Aportaciones al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en posicionamiento absoluto preciso (precise point positioning) para tiempo real a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación GNSS

RAQUEL M. CAPILLA ROMÁ

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

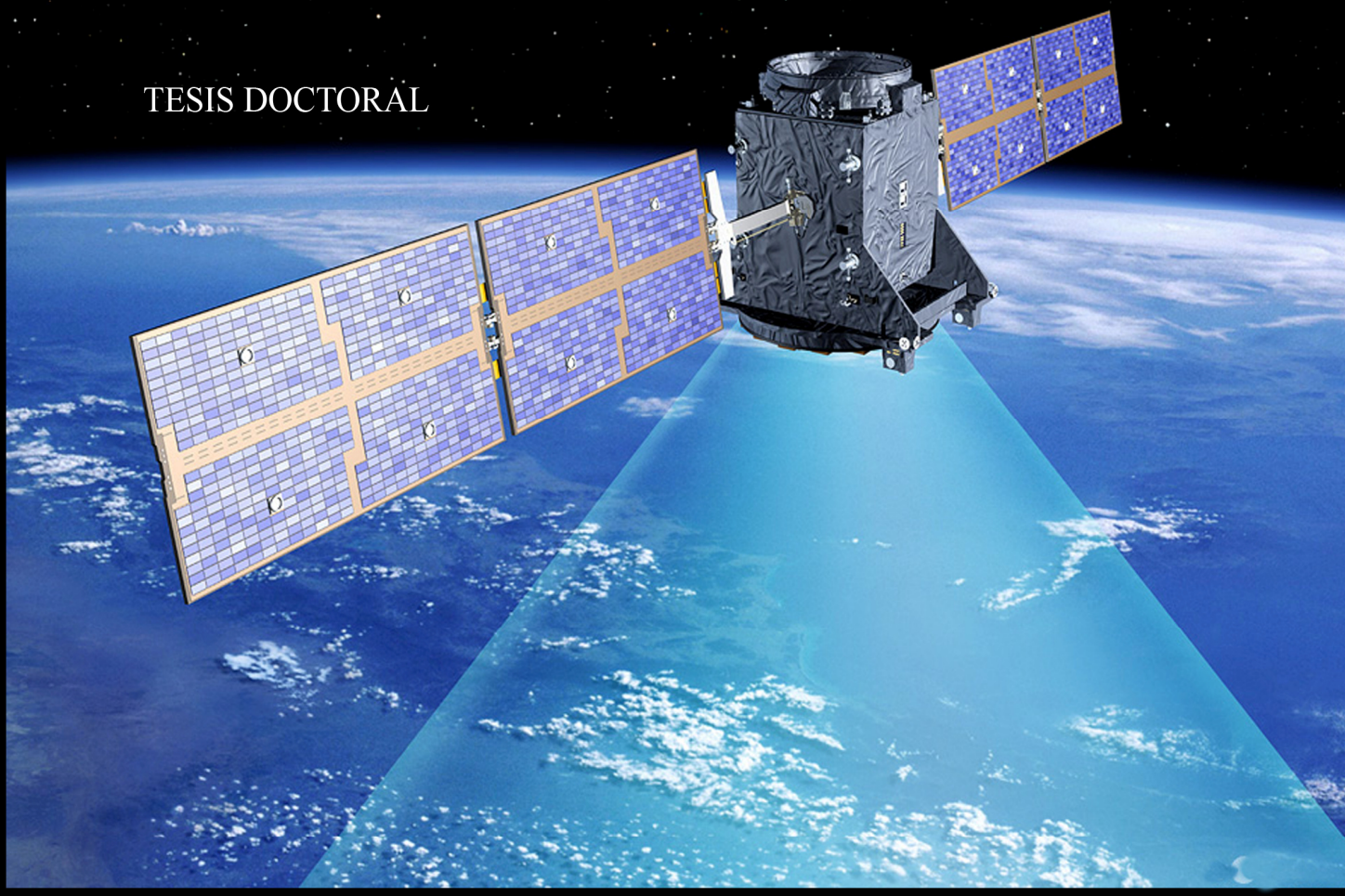
TESIS DOCTORAL

RAQUEL M. CAPILLA ROMÀ

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA
GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA

TESIS DOCTORAL



APORTACIÓN AL ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE LOS MODELOS CONCEPTUALES EN POSICIONAMIENTO ABSOLUTO PRECISO (PRECISE POINT POSITIONING) PARA TIEMPO REAL, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE PRODUCTOS Y PROTOTIPOS EN UN ESCENARIO MULTI-CONSTELACIÓN *GNSS*

Autora: RAQUEL M. CAPILLA ROMÀ

Director: Dr. JOSE LUIS BERNÉ VALERO

Valencia, Febrero 2015

2015

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODESIA Y FOTOGRAMETRÍA

PROGRAMA DE DOCTORADO:
GEODESIA, CARTOGRAFÍA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TESIS DOCTORAL

Aportación al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en Posicionamiento Absoluto Preciso (Precise Point Positioning) para tiempo real, a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación GNSS.

Autora: Raquel M. Capilla Romà

Director de tesis: Dr. José Luis Berné Valero

Valencia, Febrero de 2015

Fotografía de la cubierta inicial: Galileo System Test Bed-V2/A in orbit (artist's impression)

Released 06/04/2005 4:10 pm; Copyright ESA - P. Carril; Uso autorizado con fines de investigación.

Fotografía de la cubierta final: First two Galileo IOV satellites

Released 13/09/2011 11:29 am; Copyright ESA – P. Carril; Uso autorizado con fines de investigación.

Colección Tesis Doctorales

© Raquel Capilla Romá

© 2015, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València

Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es

ISBN: 978-84-9048-449-4 (versión impresa)

Reconocimiento, Uso No Comercial

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

…although Newton established the physics of orbital motion, he probably never imagined even in his wildest dreams that one day more than a couple of dozen man-made objects would be whizzing around the earth that, together with a small handheld box, could tell him which apple tree he was sitting under…

Richard B. Langley

Agradecimientos

A mi director de tesis José Luis Berné Valero, por la confianza depositada en mí y su asesoramiento durante el desarrollo de esta tesis.

Al personal del Departamento de Ingeniería Cartográfica de la Universidad Politécnica de Valencia, especialmente a los doctores Ángel Martín Furonés y Natalia Garrido Villén.

A André Hauschild, del DLR-German Aerospace Center, y a Denis Laurichesse, del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia, por compartir sus prototipos y modelos experimentales para el presente trabajo, y por sus consejos, así como a otros muchos investigadores cuyo esfuerzo, trabajo y divulgación científica hacen que este ámbito avance día a día.

A Mayte y Cesar por ilustrarme con el código Fortran, y a Antonio por el soporte en la programación en Python.

A los amigos y compañeros que me han deseado un "buen camino"...

A mi familia.

Resumen

El método Precise Point Positioning, (PPP), consiste en una técnica de posicionamiento absoluto con un solo receptor GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Su fundamento teórico se basa en resolver la posición con las observaciones de un único equipo, utilizando correcciones de osciladores y de órbitas de satélites, entre otros modelos. La potencia del método con respecto a la técnica diferencial reside en que el posicionamiento diferencial o relativo utiliza la solución de dobles diferencias que requiere, al menos, dos receptores para obtener una posición precisa o un receptor conectado a una red de estaciones de referencia.

Sin embargo hasta hace poco y a efectos prácticos, un posicionamiento absoluto con precisión de centímetros con un solo equipo se ha considerado irrealizable. El motivo reside en la dificultad de la cancelación de errores y de obtener la resolución de ambigüedades enteras. El principal factor que limita, por tanto, el posicionamiento absoluto preciso es la dependencia de productos externos que modelen las fuentes de error, es decir: el rendimiento de los modelos de órbitas y relojes, la calidad de las observaciones, y los errores no modelados o no calibrados. Las correcciones ionosféricas y modelos de estado de la troposfera también son esenciales para alcanzar precisiones a nivel del centímetro. Por otro lado, si se trabaja con la técnica PPP en tiempo real, se necesita productos y modelos de estado recibidos continuamente a través de paquetes de datos por internet, que deben cumplir con ciertos requisitos de latencia y disponibilidad continua. En el caso de estudio de posicionamiento en tiempo real, la técnica PPP es además muy sensible a las anomalías y las pérdidas en la recepción de los productos, y a las fluctuaciones de la constelación, produciendo pérdidas de convergencia, retrasos en la inicialización, y falta de continuidad y exactitud en los resultados.

En este momento esta situación está experimentando grandes cambios, pero necesita evolucionar aún más, ya que la determinación en tiempo real y el rendimiento de los parámetros orbitales, estados de reloj u otros modelos de error de los satélites GNSS y sus señales, se encuentran todavía en fase de mejora por parte del International GNSS Service, y es un gran desafío para los Centros de Análisis e investigadores de todo el mundo.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo ha sido el estudio de la técnica de posicionamiento Precise Point Positioning enfocada al caso de tiempo real, en base al rendimiento de los productos disponibles en varios escenarios y entornos. El estudio se centró en su aplicación y en la implementación de soluciones para mejorar sus limitaciones. Las principales tareas desarrolladas son:

-Un estudio preliminar del entorno multi-constelación, del estado del arte de la técnica Precise Point Positioning, así como de los errores a modelar, (capítulos 1 y 2).

-La supervisión de la emisión de modelos en un formato estándar, y la discusión de las limitaciones existentes en las alternativas para su generación, (capítulos 3 y 4).

-El análisis de la optimización de este método con el desarrollo de nuevas constelaciones, a través de la evaluación de nuevos productos y sesiones simultáneas de observación, (capítulo 6).

-La exploración de las posibilidades de recuperación de la naturaleza entera de las ambigüedades de fase y su repercusión en términos de rendimiento, proporcionando demostraciones reales, con aproximaciones experimentales y estandarizadas, (capítulo 7).

-El estudio de las tácticas para proporcionar productos combinados robustos en tiempo quasi-real y real, (capítulo 8), y en un marco regional o continental, (capítulo 9), con soluciones propias aplicadas.

-El diseño y desarrollo de herramientas de cálculo y apoyo, (capítulo 5), de monitorización y distribución de resultados procedentes de PPP en tiempo real, (capítulo 10), y el estudio de potenciales aplicaciones avanzadas de la técnica, (capítulo 11).

Abstract

Precise Point Positioning (PPP) method involves an absolute positioning technique from a single receiver with GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Its theoretical basis consists of solving the position with observations using a single receiver, with clock and orbit state models, among other products. The main advance over the current differential technique is that differential or relative positioning uses the double-differences solution that requires, at least, two receivers to get a precise position or a receiver connected to a network of reference stations.

However, until recently, and from a practical point of view, a precise absolute positioning with centimeter accuracy with a single GNSS receiver was considered unfeasible. The reason was the difficulty in cancellation of errors and the ambiguity resolution. The main factor that limits Precise Point Positioning (PPP) accuracy is the dependence on external information, which models the error sources, that is to say: the performance of the orbit and clock products, the quality of the observations, and the effects of the un-modeled or un-calibrated error sources. Precise ionospheric corrections and troposphere state models are also essential in order to improve positioning at centimeter level. Furthermore, in real-time PPP precise streams of products and state models are needed, and they must meet certain requirements of latency and continuous availability. In the case study of real-time positioning, the PPP technique is very sensible to gaps and outliers in the reception of the products and fluctuations in the constellation, producing lost of convergence, delay in initialization and a lack of accuracy in the results.

Nowadays, this situation is changing, but it needs to evolve even more, because the real-time determination and the performance of the orbital parameters, clock states or other modeled errors of the GNSS satellites and signals, are still in a stage of improvement by the International GNSS Service, and it is a challenge for the Analysis Centers and for the researches all around the world.

Therefore, the objective of this investigation was the study of Precise Point Positioning technique applied to the real-time case study, considering the performance of the available products in several sceneries and environments. The study focused on its application and how to improve limitations in the performance. The main tasks developed are:

-A preliminary study of the multi - constellation context, the state of the art of Precise Point Positioning technique and modeling error sources, (chapters 1 and 2).

-The review of the emission of the state models into a standard format and the discussion of the limitations in the alternatives in the generation of the models, (chapters 3 and 4).

-The analysis of the optimization of this method with the development of new constellations, by means of the test of new products, and multiple simultaneous observations performed, (chapter 6).

-To explore the possibilities of real-time recovering of integer phase ambiguities for PPP and the impact in the performance, providing practical demonstrations with experimental and standardized approaches, (chapter 7).

-To study tactics to provide combined products in quasi-real time and real-time latency, (chapter 8), and in a regional or continental frame, with own applied solutions, (chapter 9).

-The design and development of processing and analysis tools, (chapter 5), monitoring and distribution of results with the real-time PPP method, (chapter 10), and the study of potential applications, (chapter 11).

Resum

El mètode Precise Point Positioning, (PPP), consisteix en una tècnica de posicionament absolut amb un sol receptor GNSS (Global Navigation Satellite Systems). El seu fonament teòric consisteix a resoldre la posició amb observacions d'un únic equip utilitzant correccions d'oscil·ladors i d'òrbites de satèl·lits, entre altres models. La potència del mètode respecte a la tècnica diferencial és que el posicionament diferencial o relatiu utilitza la solució de dobles diferències que requereix, almenys, dos receptors per a obtenir una posició precisa o un receptor connectat a una xarxa d'estacions de referència.

No obstant això, fins fa poc i a efectes pràctics, un posicionament absolut amb precisió de centímetres amb un sol equip GNSS s'ha estat considerant irrealitzable. El motiu es troba en la dificultat de la cancel·lació d'errors i d'obtenir la resolució d'ambigüitats senceres. El principal factor que limita, per tant, el posicionament absolut precís és la dependència de productes externs que modelen les fonts d'error, es a dir: el rendiment dels models d'òrbites i oscil·ladors, la qualitat de les observacions, i els errors no modelats o no calibrats. Les correccions ionosfèriques i models d'estat de la troposfera també són essencials per a aconseguir precisions a nivell del centímetre amb un equip. D'altra banda, si es treballa amb la tècnica PPP en temps real, es necessita productes i models d'estat rebuts contínuament a través de paquets de dades per Internet, que han de complir amb certs requisits de latència i disponibilitat contínua. En el cas d'estudi de posicionament en temps real, la tècnica PPP és a més molt sensible a les anomalies i les pèrdues en la recepció dels productes, i a les fluctuacions de la constel·lació, produint pèrdues de convergència, retards en la inicialització i falta de continuïtat i exactitud en els resultats.

