

Estudio del contenido total de electrones (TEC) sobre el territorio mexicano

Víctor José **Gatica-Acevedo**
Miguel **Sánchez-Meraz**
Carlos **Sosa-Paz**

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Zacatenco,
Col. Lindavista, Del. Gustavo A. Madero, CP 07738,
Ciudad de México.
MÉXICO.

correos electrónicos (email):
vgaticaa1300@alumno.ipn.mx
mmeraz@ipn.mx
csosapaz@gmail.com

Recibido 10-11-2014, aceptado 14-03-2015.

Resumen

Este trabajo presenta una evaluación del contenido total de electrones (TEC) sobre el territorio mexicano. El TEC es el parámetro que cuantifica el estado de la ionósfera terrestre, afectando la propagación de las señales electromagnéticas que la atraviesan. Alrededor del mundo varias agencias se ocupan de monitorear el TEC con el objetivo de prevenir afectaciones en los sistemas tecnológicos, principalmente en los sistemas de navegación basada en satélite y de telecomunicaciones. La medición del TEC se realiza principalmente a través de redes integradas por receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite). México se encuentra cercano al ecuador magnético, región en donde se presenta una alta actividad ionosférica, representando variaciones importantes en el TEC y grandes afectaciones en los sistemas de base tecnológica. Los resultados presentados en este trabajo son relevantes para el sector de las telecomunicaciones,

poniendo énfasis en aplicaciones satelitales como la navegación basada en satélite (aplicaciones GNSS) que requiere altos grados de precisión e integridad.

Palabras clave: GNSS, ionosfera, TEC, monitoreo ionosférico.

Abstract (Study of the Total Electron Content (TEC) over the Mexican Territory)

This paper presents the results of an assessment of the Total Electron Content (TEC) over the Mexican territory. TEC is a parameter that let us monitor the status of the ionosphere and its affectation on the propagation of electromagnetic signals which travel through. Many agencies around the world monitor the TEC in the ionosphere in order to prevent risk situations on technological systems, such as the satellite-based navigation systems and satellite telecommunications system whose receive their signals from the space. TEC measurements are performed by using a network of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) receivers. Mexico is close to the equatorial geomagnetic region, i.e., it is a region with the presence of high ionospheric activity, which results on huge TEC variations and their effects on technological systems. This situation highlight the importance of deploying TEC monitoring systems for Mexico. Results presented in this paper are quite important for the telecommunications sector, with emphasis on those satellite applications (for example, GNSS applications) which demands high levels of integrity and accuracy.

Key words: GNSS, TEC, ionosphere, ionospheric monitoring system.

1. Introducción

La región ionosférica se define como la capa de la atmósfera que se encuentra entre los 60 a 1500 km de altura sobre la superficie terrestre. Generalmente se subdivide en tres capas: Capa D, E y F. La estructura de la ionosfera varía en función de la actividad solar y del campo magnético terrestre, siendo el contenido total de electrones (o TEC por sus siglas en

inglés) uno de los principales parámetros para medir dicha variación. La ionosfera es un medio dispersivo de las ondas electromagnéticas que cambia su velocidad de propagación. Particularmente para las señales que operan en la banda L utilizadas por los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) experimentan un retardo debido a su paso a través de la ionosfera que resulta en errores de posicionamiento del orden de los 100 metros [1]. El rango de error introducido por la afectación de la ionósfera es proporcional al TEC que se encuentra en la trayectoria satélite-receptor.

Los usuarios GNSS disponen de dos métodos para corregir el error ionosférico: 1) a través de modelos (teórico-empírico) ionosféricos, y 2) a través de la generación de mapas de TEC generados a partir del monitoreo en tiempo real de la ionosfera [2]. Existen varios modelos ionosféricos entre los que destacan los siguientes: el modelo de Ionosfera de Referencia Internacional (IRI), el modelo Klobuchar y el modelo de NeQuick. Estos modelos generan perfiles de TEC en función principalmente de la altitud, el año (respecto a los ciclos solares), época del año y ubicación geográfica. Estos modelos emplean datos adicionales obtenidos a través de misiones espaciales e incorporando información proveniente de otros instrumentos de sondeo.

Estos modelos han servido como base para las tareas de ajuste de los mapas de TEC generados por diversas agencias como son: el Servicio de GNSS Internacional (IGS), el Centro de Determinación de Órbita Europeo (CODE), el Jet Propulsion Laboratory (JPL) y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) [3]. El trabajo de adaptación del modelo IRI a partir de mediciones GNSS realizados por [4] en África, la comparación de los valores del TEC calculados respecto a las distintas variantes de los modelos IRI y NeQuick realizado por [5] sobre la región del hemisferio Norte, así como el estudio regional de la ionosfera realizado en Sudamérica por [6] para su integración al desarrollo de un sistema de aumentación basado en Tierra (GBAS), resaltan la importancia de realizar trabajos para la adaptación (o calibración) de modelos ionosféricos sobre diferentes regiones del planeta. Esta tarea es muy importante para evaluar y monitorear las afectaciones de la ionósfera sobre diversos sistemas tecnológicos, principalmente aquellos basados en el uso de señales GNSS. Sobre la región del continente Americano, la Administración Nacional de Océano y Atmosfera (NOAA) de los Estados Unidos pone a disposición mapas del TEC [7]. Dichos mapas ofrecen información del contenido electrónico de la ionósfera sobre la

región Norte del continente, incluyendo al territorio Mexicano. El objetivo de este trabajo es analizar los valores de TEC obtenidos a partir de los mapas que generan las agencias NOAA e IGS para el territorio mexicano. Se presenta la comparación de los reportes emitidos por estas agencias con mediciones del TEC realizadas a través de receptores GNSS instalados dentro del territorio de México. Posteriormente se presenta una comparación de los modelos ionosféricos IRI y Klobuchar respecto a las mediciones del TEC para la zona con mayor proximidad al ecuador geomagnético. Los resultados presentados en este trabajo buscan servir como base para impulsar el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo-real compuesto por receptores GNSS que reporte el estado de la ionósfera. Este sistema busca apoyar la operación segura de los sistemas tecnológicos susceptibles a las afectaciones de la ionosfera, como son las telecomunicaciones y los sistemas de navegación basada en satélite.

