

INFLUENCIA DE LOS TECS EN LA PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL GPS

JUAN CARLOS RECALDE MARTINEZ .

CARRERA DE INGENIERIA GEOGRAFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE.
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCION.
ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO.
Avenida El Progreso, S/N. Sangolquí-Ecuador.
jc_recaldeg@yahoo.com

ALFONSO RODRIGO TIERRA CRIOLLO

CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS. ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO.
Avenida El Progreso, S/N. Sangolquí-Ecuador.
atierra@espe.edu.ec

NIKOLAI ESPINOSA ORTIZ

CENTRO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS DEL EJÉRCITO.
Avenida El Progreso, S/N. Sangolquí-Ecuador.
nespinosa@espe-online.net

RESUMEN

La mayor fuente de error en GPS después de mayo del 2000, fecha en la cual fue desactivado el S/A (Disponibilidad Selectiva), es el error ionosférico. Este error es directamente proporcional al Contenido Total de Electrones-CTE presente en la ionosfera, este CTE va a depender principalmente de la actividad solar, la posición geográfica, del ángulo de incidencia de la señal GPS. Para el cálculo de los CTE se tomó datos de un equipo de doble frecuencia ubicado en la ciudad de Riobamba, en la estación de monitoreo continuo IGS llamada RIOP, facilitados por el Instituto Geográfico Militar y registrados cuando la actividad solar estaba en su ciclo máximo entre los años 1998 al 2001. Posteriormente, fue calculado el Retraso Ionosférico. Los resultados muestran que el Retraso Ionosférico (I) tiene su mayor influencia desde las 3 a 7 horas y la menor influencia desde las 12 a 16 horas

1. INTRODUCCION.

Las principales fuentes de errores sistemáticos que afectan al posicionamiento con GPS (Global Positioning System) están asociadas al satélite (órbita, reloj, relatividad, etc.) , la propagación, de la señal refracción troposférica e ionosférica, interrupción de señal, multicamino, el receptor/antena (reloj, canales, centro de fase de antena) y la estación (coordenadas , mares terrestres y oceánicos , movimiento de polo, etc.) (Mónico, 1995). Parte de esos errores pueden ser modelados o reducidos, si técnicas adecuadas de rastreo y procesamiento fueran adoptadas.

Los receptores GPS de doble frecuencia permiten efectuar correcciones al efecto de refracción ionosférica, debido a que el efecto de refracción es dependiente de la frecuencia de la señal (Camargo,1999).Esta estrategia permite obtener resultados que son prácticamente exentos de esos efectos.

Los mensajes de navegación transmitidas por los satélites del sistema GPS traen informaciones que permiten efectuar correcciones de ionosfera para receptores GPS de

una frecuencia, utilizando el modelo global de Klobuchar (Klobuchar, 1987). Este modelo puede corregir el 50% del efecto total (Newby e Langley, 1992).

Cuando se dispone de equipos GPS de doble frecuencia existe la posibilidad de poder minimizar los errores causado por la ionosfera mediante técnicas de procesamiento o técnicas de rastreo,, pero en nuestro país la mayoría de usuarios disponen de equipos de una sola frecuencia para realizar sus respectivos trabajos. Cuando se trabaja con una sola frecuencia se recomienda que se rastree a una distancia máxima de 10 km entre la base y el móvil para poder minimizar los errores causados por la ionosfera, pero esto ni siempre se cumple debido al efecto conocido como cintilación ionosférica que inclusive puede llegar a dar errores de hasta 30ppm (Seeber, 1993).

Una de las principales técnicas para estimar el efecto sistemático debido a la ionosfera esta basada en datos obtenidos con receptores GPS de doble frecuencia , proporcionando estimativas mas exactas del contenido total de electrones y consecuentemente estimando de mejor manera del error sistemático causados en el cálculo de las falsas distancias..