En aquest moment aquesta situació està experimentant grans canvis, però necessita evolucionar encara més, ja que la determinació en temps real i el rendiment dels paràmetres orbitals, els estats de rellotge o altres models d'error dels satèl·lits GNSS i els seus senyals, es troben encara en fase de millora per part de l'International GNSS Service, i és un desafiament per als Centres d'Anàlisi i investigadors de tot el món.

Per tant, l'objectiu d'aquest treball ha consistit en l'estudi de la tècnica Precise Point Positioning enfocat al cas de temps real, fonamentat amb el rendiment dels productes disponibles a diversos escenaris i entorns. L'estudi es va centrar en la seva aplicació i en la implementació de solucions per millorar les limitacions en la seua productivitat. Les principals tasques desenvolupades són:

-Un estudi preliminar de l'entorn multi-constel·lació, l'estat de l'art de la tècnica Precise Point Positioning, així com dels errors a modelar, (capítols 1 i 2).

-La supervisió de l'emissió de models amb un format estàndard, i la discussió de les limitacions en les alternatives a la generació de models, (capítols 3 i 4).

-Anàlisi de l'optimització d'aquest mètode amb el desenvolupament de noves constel·lacions, amb l'avaluació de nous productes i múltiples sessions simultànies d'observació, (capítol 6).

-L'exploració de les possibilitats de recuperació de la naturalesa sencera de les ambigüitats de fase i la seva repercussió en termes de rendiment, proporcionant demostracions reals, utilitzant aproximacions experimentals i estandarditzades, (capítol 7).

-L'estudi de les tàctiques per a proporcionar productes combinats robustos en temps quasi-real i en temps real, (capítol 8), i en un marc regional o continental, amb solucions pròpies aplicades, (capítol 9).

-El disseny i desenvolupament d'eines de càlcul i suport (capítol 5), de monitorització i distribució de resultats aplicats al cas de PPP en temps real, (capítol 10), i l'estudi de potencials aplicacions avançades de la tècnica, (capítol 11).

Índice de capítulos VII

Índice de figuras XIV

Índice de tablas XVIII

Acrónimos XX

Índice de capítulos

1. Contexto multi-constelación actual de la Geodesia Espacial. 1

1.1. Coyuntura actual entre los sistemas de navegación por satélite y espectro de señales. 2

1.1.1. Situación actual del sistema NAVSTAR GPS 5

1.1.2. El sistema GLONASS 7

1.1.3. El programa europeo GALILEO 8

1.1.4. El sistema Beidou 13

1.1.5. Quasi Zenith Satellite System (QZSS) 15

1.1.6. Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) 16

1.2. Sistemas de referencia convencionales. 17

1.2.1. Sistema de referencia y Marco de referencia terrestre internacional (ITRS/ITRF) 18

1.2.1.1 Definición de la materialización posterior a ITRF2008 20

1.2.2. Sistema y Marco de Referencia Terrestre Europeo 21

1.3. Organismos, consorcios y redes GNSS de ámbito global o continental.

1.3.1. El International GNSS Service. 22

1.3.2. La subcomisión Europea EUREF. 23

1.3.3. Los centros de análisis y centros de datos. Productos y servicios. 24

1.3.4. Las iniciativas MGEX y CONGO.

1.3.4.1. El proyecto MGEX (Multi-GNSS EXperimenT). 26

1.3.4.2. La red CONGO (Cooperative Network for GIOVE Observations). 27

2. Descripción de los términos a modelar en GNSS. El caso de la técnica Precise Point Positioning.

2.1. Errores de reloj en GNSS. 30

2.1.1. Clasificación y caracterización de osciladores existentes. 31

2.1.2. Modelo polinomial de representación del error de reloj. 32

2.1.3. Efectos relativistas. 33

2.2. Determinación orbital precisa. 34

2.3. Efectos sobre la propagación de la señal en la atmósfera. 35

2.3.1. Retardo troposférico. 36
2.3.2. Retardo ionosférico. 38

2.4. Pérdida de ciclo y multipath 41

2.5. Efectos de sitio, cargas y mareas. Parámetros de orientación de la tierra.
2.5.1. Mareas terrestres sólidas 41
2.5.2. Deformación de la rotación debido al movimiento del polo 42
2.5.3. Carga oceánica 42
2.5.4. Carga atmosférica 42
2.5.5. Parámetros de orientación de la tierra 42

2.6. Retardos y offsets dependientes de la antena 43

2.7. Polarización en la señales por la actitud del satélite: *Phase wind-up* 43

2.8. Retardos de señal no calibrados y *bias* entre observables. 44
2.8.1. *Bias* entre sistemas (ISB) y *bias* entre frecuencias (IFB) 44
2.8.2. Retardos de fase no calibrados (UPD) 45
2.8.3. Sesgos entre observables de código. 46
2.8.3.1. *Bias o sesgo (DCB)* entre los códigos C1 y P1 46
2.8.3.2. *Bias o sesgo (DCB)* entre los códigos P2 y C2 47

2.9. La técnica Precise Point Positioning. 47
2.9.1. Combinaciones de observables empleadas en PPP 49
2.9.2. Modelo lineal de observación en PPP 51
2.9.3. Métodos para la recuperación de ambigüedades enteras en PPP 53
2.9.3.1. Aproximación a través de la estimación del "bias" fracción de ciclo (Fractional Cycle Biases –FCB) 53
2.9.3.2. Aproximación a través de la determinación del estado del reloj y de la recuperación de su parte entera (Integer Recovery Clocks –IRC) 55
2.9.3.3. Otras aproximaciones para la obtención de ambigüedades enteras en PPP 57

3. Modelos de distribución de errores para posicionamiento PPP en tiempo real

3.1. Aproximación a través del concepto clásico "Observation Space Representation – OSR" 58
3.1.1. Materialización del concepto OSR en tiempo real a través de la solución de red GNSS 59

3.2. Aproximación a través del concepto *"State Space Representation -SSR"* 61
3.2.1. Composición del vector de estado en la aproximación por SSR 62
3.2.1.1. Correcciones a la órbita del satélite 62
3.2.1.2. Correcciones de reloj de los satélites y términos para correcciones de alto ratio 64

3.2.1.3. Mensajes para la especificación del marco de referencia 64
3.2.1.4. Mensaje SSR con el *bias* del observable de código del satélite y para la transmisión del *bias* de fase. 65
3.2.1.5. Consistencia temporal y frecuencia de actualización de los mensajes SSR 65
3.2.2. Encapsulación y transmisión de los modelos estandarizados RTCM-SSR de correcciones CLKxx en tiempo real 66
3.2.3. Perspectivas futuras en el desarrollo del estándar SSR. 71
3.2.3.1. Estandarización de las componentes del mensaje SSR para la constelación GALILEO. 73
3.2.3.2. Estandarización de las componentes del mensaje SSR para el modelado ionosférico y troposférico. 73

3.3. Encapsulación y transmisión de los modelos estandarizados RTCM-MSM de observaciones multi-constelación. 73

3.4. Discusión sobre las aproximaciones SSR y OSR 76

4. Revisión de los procesos y alternativas de generación en tiempo real de modelos del vector de estado

4.1. Aproximación a nivel de centros de análisis y herramientas científicas 78
4.1.1. Modelos de reloj para posicionamiento PPP-estándar con medidas de fase en RTNET 78
4.1.1.1. Estimación del *bias* de fase para PPP -RTK 80
4.1.2. Sistema RETICLE de estimación en tiempo real de estados de reloj 81
4.1.3. Algoritmo RTIGSMR 83
4.1.4. Sistema RETINA 85
4.1.5 . El sistema PPP-WIZARD 85

4.2. Implementación del filtro Kalman en los centros de análisis. 87
4.2.1. Predicción de valores 88
4.2.2. Fase de actualización y corrección del filtro Kalman 88

4.3. Generación de productos combinados en el IGS y distribución a través del servicio RTS. 90
4.3.1. Proceso de combinación de productos 91
4.3.1.1. Combinación de productos individuales época a época 91
4.3.1.2. Generación de productos combinados GPS a través de Filtros Kalman 92
4.3.1.3. Filtrado Kalman para la combinación de modelos GPS+GLONASS 93
4.3.1.4. Mecanismos de distribución robusta 93

4.4. Generación de modelos en tiempo real para marcos regionales 94
4.4.1. Estrategias de transformación de productos 95

5. Herramientas existentes para posicionamiento PPP en tiempo real y software

desarrollado

5.1. Herramientas existentes para posicionamiento PPP en tiempo real 98
5.1.1. Librerías de G-Nut/GEB 98
5.1.2. EPOS –RT 99
5.1.3. BKG Ntrip Client 99
5.1.4. RTKLIB 100
5.1.5. GINPOS 100
5.1.6. PPP-Wizard 101
5.1.7. GMV MAGIC-PPP 101
5.1.8. GNSS-WARP 101

5.2. Programación de nuevas rutinas de cálculo en lenguaje *Python* 101
5.2.1. Llamada a librerías de cálculo científico 103
5.2.2. Programación de módulos avanzados de cálculo 104
5.2.2.1. Librería GeoCalc. 104
5.2.2.2. Rutinas individuales 111

5.3. Diagrama de la unidad de control 112

6. Análisis del escenario multi-constelación existente para PPP.

6.1. Estado del arte en la estimación de productos multi-constelación para post-procesamiento 114
6.1.1 Análisis de modelos actuales para la constelación GALILEO 115

6.2. Impacto de la presencia de GALILEO en la solución PPP en tiempo real 122
6.2.1. Convergencia en el posicionamiento PPP empleando solución de navegación con GALILEO 123
6.2.2. Monitorización de productos de la red de rastreo GALILEO (CONGO) 124

6.3. Influencia de la constelación GLONASS en la solución PPP en tiempo real 129
6.3.1. Discusión de Outliers en la determinación de modelos SSR de órbitas GLONASS 132

6.4. Sesiones multi-constelación simultáneas 134

6.5. Aportaciones del escenario y mejoras futuras 143

7. Impacto de la recuperación del número entero de ambigüedades en tiempo real.

7.1. Desarrollo del método 148

7.2. Modelos utilizados para la resolución de ambigüedades enteras en tiempo real.

7.2.1. Análisis del prototipo basado en la combinación de observables Resultados del análisis 150

7.2.2. Aplicación del modelo estandarizado 159

7.3 .Conclusiones y discusión. 164

8. Alternativas y mejoras a los modelos combinados finales del IGS 168

8.1. Implementación de la combinación de productos para post-procesamiento en tiempo quasi-real 171

8.1.1. Combinación época a época CLK91+CLK11 para post-procesamiento PPP 172

8.1.2. Post-procesamiento PPP con la implementación de la triple combinación época a época CLK91+CLK11+CLKA1 174

8.1.3. Implementación del producto combinado mediante la media ponderada época a época 180

8.1.4. Productos combinados con detección de *outliers* 183

8.2. Estrategias de combinación de productos en tiempo real

8.2.1. Combinación época a época frente a combinación por filtros Kalman 187

8.2.2. Creación de nuevos productos en tiempo real mediante la combinación por Filtros Kalman 189

8.2.2.1. Rendimiento de la combinación de soluciones CLK11+CLKA1 191

8.2.2.2. Rendimiento de la combinación de soluciones CLK11+CLK91 195

8.2.2.3. Rendimiento de la combinación de modelos CLK91+CLKA1 201

8.2.2.4. Combinación de modelos CLK91+CLKA1 frente a combinación CLK91+CLK11 205

8.2.3. Discusión sobre la creación de productos combinados en tiempo real y post-proceso 210

9. Análisis de estrategias de obtención de productos regionales para PPP en tiempo real.

9.1. Descripción de los modelos existentes 216

9.2. Propuesta de transformación implementada en tiempo real 218

9.2.1. Rendimiento de la transformación en tiempo real aplicando la técnica PPP frente a productos de marcos regionales 219

9.2.1.1. Modelo en el marco regional frente a transformación al vuelo sobre el modelo CLK91 220

9.2.1.2. Modelo EUREF02 frente a la transformación al vuelo con el modelo CLK91 226

9.2.1.3. Modelo en el marco regional frente a modelos globales transformados al vuelo 234

9.2.2. Discusión de los escenarios 239

10. Diseño de la interface de monitorización global en tiempo real para PPP

10.1. Diagrama de despliegue del sistema de monitorización 242

10.2. Infraestructura global monitorizada 244

10.3. Distribución de resultados 245

10.4. Respuesta a nivel global de los modelos de correcciones para PPP en tiempo real 246

10.4.1. Contrastación de distintos modelos de osciladores y órbitas a nivel global 251

10.5. Discusión de la técnica para distintas aplicaciones 254

11. Respuesta de la técnica PPP en tiempo real en desplazamientos naturales o inducidos. 257

11.1. Diseño de la unidad de control de desplazamientos 257

11.2. Desplazamiento horizontal inducido

11.2.1. Ensamblaje del dispositivo 259

11.2.2. Sesión DOY 107/2013 260

11.2.3. Sesión DOY 142/2013 264

11.2.4. Sesión DOY 135/2014 267

11.3. Desplazamiento vertical inducido 270

11.3.1. Sesión DOY 142/2013 270

11.3.2. Sesión DOY 84/2014 274

11.3.3. Sesion DOY 80/2014 276

11.4. Discusión de la técnica: Disponibilidad y precisión de la solución 278

11.4.1. Determinación del desplazamiento con PPP en tiempo real frente a la determinación por dobles diferencias con productos de alto-ratio. 282

12. Conclusiones, discusión y perspectivas futuras 286

13. Anexo I 290

1. Próximos lanzamientos de satélites GNSS 2015 y estado actual de las constelaciones
   - Desglose actual de satélites GPS
   - Desglose actual de satélites GLONASS
   - Desglose actual de satélites Beidou
2. Descripción del formato RTCM
3. Descripción del protocolo NTRIP
4. Descripción del estándar NMEA

