

Procesamiento en Entorno Web de datos GNSS Aplicando Metodología de Punto Preciso

PPP

Processing Data GNSS Under Web Environment Using Precise Point Methodology PPP

Miguel Ávila ¹ David Monroy Machado ² Emmanuel Taborda ³ Andres Bernal ⁴

¹ MSc, Facultad de Ingeniería, Docente Area de Geodesia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C,
Colombia maavila@udistrital.edu.co

² Ing. Catsatral y geodesta, Especialista en Ingeniería de Software, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C,
Colombia dmonroy@correo.udistrital.edu.co

³ Estudiante de Ing. Catsatral y geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C,
Colombia etabordac@correo.udistrital.edu.co

⁴ Estudiante de Ing. Catsatral y geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá D.C,
Colombia afbernalp@correo.udistrital.edu.co

May 22, 2017

Resumen

Las bondades de la metodología de procesamiento de punto preciso, indican de manera directa en el análisis e investigación de las observaciones GNSS, el desarrollo de este servicio GPUD (Geo Procesos Universidad Distrital) web sienta sus bases sobre la herramienta Gps-Tk que hace posible una cohesión entre el potencial de la herramienta y los diversos propósitos de los investigadores al otorgar un servicio transparente a todos los sistemas operativos y accesible desde cualquier punto con una conexión a internet de manera transversal su único insumo es un archivo RINEX de observación GNSS y una interfaz amigable a todo tipo de usuario. Realizando consultas a los servicios de datos necesarios para realizar el procesamiento y entregar un resultado altamente fiable. Además de ser un documento de soporte para la aplicación este trabajo compara los resultados con los centros de procesamiento bajo la misma metodología y como patrón de comparación las coordenadas SIRGAS conyugando de esta manera un alto grado de precisión.

Palabras Clave: GNSS; PPP; SIRGAS; Servicio en Línea ; precisión

Abstract

The benefits of precise point processing methodology, index directly in the analysis and research of GNSS observations, the development of this service GPUD (Geo processes Universidad Distrital) web lays its foundations on the Gps-Tk tool that makes possible a cohesion between the potential of the tool and the different purposes of researchers by giving a service transparent to all operating systems and accessible from anywhere with an internet connection transverse so your only input is an observation GNSS RINEX file and friendly to all types of user interface. Performing queries to data services needed to perform processing and delivering a highly reliable result. In addition to being a document of support for the application of this work compared results with processing centers under the same methodology and as a patron of comparison the SIRGAS coordinates conyugando in this way a high degree of precision.

Key Words: GNSS; PPP; SIRGAS; Online-service ; accuracy

1 Introducción

Los motivos que impulsaron los sistemas de posicionamiento global por satélites (GNSS) se han perfeccionado sustancialmente partiendo de largas jornadas de observación astronómica y diversos cálculos para obtener coordenadas geográficas, acompañado de trabajos de triangulación y redes de base larga para lograr un ajuste de coordenadas, de forma paralela los equipos desarrollados en diferentes laboratorios avanzaron con la aparición del transistor y posteriormente con el capacitor permitiendo así romper la barrera terrestre para el posicionamiento. Actualmente se observa la necesidad de hacer eficiente

y eficaz posicionar un punto en la tierra tanto en coordenadas geográficas (ϕ y λ) como geocéntricas (X,Y,Z). Desde la introducción de los sistemas de posicionamiento global (GPS) en 1990 se implementaron las bases metodológicas del procesamiento de pseudo-rangos y medición de fase portadora para observaciones estáticas GNSS, logrando así cálculos de posiciones con precisión de decímetro y centímetro [Zumberge et al., 1997].

El desarrollo e implementación de los sistemas de posicionamiento global, permiten capturar datos de constelaciones como Navstar(Global Positioning System - GPS) de Estados Unidos, GLONASS (constelación rusa, conocida como el Sistema Mundial de Navegación por Satélite), GALILEO recientemente implementada por la Agencia Espacial Europea y BeiDou es la participación de la república popular de china en el ahora mercado de sistemas de posicionamiento global, con un amplio espectro de frecuencias llevando esto un mejor ajuste al momento de procesar además permite obtener coordenadas en cualquier parte del mundo.