Se puede citar que utilizando una estación GPS se estima el contenido total de electrones (CTE). (Sardon et al. 1994). La red GPS de IGS (International Gps Service) ofrece la oportunidad, para extraer la información sobre la ionosfera, por lo cual se utiliza los datos de la estación RIOP (ubicada en Riobamba, Ecuador), para calcular el Contenido Vertical Total de Electrones (CVTE) y posteriormente el Retraso Ionosférico (I) sobre la portadora L1.

2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1 ATMOSFERA

La atmósfera puede ser considerada, para la mayoría de propósitos prácticos, como un conjunto de capas de gases, esférica y concéntrica a la tierra. La estructura de la atmósfera terrestre esta relacionada con diversos parámetros (térmicos, químicos, electromagnéticos), cuyos valores generalmente combinados pueden variar sensiblemente en función de la hora, de la época del año, de la latitud, de la longitud y de la actividad solar.

Normalmente es conveniente dividir a la atmósfera, con respecto a la propagación de señales, en troposfera e ionosfera, porque las condiciones particulares de propagación son diferentes. Las capas mas bajas de la atmósfera terrestre comprendida entre la superficie tiene aproximadamente, 50 Km., reciben el nombre de troposfera y constituyen una zona neutra de la atmósfera y la propagación de señal depende principalmente del contenido de vapor de agua, de la presión o de la temperatura de la capa atmosférica. En este caso la refracción es independiente de la frecuencia de la señal transmitida, a través de ella, cuando sea menor de 30 GHz (Leick, 1995).

La parte superior esta aproximadamente entre 50 Km. y 1000 Km., recibe el nombre de ionosfera y esta formada por partículas libres cargadas o sea, por partículas ionizadas. En esta capa, la propagación de la señal depende de la frecuencia.

Durante el día diversas capas o regiones ionosféricas son reconocidas, se admite que la ionosfera esta formada por tres regiones, la secuencia va en aumento de la altitud y la concentración de iones llamadas D, E, y F, cuyas divisiones no son tan distintas. La densidad de electrones es mayor cuando esta cerca al medio día, el comportamiento es casi simétrico a lo largo del día, estas variaciones de la densidad de electrones ocurren próximas a las altitudes de 90–120 Km.

Las diversas regiones de la ionosfera son descritas por sus propiedades, tales como la concentración de electrones, alturas, etc. Cada región tiene su propia frecuencia critica , que representa la frecuencia máxima , con incidencia vertical , que puede ser reflejada por la región , ignorando el efecto del campo magnético de la tierra (Webster,1993) . Las

señales de frecuencia muy altas (VHF) son capaces de atravesar todas las capas de la ionosfera. Lo opuesto ocurre con las señales de frecuencia baja (LF), media (MF) y alta (HF). Todas las capas varían de altitud y de densidad, según las explosiones o manchas solares diarias, anuales o periódicos (aproximadamente cada 11 años); tomando en cuenta que esas variaciones no ocurren siempre en el mismo sentido para las diferentes capas (Picquenard, 1974).

La ionosfera es un medio dispersivo. Por tanto el índice de refractividad depende de la frecuencia de la señal que la atraviesa. Los responsables para la variación son los electrones de la ionosfera.

2.2 IMPACTO DE LA IONOSFERA EN LAS SEÑALES GPS

Las señales GPS, son el camino entre el satélite y la antena de la estación de rastreo, se propagan a través de la atmósfera, atravesando capas de diferentes naturalezas y estados variables. A esto se debe que sufren varios tipos de influencias, que pueden provocar variaciones en la dirección de propagación, velocidad de propagación, en la polarización y en la potencia de señal (Seeber, 1993).

Este medio de propagación comprende la troposfera y la ionosfera, con características bien diferentes. La troposfera se comporta como un medio no dispersivo o sea la refracción es independiente de la frecuencia de la señal transmitida. La ionosfera, como un medio dispersivo afecta a la modulación y a la fase de la portadora, haciendo que sufra respectivamente un retardo de avance (Leick, 1995). El retardo referido también se lo conoce como atraso ionosférico.