14. Bibliografía 298

15. Otras aportaciones relacionadas a revistas, congresos y workshops 313

Índice de figuras

Figura 1.1: Sputnik 1 -1957
Figura 1.2: 1.Satélite GPS generación GPS III. 2-3. Satélites GALILEO-FOC[1]
Figura 1.3: Órbita del sistema QZSS y satélite IRNSS
Figura 1.4: Localización frecuencias banda L y servicios SAR,[2] ARNS[3] y RNSS[4] para las distintas constelaciones de posicionamiento y navegación.
Figura 1.5: Horizonte de satélites GPS+GLONASS rastreado en la red GNSS de Valencia. Doy 165/2013.
Figura 1.6: Agentes en la Arquitectura de Galileo
Figura 1.7: Integración de GALILEO (5-6) para la lanzadera
Figura 1.8: Componentes de satélites IOV-Galileo
Figura 1.9: Servicios de Galileo
Figura 1.10: Horizonte global previsto de satélites GNSS
Figura 1.11: Simulación PPP estático con GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU
Figura 1.12: QZSS-1
Figura 1.13: Vista esquemática del funcionamiento de QZSS
Figura 1.14: Cobertura de los satélites de IRNSS
Figura 1.15: Estaciones que forman el marco ITRF
Figura 1.16: Representación de estaciones IGS en Europa junto con otras técnicas de geodesia espacial
Figura 1.17: Estaciones ITRF para el cambio de marco ITRF2008.
Figura 1.18: Densificación preliminar Europea
Figura 1.19: Estaciones GNSS pertenecientes al IGS
Figura 1.20: Red de Estaciones GNSS de EUREF
Figura 1.21: Centros de análisis de EUREF
Figura 1.22: Estado de la iniciativa MGEX en el año 2014
Figura 1.23: Red MGEX (Multi-GNSS EXperimenT) y Red CONGO
Figura 1.24: Procesamiento y flujo de trabajo de la red CONGO

Figura 2.1. Estabilidad de distintos tipos de relojes obtenidos de productos finales del IGS
Figura 2.2: Capas atmosféricas
Figura 2.3. Gráfico de la trayectoria de la señal y ángulo z.
Figura 2.4: Efecto “wind-up”.
Figura 2.5: Constelación GLONASS

Figura 3.1: Generación de una estación de referencia virtual próxima al rover
Figura 3.2: Master Auxiliary Concept
Figura 3.3: Diagrama SSR-OSR
Figura 3.4: Componentes de la órbita del satélite
Figura 3.5: Mensajes RTCM SSR- Ejemplo de frecuencia de actualización
Figura 3.6: Mensajes, constelaciones, códigos y frecuencias incluidos en el estándar RTCM-MSM

Figura 4.1: Diagrama del sistema RTNET
Figura 4.2: Esquema del filtro recursivo Kalman de estimación en tiempo real
Figura 4.3: Secuencia de operaciones de generación de modelos con el sistema RTIGSMR
Figura 4.4: Sistema PPP-Wizard.
Figura 4.5: Parámetros determinados en el sistema PPP-Wizard.
Figura 4.6: Red del Real Time Service-IGS
Figura 4.7: Diagrama de combinación de productos del IGS
Figura 4.8: Gráfico pseudodistancia
Figura 4.9: Rotación y traslación simulada sobre la distancia geométrica al satélite
Figura 4.10: Cambio de escala sobre la distancia geométrica al satélite

Figura 5.1: Conexión con el caster products.igs-ip.net del IGS mediante el BNC.
Figura 5.2: Programa RTKLIB
Figura 5.3: Librerías utilizadas de Python
Figura 5.4: Módulos generados
Figura 5.5: Aproximación a través de diagrama basado en el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) del esquema de librerías
Figura 5.6: Diagrama UML con la implementación propia en *Python* del paquete Geodesia
Figura 5.7: Gráficos de salida de las librerías

[1] *Full Operational Capability - Galileo Mission*
[2] *Galileo Search and Rescue*
[3] *Aeronautical Radio Navigation Services*
[4] *Radio Navigation Satellite Service*

Figura 5.8: Representación por UML de las llamadas realizadas desde el paquete procesos
Figura 5.9: Página inicial interface web
Figura 5.10: Cinemático PPP en tiempo real Estación Conz (Chile). Doy 95/2014.
Figura 5.11: Diagrama de entrada de datos, operaciones y procesos de salida implementados para posicionamiento PPP en tiempo real
Figura 5.12: Esquema de Unidades de control/monitorización para PPP en tiempo real.
Figura 5.13: Diagrama de la solución PPP en tiempo real.

Figura 6.1: Constelaciones rastreadas, (2013).
Figura 6.2: Diferencias ESA-TUM en la componente radial, longitudinal y transversal, para satélites GALILEO E11, E12, E19 y E20.
Figura 6.3: σ 3D respecto al promedio época a época para las órbitas GALILEO
Figura 6.4: Diferencias ESA-COM y ESA-GFZ para productos de reloj GALILEO
Figura 6.5: Diferencias ESA-GFZ para el reloj de GALILEO E20
Figura 6.6: σ de cada centro de análisis con respecto a la combinación época a época, para las GPSWEEK 1755-1757, 1783-1784
Figura 6.7. Esquema de la unidad de control para tiempo Real.
Figura 6.8: Sesgo X,Y,h y constelación rastreada GPS+GLONASS+GALILEO frente GPS+GLONASS
Figura 6.9: Representación época a época GPS+GLONASS+GALILEO frente GPS+GLONASS
Figura 6.10-6.13: Doy358-361/2012. Sesgo X,Y,h,representación época a época y rastreo CLK91 frente a productos CONGO
Figura 6.14: Doy 113 -116/2014. Influencia de la presencia de GLONASS en la solución PPP en tiempo real
Figura 6.15: Pérdidas de convergencia en 24 horas y porcentaje de tiempo para un determinado rango, GPS y GPS+GLONASS
Figura 6.16: Anomalías en productos CLK en órbitas GLONASS
Figura 6.17: Influencia de *outlier* en GLONASS. Doy 119/ 2014
Figura 6.18-6.24: Doy 085, 086, 091, 092, 322, 324, 326/2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO
Figura 6.25: Tiempo en alcanzar convergencia y pérdidas.
Figura 6.26: % de observaciones para cada nivel de sesgo en la solución PPP en tiempo real
Figura 6.27: Tiempo promedio en recuperar la convergencia en dirección h en PPP tiempo real. GPS vs GPS+GLONASS
Figura 6.28: Valores en rango de 20 cm para varios escenarios.
Figura 6.29: Estadísticos globales. Valores Promedio y Desviación Estándar por constelaciones rastreadas
Figura 6.30: Resumen de precisiones diarias PPP en tiempo real frente a PPP en post-proceso para varios escenarios multi-constelación, (Doy 49-92/2013)
Figura 6.31: Resumen de precisiones diarias PPP en tiempo real frente a PPP en post-proceso para varios escenarios multi-constelación, (Doy 323-330/2013)
Figura 6.32: Resumen precisiones totales por producto y constelación

Figura 7.1: Sesgo N,E para las soluciones PPP-AR y PPP-estándar. Doy 151,156,161,163,168,171,174,177/ 2014.
Figura 7.2: Constelación rastreada para las soluciones PPP-AR y PPP-estándar
Figura 7.3: Representación cinemática de PPP con resolución de ambigüedades y PPP estándar
Figura 7.4: Impacto de la solución en tiempo real con ambigüedades enteras para PPP en la cantidad de pérdidas de convergencia > 10 cm, dirección N, E, h
Figura 7.5: Impacto de la solución en tiempo real con ambigüedades enteras para PPP en la cantidad de pérdidas de convergencia > 5 cm, dirección N, E, h
Figura 7.6: Sesgo N,E de la solución PPP-AR frente a la solución flotante con la aproximación estandarizada. Doy 316, 320, 325, 331/2014
Figura 7.7: Resultados en cinemático N,E,h de la solución PPP-AR frente a la solución flotante con la aproximación estandarizada.
Figura 7.8: Pérdidas de convergencia por encima de los 10 cm de la solución PPP-AR frente a la solución PPP estándar con los mensajes estandarizados
Figura 7.9: Pérdidas de convergencia por encima de los 5 cm de la solución PPP-AR frente a la solución PPP estándar con los mensajes estandarizados
Figura 7.10: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades enteras (prototipo experimental)
Figura 7.11: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades flotantes
Figura 7.12: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades enteras (modelo estandarizado)
Figura 7.13: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades flotantes

Figura 8.1: Opciones para la generación de modelos combinados
Figura 8.2: Modelo combinado IGS02 frente a modelo individual. Constelación GPS. Doy 280,283/2012
Figura 8.3: Modelo combinado IGS03 frente a modelo individual. Constelación GPS y GLONASS. Doy 045,064/2012
Figura 8.4: Contenido del modelo IGS frente a alternativa implementada de modelo combinado
Figura 8.5: Combinación propia época a época frente a modelo individual y modelo IGS. Doy 061/2013

Figura 8.6: Combinación propia época a época frente a modelo individual y modelo IGS. Doy 063/2013
Figura 8.7: Combinación propia época a época frente a modelo individual y modelo IGS. Doy 101 /2013
Figuras 8.8 - 8.12: Triple combinación propia época a época frente a modelo individual, doble combinación y modelo IGS. Doy 012/2014, 060/2014, 061/2014, 063/2014, 104/2013
Figura 8.13: Representación de la estabilidad del bias PRN 10 y PRN 20
Figura 8.14: Media ponderada época a época de los modelos con triple combinación Doy 012,060,061,063/2014 y Doy 102,104/2013
Figura 8.15:Diferencias época a época entre las correcciones a las componentes orbitales radial, longitudinal y transversal época a época en varios modelos. PRN 18
Figura 8.16: Outlier en las correcciones a las componentes orbitales GLONASS R03.
Figura 8.17: Control de outliers época a época para generación de un producto combinado. Doy 102/2013,Doy 103/2013, Doy 063/2014, Doy 344/2014
Figura 8.18: Sesgo X,Y,h de la combinación con control de outliers. Doy 102/2013
Figura 8.19: *Streams* de modelos de osciladores y órbitas para participar en la combinación
Figura 8.20: Combinación época a época en tiempo real frente a combinación por filtros Kalman.
Figura 8.21: Cómputo de horas/día con convergencia en la combinación en tiempo real
Figura 8.22: Solución PPP tiempo real época a época. Modelo CLK91 frente a la combinación CLK91+CLK80, CLK91+CLK80+CLK11 -Doy 043,042/2013
Figura 8.23-8.25: Combinación CLK11+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 046/2013, Doy 047/2013, Doy 048/2013
Figura 8.26-8.29: Combinación CLK91+CLK11 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 056/2013, Doy 060/2013, Doy 061/2013, Doy 063/2013.
Figura 8.30-8.32: Combinación CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS**.** Doy 081/2013, Doy 104/2013, Doy 062 /2014
Figura 8.33: Ejemplo del efecto de *outliers* del modelo IGS03 en PPP tiempo real. Doy 60/2014
Figuras 8.34-8.37: Combinación CLK91 +CLK11 y CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 101 /2013,Doy 102 /2013, Doy013/2014, Doy 063/2014
Figura 8.38: Efecto de outlier del modelo IGS03 en posicionamiento PPP en tiempo real, CLK91+CLK11 frente a IGS03. Doy 105 – 15/04/2013
Figura 8.39: Estadísticos globales. –Valores en rango de 20 cm.
Figura 8.40: Estadísticos globales. –Valores Promedio y Desviación Estándar
Figura 8.41: Combinaciones de productos individuales. –Offsets Promedio y desviaciones estándar
Figura 8.42: Sesgo X,Y y desviación época a época con PPP en tiempo real de la combinación CLK91-CLK11-CLK21-CLK80 frente a la combinación CLK11+CLK91.
Figura 8.43: Sesgo X,Y y desviación época a época con PPP en tiempo real de la combinación CLK91-CLK11-CLK21 frente a la combinación CLK11+CLK91.

Figura 9.1: Aproximaciones ETRF/ITRF
Figura 9.2: Diagrama UML transformación de Marco ITRF con la implementación propia en *Python*
Figura 9.3-9.7: Offset X,Y,h y constelación utilizada con el modelo CLK41 frente al modelo CLK91. Doy294/2012, Doy297/2012),Doy298/2012, Doy300/2012, Doy301/2012
Figura 9.8: Diferencias con PPP en cinemático tiempo real en X,Y,h de la transformación al vuelo frente al modelo regional.
Figuras 9.9-9.12: Offset X,Y,h del producto regional frente a la transformación al vuelo. Doy342/2012. Doy343/2012, Doy347/2012, Doy 349/2012, Doy 350/2012, Doy351/2012, Doy 352/2012
Figuras 9.13-9.16: PPP cinemático tiempo real con las soluciones global-regional. Doy 346 /2012, Doy 347/2012, Doy 348 /2012, Doy 349 /2012, Doy 350/2012, Doy 351/2012, Doy 352/2012
Figuras 9.17-9.21: Offset X,Y,h y posiciones cinemáticas época a época con PPP con soluciones regionales frente a regionales. Doy 298/2013, Doy 299/2013, Doy 300/2013, Doy 302/2013, Doy 303/2013
Figura 9.22: Disponibilidad de las muestras
Figura 9.23: Estadísticos globales. Valores en rango para los marcos ITRF2008 y ETRF2000
Figura 9.24: Estadísticos globales. Valores promedio y desviación estándar para los marcos ITRF2008 y ETRF2000

Figura 10.1: Diagrama de despliegue UML
Figura 10.2: Interface de inicio alojada en el servidor web
Figura 10.3: Distribución global de estaciones integradas en el ejemplo de sistema de monitorización PPP en tiempo real.
Figura 10.4: App de *google maps* embebida en la interface web
Figura 10.5: Distribución de los resultados del cálculo PPP en tiempo real
Figura 10.6: Acceso a las carpetas de resultados
Figura 10.7: Visualización de resultados a través de la interface web
Figura 10.8: Sesgo X,Y de los resultados con PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente
Figura 10.9: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente.

