta etapa del algoritmo. El proceso comienza con valores iniciales $(a_{ij}, \sigma_{ij})_0$ para los coeficientes y sus desviaciones estándares. Luego, el Filtro Kalman utiliza el primer bloque de 5 minutos de datos y genera valores actualizados $(a_{ij}, \sigma_{ij})_1$. Estos parámetros tendrán una validez de aplicación de 5 minutos. En la etapa siguiente, el Filtro Kalman combina los coeficientes y desviaciones estándares de la etapa anterior con el siguiente bloque de 5 minutos de datos y se obtiene un nuevo juego de parámetros. Este procedimiento se repite hasta procesar el paquete de datos completos correspondiente a una semana completa.

Los parámetros a_{ij} son lo que permiten calcular la corrección ionosférica interpolada en cualquier punto de la región de cobertura. Los parámetros σ_{ij} permiten obtener un estimador del error que se está cometiendo con la interpolación a partir de una propagación estadística de errores (Brandt, 1989).

6. HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la calidad de la corrección ionosférica que se puede obtener mediante un algoritmo de corrección ionosférica tipo SBAS para la región del Caribe, Centro y Sur América. Para esto, como se mencionó en la Sección 2, un grupo de estaciones de monitoreo GPS permanente fueron seleccionadas para actuar como usuarios de las correcciones calculadas (red de verificación). El criterio de evaluación se concentró en el efecto sobre la componente vertical de la posición que determinaría un usuario de posicionamiento del SBAS en la región, ya que esa es la componente más sensible a los errores ionosféricos.

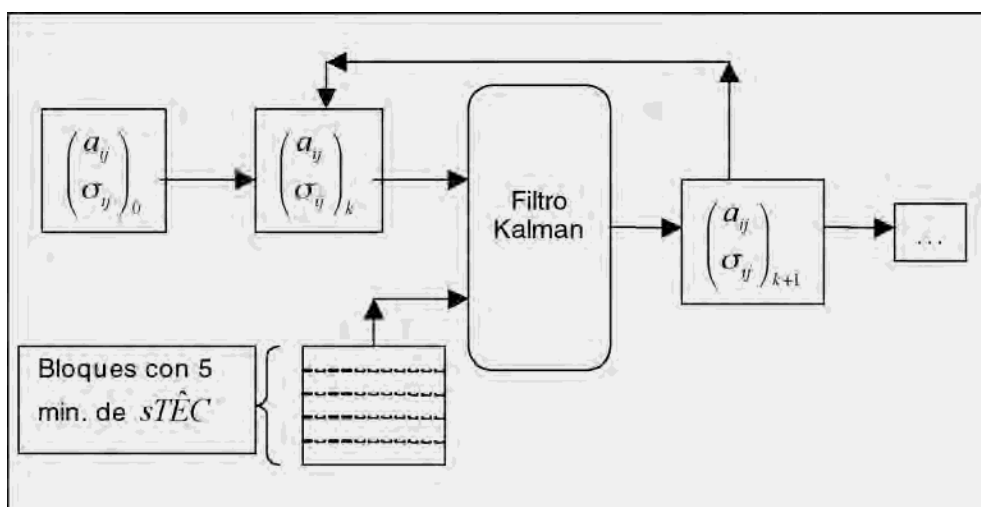


Figura 4.- Esquema de procesamiento para el cálculo de la función corrección ionosférica basada en un Filtro Kalman.

Como es sabido, el posicionamiento utilizando satélites GPS consiste en resolver un sistema donde las incógnitas son las coordenadas geográficas: λ , φ y h , y el error de sincronización del reloj del receptor, τ , a partir de mediciones simultáneas de la distancia entre el receptor y al menos 4 satélites y de la posición de cada satélite que se obtiene a partir del mensaje de navegación que ellos mismo transmiten. A los efectos de este trabajo es conveniente formular el problema de la determinación de las coordenadas en un sistema de coordenadas locales, lo que conduce al sistema de ecuaciones 7.

$$\begin{bmatrix} \cos e_i & \cos a_i & \cos e_i & \sin a_i & \sin a_i & c \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos e_n & \cos a_n & \cos e_n & \sin a_n & \sin a_n & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \psi \\ \zeta \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_i - r_i \\ \dots \\ \rho_n - r_n \end{bmatrix}; \quad (7)$$