1.1. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) y monitoreo ionosférico

Los GNSS son el conjunto de elementos desplegados en tierra y en el espacio, que tienen como misión proporcionar el servicio de posicionamiento-navegación-temporización (PNT) por medio de señales electromagnéticas [8]. Las principales constelaciones GNSS están conformadas por los sistemas: GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou (estos dos últimos actualmente están en fase de desarrollo). Los GNSS son vulnerables a las condiciones del clima espacial [9][10], siendo el retardo ionosférico la principal fuente de error. Existen varias técnicas que ayudan a mitigar el retardo ionosférico y como consecuencia incrementan la precisión e integridad del posicionamiento mediante GNSS. Las técnicas de doble frecuencia, las correcciones emitidas por sistemas de aumentación y los modelos ionosféricos, son los métodos principalmente empleados que corrigen este error y mejoran la precisión del GNSS [11]. Sin embargo, esta afectación ha permitido utilizar a los GNSS como una herramienta para el monitoreo ionosférico, permitiendo medir varios parámetros ionosféricos, entre ellos el TEC. La recolección continua de datos a través de redes compuestas por receptores GNSS alrededor del mundo ha permitido generar mapas del TEC con diferentes resoluciones de tiempo [12]. Los receptores GNSS generan datos de observables a partir de las frecuencias $L1$ y $L2$, considerando principalmente dos parámetros: el retardo de los pseudoranges (ρ) y las fases de las portadoras (Φ). El retardo

ionosférico I es proporcional al TEC presente entre la trayectoria de las señales L1 y L2, expresándose de la siguiente manera:

$$I = \frac{40.3}{f^2} \text{ TEC} \quad (1)$$

El TEC se mide en electrones por m^2 , definiendo la unidad TECU ($1 \text{ TECU } e = 1 \times 10^{16} / \text{m}^2$), en donde 1 TECU provoca un retardo equivalente a 0.163 metros en la señal L1 y de 0.267 metros en la señal L2 [13]. Por lo tanto se puede considerar que existe una diferencia de 10 cm entre las señales L2 y L1, correspondiendo a 1 TECU de contenido electrónico y se expresa matemáticamente como:

$$\text{TEC} = \frac{\rho_{L1} - \rho_{L2}}{0.104 \text{ mTECU}^{-1}} \quad (2)$$

En donde los seudorangos (ρ_{L1} y ρ_{L2}) son proporcionados por los receptores GNSS multifrecuencia en unidades de metros. El contenido total de electrones vertical (VTEC) observado en un punto sub-ionosférico se calcula utilizando la siguiente función de mapeo [12]:

$$\text{VTEC} = \text{TEC} \cdot \cos \left[\arcsin \frac{R_e \cos(\theta)}{R_e + h} \right] \quad (3)$$

En donde R_e es el radio de la Tierra (6371.2 km), h es la altura de la ionosfera respecto a la superficie terrestre (350 km), y θ corresponde al ángulo de elevación entre satélite-receptor dado en grados. Utilizando este principio y corrigiendo errores instrumentales conocidos como *desviaciones de código diferenciales* (DCB), es como varias agencias y centros de investigación generan mapas de TEC regionales y globales [11][13]. En la región norte del continente americano, la NOAA de los Estados Unidos gestiona una red de receptores GNSS conocida como Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS). Los datos registrados por la CORS, así como los mapas de TEC generados para la región de Norteamérica, son accesibles a través de las direcciones web <http://geodesy.noaa.gov/CORS> y <http://www.swpc.noaa.gov>, respectivamente.

1.2. Modelos ionosféricos

A principios del siglo pasado, la interacción de las señales electromagnéticas con el medio ionosférico despertó el interés por comprender y modelar dicha región. Varios modelos, tanto teóricos como empíricos han sido propuestos y aceptados como referencias para la descripción del medio ionosférico, mejorándose estos a través de la incorporación de datos provenientes del GNSS. El trabajo de Arbesser-Rastburg [14] muestra los principales modelos ionosféricos que son gran interés en aplicaciones GNSS:

- **Modelo de Ionosfera de Referencia Internacional (IRI).** Es un modelo empírico desarrollado por el Comité de Investigación Espacial (COSPAR) y la Unión Internacional de Radio Ciencia (URSI) a comienzos de 1968 [16]. El modelo IRI es capaz de describir la densidad electrónica, la temperatura iónica, composición y el contenido total de electrones (TEC) para una fecha, hora y posición específica.
- **Modelo de Klobuchar.** En la década de los 80 [12] presentó un algoritmo para corregir el retardo ionosférico para receptores GPS monofrecuencia. Este modelo se basa en la representación del retardo ionosférico por medio de una función coseno, el cual mantiene su fase cero a las 14:00 horas tiempo local y una constante de tiempo nocturna de 5 nanosegundos. La amplitud y el periodo de esta curva son generadas a partir de polinomios de tercer grado, los cuales dependen de la hora local y de la latitud geomagnética. Los coeficientes de estos polinomios son calculados por el segmento de control del GPS y son incorporados dentro del mensaje de navegación.
- **Modelo NeQuick.** Este modelo es la propuesta para la corrección del retardo ionosférico para los receptores monofrecuencia que usen la constelación Galileo. Fue desarrollado por Radice [15], consistiendo en un modelo de la densidad electrónica 3D y dependiente del tiempo, el cual proporciona la densidad electrónica en función de la posición y el tiempo [16]. Este modelo permite obtener el TEC calculando la densidad electrónica presente en la trayectoria satélite-receptor.