El índice de refracción es proporcional a los CTE, o sea el número de electrones presentes a lo largo del camino del satélite al receptor. El problema principal es que los CTE varían dependiendo del tiempo y espacio y esta en función de la ionización solar, actividad magnética, ciclo de manchas solares, estación del año, localización del usuario y dirección del rayo vector del satélite (Leick, 1995).

La variación del índice de refracción de su valor unitario de las diferentes capas de la ionosfera, hace con que a la velocidad de la fase portadora (V_f) sufra un retardo, donde λ representa la longitud de la onda y f su frecuencia y es dada por (Hofmann-Wellenhof, 1993):

$$V_f = \lambda f \quad (1)$$

En la distancia (S) entre el satélite (s) y el receptor (r) se desprecian los otros errores sistemáticos, y esta dada por:

$$S = \int_s^r n ds, \quad (2)$$

donde n , representa de forma genérica el índice de refracción de fase o de grupo.

La diferencia entre la distancia (S) y la distancia geométrica (ρ) entre el satélite y el receptor en la capa de refracción ionosférica (I_r^S) representa un error sistemático, que en el caso de la fase portadora (I_{fr}^S).

$$I_{fr}^s = \int_s^r \frac{40,3 n_e}{f^2} ds - \rho \quad (3)$$

o

$$I_{fr}^s = - \frac{40,3 n_e}{f^2} \int_s^r n_e ds \quad (4)$$

Donde la parte variable caracteriza la densidad de electrones a lo largo del camino y representa el contenido total de electrones (CTE), o sea:

$$CTE = \int_s^r n_e ds \quad (5)$$

así:

$$I_{fr}^s = - \frac{40,3}{f^2} CTE \quad (6)$$

De forma similar, se obtiene la refracción ionosférica para las señales moduladas por código

$$I_{gr}^s = \frac{40,3}{f^2} CTE \quad (7)$$

En las expresiones (6) y (7) los CTE esta dado a lo largo de la dirección del satélite y receptor, y la unidad que se utiliza para representar esta dada en electrones por metro cuadrado (el/m²).

El valor de (z'), representa el ángulo zenital del camino de la señal, en relación a un plano de altitud media (h_m), y es obtenido de la siguiente expresión (Hofmann-Wellenhof, 1993):

$$\text{Sen}(z') = \frac{r_m}{r_m + h_m} \text{sen}(z) \quad (8)$$

donde r_m es el radio medio de la tierra (6371Km), h_m representa la altura media de la ionosfera que es 350Km (Klobuchar) y (z) es la distancia zenital al satélite.

La corrección del error sistemático debido a la ionosfera una vez calculada representa solo el efecto de primer orden de la ionosfera, el cual puede ser modelado con datos obtenidos con receptores GPS de doble frecuencia; el error remanente representa unos pocos centímetros (Seeber,1993).

A lo largo del día, los CTE para una localización, depende de la hora local; y la densidad máxima es alcanzada entre las 12:00 y 16:00 horas locales (Webster, 1993). En el caso de la estación en Riobamba, los valores más altos del contenido vertical de electrones alcanzan entre las 13:00 a 15:00 horas en tiempo local (Recalde, et. al, 2006).

3. RESULTADOS.

El cálculo del Retraso Ionosferico Vertical (I), esta en función del Contenido Total de Electrones, y cuyas siglas en inglés son TEC, se lo realizó utilizando los archivos RINEX de dos semanas escogidas, una en el mes de abril y la otra en el mes de agosto por cada año desde 1998 hasta el 2001, fecha en la cual el ciclo solar # 23 estaba en su punto máximo de actividad.

Dentro de los archivos RINEX se identifica las pseudodistancias, ya que estas son parte básica para realizar los cálculos del estudio y son las afectadas por el Retraso Ionosferico. Después de calcular los CTE (Contenido Total de Electrones), se calcula los CVTE (Contenido Vertical Total de Electrones), para lo cual se utiliza la fórmula siguiente:

$$CVTE = CTE * \cos(z') \quad (9)$$

El retraso ionosferico(I), mas bajo en el periodo de estudio (1998 – 2001) es en marzo del 1999 con un valor de 0.04 m; y la mas alta es en febrero del 2000 con un valor de 17.64m. El Retraso Ionosferico en los cálculos se presentan con signo negativo, motivo por el cual la corrección se la hace con signo positivo.