Para comprender el significado de los términos que intervienen en estas ecuaciones nos ayudaremos con el esquema que se muestra en la Fig. 5: las variables e_j y a_i son la elevación y el acimut al satélite i (punto S en la Fig. 5), visto desde un punto arbitrario (P en la Fig. 5) próximo al receptor (R en la Fig. 5); ρ_i es la distancia entre el receptor y el satélite i medida por el receptor y r_i es la distancia geométrica entre el punto P y el satélite i que se calcula a partir de las coordenadas de ambos; finalmente ξ , ψ y ζ son las distancias en la direc-

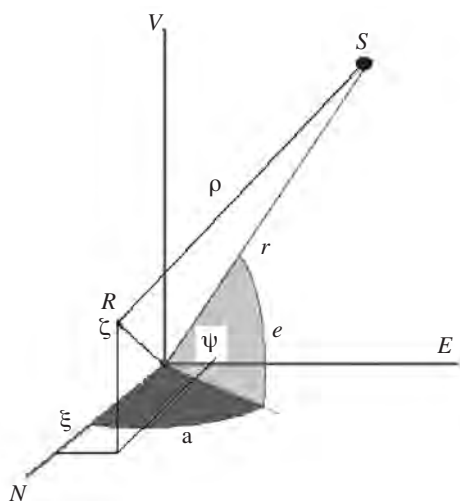


Figura 5.- Esquema de los elementos que intervienen en el planteamiento local del problema de posicionamiento.

ción Norte, Este y Vertical entre la solución del algoritmo de posicionamiento y el punto P ; τ es el retardo en el reloj del receptor.

Puesto que todas las estaciones que integran la red de verificación pertenecen a la red SIRGAS, sus coordenadas son conocidas con precisión mejor que el centímetro. Luego, asignando estas coordenadas al punto P y resolviendo las incógnitas ξ , ψ y ζ , se obtiene el error en las direcciones norte, este y vertical que calculará un receptor que mida las distancias ρ_i . En particular, si cada elemento del miembro de la derecha de las Ecs. 7 se reemplaza por los $sTEC_i$, es decir el error ionosférico que afecta a la distancia medida al satélite i , las incógnitas ξ , ψ y ζ representarán a los errores en las coordenadas debidos a la ionosfera. Extendiendo este razonamiento, si se reemplaza el lado derecho de la Ecs. 7 por $\Delta sTEC_i = sTEC_i - s\tilde{TEC}_i$, donde $sTEC_i$ es el efecto ionosférico y $s\tilde{TEC}_i$ es la corrección estimada por la función descrita en la sección anterior, las incógnitas ξ , ψ y ζ resultan ser los errores en la posición debidos a la ionosfera residual, es decir a aquella parte del efecto ionosférico que el valor dado por el modelo utilizado en el SBAS no alcanza a reproducir.

Para ilustrar el desarrollo anterior, la Fig. 6 muestra la serie de tiempo para los $sTEC_i$ determinados para una estación en función del tiempo universal para la S1. La Fig. 7 muestra la serie de tiempo para los $\Delta sTEC_i = sTEC_i - s\tilde{TEC}_i$, es decir después de aplicar la corrección de tipo SBAS. Ambas figuras corresponden a la estación NAUS que se ubica en la región de latitud geomagnética baja. De la comparación de las Figs. 6 y 7, se ve la reducción del error ionosférico cuando se aplica la corrección, que se hace más evidente en las horas que corresponden al mediodía local.