Estos modelos presentan limitaciones principalmente en las predicciones del perfil electrónico superior de la ionosfera

[17]. El desarrollo de instrumentos de sondeo, datos registrados por receptores GNSS instalados alrededor del mundo, así como misiones espaciales como TOPEX/POSEIDON, han permitido obtener datos a diferentes altitudes los cuales ayudan a mejorar los modelos ionosféricos [18].

2. Análisis del TEC sobre el territorio mexicano

En México se encuentran instalados 22 receptores GNSS asociados a la CORS, de los cuales se tiene acceso a los datos registrados a través de los archivos RINEX (*Receiver Independent Exchange*). Los archivos RINEX almacenan la información de las medidas del código del pseudo-rango (ρ_{L1} , ρ_{L2}) y fase de portadora (Φ_{L1} , Φ_{L2}) de las señales captadas por los receptores GNSS [19]. La Figura 1 muestra un mapa con la ubicación de los receptores GNSS utilizados en este trabajo para la medición del TEC. La Tabla 1 presenta las coordenadas de dichas estaciones GNSS. En este estudio se consideraron los valores de las Desviaciones de Código Diferencial (DCB), tanto de los satélites GPS y de los receptores, los cuales son necesarios para realizar estimaciones del TEC con mayor precisión [20][21]. Empleando los valores de pseudo-rango obtenidos de los RINEX y aplicando las expresiones definidas en (1) y (2), se calculó el valor del TEC registrado por cada receptor, empleando registros del año 2013. Para procesar los archivos RINEX se empleó la herramienta informática "gLAB", la cual es de uso libre y fue desarrollada por el grupo de investigación de Astronomía y Geomática (gAGE) de la Universidad Politécnica de Catalunya (J. Sanz Subirana 2013). Se utilizó la función de mapeo definida en (3), con la cual se obtiene el TEC vertical (VTEC) medido por cada receptor. Por razones prácticas, nos referiremos al VTEC como TEC a partir del resto del documento. Con esto se ha definido el escenario en el cual se realizó la evaluación del TEC, destacando la consideración de receptores instalados en distintas latitudes del territorio Mexicano. La ionosfera terrestre varía respecto a la ubicación en tierra principalmente en la componente latitudinal, debido a la variación del ángulo cenit respecto al Sol. Por esta razón toman relevancia las estaciones con receptores GNSS instalados en Mexicali y Oaxaca, ubicados en los puntos extremos de México.

2.1. Comparación del TEC medido respecto a los reportes emitidos por la NOAA y el IGS

Esta sección presenta un análisis comparativo entre los reportes de TEC emitidos por la NOAA y el IGS, respecto a



Fig. 1. Mapa de estaciones GNSS utilizadas.

mediciones de TEC realizadas a partir de los receptores GNSS que integran nuestro escenario de análisis. Tanto la NOAA como el IGS emplean diferentes técnicas de sondeo para la generación de mapas de TEC, en este sentido resulta importante identificar a cual referencia tienden a ajustarse las mediciones del TEC. La NOAA coloca a disponibilidad sus mapas de TEC en archivos de texto generados a través de la página web <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/USTEC/products>. El IGS proporciona archivos llamados IONosphere Map Exchange (IONEX) en los que se encuentran los mapas globales de TEC generados por esta agencia [22]. El TEC fue medido tomando los registros de pseudor rangos generados por cada receptor durante 5 días continuos, aproximadamente a la mitad de cada mes del año. Los valores de TEC medidos fueron promediados a intervalos de una hora durante cada día. Posteriormente se obtuvo el valor representativo para cada hora del día de un mes en particular como el promedio del TEC considerando las mediciones a la misma hora en

Tabla 1. . Ubicación de los receptores GNSS utilizados en este trabajo.

Estación receptora GNSS	Latitud	Longitud
AGUASCALIENTES	21.856111°N	102.284167°W
LA PAZ	24.145000°N	110.330556°W
MEXICALI	32.632778°N	115.475556°W
OAXACA	17.078333°N	96.716667°W

cada uno de los 5 días de la medición. Los meses seleccionados para realizar el análisis fueron marzo y diciembre, en los cuales se presenta el inicio de la primavera y del periodo invernal respectivamente en el hemisferio Norte.