Al final de la década de los 90s el Procesamiento de Punto Preciso (PPP) nació como concepto de análisis robusto de GPS [Teunissen, 2012] para la obtención de coordenadas; se procesan las observaciones por fase y código mediante el uso de orbitas precisas de satélites y deltas de tiempo . El potencial sobre la información disponible para el análisis genera necesidades, entendidas como la capacidad de corregir, depurar y aprovechar al máximo los datos obtenidos y determinar con precisión un punto sobre la tierra de esta manera el resultado de procesar los datos bajo la metodología (PPP) expande el horizonte en la determinación de correcciones relacionadas con la dinámica terrestre aplicables a las estaciones permanentes.

Dicha metodología no está presente en el software comercial que acompaña cada marca de receptores GNSS, pero si en el software científico como Bernese GNSS o GAMIT GLOBK el cual permite este tipo de resultados, con ciertas restricciones por precio y uso respectivamente, sin embargo, existen diversos centros de procesamiento en ambiente web como son: IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística en Brasil (<http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>), magicGNSS/PPP (Precise Point Positioning) (<http://magicgnss.gm-v.com/ppp/>) servicio web, Automatic Precise Positioning Service (APPS) del laboratorio de propulsión de la NASA(http://apps.gdgps.net/apps_file_upload.php), Geodetic reference systems “PPP” de Canadá(<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>). Las coordenadas reportadas por estos centros de procesamiento son bajo software científico permitiendo comparar con la metodología PPP aplicada en este trabajo.

Sin embargo, los trabajos realizados en la implementación de la aplicación web para el procesamiento de datos RINEX bajo metodología PPP se le otorgo mayor importancia al desarrollo en materia de investigación por medio de la herramienta web de esta manera dejar a un lado las limitantes del software tradicional. El aplicativo carga, calcula y muestra valores y graficas dispuestas al análisis sobre el rastreo en un punto de interés, permite acercarnos más a conocer en detalle la forma de la tierra y sus movimientos con precisión de milímetros.

2 Metodología

El procesamiento de punto preciso (PPP) destaca como metodología para proporcionar coordenadas con precisión inferior al centímetro, esto debido a factores como el aumento de servicios globales de GNSS, efemérides con un alto grado de precisión y relojes calibrados para medir diferencias de tiempo en nanosegundos; afinando la medición y corrección en tierra de las variables asociadas a los satélites; se proporciona una solución altamente robusta y redundante. Cabe resaltar que estas precisiones son para observaciones estáticas además requiere un tiempo para que sean publicados los insumos utilizados en procesamiento; por ahora los sistemas de procesamiento real PPP están en una fase incipiente de desarrollo. [Service, 2011]

El algoritmo PPP utiliza como entradas las observaciones de fase y código de un receptor de doble frecuencia y las órbitas precisas de los satélites en combinación con los relojes, para el cálculo de coordenadas precisas es decir, se coordina, el reloj de receptor con el reloj abordo del satélite, el retardo cenital troposférico y las ambigüedades de fase [Teunissen, 2012]. Los datos recolectados en el archivo RINEX se procesan junto a las correcciones provenientes de la dinámica terrestre, Las ecuaciones utilizadas por la herramienta GpsTk [Salazar Hernández et al., 2008] en la metodología PPP están descritas a continuación.

$$\ell_P = \rho + c(dt - dT) + T_r + \varepsilon_P \quad (1)$$

$$\ell_\Phi = \rho + c(dt - dT) + T_r + N\lambda + \varepsilon_\Phi \quad (2)$$

donde:

- ℓ_P es la combinación libre de ionosfera de L1 y L2 pseudoranges.
 - ℓ_Φ es la combinación libre de ionosfera de L1 y L2 fase-portadora.
 - dt es la delta entre el reloj del receptor y el tiempo GPS.
 - dT es la delta entre el reloj del satélite y el tiempo GPS.
 - c es la velocidad del vacío de la luz.
 - T_r es el retardo de la señal debido a la atmósfera neutral (principalmente la troposfera).
 - λ es la longitud de onda portadora.
 - N es la ambigüedad de no-entera de la combinación libre de ionosfera fase portadora.
 - $\varepsilon_P, \varepsilon_\Phi$ es la medición de las componentes de ruido, incluyendo 'multipath'.
- El Símbolo ρ es el pseudorange computado en función del satélite (X_s, Y_s, Z_s) y la estación de (x, y, z) coordenadas a partir de la siguiente ecuación

$$\rho = \sqrt{(X_s - x)^2 + (Y_s - y)^2 + (Z_s - z)^2} \quad (3)$$

Se expresa el retardo troposférico (T_r) en función del retraso zenital (ZDP) con la función de mapeo (M), relacionando el retraso troposférico, con el ángulo de elevación del satélite, mientras se elimina el delta de tiempo de los satélites el cual es conocido (dT). El resultado es el siguiente modelo matemático:

$$f_P = \rho + cdt + Mzdp + \varepsilon_P - \ell_P = 0 \quad (4)$$

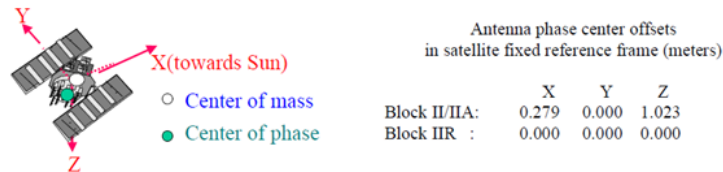
$$f_\Phi = \rho + cdt + mzdP + N\lambda + \varepsilon_\Phi - \ell_\Phi = 0 \quad (5)$$

Utilizando las ecuaciones (4) y (5) se realiza un ajuste y posterior formulación matemática que se puede ver en [Héroux and Kouba, 1995, text]. Esto soluciona el problema general de la incertidumbre sobre las coordenadas del punto en el cual se realizó la observación, a este resultado se le aplican diversas correcciones para tratar de reproducir las variables de entorno que acompañan la observación GNSS y poder extraer su influencia sobre los resultados; estas correcciones son por: offset de la antena del satélite, "Phase Wind-Up", cargas oceánicas y por desplazamiento del polo

2.1 "Offset" de la antena del satélite

Offset antena del satélite Esta corrección se origina en la Existente diferencia entre el centro de masa y centro de fase de la antena a bordo del satélite, es decir que las efemérides del satélite son referidas al centro de masas del satélite y se debe desplazar a el centro de la antena. Estos desfases se presentan en (X_s, Y_s, Z_s) 1

Figure 1: IGS Marco Convencional de centros de fase y antenas (en metros)



Fuente: koruba and helenoux 2001

Como se muestra en la figura 1 cargados los datos de "Offset" se genera un ajuste al punto desde donde se origina la señal garantizando eliminar este efecto distorsionador en la precisión del punto

2.2 "Phase Wind-Up"

Los satélites de la constelación (NAVSTAR) transmiten ondas de radio polarizadas a circular derecha (RCP) por sus siglas en inglés por lo tanto la fase portadora observada depende de la orientación mutua de las antenas del satélite y el receptor. Una rotación de cualquier receptor alrededor de su eje (vertical) cambia la fase portadora a un ciclo de longitud de onda que corresponde a una revolución completa de la antena, ese efecto se llama "phase wind-up"

La corrección de phase se evalua según [Wu et al., 1992] con productos vectoriales internos y producto punto así:

$$\Delta\phi = \text{sign}(\zeta) \cos^{-1}(\vec{D}' \cdot \vec{D} / |\vec{D}'| |\vec{D}|) \quad (6)$$

$$(7)$$

Donde $\zeta = \hat{k} \cdot (\vec{D}' \times \vec{D})$, y \hat{k} es el vector unitario del satélite y \vec{D}', \vec{D} vectores del satélite y del receptor calculado a partir de los vectores de coordenadas unitarias del satélite $(\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}')$ y los vectores unitarios del receptor $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$

$$\vec{D}' = \hat{x}' - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}') - \hat{k} \times \hat{y}' \quad (8)$$

$$\vec{D} = \hat{x} - \hat{k}(\hat{k} \cdot \hat{x}) - \hat{k} \times \hat{y} \quad (9)$$