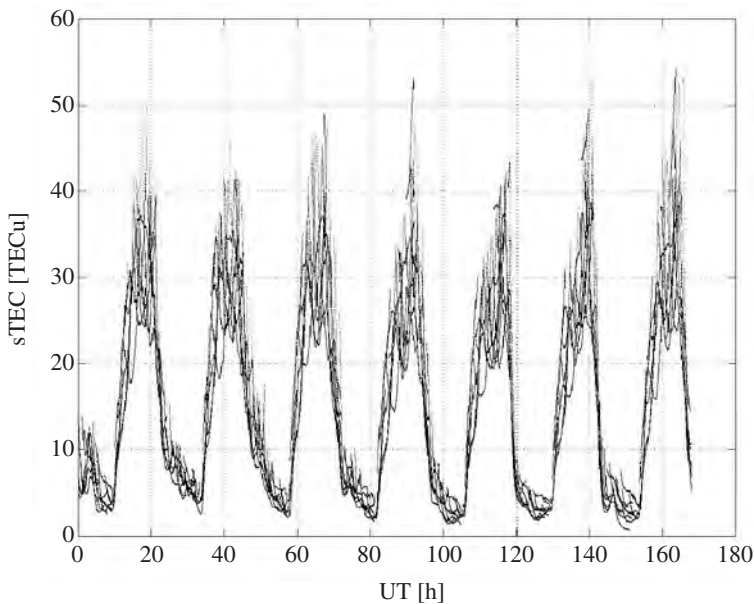


Figura 6.- Serie de tiempo del error causado por la ionosfera en la distancia medida a los satélites por la estación NAUS (latitud geomagnética baja) en función de Tiempo Universal medido en horas para la Semana 1.

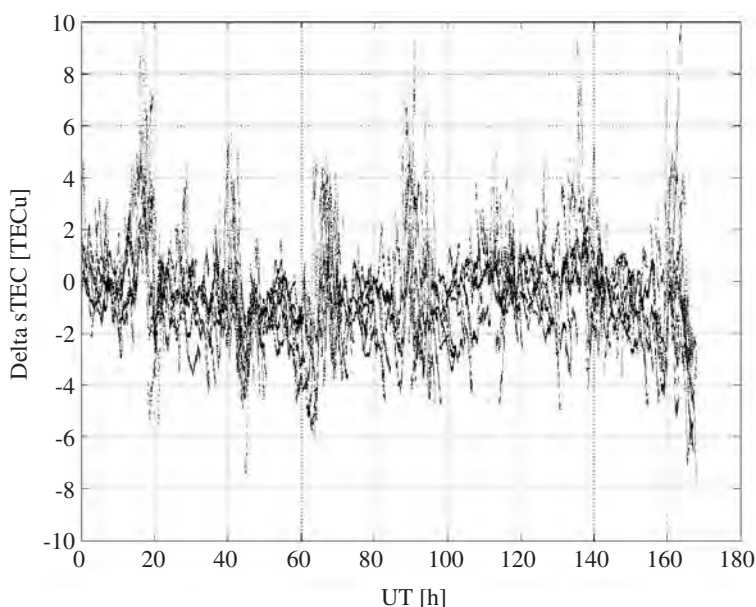


Figura 7.- Serie de tiempo de la diferencia entre el error ionosférico observado y el calculado (efecto residual) para la estación NAUS en función del Tiempo Universal medido en horas para la Semana 1.

Como se mencionó anteriormente, un SBAS además de proveer la información necesaria para calcular la corrección ionosférica, provee también información que permite calcular un estimador del error de la corrección. Luego, a partir de éstos y aplicando propagación estadística de errores (Brandt, 1989) dada por la Ec. 8 se obtienen los estimadores de error, y para cada componente.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\xi}^2 & \sigma_{\xi\psi} & \sigma_{\xi\zeta} \\ \sigma_{\xi\psi} & \sigma_{\psi}^2 & \sigma_{\psi\zeta} \\ \sigma_{\xi\zeta} & \sigma_{\psi\zeta} & \sigma_{\zeta}^2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \sigma_{sTEC_i}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{sTEC_n}^2 \end{bmatrix} A'; \quad (7)$$

donde la matriz A se define de las Ecs.7 y es igual a:

$$A = \begin{bmatrix} \cos e_1 & \cos a_1 & \cos e_1 & \sin a_1 & \sin a_1 & c \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos e_n & \cos a_n & \cos e_n & \sin a_n & \sin a_n & c \end{bmatrix} \quad (7)$$

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para evaluar de forma agregada la calidad de los parámetros provistos por el algoritmo tipo SBAS, en este trabajo se ha utilizado un gráfico denominado *de integridad*, que es muy usado para evaluar el desempeño de los SBAS actualmente operativos y que consiste en graficar en el eje de las abscisas el módulo del error ionosférico residual, y en el eje de las ordenadas el estimador del error obtenido de la propagación multiplicado por un factor cuyo valor es siempre mayor que la unidad y depende del nivel de seguridad que se adopte. La escala de grises indica los porcentajes de datos en cada área del gráfico. La línea *ordenada* = *abscisa* divide al plano x - y en dos triángulos. La primera condición que se debe verificar es que la mayor cantidad de puntos se ubique en el triángulo superior, es decir que los estimadores de error nunca sean menores a los errores. La segunda condición es que los errores se mantengan acotados dentro de cierto rango. Los valores que aparecen en el margen superior de cada triángulo indican los porcentajes de puntos que se encuentran en cada triángulo.