Las Figuras 2 y 3, presentan las gráficas del comportamiento del TEC correspondientes a los meses de marzo y diciembre, respectivamente, registrado durante un periodo de 24 horas para cada ubicación. Es posible apreciar en las gráficas que los valores máximos de TEC los reporta la NOAA, presentando diferencias respecto a las otras curvas por encima de los 50 TECU durante el mes de marzo y 40 TECU durante el mes de diciembre. Analizando las gráficas de los meses de marzo y diciembre, correspondientes a Mexicali, se aprecia que las curvas de TEC presentan el nivel máximo en diferentes horas del día (desfasamiento), mientras que en las demás ubicaciones este desfasamiento es menor, variando entre el intervalo de las 12 a las 18 horas TL (Tiempo Local). Por otra parte, los valores máximos de TEC entre las curvas obtenidas de los receptores y las reportadas por el IGS presentan diferencias mínimas, particularmente en el receptor Aguascalientes tienden al mismo valor (41 TECU) en la gráfica de la Figura 2. Respecto a las gráficas correspondientes a los receptores de La Paz, Aguascalientes y Oaxaca, es posible apreciar que las curvas de TEC tienden a ajustarse mejor, particularmente las correspondientes al mes de diciembre (Figura 3). Aunque siguen presentes desfases del orden de entre 2 y 3 horas respecto los valores máximos, se aprecia un comportamiento regular en comparación con las curvas de TEC generadas por el receptor de Mexicali. Respecto al gráfico correspondiente al receptor Oaxaca, es posible apreciar que las tres curvas del mes de Diciembre tienden a empatar respecto al comportamiento del TEC, presentando desfases de menor magnitud respecto a los reportes de la NOAA y el IGS. Se aprecian algunos cambios abruptos para la curva del TEC reportado por la NOAA a las 9 horas TL, lo cual no es reportado por el IGS y no fue detectado por las mediciones. Esto podría indicar la generación de valores atípicos del método empleado por la NOAA para la generación de las estimaciones de los mapas de TEC. Sin embargo, se aprecia que en latitudes más bajas, las curvas del comportamiento del TEC tienden a empatarse, particularmente las del TEC medido y el TEC reportado por IGS. Las diferencias entre los valores emitidos por la NOAA y el IGS se atribuyen a las técnicas de mapeo que emplea cada agencia para generar los mapas de TEC. La NOAA utiliza la técnica de mapeo basada en funciones empíricas ortonormales (EOF de las siglas en inglés) implementada en un filtro de Kalman. Los archivos IONEX generados por el IGS indican el uso de la técnica de mapeo expresada en (3) para la generación de los mapas de TEC, lo cual podría explicar la similitud respecto a

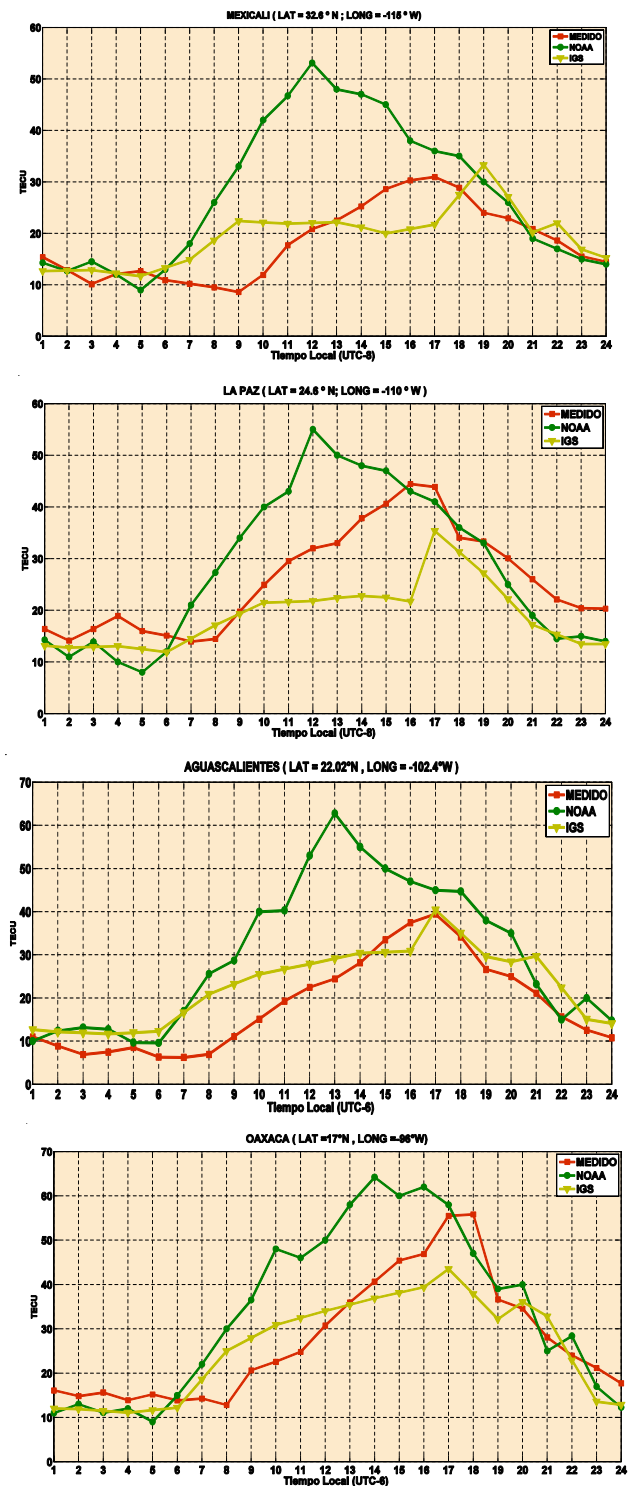


Fig. 2. Registro del comportamiento del TEC para el mes de marzo (21/03/2013).