Figura 10.10: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente. Doy 147-178.
Figura 10.11-10.12: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real y en post-proceso con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente frente al modelo IGS03.
Figura 10.13: Episodios de movimiento sísmico
Figura 10.14: Deformación detectada en tiempo real tras el terremoto de Chile, 14-15/11/2007 con la técnica PPP
Figura 10.15: Deslizamiento detectado con PPP post-procesado con ambigüedades enteras para un gran periodo de tiempo

Figura 11.1: Esquema de flujo de la observación en Tiempo Real en la unidad de control
Figura 11.2: Situación de la base de calibración de la UPV
Figura 11.3: Croquis de la guía utilizada y de las piezas para el ensamblado
Figura 11.4: Montaje de la antena GNSS sujeta a la guía
Figura 11.5: Antena GNSS en la posición inicial con la varilla milimétrica acoplada.
Figura 11.6: PPP tiempo real época a época -componente planimétrica. Doy 107/2013
Figura 11.7: Satélites rastreados. Doy 107/2013. Duración de la medición: 40 minutos.
Figura 11.8: Desplazamiento inicial en planimetría. -Doy 107 /2013
Figura 11.9: Desplazamiento final en planimetría -Doy 107/2013
Figura 11.10: Post-procesamiento quasi-real PPP de la sesión con desplazamiento inducido. Doy 107/2013
Figura 11.11: Antena GNSS en la posición final tras el desplazamiento
Figura 11.12: Observación planimétrica. Doy 142/2013 .
Figura 11.13: Constelación rastreada
Figura 11.14: Comportamiento de la componente altimétrica durante la sesión. Doy 142/2013
Figura 11.15: Post-procesamiento quasi-real PPP de la sesión con desplazamiento inducido. Doy 142/2013
Figura 11.16: Cinemático PPP tiempo real y rastreo. Doy 135/2014
Figura 11.17: Desplazamientos inducidos detectados en PPP –Tiempo real dirección N-S. Doy 135/2014
Figura 11.18: Post-procesamiento quasi-real PPP con GPS+GLONASS y sin GLONASS. Doy 135/2014
Figura 11.19: Aplomado del jalón para inducción del desplazamiento
Figura 11.20: Representación en dirección N,E,h, y NE de las posiciones cinemáticas con PPP en tiempo real y rastreo. Doy 142/2013. Sesión 2.
Figura 11.21: Observación altimétrica. Doy 142/2013. Sesión 2.
Figura 11.22: Desplazamiento en altimetría. Doy 142/2013. Sesión 2.
Figura 11.23: Instante del desplazamiento inducido en altimetría. Doy 142/2013.Sesión2.
Figura 11.24: Post-procesamiento quasi-real PPP con GPS+GLONASS y sin GLONASS. Doy 142/2013.Sesión2
Figura 11.25: Representación época a época de la solución PPP en tiempo real, sesgo X,Y y rastreo. Doy 84/2014.
Figura 11.26: Desplazamientos detectados con PPP en tiempo real. Doy 84/2014
Figura 11.27: Post-procesamiento quasi-real PPP con GPS+GLONASS y sin GLONASS. Doy 84/2014
Figura 11.28: Sesión PPP en tiempo real GPS. Doy 80/2014
Figura 11.29: Visualización del desplazamiento vertical con Post-procesamiento quasi-real PPP GPS+GLONASS
Figura 11.30: Visualización del desplazamiento vertical con Post-procesamiento quasi-real PPP GPS
Figura 11.31: Estadísticos globales. Campañas de campo –Valores en el rango de 20 cm.
Figura 11.32: Representación X, Y, XY, h y número de satélites. Doy 142 / 2013
Figura 11.33: PPP tiempo real con la estación de VALE, diferencias X, Y, h en cinemático y rastreo. Doy 142 /2013.
Figura 11.34: Representación X, Y, XY, h y número de satélites. Doy 107/ 2013.
Figura 11.35: Comparativa entre observación en campo y gabinete, para las sesiones con desplazamiento horizontal. Valores Promedio y Desviación Estándar
Figura 11.36: Comparativa entre observación en campo y gabinete para las sesiones con desplazamiento vertical Valores Promedio y Desviación Estándar
Figura 11.37: Desplazamientos detectados con dobles diferencias en dirección E, y en dirección N,E. Doy107/2013, Doy142/2013.

Figura 12.1: Ejemplo de observación cinemática

Índice de tablas

Tabla 1.1: Estado de las constelaciones a fecha Marzo 2014. http://igs.org/mgex/
Tabla 1.2: Tablas de frecuencia para señales GPS.
Tabla 1.3: Características de la constelación COMPASS
Tabla 1.4: Frecuencias emitidas en las portadoras en la constelación Beidou
Tabla 1.5: Parámetros de la transformación en la época 2005 y sus tasas de ITRF2005 a ITRF2008
Tabla 1.6: Centros de análisis del IGS,www.igs.org, 2014
Tabla 1.7: Opciones de procesamiento para productos multi-constelación en el TUM

Tabla 2.1: Orbitas y relojes del IGS: Precisión (RMS), latencia y muestreo

Tabla 3.1: Mensajes RTCM 3.1 definidos para la encapsulación de solución de red
Tabla 3.2: Estandarización de retardos de fase no calibrados para RTCM -SSR
Tabla 3.3: Modelos emitidos en streaming para PPP en tiempo real de distintos centros
Tabla 3.4: Indicadores asociados a cada bias según observable
Tabla 3.5: Rango de mensajes reservados al bias.
Tabla 3.6: Estandarización del vector de estado para satélites Galileo en RTCM-SSR
Tabla 3.7: Mensajes RTCM-SSR para modelado ionosférico
Tabla 3.8: Rangos de mensajes para el formato RTCM-MSM.
Tabla 3.9: Desglose de mensajes multi-constelación. RTCM SC-104, (2013)
Tabla 3.10: Diferencias con el estándar RTCM 3.0 y RTCM MSM

Tabla 4.1: Aportación de los distintos centros de análisis al servicio RTS.
Tabla 4.2: Cambio de marco entre ITR08 y cada marco regional.

Tabla 6.1: Productos multi-constelación
Tabla 6.2: Efemérides broadcast ASCII
Tabla 6.3: Offsets máximos/mínimos en componentes orbitales por CA respecto a la ESA
Tabla 6.4: Offsets máximos/mínimos respecto al promedio
Tabla 6.5: Modelos empleados en el análisis multi-constelación
Tabla 6.6: Estadísticos obtenidos, modelo CLK91 frente CLKA1
Tabla 6.7: Estadísticos obtenidos de la solución PPP con y sin presencia de GLONASS.
Tabla 6.8: Estadísticos obtenidos en la solución PPP de GPS frente a doble-triple constelación
Tabla 6.9: Tiempo en alcanzar el rango dentro de un determinado umbral
Tabla 6.10: Estadísticos globales. Porcentaje de disponibilidad de la solución durante 1 mes.

Tabla 7.1: Aproximación estándar para la emisión del *bias* del observable código
Tabla 7.2: Aproximación experimental para la emisión del *bias* de fase
Tabla 7.3: Contenido de los modelos con *bias* de fase.
Tabla 7.4: Estadísticos de PPP –AR y PPP estándar con el prototipo experimental de mensajes con bias de fase
Tabla 7.5: Estadísticos de PPP –AR y PPP estándar con los mensajes estandarizados de bias de fase

Tabla 8.1: Estadísticos obtenidos para las GPSWEEK 1656-1657.CLK10-IGS02.
Tabla 8.2: Estadísticos obtenidos para las GPSWEEK 1727 -1730.CLK11-IGS03
Tabla 8.3: Biases entre observables de código emitidos por distintos centros de análisis
Tabla 8.4: Estadísticos con el modelo implementado, combinación época a época CLK91+CLKA1+CLK11
Tabla 8.5: Estadísticos para la solución de un centro de análisis individual: Modelo CLK91
Tabla 8.6: Estadísticos para la solución combinada del lado del servidor del IGS: Modelo IGS03
Tabla 8.7: Tablas de estadísticos producto combinado promediado
Tabla 8.8: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLK80, CLK91+CLK80+CLK11
Tabla 8.9: Estadísticos obtenidos. CLK11 frente a la combinación de los productos CLK11+CLKA1 e IGS03.
Tabla 8.10: Tiempos de convergencia para umbrales de 20 y 5 cm.
Tabla 8.11: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLK11 e IGS03.
Tabla 8.12: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLKA1 e IGS03.
Tabla 8.13: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLK11, CLK91+CLKA1 e IGS03.
Tabla 8.14: Estadísticos globales. Disponibilidad de los modelos en el total de las sesiones

Tabla 9.1: Productos en el marco regional
Tabla 9.2: Descripción de los modelos RTCM-SSR empleados en los escenarios
Tabla 9.3: Resumen de estadísticos obtenidos –CLK91 y CLK41
Tabla 9.4: Estadísticos promedio de las soluciones acumulativas diarias para PPP-Tiempo real con el modelo regional frente al global

Tabla 9.5: Estadísticos del escenario simultáneo de modelos globales frente al modelo regional
Tabla 9.6: Disponibilidad de las muestras para un total de 15 días

Tabla 10.1: Características principales de las estaciones monitorizadas
Tabla 10.2: Estadísticos de la técnica PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente.
Tabla 10.3: Réplicas del terremoto de Iquique de Abril de 2014

Tabla 11.1: Convergencia en planimetría durante la ventana de tiempo antes del desplazamiento. -Doy 107
Tabla 11.2: Estadísticos. Desplazamiento inicial en planimetría. -Doy 107
Tabla 11.3: Desplazamiento detectado en PPP tiempo real y con post-procesamiento PPP.
Tabla 11.4: Estadísticos. Desplazamiento-convergencia en planimetría. -Doy 142
Tabla 11.5: Estadísticos. Convergencia en altimetría. -Doy 142
Tabla 11.6: Desplazamientos detectados en PPP tiempo real y en post-procesamiento PPP ultra-rápido. Doy 142/2013
Tabla 11.7: Desplazamientos detectados en PPP tiempo real y con post-procesamiento PPP ultra-rápido. Doy 135/014
Tabla 11.8: Estadísticos. Convergencia en planimetría. -Doy 142/2013
Tabla 11.9: Estadísticos. Convergencia en altimetría. -Doy 142/2013
Tabla 11.10: Desplazamiento en altimetría. -Doy 142/2013
Tabla 11.11: Desplazamiento detectado con PPP. Doy 142/2013.Sesión2
Tabla 11.12: Estadísticos en planimetría en PPP tiempo real. Doy 84/2014
Tabla 11.13: Desplazamiento detectado con PPP. Doy 84/2014
Tabla 11.14: Desplazamiento detectado con PPP. Doy 80/2014
Tabla 11.15: Estadísticos de las series de datos del desplazamiento inducido horizontal
Tabla 11.16: Estadísticos de las series de datos del desplazamiento inducido vertical
Tabla 11.17: Estadísticos de los desplazamientos medidos con dobles diferencias con productos de alto-ratio. Componente horizontal.
Tabla 11.18: Estadísticos de los desplazamientos medidos con dobles diferencias con productos de alto-ratio. Componente vertical.

Acrónimos

AIUB	*Astronomical Institute of Berne*
API	*Application Programming Interface*
ARNS	*Aeronautical Radio Navigation Services*
BIH	*Bureau International de l'Heure*
BKG	*Bundesamt Für Kartographie Und Geodäsie*
BNC	*BKG Ntrip Client*
BOC	*Binary Offset Carrier*
BPSK	*Binary Phase Shift Key*
CDMA	*Code Division Multiple Access*
CNAV	*Civil Navigation*
CNES	*Centre National d'Etude Spatiales*
CODE	*Center for Orbit Determination in Europe*
CONGO	*COoperative Network for GIOVE Observation*
CS	*Comercial Service*
CTP	*Conventional Terrestrial Pole*
CWAAS	*Canada Wide Area Augmentation System*
DCB	*Differential Code Bias*
DGPS/DGNSS	*Differential GPS/ Differential GNSS*
DLR	*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*
DORIS	*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*
DOY	*Day of Year*
E-GVAP	*EUMETNET GPS water vapour*
EPN	*Euref Pernament Network*
ESA	*Agencia Espacial Europea*
ETRF	*European Terrestrial Reference Frame*
ETRS	*European Terrestrial Reference System*
EUREF	*European Reference Frame*
FCB	*Fractional Cycle Bias*
FDMA	*Frequency Division Multiple Access*
FOC	*Full Operational Capability*
FTP	*File Transfer Protocol*
GEO	*Órbita geoestacionaria*
GFZ	*Geo-forschungs zentrum Potsdam*
GIOVE	*Galileo in Orbit Validation Element*
GLONASS	*GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS	*Global Navigation Satellite System*
GNSS ICD	*GNSS Interface Control Document*
GPS Week	*Semana GPS*
GRS80	*Geodetic Reference System 1980*
GSA	*European GNSS Supervisor Authority*
HTML	HyperText *Markup Language*
HTTP	*HyperText Transfer Protocol*
IAG	*International Association of Geodesy*
IAPG	*Institute for Astronomical and Physical Geodesy*
ICDs/ISs	*Interface Control Documents / Interface Specifications*
IERS	*International Earth Rotation Service*
IFB	I*nter-frequency Bias*
IGS	*International GNSS Service*
IOD	*Issue Of Data*
IODE	*Issue Of Data Ephemerids*
IONEX	*Ionosphere Map EXchange Format*
IOV	*In-Orbit Validation*
IRC	*Integer Recovery Clocks*
IRM	*IERS Reference Meridian*
IRNSS	*Indian Navigation Satellite Systems*
IRP	*IERS Reference Pole*
ISB	*Inter-system Bias*
ISRO	*Indian Space Research Organization*
ITRF	Internacional Terrestrial Reference Frame
ITRS	*Internacional Terrestrial Reference system*
JAXA	*Japan Aerospace Exploration Agency*

JPL	*Jet Propulsion Laboratory*
LAMBDA	*Least-squares AMBiguity De-correlation Adjustment*
MAC	*Master Auxiliary Concept*
MEO	*Medium Earth Orbit*
MGEX	*Multi-GNSS EXperimenT*
MSAS	*Multifunctional Satellite Augmentation System*
NAGU	*Notice Advisory to GLONASS Users*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NGAA	*Nordic Geodetic Commission of Sweden*
NMEA	*National Marine Electronics Association*
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration*
NTRIP	*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*
OS	*Open Service*
PCO	*Phase Center Offsets*
PCV	*Phase Center Values*
PID	*Provider ID*
PPP	*Precise Point Positioning*
PPP-AR	*Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution*
PRS	*Public Regulated Service*
PRN	*Pseudo Random Noise*
QZSS	*Quasi-Zenith Satellite System*
RINEX	*Receiver Independent EXchange Format*
RNSS	*Radio Navigation Satellite Service*
RTCM	*Radio Technical Commission for Maritime Services*
RTK	*Real Time Kinematic*
RT-PPP	*Real Time Precise Point Positioning*
RTS	*Real Time Service*
SAR	*Galileo Search and Rescue*
SAR	*Search and Rescue*
SBAS	*Satellite Based Augmentation System*
SID	*Solution ID*
SLR	*Satellite laser ranging*
SOL	Safety of Live Service
SP3	*Standard Product (Orbit Format) 3*
SSR	*State Space Representation*
TCP	*Transmission Control Protocol*
TEC	*Total electron content*
TUM	*Technical University of Munich*
UCD	*Uncalibrated code delays*
UE	*Unión Europea*
UML	*Unified Modeling Language*
UPD	*Uncalibrated Phase Delays*
UTM	*Universal Transverse Mercator*
VLBI	*Very-long-baseline interferometry*
VRS	*Virtual Reference Station*
WAAS	*Wide Area Augmentation System*
WGS84	*World Geodetic System 84*
ZPD	*Zenith Path Delay*
ZTD	*Zenith Tropospheric Delay*

Capítulo 1:
Contexto multi-constelación actual de la Geodesia Espacial.