La Fig. 8 muestra dos gráficos de integridad para la estación BRFT (latitud geomagnética baja). El gráfico de la izquierda corresponde a la S1 y el de la derecha a la S2. El gráfico de la S2 muestra una mayor dispersión que el de la S1; evidenciando que para el solsticio de verano el comportamiento de la corrección ionosférica es mucho más compleja.

La Fig. 9 muestra los gráficos de integridad correspondientes para la estación IGM1 (latitud geomagnética media). El contraste que aparece al comparar estos gráficos con los de la Fig. 8 es significativo, pero se explica claramente al tener en cuenta la región geomagnética a las que pertenece cada estación.

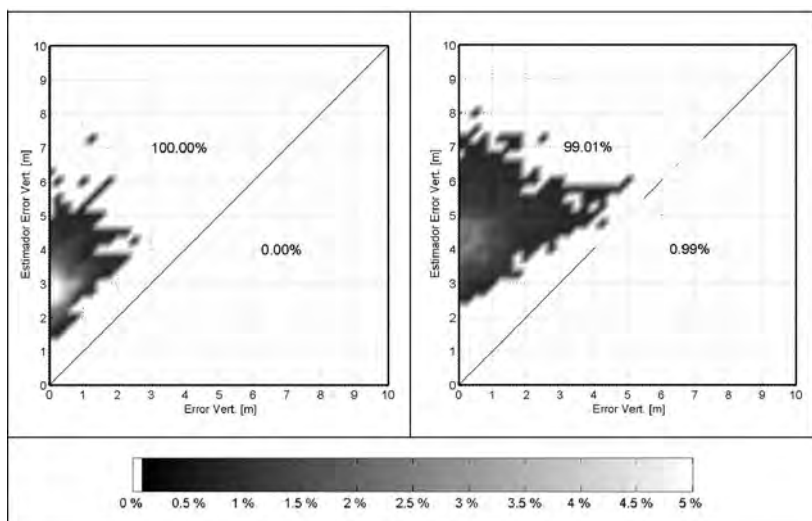


Figura 8.- Gráficos de integridad para la estación BRFT (latitud geomagnética baja). El gráfico de la izquierda corresponde a la S1; el gráfico de la derecha corresponde a la S2.

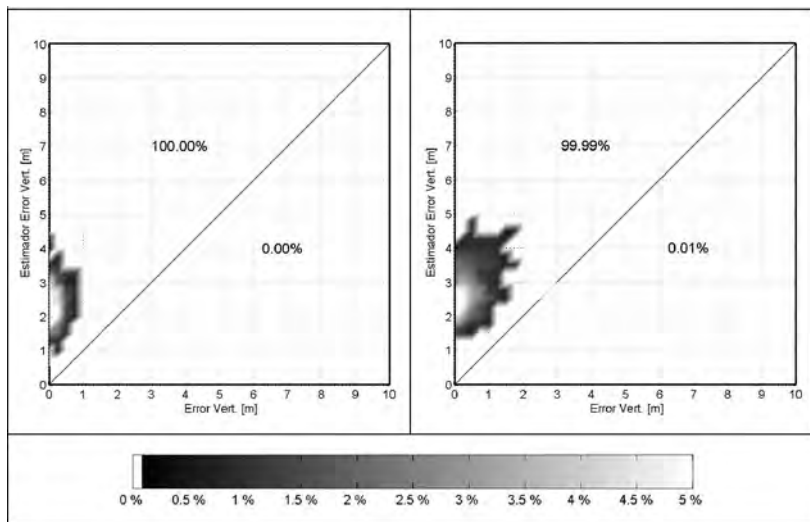


Figura 9.- Gráficos de integridad para la estación IGM1 (latitud geomagnética media). El gráfico de la izquierda corresponde a la S1; el gráfico de la derecha corresponde a la S2.