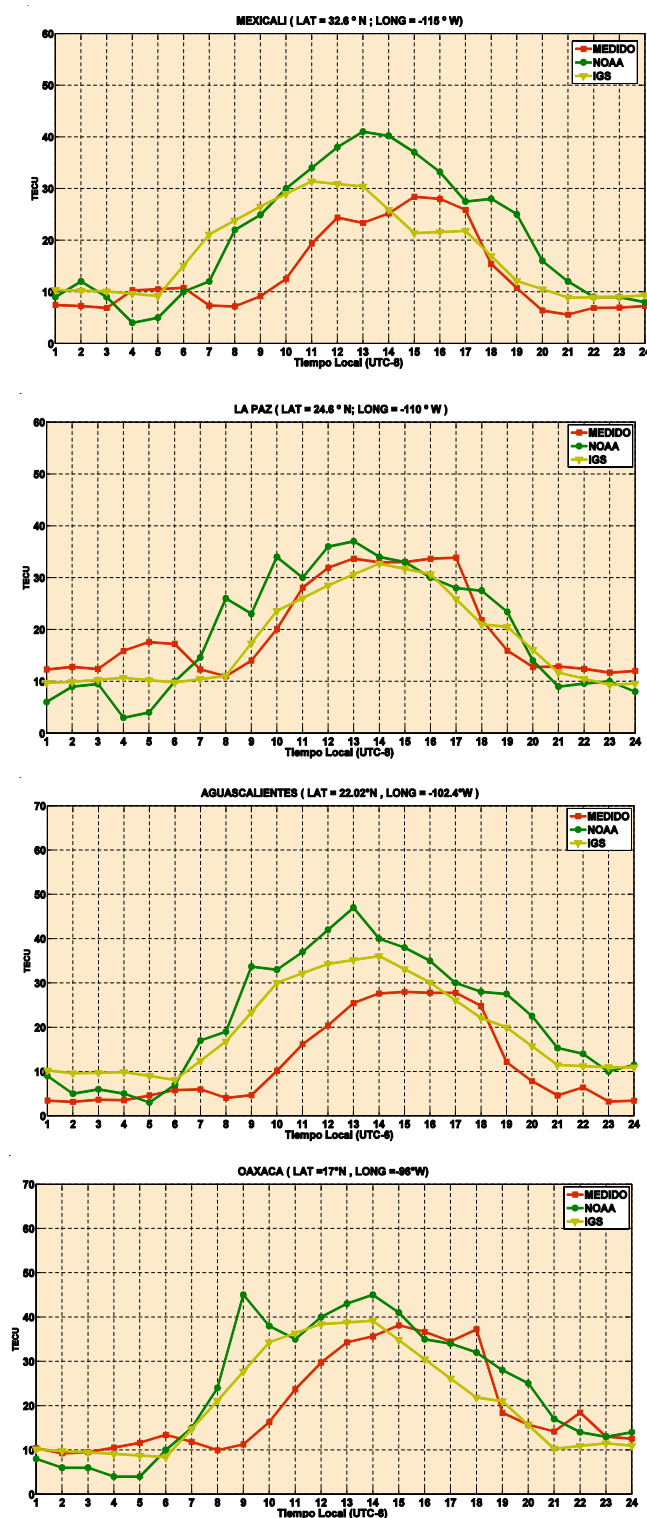


Fig. 3. Registro del comportamiento del TEC para el mes de diciembre (21/12/2013).

nuestras mediciones. El sistema que tiene implementado la NOAA para la estimación del TEC utiliza como fuente de datos de entrada la producida por receptores GNSS y de otras fuentes de datos que no son accesibles a los usuarios (Spencer 2009). La incorporación de otras fuentes de información podría resultar en estimaciones del TEC con alto grado de precisión, lo cual sería importante considerar para el desarrollo de un sistema de monitoreo ionosférico para el territorio mexicano. Por este motivo, resulta conveniente considerar como una referencia confiable la información del TEC emitida por la NOAA para buscar realizar un ajuste al modelo que sería utilizado para la generación de los mapas de TEC por el sistema de monitoreo a desarrollar.

La tabla 2 presenta los resultados del *error cuadrático medio* (ECM) y la *desviación estándar de dicho error* entre el TEC reportado por las agencias NOAA e IGS respecto a las mediciones del TEC en cada estación. Con el error cuadrático medio es posible identificar que tan próximos son los valores medidos del TEC respecto a los valores de TEC reportados por cada agencia. El error medio del TEC es mayor para los valores generados por la NOAA respecto al error medio del TEC para los valores reportados por IGS.

La desviación estándar indica que tan dispersos están los valores medidos respecto a los valores reportados por cada agencia, siendo evidente que la menor dispersión la presenta el IGS, y mayor dispersión se presentó para el TEC reportado por la NOAA. Estos resultados confirman que las mediciones de TEC muestran una mayor cercanía con los valores reportados por el IGS. Asumimos que este resultado se debe a que en este trabajo se hace uso de la técnica de mapeo definida en (3), que es la misma que usa IGS.

2.2. Comparación del TEC medido respecto a los ionosféricos teóricos

Los trabajos para ajustar regionalmente los mapas de TEC parten de modelos ionosféricos desarrollados por la comunidad internacional. El modelo IRI es una referencia aceptada generalmente para validar perfiles ionosféricos dentro del intervalo comprendido de los 60 hasta los 1500 km de altura sobre la superficie terrestre [21]. El modelo de Klobuchar es el modelo que emplean los receptores monofrecuencia GNSS, y corrigen aproximadamente el 50% del error atribuido a la ionosfera [12]. En este apartado se muestra un estudio comparativo entre el TEC medido por el receptor OAXACA y el TEC calculado a través de los modelos Klobuchar e IRI2007. Para realizar esta comparación, se evaluó el TEC registrado para el día 22 de junio (Solsticio de Verano), para los años 2013, 2014 y 2015.

Tabla 2. Error cuadrático medio y desviación estándar del TEC medido respecto al TEC reportado por la NOAA y el IGS.