El término GNSS (Global Navigation Satellite Systems), comprende todos los sistemas de navegación por satélite que proporcionan un posicionamiento geo-espacial con cobertura global o regional. La función principal de los distintos programas de desarrollo de los sistemas GNSS seguidos desde el lanzamiento de cada constelación, es optimizar las prestaciones que ofrecen para que cumplan los requisitos necesarios de las distintas aplicaciones, y puedan complementarse como un sistema tanto de navegación como de posicionamiento preciso fiable.

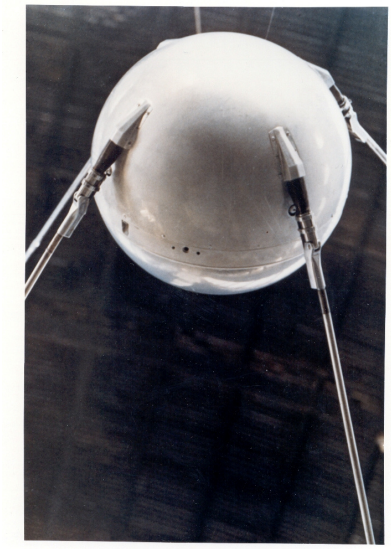


Figura 1.1: Sputnik 1 -1957
(NASA Gallery. Garber, 2009)

Se considera que a finales de la década de los 50, tuvo lugar el nacimiento de la era espacial con el lanzamiento por parte de la Unión Soviética de las misiones espaciales no tripuladas y en concreto del satélite Sputnik I, para demostrar la viabilidad de los satélites artificiales en órbita terrestre. Mediante la observación del efecto Doppler sobre los satélites de Sputnik de la señal que transmitía, podía observarse la variación aparente de frecuencia que experimentaba la energía radiada cuando existía un movimiento relativo entre la fuente que transmitía dicha energía y el receptor de la misma, siendo ese cambio de frecuencia proporcional a la velocidad relativa entre el transmisor y el receptor. De esta manera era como se determinaba la órbita del satélite. Análogamente, se planteó a partir de ese momento que la posición de un observador podría ser establecida mediante el estudio de la frecuencia Doppler de una señal transmitida por un satélite cuya órbita estuviera determinada con precisión.

Basándose en esa premisa se podía aplicar esa teoría, para dotar a los sistemas de navegación de las flotas de un mecanismo de determinación de posiciones actualizadas y precisas. De este modo surgió el sistema americano TRANSIT, que hacia la década de los 60 estuvo disponible. Las actualizaciones de posición, por aquel entonces, se encontraban disponibles con latencias de decenas de minutos y el observador debía permanecer casi estático para poder obtener información útil para posicionamiento.

El Departamento de Defensa Estadounidense (DoD) necesitaba un sistema más eficaz que el de observaciones Doppler a los satélites TRANSIT. En 1973 se empezó a desarrollar el proyecto de la constelación NAVSTAR (*Navigation Satellite Time and Ranging*), para poder disponer, de forma

continua y en tiempo real, de un sistema de navegación más fiable en un sistema de referencia tridimensional. De esta manera se desarrolló el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Hoy en día, los principales sistemas de navegación actuales son ampliamente conocidos. Es más, el mercado de la navegación por satélite ha experimentado tal explosión desde los años 90, que paralelamente se han lanzado otros sistemas similares, regionales o complementarios al sistema NAVSTAR americano GPS (figura 1.2 y 1.3).

Muestra de ello es el sistema ruso GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), totalmente operativo, tras haber estado sometido a una fase de reestructuración y de revitalización en la última década. China se encuentra ampliando su sistema de satélites dentro del sistema de navegación por satélite Beidou. El sistema europeo Galileo, promovido por la Agencia Espacial Europea, (ESA), ha estado llevando a cabo la fase de validación de sus primeros satélites, (*in orbit validation*), estando programada su plena operatividad para la presente década.

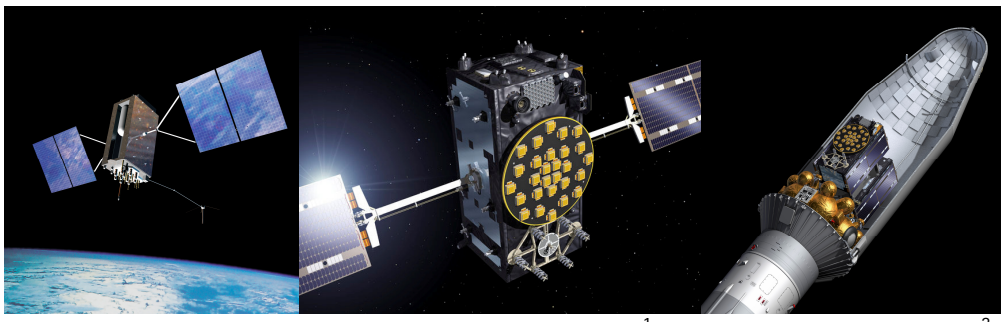


Figura 1.2: 1.Satélite GPS generación GPS III (Cortesía del NOAA[1]); 2-3. Satélites GALILEO-FOC[2], (Cortesía de la ESA - Huart, 2014).

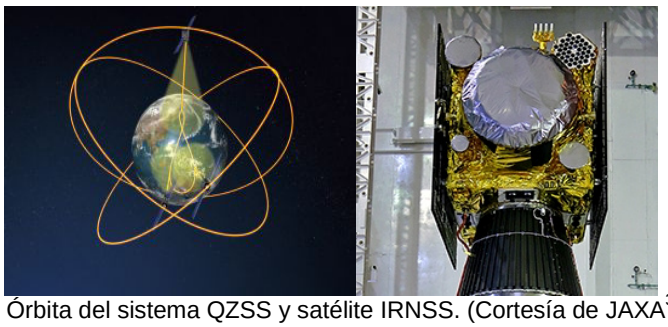


Figura 1.3: Órbita del sistema QZSS y satélite IRNSS. (Cortesía de JAXA[3] e ISRO[4])

Quasi Zenith Satellite System, QZSS, es un sistema de navegación por satélite regional japonés, para transmitir señales de aumentación del sistema GPS y complementario del mismo, así como señales propias asignadas. Su primer satélite, (de sobrenombre *Michibiki* que se traduce como "guía" o "mostrar el camino"), fue lanzado en el año 2010. Por último, el Indian Regional Navigation Satellite System, (IRNSS), es el sistema de navegación autónomo regional desarrollado por el gobierno de la India y bajo su control, impulsado siguiendo la filosofía de que el acceso a los sistemas de navegación globales por satélite controlados por un gobierno extranjero no está garantizado en situaciones hostiles. Los lanzamientos correspondientes al año 2015 pueden verse en el Anexo I, (Tabla 1).

1.1. Coyuntura actual entre los sistemas de navegación por satélite y espectro de señales

El éxito de un sistema completamente global que cumpla todos los requerimientos necesarios como sistema único, obliga a una necesaria coyuntura entre los sistemas de posicionamiento por

[1] *National Oceanic and Atmospheric Administration (United States Government)*
[2] *Full Operational Capability - Galileo Mission*
[3] *Japan Aerospace Exploration Agency*
[4] *Indian Space Research Organization*

satélite. GPS y GLONASS, son constelaciones que pueden complementarse con las denominadas aumentaciones y/o utilizarse conjuntamente con las futuras constelaciones actualmente en desarrollo, mediante las técnicas de posicionamiento conocidas. Estas son el posicionamiento diferencial o relativo, en tiempo real o post-proceso, o el posicionamiento preciso de punto absoluto normalmente denotado por sus siglas PPP[5], (Zumberge et al., 1997). Si atendemos a la coyuntura entre las constelaciones y sus fases de evolución, nos encontramos con las siguientes acepciones:

- GNSS-1: Comprende las constelaciones básicas de GPS y del GLONASS, complementadas con otros servicios de aumentación de cobertura regional (continental), que proporcionen las prestaciones necesarias para aumentar la integridad, precisión, continuidad y disponibilidad de la señal, orientada al ámbito aeronáutico. Contempla varias iniciativas de aumentación regional, entre otras: EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay System*) en Europa, (Ventura-Traveset et al., 2010), WAAS (*Wide Area Augmentation System*) para Estados Unidos, CWAAS (*Canada Wide Area Augmentation System*) en Canadá, y MSAS (*Multifunctional Satellite Augmentation System*) en Japón.

- GNSS-2: Es la segunda generación de sistemas de navegación por satélite que proporcionarán la exactitud e integridad necesaria para la navegación civil. Comprende las frecuencias L1 y L2 para uso civil y L5 para la integridad del sistema. Está integrado por las actualizaciones de los sistemas GLONASS y GPS, que entre otras cosas han desarrollada los lanzamientos del bloque de satélites con la frecuencia L2C actualmente disponible, la frecuencia L5, los satélites GPS III y GLONASS-K, el sistema Galileo, y el sistema de navegación global chino Beidou.

En realidad, las señales GNSS son una superposición de diferentes componentes, es decir son ondas electromagnéticas en una frecuencia dada, que actúan como portadoras de información, (datos de navegación), y constan de la fase portadora y del observable código. Individualmente, cada una de las señales de cada constelación GNSS viene detalladamente especificada y descrita en los correspondientes *Interface Control Documents* (ICDs) e *Interface Specifications* (ISs) para cada constelación, (GPS ICDs/ISs 2012 a,b,c, GLONASS ICDs/ISs 2008, Galileo ICDs/ISs 2010, BeiDou ICDs/ISs 2011, IRNSS ICDs 2014 etc..), y en sus actualizaciones y revisiones posteriores.

A partir de la alta estabilidad de los osciladores que llevan los satélites se produce una frecuencia fundamental dentro de la banda L, cuyo valor es de 10,23 MHz, y que sirve de fuente para las restantes frecuencias portadoras y señales utilizadas en todo el conjunto de la señal radiodifundida en cada constelación, (Hofmann-Wellenhof et al., 1992). Por lo tanto, para todas las constelaciones GNSS, los satélites transmiten señales en las distintas frecuencias portadoras, utilizando la banda L (1,5 GHz – 2,7 GHz). Para GPS, estas frecuencias se designan como L1, L2 y L5, para Galileo como E1, E5a, E5b, E6 y para GLONASS como L1, L2 y L3 etc...

Constelación	Constelación operativa	Frecuencias Portadoras
GPS	31 GPS	L1, L2, L5
GLONASS	24 operativos + 4	L1, L2, L3
Galileo	2 Giove + 4 IOV de 30 previstos	E1, E5a, E5b, E6
QZSS	1 QZSS	L1, L2, L5, LEX(6)
Beidou	5 Geoestacionarios 9 no geoestacionarios	B1,B1-2, B2, B3
IRNSS	3 de 7 : 3 geoestacionarios y 4 geosíncronos	L5 (1176.45 MHz) y S (2492.028 MHz)

Tabla 1.1: Estado de las constelaciones a fecha Marzo 2014. (http://igs.org/mgex/)

Para la constelación NAVSTAR el satélite emite sobre dos ondas portadoras L1 y L2 correspondientes a la banda L de radiofrecuencias, que son el resultado de multiplicar, respectivamente, la frecuencia

[5] *Precise Point Positioning*

fundamental de 10,23 MHz por 154 y por 120, lo que da lugar a unos valores de 1.575,42 y 1.227,60 MHz para L_1 y L_2 respectivamente, a los que corresponden unas longitudes de onda λ_1 = 19,0425 cm y λ_2 = 24,4379 cm.

La banda L5, dispone de una frecuencia para la portadora de 1176.45 MHz, ha sido diseñada para subsanar la debilidad de otras bandas del espectro para navegación. Es fundamental, para ser destinada, entre otras aplicaciones, al uso de aplicaciones *Safety of Life*, ocupando parte de la banda donde no está permitida ninguna otra señal que pueda interferir, y situada muy cercana a la banda de navegación aeronáutica con el fin de facilitar la recepción de señales de navegación por satélite a las aeronaves. La ubicación de las distintas frecuencias dentro de la banda L puede observarse en el siguiente gráfico basado en representaciones similares de El Assir, (2012) y Sanz et al., (2013).

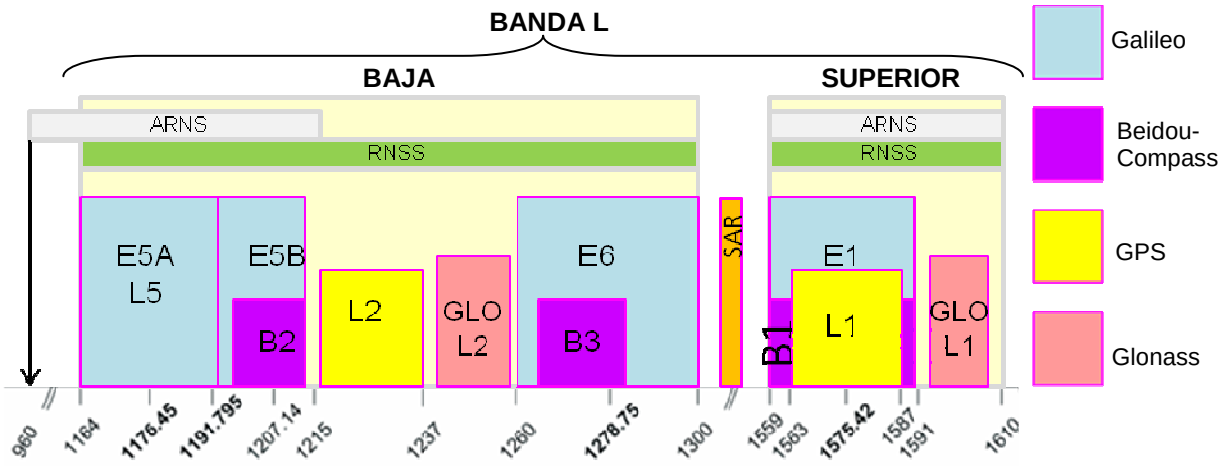


Figura 1.4: Localización de las distintas frecuencias en la banda L, y servicios SAR,[6] ARNS[7] y RNSS[8] para las distintas constelaciones de posicionamiento y navegación. Elaboración propia.