Para calcular z' se utiliza la expresión (8).

En la Tabla 2, se observa una muestra del retraso ionosferico de cuatro días diferentes del año de 1998

En la Tabla 3, se observa una muestra del retraso ionosferico de cuatro días diferentes del año de 2001

Tabla 2: Cuadro comparativo de los resultados obtenidos de 1998

	Domingo 19	Lunes 20	Martes 21	Miercoles22
TIEMPO (h)	I (m)	I (m)	I (m)	I (m)
0	-10,670	-10,184	-10,112	-8,995
2	-8,750	-9,074	-7,402	-5,911
4	-6,182	-6,234	-5,293	-6,469
6	-6,999	-3,356	-2,608	-3,753
8	-2,955	-1,273	-1,845	-2,974
10	-0,184	-2,655	-1,065	-1,045
12	-2,267	-8,028	-3,495	-2,411
14	-6,611	-8,874	-5,925	-7,309
16	-10,445	-12,653	-10,179	-9,852
18	-13,202	-11,651	-11,976	-11,167
20	-14,568	-11,742	-13,698	-12,563
		SIN		
22	-12,579	DATOS	-12,630	-11,781

Tabla 3: Cuadro comparativo de los resultados obtenidos 2001

TIEMPO (h)	Domingo15	Lunes 16	Martes 17	Miércoles 18
0	-12,760	I (m)	I (m)	I (m)
2	-15,272	-14,452	-12,687	-12,523
4	-14,329	-13,396	-6,880	-5,329
6	-5,724	-13,368	-14,139	-13,030
8	-3,107	-9,514	-3,649	-10,970
10	-0,256	-4,041	-3,897	-9,062
		SIN		
12	-5,774	DATOS	-2,338	-5,956
14	-13,396	-2,547	-3,280	-11,489
16	-15,473	-10,430	-11,016	-15,298
18	SIN DATOS	-13,173	-14,196	-14,324
		SIN	SIN	
20	SIN DATOS	DATOS	DATOS	-16,499

22	-15,736	SIN DATOS	SIN DATOS	-17,264
----	---------	--------------	--------------	---------

En la figura 1, se muestra gráficamente el comportamiento del Retraso Ionosferico(I) a lo largo de las 24 horas, de los días 19 al 22 de abril de 1998 y en la figura2 se muestra gráficamente el I en las 24 horas del 15 al 18 de abril del 2001. Se puede observar que el comportamiento en cualquier día tiene la misma tendencia. Los menores valores calculados comienzan a partir aproximadamente de las 10 horas UTC (5 horas local), a partir del cual comienzan a aumentar, hasta alcanzar los máximos valores, aproximadamente alrededor de las 20 horas UTC (15 horas local)

Observando la figura 1 y 2, se aprecia que entre las 8:00 y 12:00 horas en tiempo UTC o de 3:00 y 7:00 horas en tiempo local se tiene los valores más bajos de los I y en cambio entre las 18:00 y 20:00 horas en tiempo UTC y las 13:00 y las 15:00 horas en tiempo local es en cambio donde se tiene los valores más altos de los I; y con estos resultados se puede confirmar que en este intervalo de tiempo la actividad solar es mayor y por ende afecta en mayor cantidad a las señales GPS.