Para obtener valores indicativos de cada semana, es conveniente realizar los gráficos de integridad para el conjunto completo de datos de la red de verificación para cada semana. Estos gráficos aparecen en la Fig.10 donde el gráfico de la izquierda

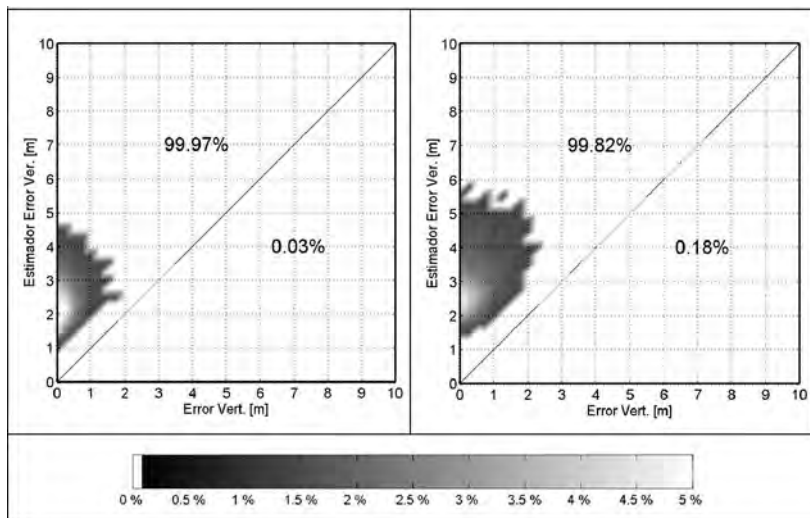


Figura 10.- Gráfico de integridad para todas las estaciones de la Red de Evaluación. El gráfico de la izquierda corresponde a la S1; el gráfico de la derecha corresponde a la S2.

corresponde a la S1 y el de la derecha a la S2. La Tabla 1 sintetiza los resultados para el análisis en conjunto, y muestra que un número cercano al 99% de puntos se ubican en el triángulo superior del gráfico de integridad para ambas semanas.

Tabla 1.- Porcentajes de datos en el triángulo superior e inferior del gráfico de integridad conjunto para todas las estaciones de evaluación para cada semana.

| | Triáng. Superior | Triáng. Inferior |
|----|-------------------------|-------------------------|
| S1 | 99.97% | 0.03% |
| S2 | 99.82% | 0.18% |

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La presente contribución describe un experimento para evaluar la calidad de la corrección ionosférica para un esquema similar a los utilizados en los SBAS, utilizando mediciones reales recolectadas por una red de monitoreo GPS permanente distribuida de forma relativamente homogénea en el área de estudio. Esta característica hace que el escenario planteado para el análisis, incluyendo problemas de configuración y fuentes de error, resulte muy cercano al que tendría que manejar un SBAS en la región.

Los resultados presentados en la Sección 7 son muy satisfactorios. El algoritmo implementado tuvo una capacidad de predicción del error ionosférico del orden del 99%. Si bien estos resultados son muy alentadores, es preciso tener en cuenta que el estudio fue realizado con mediciones de un período de tiempo donde la actividad solar estaba próxima a su mínimo. Es esperable que para niveles de actividad solar mayores, el comportamiento temporal y espacial de la distribución del presente una mayor complejidad de representación y de predicción.

El estudio muestra los resultados que se obtienen para los solsticios de verano e invierno, asumiendo que estas dos condiciones son las más demandantes. Sin embargo, para caracterizar el comportamiento del algoritmo en la región, faltaría completar el análisis con resultados del comportamiento durante los equinoccios intermedios.

REFERENCIAS

- AZPILICUETA, F., C. BRUNINI & S. RADICELLA (2005). Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude. *Adv. Space Res.*, 38(11), 2324-2331, DOI:10.1016/j.asr.2005.07.069.
- BLEWITT G. (1990). An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 17(3), 199-202.
- BRANDT, S. (1999). Statistical and computational methods in data analysis. Springer, 3rd edition, 652 pp.

- BROWN, R. & P. HWANG (1991). Introduction to random signals and applied Kalman filtering. John Wiley & Sons, 2nd edition, 512 pp.
- BRUNINI, C. (1998). Global Ionospheric model from GPS measurements, Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata.
- FORTES, L.P., E. LAURIA, C. BRUNINI, A. HERNANDEZ, L. SANCHEZ, H. DREWES & W. SEEMUELLER (2006). Current status and future developments of the SIRGAS project. Wiss. Arb. Fachr. Verm, University of Hannover; Nr. 258: 59-70.
- RAWER, K. (1984). Geophysics III, Part VII, in Rawer K. (Ed.) *Encyclopedia of Physics*, Springer-Verlag, 387–391.
- SCHAER, S. (1999). Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System, PhD thesis. Bern University, Bern, Switzerland.