En los satélites del sistema GLONASS, se transmite por diferentes canales de frecuencia partiendo de la banda L1 (1592.9-1610 MHz) y L2 (1237.8-1256.8 MHz). Los satélites de tercera generación GLONASS, de la serie GLONASS-K, ofrecen una nueva señal, la L3, en la banda 1189-1215 MHz (L3).

El sistema Beidou/Compass ocupa dentro de la Banda L las frecuencias centrales 1561.098 MHz (B1), 1589.742 MHz (B1-2), 1207.14 GHz (B2), 1268.52 GHz (B3). Todas las señales de la constelación utilizan el modo de acceso de multiplexación CDMA *(Code Division Multiple Access)*, al igual que las señales que emiten los satélites de las constelaciones GPS y Galileo, que consiste en emitir distintos códigos en una misma frecuencia portadora.

El satélite de órbita geosincrónica *Michibiki* del sistema QZSS, está equipado con una antena de banda L primaria (L-ANT) para la transmisión L1, L2, L5 y L6, mientras que se utiliza una antena independiente para una señal de aumentación sobre la banda L1. Por último, el sistema promovido y desplegado por la India, conformado por los satélites IRNSS[9], transmite señales en la banda L5 (1.176,45 MHz), así como en la banda S (2492,028 MHz).

De acuerdo con las resoluciones alcanzadas en junio de 2000 en Estambul, GALILEO trasmite en tres bandas asignadas a los Servicios de Radio Navegación por Satélite (RNSS, en el acrónimo inglés).Las bandas asignadas son la de 1164-1215 Mhz (E5a y E5b), la banda de 1260-1300 Mhz (E6) y la banda 1559-1591 Mhz (E2-L1-E1). En algunos casos las bandas son comunes con GPS o GLONASS, pero los niveles de interferencia están dentro de los valores permitidos. Desde el punto de vista práctico la utilización de las mismas bandas, con los nuevos tipos de modulación, permite mejorar la interoperabilidad entre distintos sistemas.

[6] *Galileo Search and Rescue*
[7] *Aeronautical Radio Navigation Services*
[8] *Radio Navigation Satellite Service*
[9] *Indian Regional Navigation Satellite System*

1.1.1. Situación actual del sistema NAVSTAR GPS (NAVigation System Time and Ranging Global Positioning System).

Hablar de la situación actual del sistema NAVSTAR GPS implica, en primer lugar, detallar la evolución en el tiempo del segmento espacial. Es sabido que el sistema GPS dispone de tres segmentos claramente diferenciados, el segmento espacial, el segmento de control y el segmento usuario.

El segmento espacial, está formado por los satélites activos que se distribuyen en seis planos orbitales con una inclinación de 55° respecto al plano ecuatorial terrestre. Cada satélite completa dos órbitas cada vez que la Tierra efectúa una rotación. Los satélites disponen de diversos sistemas de identificación, tales como el número de lanzamiento o código de "ruido pseudoaleatorio" (Pseudo Random Noise PRN), que son grupos de secuencias binarios que presentan características de ruido aleatorio, número de catálogo de la NASA y designación internacional. A fin de evitar confusiones, el satélite emite un mensaje propio de navegación en el que se identifica por el número PRN. El mensaje completo consiste en una secuencia de 25 celdas de 1500 bits cada una. Como se transmite a 50 bits por segundo, el tiempo necesario para transmitir el mensaje completo es de 12,5 minutos. Adicionalmente, en el mensaje de navegación se emiten cada 30 segundos sus efemérides para conocer de manera expedita sus posición orbital, el *offset* de sus osciladores, es decir el desfase entre el estado del reloj del satélite y el tiempo GPS, información sobre la salud del satélite, y un indicador de la precisión esperada (User Range Accuracy, URA), (Hofmann-Wellenhof et al., 1992).

Existen distintas clases o generaciones de satélites GPS: Bloque I, Bloque II, Bloque II-A, Bloque II-R, Bloque II-F y por último el Bloque III. Los satélites que han ido reemplazando a los primeros que se lanzaron son los del Bloque II-R (de reemplazo) y la siguiente generación de satélites es la del Bloque II- F (Follow-on), cuya puesta en órbita se inició sobre el año 2010. Estos bloques están en un constante proceso de modernización para cumplir los requisitos de los sistemas GNSS. El bloque IIR-M, tenía la finalidad de emitir la 2ª señal civil (L2C) sobre la frecuencia L2, a partir del año 2005, mejorando la robustez y velocidad de la readquisición de la señal L2 en caso de pérdida y el rastreo de satélites de poca elevación. La señal L2C, destinada a la transmisión de información para aplicaciones civiles permite mayor precisión de posicionamiento, y actúa de forma redundante. El bloque II-F supone la activación de la 3ª señal civil (L5), y en sus satélites adicionalmente se ha mejorado el rendimiento de los osciladores.

Como ya se ha comentado, la fuente de frecuencia, está controlada por relojes atómicos. Los relojes del Bloque I eran de menos fiabilidad, ya que algunos eran de cuarzo, con precisiones de 10^{-10}. Los del Bloque II disponen de relojes de rubidio y de cesio, cuya estabilidad es del orden de 10^{-13} - 10^{-14} . Los satélites de última generación además de relojes de rubidio, pueden utilizar osciladores atómicos de hidrógeno, conocidos como "máseres" de hidrógeno, con precisiones del orden de 10^{-14}-10^{-15} (Marquis y Shaw, 2011).

Sobre las frecuencias portadoras L_1 y L_2 se modula el código P (Precise o Protected Code), sobre L_1 el código C/A (Course/Adquisition o Clear/Access), sobre la L_2 la señal L2C que corresponde al Código Civil transmitido por la portadora L2, presente en varios satélites operativos proporcionando más robustez a la L2.

Banda	Señal portadora	Canales	Uso Actual	Uso Futuro
L1	1575.42 MHz (154*f0)	En fase (I)	Código L1P (P1)	Código L1P (P1) y M de uso militar
		En cuadratura (Q)	Código C/A (C1)	Señal L1 con código C/A(C1) de uso civil
L2	1227.60 MHz (120*f0)	En fase (I)	Código L2P (P2)	Código L2P(P2) y M de uso militar
		En cuadratura (Q)	Código L2C (C2)	Señal L2C con código C/A de uso civil
L5	1176.45 MHz (115*f0)	En fase (I)	I5	Señal piloto, seguridad , búsqueda y rescate
		En cuadratura (Q)	Q5	Señal de datos, seguridad , búsqueda y rescate

Tabla 1.2: Tablas de frecuencia para señales GPS.

Básicamente, los códigos fueron diseñados como grupos de secuencias binarias de información, que se incorporaban a las fases portadoras como modulaciones binarias bifásicas, es decir, como cambios de

fase, de 0º para representar un cero binario, o de 180º, para representar un 1 binario. La modulación se efectúa de acuerdo con algoritmos polinómicos característicos para cada satélite, de manera que con la información que transportan, entre otras cosas, se identifica a cada satélite en particular. El sistema NAVSTAR utiliza la técnica de acceso de multiplexación denominada *Code Division Multiple Access* (CDMA), citada anteriormente.

En el año 2014, comenzó a radiodifundirse los mensajes de navegación de uso civil (CNAV[10]) sobre la L2C y la L5 para facilitar datos actualizados al segmento de control GPS.

Por último, la señal L1C, es la cuarta señal de uso civil diseñada para los satélites correspondientes al Bloque III GPS. Esta señal está compuesta de dos códigos: el código L1C, sin mensaje de datos, y el código L1CD o CNAV2, que transmite el mensaje de navegación.

Como novedad, ambas señales van moduladas por una técnica diferente de las usuales en GPS, denominada *Binary Offset Carrier Modulation* (BOC), sobre la portadora L1 y están diseñadas para facilitar la interoperabilidad entre el sistema GPS y otros sistemas de posicionamiento globales como Galileo o de ámbito regional. Las modulaciones de las señales de GPS utilizadas hasta ahora son del tipo BPSK (*Binary Phase Shift Key)*. Son modulaciones digitales que se basaban en el cambio de fase de la portadora cuando cambia el dato que le llega, con sólo dos estados que se corresponden con el valor de un bit: "0" y "1".

La eficiencia de la modulación BOC frente a la modulación anterior, reside en una mayor robustez frente a efectos *multipath* y un mayor rechazo de interferencias de banda estrecha. Adicionalmente, es más resistente al ruido que otras modulaciones. También permite una compartición adecuada del espectro en la frecuencia L1, (Lezaeta et al., 2011), es decir mediante este tipo de modulación se optimiza el uso de la banda asignada al poder convivir varias señales diferentes de distintas constelaciones.

La modulación BOC se emplea en los sistemas de navegación por satélite de nueva generación, y es un caso particular de la modulación binaria donde se emplean señales que contienen una secuencia de códigos binarios (Gómez, 2013). Una señal modulada con la técnica BOC consiste en una portadora sinusoidal, un código PRN multiplicado por una sub-portadora y la secuencia de datos. La modulación BOC proviene de la modulación BPSK introduciendo la sub-portadora.

Segmento de control

El sector de control es el encargado de realizar el seguimiento y control de operatividad de las órbitas de los satélites del sector espacial, así como las de sus relojes u osciladores. La información obtenida de este seguimiento es enviada a una denominada "Estación principal", en la que se calculan las órbitas aproximadas de los satélites. Los cálculos realizados y las correcciones de los relojes de los satélites están introducidos en el mensaje de navegación.

Es posible usar efemérides y modelos de estados de reloj calculados "a posteriori", como productos de los distintos Centros de Análisis existentes a nivel global y del *International GNSS Service* (IGS). Estos productos son obtenidos de forma muy exacta con diferentes latencias (tiempo real, broadcast, ultra-rápidos, rápidos y finales).

Segmento del usuario

El sector del usuario está constituido por todos los equipos utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites y empleados para el posicionamiento, ya sea empleando la técnica diferencial o el posicionamiento absoluto preciso (PPP), estático o cinemático, navegación o para la determinación del tiempo con precisión.

Todos los receptores llevan un oscilador de cuarzo muy estable, del orden de 10^{-9}, cuya misión es generar una frecuencia fundamental de la que se derivan todas las demás que son necesarias en el proceso de medición.

[10] *Civil Navigation*

1.1.2. El sistema GLONASS (Global Navigation Satellite System)

El sector espacial

A principios de la década de los 70, el Ministerio de Defensa Ruso desarrolló el sistema Global *"Naya Navigatsionnaya Sputnikova"* o Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS), con similares objetivos y finalidades que el GPS y diseñándolo con una estructura parecida a la constelación americana, aunque no idéntica. En el año 1993, oficialmente el Gobierno Ruso transfirió el programa GLONASS a las Fuerzas Espaciales Militares Rusas (RSF). Este organismo es el responsable del desarrollo de satélites GLONASS, de su mantenimiento y puesta en órbita y opera en colaboración con el IAC (*Information-Analytical Centre*), encargado de proporcionar la información actualizada sobre la constelación.

Si bien, a partir del año 1999 se comenzó a intuir un posible colapso del sistema a causa de la situación financiera y la inestabilidad del gobierno ruso, lo cual hacía peligrar la preservación del sistema y el futuro del mismo, en este último tiempo el sistema ha aumentado el número de satélites operativos hasta prácticamente completar la constelación. El sistema GLONASS, al igual que el NAVSTAR, estaba preparado para ser operativo con 24 satélites, pero en tres planos orbitales de 8 satélites cada uno e inclinación de 64,8º respecto al Ecuador, y a una altitud de 25000 km. Con la constelación completa, se garantiza una visibilidad de un mínimo de 5 satélites en todo el mundo con adecuada geometría, es decir, la constelación GLONASS proporciona una cobertura de navegación continua y global.

Este sistema ha estado sometido a un proceso de continua modernización, en el cual entre 2007 y 2008 se llevó a cabo el lanzamiento de satélites del programa GLONASS- K y un cambio del sistema de referencia en 2007 de PZ 90 a PZ 90.02, compatible con el marco global denominado *International Terrestrial Reference Frame*, (ITRF). Actualmente se ha diseñado tres señales civiles en los satélites GLONASS-K, (L1, L2 y L3), y se ha llevado a cabo el lanzamiento de la tercera generación de satélites GLONASS -M.

En cuanto al mantenimiento y satélites de reemplazo del sistema GLONASS, existe un programa gubernamental que contempla su continuidad. Entre 2012 y 2020 está prevista la fabricación de al menos 22 satélites GLONASS-K. En concreto, se espera que esta generación de satélites pueda operar por 10 años, lo que supone una mejora en la esperanza de vida de siete años de satélites anteriores, (Marín, 2014).

Dentro de la misión GLONASS- K, los del grupo GLONASS- K1 se encuentran reemplazando a los satélites más antiguos de GLONASS- M. Dentro de esta misión, los satélites también llevan un transpondedor COSPAT- SARSAT. Estos transpondedores se utilizan para ayudar a las operaciones de búsqueda y rescate en todo el mundo a través de la retransmisión de señales de socorro de usuarios equipados con los transmisores apropiados, así como otra información relacionada.