2.3 Efectos por desplazamientos terrestres

toda observación realizada sobre la superficie terrestre se ve sometida a aparentes movimientos periódicos de la tierra, la suma de estos se expresa en diferenciales de posición en dirección de los tres ejes coordenados que no son incluidos en la solución por fase o código de la observación, por lo tanto, si se desea corregir estos movimientos y obtener una coordenada filtrando los efectos propios de la corteza terrestre como las cargas oceánicas y los desplazamientos del polo, se debe calcular el valor para el momento de la observación, explicado a continuación.

Sea el vector de coordenadas para los deltas del desplazamiento $\Delta\vec{r}^T = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$ [McCarthy, 1989]

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{r^3} \left\{ [3l_2(\hat{R}_j \cdot \hat{r})] \hat{R}_j + [3(\frac{h_2}{2})(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{h_2}{2}] \hat{r} \right\} + [-0.025m \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot (\theta_g + \lambda)] \cdot \hat{r} \quad (10)$$

El desarrollo de la ecuación (10) nos permite calcular el desplazamiento del punto causado por los efectos terrestres, para un mejor manejo de esta corrección se formulan por separados dichos efectos.

2.3.1 Cargas Terrestres

La tierra es lo suficientemente flexible para responder a las mismas fuerzas gravitatorias que generan las mareas en los océanos. Los desplazamientos periódicos verticales y horizontales causados por estas mareas están representados por armónicos esféricos de grado y orden (n, m) caracterizados por los números "love" $h_{n,m}$ y el número "Shida" $L_{N,M}$, números adimensionales utilizados como representación de los fenómenos de deformación producidos por un potencial perturbador; EL número "Love" h describe desplazamientos radiales de la superficie cortical relativa al elipsoide y el "Shida" L describe el desplazamiento tangencial elástico. Los valores dependen de la latitud y frecuencia de las mareas [?] estas correcciones son pertinentes cuando se desea obtener una precisión alrededor de 5mm con un segundo orden de la corrección incluyendo un parámetro de altura (véase e.g. IERS convenciones (IERS, 1996))

2.3.2 Cargas oceánicas

Otro tipo de fuerza influyente en el punto de observación es la carga oceánica que es similar a la carga de tierra, donde la carga oceánica completa las fuerzas gravitatorias; se denominan cargas diurnas y semi diurnas, esta corrección aporta al refinamiento del punto en el orden de 5mm para puntos estáticos, si las épocas de la observación completan 24^h este efecto se ve compensado en su mayoría pero igual se recomienda realizar esta corrección si se desea eliminar este tipo de fuerza que genera cambios en la posición vertical y horizontal [Dragert et al., 2000],

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j + u_j + \Phi_{cj}) \quad (11)$$

donde f_j y u_j dependen de la longitud del nodo lunar (en 1-3 mm precisión $f_j = 1$ y $u_j = 0$); el término \sum_j representan los coeficientes en armónicos (11 en total) de la marea estos son $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m$ y S_{sa} ; los parámetros ω_j y χ_j son la velocidad angular y el argumento astronómico en el tiempo $t = 0h$, correspondiente a la componente j en la Carga oceánica. Los argumentos de χ_j puede ser evaluado fácilmente por una rutina FORTRAN ARG disponible desde el sitio ftp de IERS convenciones: <ftp://maia.usno.navy.mil/conventions/chapter7/a-rg.f>.

2.4 Parametros de rotación terrestre (PRT)

Los parámetros de rotación terrestre X_p, Y_p y UT1-UTC donde (X_p, Y_p) es la posición del polo y los tiempos universales coordinados (UT1-UTC) junto con los datos de precesión, nutación y hora sideral facilitan transformaciones precisas entre marcos de referencia terrestres que se requieren en el análisis global de GPS [McCarthy, 1989]. Las orbitas resultantes en el marco de referencia convencionales (ITRF) implican directamente los parametros de rotación terrestre como productos de orbitas finales igs.sp3, en consecuencia, como se utiliza un marco de referencia inercial se debe generar un ajuste por los PRT a las orbitas finales.