Estaciones con receptores GNSS	Error Cuadrático Medio del TEC en marzo (TECU) μ		Desviación Estándar del TEC en marzo (TECU) σ		Error Cuadrático Medio del TEC en diciembre (TECU) μ		Desviación Estándar del TEC en diciembre (TECU) σ	
	NOAA	IGS	NOAA	IGS	NOAA	IGS	NOAA	IGS
MEXICALI	3.0376	1.1968	14.8810	5.8633	2.0586	1.5994	10.0850	7.8353
LA PAZ	1.9434	1.8958	9.5205	9.2877	1.4323	0.7595	7.0169	3.7206
AGUASCALIENTES	3.1895	1.3814	15.6251	6.7672	2.6916	1.7178	13.1886	8.4153
OAXACA	2.5831	1.2840	12.6548	6.2901	2.1256	1.1277	10.4131	5.5244

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran las curvas de TEC registradas para la ubicación del receptor OAXACA para las fechas señaladas con anterioridad.

En las gráficas se pueden apreciar las diferencias entre el TEC obtenido mediante modelos teóricos (IRI 2007 y modelo Klobuchar), y el TEC medido por el receptor OAXACA y lo reportado por la NOAA. En la figura 4 se puede apreciar que el TEC obtenido de las mediciones presenta un comportamiento similar en las primeras horas del día, y las diferencias en magnitud se incrementan cuando comienza la actividad solar (entre 6 y 7 am). El TEC obtenido mediante el modelo Klobuchar sigue el comportamiento del TEC medido a lo largo del día, marcando diferencias en magnitud mínimas (ECM de 2.5 TECU) respecto a lo reportado por la NOAA. Respecto al TEC medido por el receptor y el calculado por el modelo Klobuchar la diferencia es mayor (ECM 3.8 TECU). Es evidente que el modelo IRI estima niveles inferiores de TEC respecto a las demás referencias y repitiéndose esta situación para las Figuras 5 y 6.

La Figura 5 muestra el comportamiento del TEC similar de las cuatro referencias respecto a las primeras horas del día. Posterior a las 7 am, las curvas del TEC medido son muy parecidas, al igual que la curva del TEC calculado por el modelo Klobuchar, excepto para el intervalo de las 14 a 18 horas. El desfase entre las curvas del TEC medido, NOAA y Klobuchar es menor.

Respecto a las curvas mostradas en la Figura 6 se aprecia un comportamiento irregular entre el TEC medido, el reportado por la NOAA y el calculado por el modelo Klobuchar. Se presentan desfases muy marcados entre las tres curvas debido a una tormenta geomagnética provocada por la alta actividad solar, con un índice geomagnético $Kp=8$ [25], registrada durante el día 22 de junio de 2015.

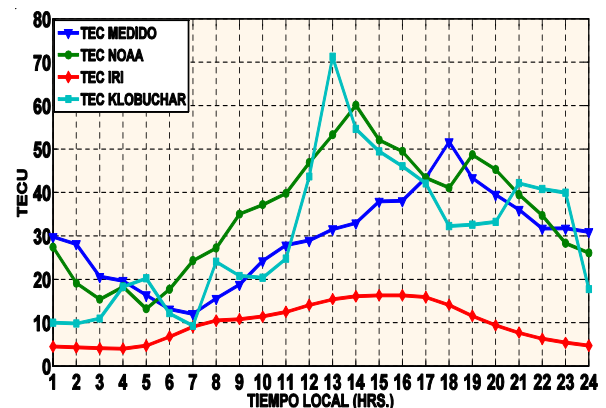


Fig. 4. Registro del comportamiento del TEC para el mes de diciembre (21/12/2013).

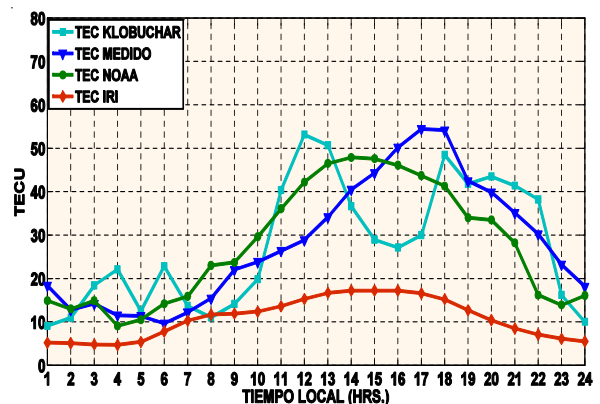


Fig. 5. Curvas de TEC registrados a partir de la ubicación del receptor GNSS OAXACA para el día 22 de junio de 2014.

Los resultados de las gráficas muestran la necesidad de ajustar el modelo de predicción ionosférico IRI para las condiciones que se presentan en nuestro país respecto al TEC.

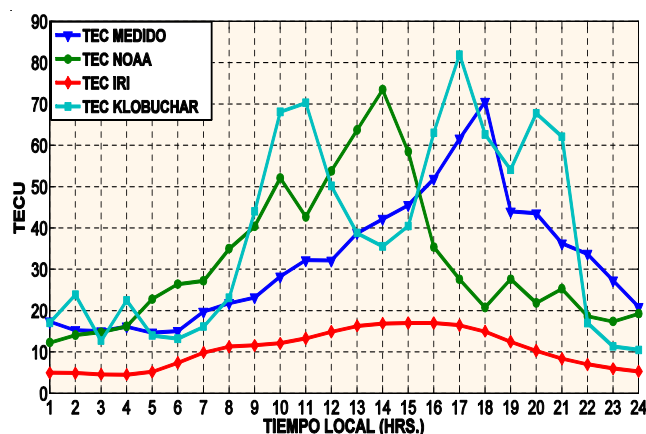


Fig. 6. Curvas de TEC registradas a partir de la ubicación del receptor GNSS OAXACA para el día 22 de junio de 2015.

El modelo de Klobuchar funciona adecuadamente la mayor parte del tiempo, pero cuando se presentan eventos extraordinarios como las tormentas geomagnéticas, se presenta diferencias importantes que podrían impactar de manera negativa en aplicaciones GNSS.