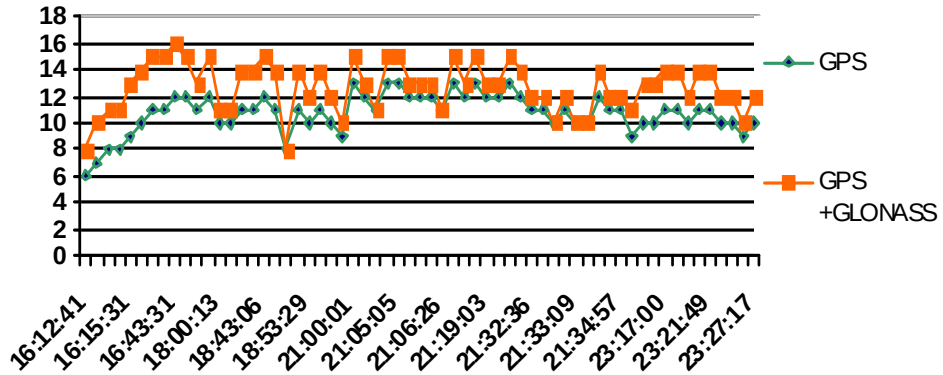


Figura 1.5: Horizonte de satélites GPS+GLONASS rastreado en la red GNSS de Valencia. Doy 165/2013, (Capilla et al., 2008)

Los satélites de GLONASS se diseñaron para utilizar la técnica de acceso FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), es decir, cada satélite emite una frecuencia diferente, de manera que todas las

frecuencias están separadas por un intervalo de 0.5625 MHz, permitiendo de esta forma que se pueda transmitir el mismo código para todos ellos, ya que los satélites quedan identificados por su frecuencia y no por el PRN de su código como en el GPS (Kaplan, 1996). Sin embargo, por razones de interoperabilidad, en Ipatov y Shebshaevich (2010), y otros estudios, se ha planteado ya para GLONASS efectuar el acceso a las señales por la técnica que utilizan los sistemas GPS y en el sistema Galileo, denominada CDMA *(Code Division Multiple Access)*.

El segmento de control.

El Sector de Control está formado por un Sistema Central de Control (SCC) en la región de Moscú y una red de estaciones de seguimiento y control (Command Tracking Stations, CTS), compuesto por cinco estaciones de control y telemetría, tres equipos de navegación supervisores, un sistema sincronizador central y un sincronizador y supervisor de la escala de tiempo a bordo. Las estaciones supervisoras están distribuidas uniformemente por toda la antigua Unión Soviética, dando una cobertura global. Al igual que el de GPS, debe seguir y vigilar el estado de sus satélites, determinar las efemérides y errores de los relojes de los satélites. Además también deben actualizar los datos de navegación de los satélites. Estas actualizaciones se realizan dos veces al día.

Las estaciones de control (CTSs), realizan el seguimiento de los satélites y almacenan los datos de distancias y telemetría a partir de las señales de los satélites. La información obtenida en las estaciones es procesada en el Sistema Central de Control (SCC) para determinar los estados de las órbitas y relojes de los satélites, y para actualizar el mensaje de navegación de cada satélite. Esta información es enviada a cada satélite por medio de las CTSs. El valor del error medio cuadrático en la determinación de las órbitas para GLONASS es de aproximadamente 10 m.

Las estaciones de control de las Fuerzas Espaciales Rusas publican unos boletines, llamados NAGUSs[11] para los usuarios GLONASS con noticias, estado y anomalías del sistema, para así anunciar la no operatividad de alguno o varios satélites.

El sector usuario

Al igual que en el sistema GPS está constituido por todos los equipos utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites y empleados para el posicionamiento. Existen dos generaciones de receptores GLONASS. La primera generación contenía 1,2 y 4 canales. Los de segunda generación son más compactos y ligeros, incluyendo 5, 6 y 12 canales, usados para aplicaciones civiles y capaces de operar con las dos constelaciones GPS/GLONASS.

1.1.3. El programa europeo GALILEO

A finales de la década de los 90, los países que integran la Unión Europea (UE) y la Agencia Espacial Europea (ESA), pusieron en marcha una iniciativa histórica dentro de la Europa Comunitaria, al comenzar a gestionar el proyecto Galileo consistente en una nueva constelación de satélites enteramente europea y bajo control europeo, pero con cobertura global y totalmente compatible e interoperable con otros sistemas GNSS. Galileo a diferencia de GPS y GLONASS estará bajo control civil (European Comission, 1999). Por otro lado, supondrá una optimización en disponibilidad de satélites y en rendimiento. Este rendimiento, teóricamente, se plasmará en un menor tiempo para la resolución de ambigüedades de la portadora, al disponer de más observables y señales. Incluso aumentará el rango de distancia tolerada a estaciones fijas para posicionamiento preciso en tiempo real.

Formalmente Galileo arranca en Diciembre de 1999, cuando la Comunidad Europea inicia la fase de definición con algunos proyectos dedicados a estudiar aspectos generales de Galileo. A partir de entonces, la ESA acomete la primera fase de Galileo para estudiar los requisitos y elaborar las especificaciones iniciales de la infraestructura necesaria para el proyecto Galileo.

[11] *Notice Advisory to GLONASS Users*

Por definición el sistema Galileo se encuentra estructurado en distintos agentes (terrestre para control, espacial, usuario), y distintas componentes, desde el punto de vista de cada una de las funciones para las que están orientadas.

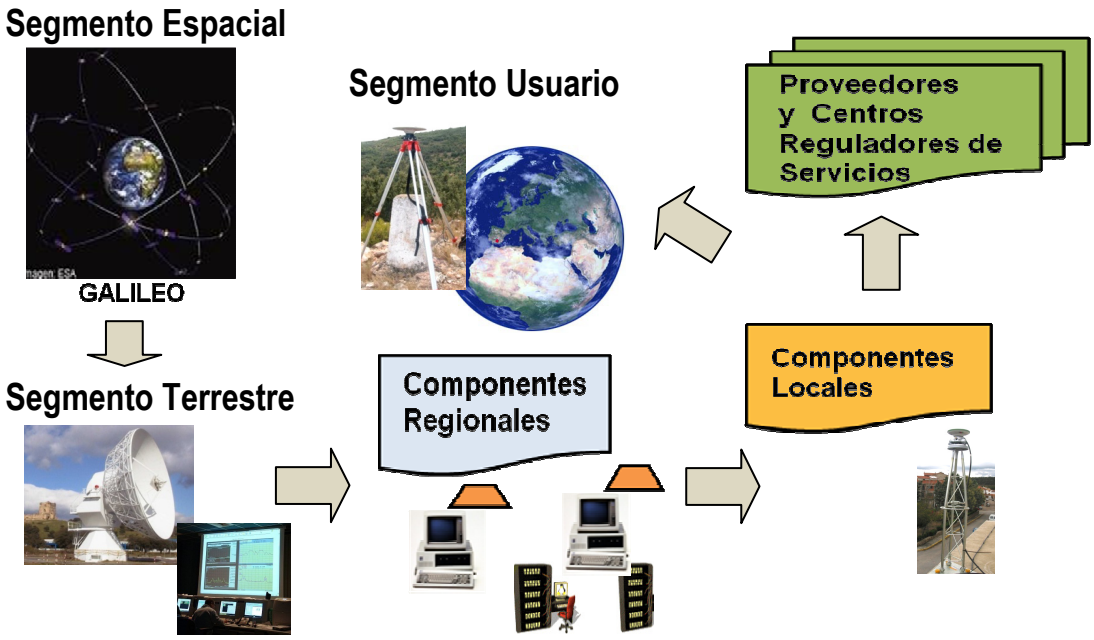


Figura 1.6: Agentes en la Arquitectura de Galileo. (Elaboración propia basada en Capilla, 2009)

Figura 1.7: Integración para la lanzadera (Cortesía de la ESA- CNES-ARIANESPACE-Baudon, 2014)

En lo que respecta al segmento espacial los dos primeros satélites experimentales de Galileo fueron lanzados desde la base de Baikonur en Kazajistán, esta primera misión fue denominada *Galileo In orbit Validation Element*, y sus satélites nombrados con los acrónimos GIOVE-A (2005) y GIOVE-B (2008). La finalidad de la misión era analizar la tecnología desarrollada para los vehículos espaciales, así como las frecuencias asignadas.

Una vez completada esta primera fase, en octubre de 2011, se inició la misión *In Orbit Validation IOV*, en la que se lanzaron los dos siguientes satélites y posteriormente, el 12 de octubre de 2012, se alcanzó un número de 4 satélites *IOV* en órbita.

El objetivo de la misión *IOV* era evaluar la funcionalidad para la navegación útil de Galileo. Asimismo, se pretende asegurar las solicitudes de frecuencias de Galileo, caracterizar el entorno de radiación de la órbita media terrestre que los satélites operativos ocuparán y permitir la experimentación con las señales en vivo. Los satélites están diseñados para poner en activo el generador de microondas Máser Pasivo de Hidrógeno (PHM), el más exacto jamás lanzado en órbita.

Los satélites restantes son puestos en órbita a intervalos regulares para llegar a plena capacidad operativa una vez que la fase de validación *IOV* se completa, (De Smet, 2013), dentro de la misión *Full Operational Capability (FOC).*

Como es conocido, dos satélites de la misión *Full Operational Capability*, lanzados en 2014, alcanzaron órbitas excéntricas con semi-ejes mayores con una longitud de 3300 km inferior a lo previsto y con una inclinación de unos 49,7 grados, (en lugar de una altura orbital de 23222 kilómetros

por encima de la superficie de la Tierra e inclinación de 56 grados). Esto provocó que los dos satélites, se movieran entre alturas en el apogeo de unos 25900 kilómetros y alturas en el perigeo de alrededor de 13800 kilómetros. A día de hoy se ha podido alcanzar una solución plausible, por parte de la ESA, con el fin de que los satélites fueran útiles para posicionamiento y navegación. De hecho el perigeo del satélite Galileo 5, (Galileo FOC-FM1), fue rectificado a finales del año 2014, para la posición en el perigeo desde los 13800 kilómetros de altitud hasta los 17230 kilómetros, realizando el cambio correspondiente en la excentricidad orbital.

Teóricamente en la nueva órbita rectificada de estos dos satélites es posible incrementar la visibilidad del satélite, y favorecer que la señal sea menos sensible al efecto Doppler, u otras afecciones debidas a la exposición a determinados niveles de radiación debido a la altura en que habían sido ubicados inicialmente, (Navarro-Reyes, 2014).

La constelación completa de satélites Galileo constará de tres planos orbitales inclinados en un ángulo de 56 grados con respecto al ecuador. Cada satélite tarda 14 horas aproximadamente en completar una órbita alrededor de la tierra, en cada plano orbital habrá un satélite de repuesto, con un total de 27 satélites operativos y 3 de repuesto. Los lanzamientos inminentes pueden verse en el Anexo I, (Tabla 1).

La siguiente figura muestra parte de la estructura de los satélites del segmento espacial de la constelación europea Galileo, basada en los vehículos de Galileo pertenecientes a la fase *"In orbit Validation" (IOV)*. El diagrama elaborado a continuación se basa en Burbidge (2007) y Schönemann (2014), donde se esquematiza y diferencia claramente las componentes del oscilador de los satélites de Galileo, que consta del Máser de Hidrógeno (PHM) y el generador de frecuencia estándar atómico (RAFSs) que genera la frecuencia fundamental de 10.23 Mhz, conformando la Unidad de control del oscilador. En segundo lugar, la unidad de generación de frecuencias y conversión sintetiza la frecuencia fundamental a 122.76 MHz, y la unidad de generación de señales Galileo produce las señales de navegación L1 (E1), E5, E6…., que son finalmente amplificadas y filtradas para ser transmitidas por la banda L de radiofrecuencias.

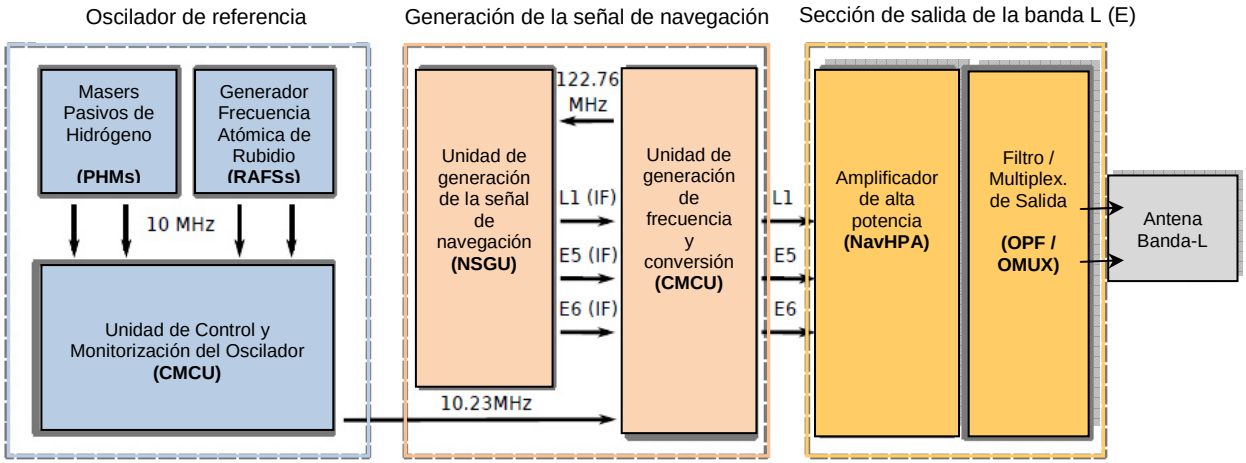


Figura 1.8: Componentes de satélites IOV-Galileo. (Elaboración propia)

Los satélites Galileo hacen uso de la técnica de acceso CDMA[12] lo que significa mantener el mismo tipo de acceso que GPS, pero diferente al GLONASS que es FDMA, consistente en una división de frecuencias por satélite. En el caso de Galileo se utilizan los códigos PRN propios de cada satélite, que deben ser identificados por los receptores.

La infraestructura en tierra de Galileo constituye lo que se denomina el segmento terrestre que consta de:

- Segmento terreno principal, dedicado a la gestión de la constelación y al control de la navegación, sincronización y determinación orbital.

[12] *Code Division Multiple Access*

- Segmento terreno complementario, dedicado a la determinación y difusión de los parámetros de integridad del sistema para aplicaciones críticas de seguridad.

Además, diseminadas por toda la geografía mundial existirán las componentes regionales, (figura 1.6), constituidas por estaciones receptoras que permitirán monitorizar el sistema y determinar su integridad a otra escala, o sobre áreas específicas fuera de Europa (http://www.seguridadaerea.gob.es), y el sistema EGNOS actualmente prestado a través de satélites geoestacionarios, u otros elementos como estaciones de enlace, o enlaces con referencias externas de tiempo constituidos por osciladores de gran precisión. Por último, Galileo contempla las componentes locales y los proveedores y centros reguladores de servicios, para aplicaciones de altas prestaciones, servicios de valor añadido o que requieran más precisión, que podrán consistir en servicios comerciales de correcciones, soporte al usuario, certificaciones, licencias etc...