Este efecto puede ser modelado, en correcciones aparentes de los desplazamientos $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ partiendo de las coordenadas (X_p, Y_p, Z_p) de una estación (ITRF). Puede evaluarse diariamente desde las correcciones porvistas por los parametros de rotación terrestre calculados para el día $(\delta X_p, \delta Y_p, \delta Z_p)$, y la transformación de coordenadas estándar para la corrección, de esta forma se aplica esta corrección a el punto de observación (usando la Convención IERS y los parámetros de rotación $R_x = \delta Y_p, R_y = \delta X_p, R_z = -\delta UT1$).

$$\Delta x = +y * \delta UT1 + z * \delta X_p, \quad (12)$$

$$\Delta y = +x * \delta UT1 + z * \delta Y_p, \quad (13)$$

$$\Delta z = +x * \delta Y_p + y * \delta Z_p, \quad (14)$$

Para cada una de las correcciones diarias $(\delta X_p, \delta Y_p, \delta UT1)$ del los PRT se obtiene por medio de una aproximación. En este caso el desplazamiento del polo (δX_p) se calcula de la siguiente manera:

$$\delta X_p = \sum_{j=1}^8 F_j \sin \xi_j + G \cos \xi_j \quad (15)$$

siendo ξ_j es el argumento astronómico en la época actual aplicado en las mareas j con ocho mareas diurnas consideradas $(M_2, S_2, N_2 K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1)$, aumentada con $n \times \pi/2 (n = 0, 1 \text{ o } -1)$ y F_j y G_j son los coeficientes de maximos derivados de los modelos recientes para cada uno de los tres Componentes de los parametros de rotacion terrestre.

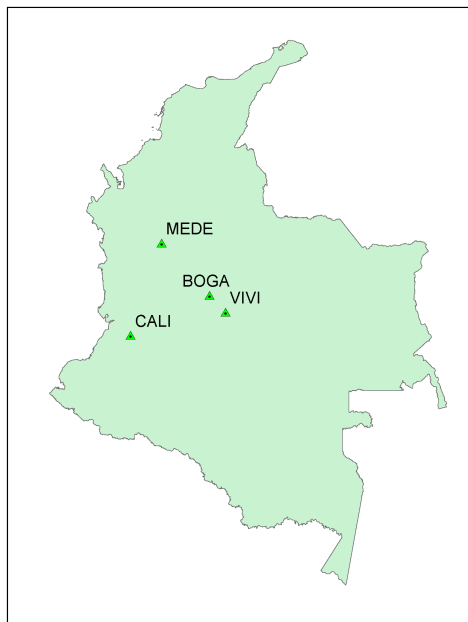
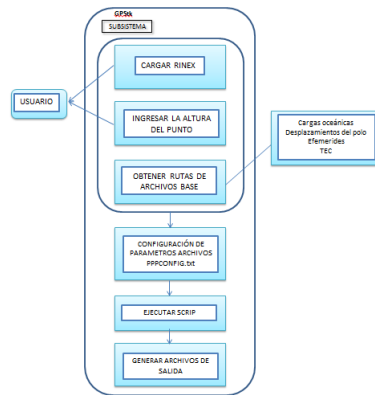
3 Datos y Análisis

El desarrollo de la aplicación para el procesamiento de datos GNSS se formó sobre la herramienta GpsTk (GNU Public Licence) donde su objetivo al momento de desarrollo en los laboratorios de la universidad de Texas es el de proporcionar una librería y un conjunto de aplicaciones para el procesamiento GNSS de forma que los investigadores puedan centrarse en la investigación, y no en la programación. Además, para llevar a cabo tareas relacionadas con los relojes, importación de datos en formatos generales, que son la base para producir aplicaciones más complejas. [Salazar Hernández et al., 2008].