Figura 1: Retraso Ionosferico de abril de 1998

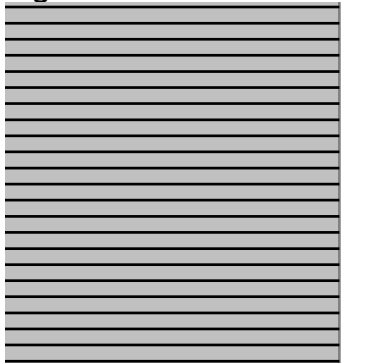
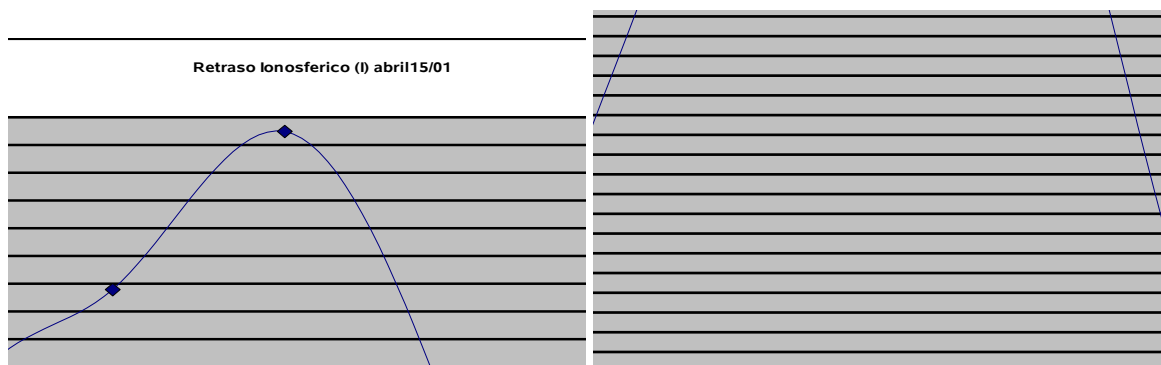


Figura 2: Retraso Ionosferico de abril de 2001



4. CONCLUSIONES.

- El error obtenido en la falsa-distancia puede llegar a 18 m aproximadamente, en el sitio de la estación de Riobamba.

- A las 05 horas local del Ecuador, el Retraso Ionosferico (I) es mínimo, y comienza a aumentar hasta las 15 horas local en la cual llega a su valor máximo, y posteriormente va disminuyendo.
- Los primeros resultados indicaría que es preferible no realizar rastreos GPS entre las 12.00 -16:00 horas locales especialmente cuando se utiliza equipos GPS.
- Estos resultados se obtuvo en épocas donde la actividad solar esta en su actividad máxima, por lo que en actividades de ciclo solar bajo los resultados deberán cambiar, por lo que se recomienda que se hagan estudios en el ciclo solar bajo.

REFERENCIAS

- Camargo,P., **Modelo regional de la Ionosfera para uso en Posicionamiento con Receptores GPS de una Frecuencia**, Tesis de Doctorado,p. 104-112, 1999.
- Gemaël, C., **Introducción al Ajustamiento de Observaciones**, p. 115-121,1994
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.. **Global Positioning System Theory and Practice**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1993.
- Klobuchar, J. Global Positioning System. Theory and Applications, Volumen 1, p. 504-506, 1995.
- Klobuchar, J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v.AES-23, n.3, p.325-331, May 1987.
- Leick, A. **GPS Satellite Surveying**. 2.ed. New York : John Wiley & Sons, 1995.
- Monico, G. **Posicionamiento por NAVSTAR S**, Descripción, Fundamentos y Aplicaciones, p. 99-107,Septiembre, 2000.
- Newby, S; Langley, R. Three alternative empirical ionospheric models – are they better than GPS broadcast model?, In : **Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning**, Columbus, OH, USA, Mar. 16-2, v.1, p.240-244, 1992.
- Recalde, J; Tierra, A; Espinosa, N. Determinación del Contenido Vertical Total de Electrones para Uso en Posicionamiento con Receptores de una Frecuencia. **Revista Geoespacial**. N°3, p. 24-32, 2006
- Seeber, Gunter. **Satellite Goedsy : Foundations, Methods and Applications**. Berlin-New York : Walter de Gruyter, 1993.
- Webster, I. **A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System**. New Brunswick, 1993. M.Sc.E Thesis - Departament of Surveying Engineering, University of New Brunswick.
- Zhizao, L.; Yang,G. Ionospheric TEC Predictions over a Local Area GPS Refrence Network. **GPS Solutions**, p. 23-28, 2004