Esta comparación respecto a los principales modelos ionosféricos resulta de gran importancia, para desarrollar un sistema de monitoreo ionosférico nacional que reporte la condición de esta región de la atmósfera y evalúe su impacto en los sistemas de telecomunicaciones y navegación basada en satélite. Para evidenciar el impacto que tiene la ionosfera sobre el servicio de posicionamiento GNSS, se analizó la incorporación las correcciones ionosféricas al cálculo de posicionamiento del receptor OAXACA. La Figura 7 muestra diferentes casos en cómo afecta la aplicación de las correcciones del retardo ionosférico al cálculo de la posición. Se utilizaron datos registrados para el día 22 de junio del 2015 (día de alta actividad solar señalado anteriormente).

La Figura 7 a) muestra que al no utilizar algún método de corrección del retardo ionosférico, la componente de altitud resulta gravemente afectada. Errores en la componente de altitud mayores a 4 metros no son permitidos en operaciones de aproximación vertical basadas en GNSS dentro de la navegación aérea [26].

La aplicación del modelo de Klobuchar en el cálculo de posicionamiento para la corrección del retardo ionosférico se muestra en la Figura 7 b). De las gráficas se aprecia el impacto que tiene la aplicación de la corrección del retardo ionosférico para la componente de altitud. Se aprecia que los niveles de error sobre

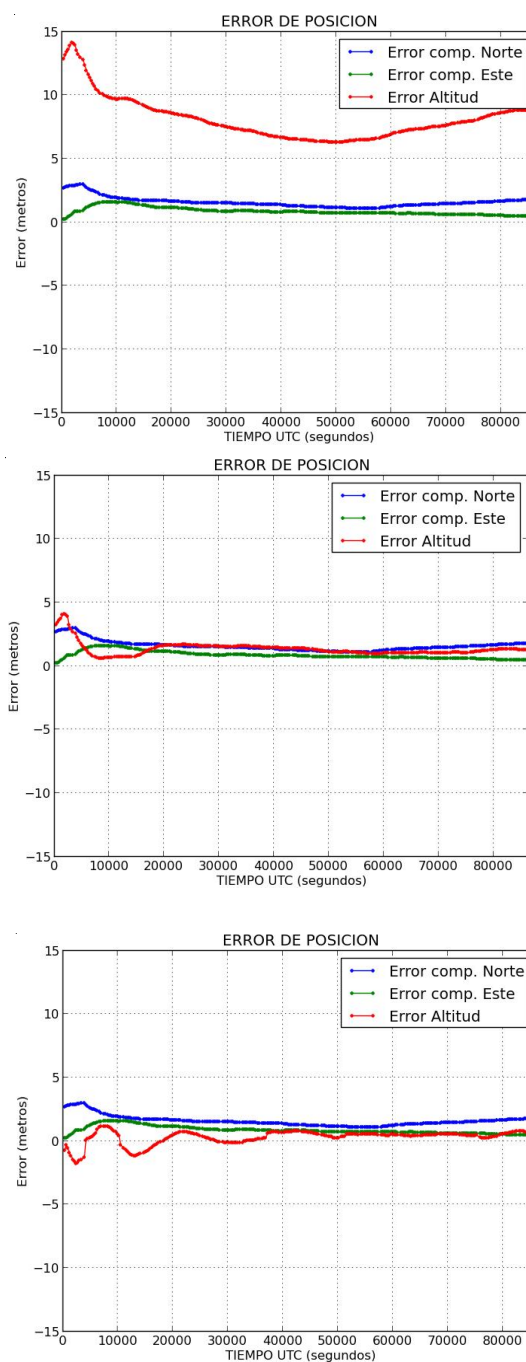


Fig. 7. Cálculo de la posición geográfica del receptor GNSS OAXACA bajo diferentes situaciones; a) Sin la aplicación de las correcciones del retardo ionosférico, b) aplicando el modelo de Klobuchar para las correcciones del retardo ionosférico, c) aplicando técnicas de doble frecuencia y mapas de TEC (IONEX) para corregir el retardo ionosférico.

la componente de altitud no superan los 5 metros de error, manteniéndose el error por encima del valor de 1 metro de error.

Para el último caso presentado en la Figura 7 c), se observa que la incorporación de mapas de TEC (IONEX) producto del monitoreo en tiempo real, y adicionalmente aplicando la técnica de corrección de doble frecuencia, se obtienen altos grados de precisión en la componente vertical (del orden de centímetros).

Con este experimento se demuestra la relevancia que tiene la corrección del retardo ionosférico, así como la generación de técnicas de corrección. Las aplicaciones GNSS basadas en receptores monofrecuencia presentan deficiencias en la corrección del retardo, y como se mencionó en el documento dependen de modelos ionosféricos. Por esta razón resulta relevante el ajuste de modelos de manera regional para su uso en las aplicaciones que utilicen este tipo de receptores.

3. Conclusiones

Este trabajo presenta los resultados de un estudio del TEC medido a través de receptores GNSS sobre el territorio mexicano. Las mediciones de TEC fueron comparadas con reportes emitidos por agencias especializadas en clima espacial, particularmente el caso de la NOAA realizando esta tarea de forma regional, y el IGS lo hace de manera global. Respecto a la comparación con el modelo ionosférico IRI, se demostró que este no reporta valores de TEC cercanos a aquellos que se están midiendo directamente, lo cual indica una necesidad de ajustarlo para poder aplicarlo en un sistema de monitoreo ionosférico para la región de México. El retardo ionosférico calculado por el modelo Klobuchar a partir de los datos registrados por la estación OAXACA, se ajustan a lo reportado por la NOAA y lo registrados por las mediciones. Sin embargo, cuando ocurren eventos extraordinarios como las tormentas solares, los valores reportados por este modelo no son confiables.