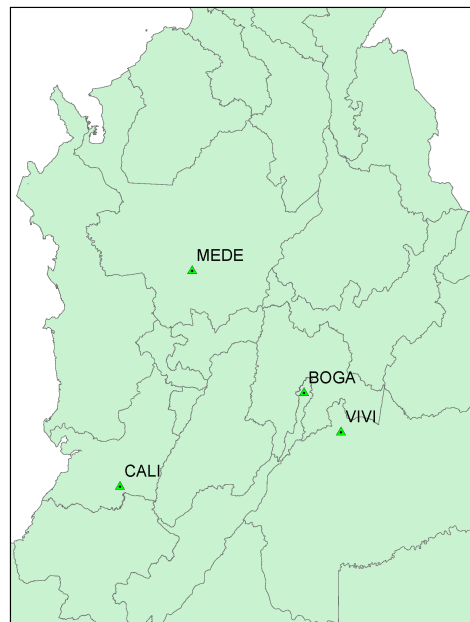
El código creado para esta estrategia de procesamiento se encuentra disponible como un ejemplo en la web del desarrollador específicamente el ejemplo 9. El siguiente esquema muestra de manera concreta los módulos utilizados. De esta forma, se proporciona una aplicación web para facilitar el procesamiento de observaciones GNSS.

Los datos utilizados pertenecen a cuatro estaciones permanentes GNSS sobre el territorio colombiano incluidas en el sistema de referencia geocéntrico para las Américas (SIRGAS). Ente que hace parte del Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS: International Terrestrial Reference System) estas estaciones son operadas por el instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC), quien a su vez realiza el procesamiento. Uno de los productos de SIRGAS son las coordenadas ajustadas con los diferentes centros de procesamiento [http://www.sirgas.org/index.php?id=52] en ref se muestra las estaciones permanentes en centro y norte del parís

Se eligieron estas estaciones por su regularidad en el funcionamiento, además de su separación entre ellas que supera los 80 km, generando así un esenario adecuado para su manejo independiente entre ellas, por el principio de disposición de datos crudos se determinó el año 2012 y la semana GPS 1677 para realizar el procesamiento en los diferentes servicios en línea teniendo en cuenta que todos los insumos estuvieran publicados para procesar; la solución corresponde a la última semana de febrero, las estaciones se muestra en 1



(a) Estaciones GNSS



(b) Detalle estaciones

Figura 2: Estaciones Permanentes Red MAGNA-ECO

Cuadro 1: Coordenadas Geocentricas Estaciones Permanentes

ESTACIÓN	X (m)	Y (m)	Z(m)
BOGA	1744517.525	-6116051.957	512580.742
CALI	1483099.940	-6193060.250	373123.900
MEDE	1579612.740	-6142791.690	684358.670
VIVI	1798111.400	-6103163.800	450211.100

El modo para evaluar la efectividad del servicio GP-UD, fue procesando las estaciones permanentes en tres servicios PPP online; IBGE (<http://www.ppp.ibge.gov.br/ppp.htm>), GAPS (<http://gaps.gge.unb.ca/submitbasic.php>) , CSRS (<https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>) . después de procesar siete días de la semana GPS 1677 y promediar sus resultados, se organizaron y mostraron los resultados en la tabla .

Los resultados se resumen por coordenadas (X, Y, Z) geocéntricas de acuerdo a cada servicio y además al punto de comparación con la coordenada para esa semana por parte de la red SIRGAS-CON.

Cuadro 2: Resultados del Procesamiento PPP en línea

		SIRGAS	IBGE	CSRS-PPP	GAPS	GPUD
BOGA	X	1744517.2500	1744517.2577	1744517.9440	1744517.2449	1744517.2809
	Y	-6116051.2404	-6116051.2320	-6116053.1843	-6116051.2255	-6116051.2644
	Z	512581.0196	512581.0177	512581.2533	512581.0199	512581.0286
CALI	X	1483099.9552	1483099.9651	1483100.6401	1483099.9499	1483099.9873
	Y	-6193060.1829	-6193060.1633	-6193062.1277	-6193060.1601	-6193060.2100
	Z	373124.1501	373124.1476	373124.3945	373124.1486	373124.1699
MEDE	X	1579608.4565	1579608.4604	1579609.1438	1579608.4528	1579608.4365
	Y	-6142783.8302	-6142783.8254	-6142785.7433	-6142783.8217	-6142783.7214
	Z	684352.4064	684352.4041	684352.6444	684352.4076	684352.4497
VIVI	X	1798110.7091	1798110.7252	1798111.4100	1798110.7099	1798110.7319
	Y	-6103160.6755	-6103160.6547	-6103162.6260	-6103160.6670	-6103160.7296
	Z	450209.6562	450209.6550	450209.8877	450209.6550	450209.6752