Existe una relativa cercanía de México al ecuador geomagnético, es decir que se encuentra en una región de alta concentración de electrones y alta actividad ionosférica. Varios textos señalan que esta región de alta concentración electrónica está delimitada entre las latitudes $\pm 15^\circ$ respecto al ecuador geomagnético. Sin embargo, México se encuentra al borde de esta región, lo cual representa una complejidad para un modelado o el ajuste de un modelo validado. Por esta razón los resultados presentados en este trabajo son muy importantes, debido a que pueden servir como evidencia para un análisis detallado de la región de México, a través de la integración de redes densamente compuestas de receptores GNSS, ionosondas, magnetómetros y demás dispositivos que permitan obtener datos importantes para estudiar la ionosfera. Estos datos adicionales podrían ser-

vir como base para ajustar los modelos ionosféricos que emplean las aplicaciones basadas en GNSS y de esta manera mejorar su desempeño, particularmente las que requieren altos grados de precisión.

La importancia de este estudio obedece a los trabajos realizados a nivel global relativo a mejoramiento de las predicciones en clima espacial principalmente para las aplicaciones GNSS. En la región de Centro y Sudamérica se lleva tiempo realizando trabajos para el desarrollo de un sistema de aumentación GNSS, en donde el estudio de la ionosfera resulta fundamental, por lo que este trabajo también aporta información importante.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo del Instituto Politécnico Nacional. También se extiende el agradecimiento a las agencias NOAA e IGS por colocar a disposición los datos empleados para realizar este trabajo. Se agradece al grupo de investigación de Astronomía y Geomántica (gAGE) de la Universidad Politécnica de Catalunya por el desarrollo de la herramienta informática gLAB. Finalmente, se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Referencias

- [1] Jakowski, N. & Hoque, M.M., 2012. Ionospheric range error correction models. *2012 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2012*.
- [2] Jakowski, N., Hoque, M.M. & Mayer, C., 2011. A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors. *Journal of Geodesy*, 85, pp.965-974.
- [3] Hernández-Pajares, M. et al., 2009. The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, 83, pp.263-275.
- [4] Okoh, D. et al., 2013. Using GPS-TEC data to calibrate VTEC computed with the IRI model over Nigeria. *Advances in Space Research*.
- [5] Maltseva, O., Nikitenko, T. & Zhabankov, G., Global TEC maps and the best version of the empirical N (h) - model 2. *Experimental data and determined values 3. Results for the mid latitude stations*, 2011(July 2011), pp.11-14.
- [6] Quintana, M.R. et al., 2011. *Diseño de un mapa ionosférico como soporte al desarrollo de GBAS, precisión de aproximación categoría I en Colombia*. Design of an ionospheric map as a support for development and implementation of GBAS , precision approach category I , pp.15-28.

- [7] Tsugawa, T. *et al.*, 2007. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. *Geophysical Research Letters*, 34(August), pp.1-5.
- [8] Gleason, S. & Gebre-Egziabher, D., 2004. *GNSS application and methods A*. House, ed., Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>.
- [9] Shanmugam, S. *et al.*, 2012. Evolution to modernized GNSS ionospheric scintillation and TEC monitoring. In *Record - IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium*.
- [10] Groves, P., 2008. *Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems*, Available at: <http://discovery.ucl.ac.uk/1308010/>.
- [11] Mannucci, A. J. *et al.*, 1998. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*, 33(3), p.565.
- [12] Dyrud, L. *et al.*, 2007. IM GPS, pp.1-19.
- [13] Klobuchar, J., 1987. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-23(3), pp.325-331.
- [14] Todorova, S. *et al.*, 2003. Regional Ionosphere Modelling With Gps and Comparison With Other Techniques. *Proceedings of the Symposium "Modern Technologies, Education and Professional Practice in the Globalizing World."*
- [15] Arbesser-Rastburg, B., 2000. 1.6 *The Challenge of the Ionosphere for EGNOS Ionospheric Propagation Effects on GNSS Signals*.
- [16] Bilitza, D. *International Reference Ionosphere 2000*.
- [17] Radicella, S. M. Nava, B. & Coisson, P., 2008. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, pp.1856-1862.
- [18] J. Sanz Subirana, J.M.J.Z. & M.H.-P., 2013. *GNSS Data Processing Volumen I: Fundamentals and Algorithms*, ESA, the Netherlands.
- [19] Coisson, P. *et al.*, 2006. Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations. *Advances in Space Research*, 37, pp.937-942.
- [20] Yasyukevich, Y. V. *et al.*, 2010. Cross testing of ionosphere models IRI-2001 and IRI-2007, data from satellite altimeters (Topex/Poseidon and Jason-1) and global ionosphere maps. *Advances in Space Research*, 46(8), pp.990-1007. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.010>.
- [21] Gurtner, W. & Estey, L., 2007. *RINEX The Receiver Independent Exchange Format*, (June).
- [22] Cornely, P., 2013. *Receiver Biases in Global Positioning Satellite Ranging*, 85(1).
- [23] Stefan Schaer, Werner Gurtner *"IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1"* February 1998.
- [24] Klobuchar, J. A., 1996. Ionospheric effects on GPS. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 163, pp.485-515.
- [25] W. D. Gonzalez, A. Joselyn, y. Kamide, H. W. Kr What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, núm. A4, pp. 5771-5792, abril, 1994.
- [26] OACI Doc. 9849 AN/457. *Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual*, 2005.

DOAJ

Directory of Open Access Journals

20% of peer-reviewed articles are now freely available

<http://www.doaj.org>