4 Resultados

Se dejaron las coordenadas SIRGAS como el patrón de comparación, teniendo en cuenta que estas son ajustadas por estrategias de procesamiento más complejas y que constituyen un alto grado de precisión; con el ánimo de observar las diferencias y contrastar el servicio GP-UD, respecto a los demás servicios y su aproximación a SIRGAS se exponen los resultados en 3

Cuadro 3: Residuales para la semana 1677 en relación a SIRGAS

	m	IBGE	CSRS-PPP	GAPS	GPUD
SIRGAS	DX	-0.00939	-0.69176	0.002655	-0.01317
	DY	-0.01339	1.938082	-0.01094	-0.0007
	DZ	0.001975	-0.23691	0.000238	-0.01821

Comparando las diferencias entre los diversos sistemas se puede resaltar el servicio GAPS donde la diferencia no supera 1cm en comparación con CSRS donde se encuentra las mayores diferencias, esas superan los 10 cm con lo cual el servicio no satisface los planteamientos de la estrategia PPP. Los resultados para IBGE con equiparables con el servicio GP-UD si analizamos que el delta más alejado de los datos es de 0.013 metros; estando en un punto limite si tenemos en cuenta todas las correcciones aplicadas.

5 Conclusión

Comparando los resultados obtenidos contra las coordenadas publicadas por SIRGAS para la semana 1677 se destacan los resultados de GAPS, los cuales se distancian en escasos 2mm en el promedio general de las estaciones evaluadas, por otro lado, la aplicación objeto de este proyecto de posiciona de manera similar con el IBGE, se observa que en promedio 18 mm de diferencia en las coordenadas, por último, el servicio CSRS-PPP lleva los resultados más alejados; superando los 10 centímetros. Respecto a el servicio creado, responde de manera eficiente la necesidad de obtener coordenadas precisas y otorga al investigador las gráficas y datos necesarios para entender las condiciones en las cuales se realizó la observación, y por medio de software generar filtros y rescatar el intervalo optimo dentro de la observación para ser procesado.

Referencias

- [Dragert et al., 2000] Dragert, H., James, T., and Lambert, A. (2000). Ocean loading corrections for continuous gps: A case study at the canadian coastal site holberg. *Geophysical research letters*, 27(14):2045–2048.
- [Héroux and Kouba, 1995] Héroux, P. and Kouba, J. (1995). *GPS precise point positioning with a difference*. Natural Resources Canada, Geomatics Canada, Geodetic Survey Division.
- [McCarthy, 1989] McCarthy, D. D. (1989). Iers technical note# 13. *Observatoire de Paris. Central Bureau of IERS. Paris*.

- [Salazar Hernández et al., 2008] Salazar Hernández, D. J., Hernández Pajares, M., Zornoza, J., Miguel, J., and Sanz Subirana, J. (2008). High accuracy positioning using carrier-phases with the opensource gpstk software. In *ION international technical meeting*, volume 2008.
- [Service, 2011] Service, I. G. (2011). Precise point positioning.
- [Teunissen, 2012] Teunissen, P. J. (2012). A-ppp: Array-aided precise point positioning with global navigation satellite systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(6):2870–2881.
- [Wu et al., 1992] Wu, J.-T., Wu, S. C., Hajj, G., Bertiger, W. I., and Lichten, S. M. (1992). Effects of antenna orientation on gps carrier phase. In *Astrodynamics 1991*, pages 1647–1660.
- [Zumberge et al., 1997] Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., and Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3):5005–5017.