Una de las principales ventajas de Galileo frente a otros sistemas es su capacidad de ofrecer una señal garantizada de elevada precisión para servicios de alta calidad. Abre posibilidades completamente nuevas e innovadoras para aplicaciones móviles y de precisión, como por ejemplo, en los mercados del transporte y las telecomunicaciones, que mejorarán los rendimientos de las actividades basadas en ellas. Galileo ampliará los servicios de búsqueda y rescate en tiempo real, basados en balizas automáticas que señalizan el lugar en que ocurre la emergencia mejorando las operaciones de rescate a nivel global en cooperación con el sistema mundial COSPAS –SARSAT.

Las prestaciones están planificadas para ofrecer un conjunto de cinco servicios básicos, (De Smet, 2013), del que podrán derivarse todas aquellas aplicaciones que la tecnología y la ingeniería sean capaces de desarrollar, para un mercado como es el de la navegación y el posicionamiento en expansión continua.

Figura 1.9: Servicios de Galileo. (Elaboración propia, Capilla, 2009)

Hay cinco tipos de servicios contemplados por Galileo: datos de navegación básicos, datos de integridad, datos comerciales, datos para el Servicio Público Regulado y datos para el Servicio de búsqueda, auxilio y rescate.

- *El Servicio Abierto (Open Service: OS),* estará cubierto mediante tres señales de navegación de diferente frecuencia. El Servicio Abierto será gratuito para todos los usuarios provistos de un

receptor Galileo compatible y suministrará información de posición y tiempo. Este servicio está pensado para aplicaciones de uso masivo.

- *Servicio Comercial (Comercial Service: CS),* es un servicio de pago que proporcionará información de posición y tiempo para productos profesionales y comerciales de valor añadido. Aunque podrá utilizar una tercera portadora, para aplicaciones de precisión de área local que exigen resolver ambigüedades de ciclo. Contempla la posibilidad de enviar una señal de datos cifrada si así lo demandara algún servicio y una señal de enlace para aplicaciones de posición y redes de comunicaciones.

- *Servicio relacionado con la seguridad para la vida* (Safety of Live Service: SoL), este servicio proporciona una señal de integridad, que puede estar cifrada, ligada a un tiempo límite de alarma. Este servicio permitirá, entre otras aplicaciones, el aterrizaje de precisión.

- El *Servicio Público Regulado* (PRS, en su acrónimo inglés). La naturaleza de las señales PRS, implican un servicio robusto y resistente a las interferencias o cualquier otra agresión accidental o deliberada. La información PRS será cifrada. El Servicio PRS se distribuye a través de frecuencias dedicadas, separadas de las utilizadas para los otros servicios y estará bajo control gubernamental. Aunque las aplicaciones y los usuarios no están todavía definidos pueden establecerse los siguientes grupos:

  -Aplicaciones públicas dedicadas a la seguridad, como policía, protección civil, aplicaciones judiciales (control o seguimiento de personas, etc.).
  -Aplicaciones en sectores críticos como energía, transporte y comunicaciones.
  -Actividades económicas o industriales consideradas de interés estratégico para Europa.

- *Servicio de búsqueda, auxilio y rescate* (SAR, en su acrónimo inglés), este será un servicio en beneficio público general accesible a todos los ciudadanos del mundo que se encuentren en una situación comprometida. Los datos SAR utilizados para confirmación de recepción del mensaje de petición de ayuda y coordinación de los equipos de rescate, estarán embebidos en los datos del Servicio Abierto (OS) y emitidos entre las bandas E1 y E6.

Algunos servicios, como el SoL están sujetos a redefiniciones con el fin de buscar mayor interoperabilidad con otras soluciones existentes o adaptarse al desarrollo y prestaciones que la constelación GALILEO va proporcionando gradualmente (De Smet, 2013).

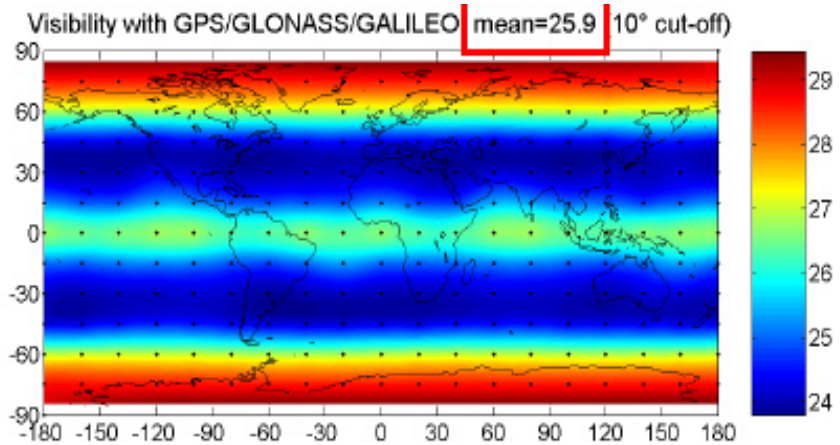


Figura 1.10: Horizonte global previsto de satélites GNSS. (Imagen cedida. Svehla et al., 2008)

Por último, y no por ello menos importante, es necesario resaltar que por razones de compatibilidad en relación con la seguridad, de prevención de interferencias y de adecuación del rendimiento de los sistemas GNSS, se ha acordado utilizar modulaciones como la basada en BOC, *(Binary Offset Carrier)*, explicada anteriormente. Este tipo de modulación es importante para la co-existencia de señales de distintas constelaciones en una misma banda, como sucede por ejemplo en la frecuencia L1. Por ejemplo, el servicio abierto, comercial y el destinado a la seguridad de la vida estarán implementados sobre esta modulación o derivados de ella mediante técnicas como la multiplexación (MBOC)[13].

[13] *Multiplexed Binary Offset Carrier*

1.1.4. El sistema Beidou.

El desarrollo del sistema de navegación y posicionamiento Beidou es una iniciativa de la República Popular China. Si bien durante su desarrollo el servicio todavía se encontraba restringido y limitado al área de cobertura correspondiente al este del continente asiático, Beidou está diseñada para ser una constelación completa para el año 2020 y contará con un número de satélites en torno a 30-35. Inicialmente, la constelación de satélites de navegación tiene un tiempo de vida previsto de 8 años, estando previsto que sea incrementado hasta 11-12 años con las siguientes generaciones de satélites.

El programa BeiDou comenzó en 1983 con una propuesta del científico Chen Fangyun para desarrollar el sistema de navegación regional denominado Twinsat System, empleando dos satélites geoestacionarios, (Kramer, 2002). La misión fue testeada en 1989 en una prueba con dos satélites en órbita. Esta prueba mostró que la precisión del sistema de Twinsat sería comparable a la estadounidense GPS (Sistema de Posicionamiento Global). A partir de ese momento, en 1993, el programa BeiDou-1 inició oficialmente su diseño, produciéndose el lanzamiento experimental de los dos primeros satélites de navegación Beidou en el año 2000.

Aunque el programa fue iniciado por las fuerzas militares de China, es el Centro de proyectos de navegación por satélite de China fundado en el año 2006, el que se hace cargo de la investigación, la creación y la gestión del sistema regional para la navegación.

Ya entrados en el siglo XXI, China se encuentra en una fase de desarrollo muy avanzada de su constelación de satélites de navegación. El sistema inicialmente fue denominado como Compass Navigation Satellite System o conocido por su traducción en el lenguaje nacional como misión Beidou-1. Posteriormente, el programa ha evolucionado encontrándose en la fase BeiDou-2 (Jianyu, 2007). El nombre de la misión corresponde a la denominación en Chino de la constelación Osa Mayor.

La misión Beidou-2 consiste en una constelación de 35 satélites, de los cuales 5 satélites son de órbita geoestacionaria (GEO) y 30 de órbita terrestre media (MEO), que ofrecerán una cobertura completa del planeta.

Sistema	COMPASS
País	China
Altura orbital	21.150 km
Periodo	12.63 horas (12 h 38 m)
Número de satélites	5 sat. - órbita geoestacionaria (GEO) 30 sat.- órbita terrestre media (MEO)
Estado	15 satélites operativos, 20 satélites adicionales en planificación

Tabla 1.3: Características de la constelación COMPASS (http://www.igs.org/mgex/ . Visitado: Junio 2014)

De acuerdo con la Agencia Nacional China del Espacio, CNSA, y la Oficina China de Navegación por Satélite, CSNO, el desarrollo del sistema de navegación se ha desplegado en tres fases, (CSNO, 2011):

1) Fase-I: Es el Sistema de Demostración BeiDou de navegación por satélite, establecido en el período 2000-2003. El sistema de navegación BeiDou experimental consistió en 3 satélites.

2) Fase-II: Es el sistema de satélites de navegación regional BeiDou que cubre China y las regiones vecinas que se inicia en el año 2012.

3) Fase-III: Es la fase de establecimiento completo para proporcionar un servicio global previsto para el año 2020.

En el año 2006 se propuso asignar una parte de las señales de Compass / Beidou en la misma frecuencia prevista para el PRS de Galileo (Servicio Público Regulado), lo que entraba en conflicto con

el diseño de las radiofrecuencias de la constelación Europea.

No obstante, los promotores gubernamentales de Beidou, se unieron al Comité de las Naciones Unidas para los sistemas GNSS (ICG), ingresando en el Forum de proveedores de sistemas de navegación celebrado por primera vez en el año 2007 en Bangalore, India. Los participantes del Forum incluían además a la Unión Europea, responsable de los programas Galileo y EGNOS, la India que desarrolla los sistemas IRNSS- GAGAN, Japón que lleva a cabo la misión QZSS y MSAS, Rusia encargada del sistema GLONASS y EE.UU. responsable del sistema GPS. El objetivo del Forum es fomentar la compatibilidad de los servicios / señales y la interoperabilidad entre los diversos sistemas de navegación para un mejor servicio a la comunidad de usuarios, y así poder evitar posibles conflictos en la asignación de frecuencias.

A falta de asignación oficial del número de vehículo espacial (SVN), los satélites de Beidou tienen asignada una numeración para ser catalogados internacionalmente basado en la secuencia de lanzamiento de la nave espacial respectiva. Asimismo, dispone de un número PRN asignado, basado en la comparación de los códigos transmitidos con las secuencias de código publicadas en el Interface Control Document de BeiDou.

Sobre las tres bandas portadoras, B1, B2, B3, se modula el código o servicio, (abierto o autorizado), y el mensaje de navegación NAV con dos posibles formatos D1 NAV o D2 NAV. El primero contiene la información fundamental de los satélites como son el almanaque, los parámetros del modelo ionosférico, correcciones del reloj, salud del satélite o el desplazamiento de tiempos con otros sistemas, y el segundo, aparte de la información fundamental, aporta información de servicios de aumentación.

Canal	Frecuencia	Servicio
B1 (I)	1561.098 MHz	Abierto
B1 (Q)	1561.098 MHz	Autorizado
B2 (I)	1207.14 MHz	Abierto
B2 (Q)	1207.14 MHz	Autorizado
B3	1268.52 MHz	Autorizado

Tabla 1.4: Frecuencias emitidas en las portadoras en la constelación Beidou (Peñafiel et al., 2014)

En Svehla (2008), se analiza el hipotético escenario resultado y el impacto teórico en precisión por la presencia de las constelaciones GPS/GLONASS/GALILEO/BEIDOU en un posicionamiento absoluto con la técnica Precise Point Positioning, (Zumberge et al., 1997).

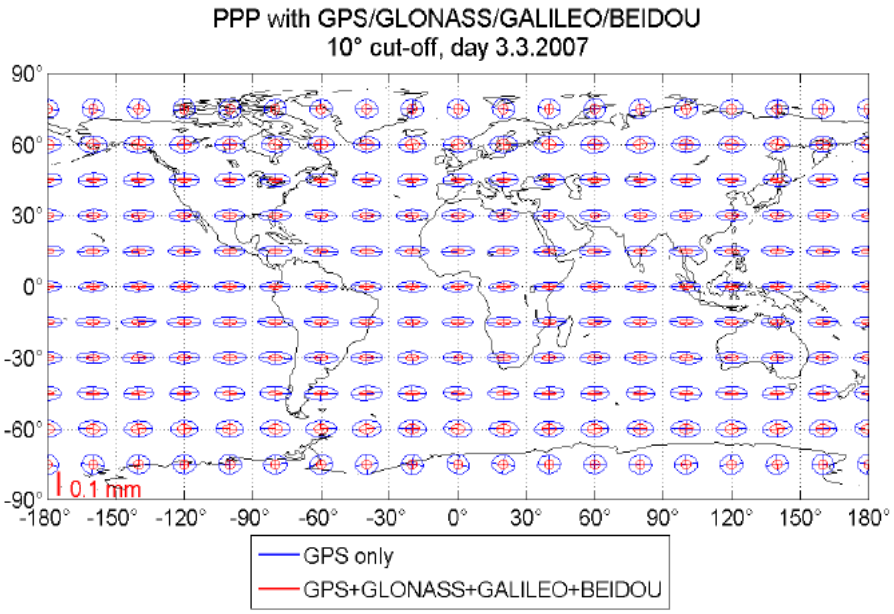


Figura 1.11: Simulación PPP estático con GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU. (Imagen cedida, Svehla, 2008)

En Beidou se proporcionan dos tipos de servicios. Uno de ellos es el servicio abierto, que está diseñado

para proporcionar a los usuarios una precisión de navegación de 10 metros, precisión de velocidad en 0,2 metros por segundo y precisión para la sincronización de tiempo dentro de 50 nanosegundos. El otro es el de servicio autorizado, que ofrecerá posicionamiento y velocidad de precisión, tiempos, servicios de comunicación más seguros e información de integridad para los usuarios autorizados.

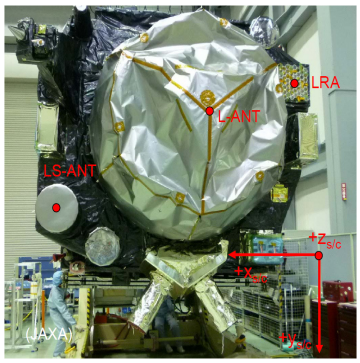
1.1.5. Quasi Zenith Satellite –System (QZSS)

El Sistema por Satélite *cuasi-cenital* japonés (QZSS) es un sistema de corrección de señales de navegación por satélite propuesto para uso complementario del GPS en Japón, actualmente el principal impulsor y distribuidor de información de su estado de desarrollo es la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA).

En 2002 el gobierno japonés, autorizó el inicio de los estudios para desarrollar la misión, al equipo de empresas ASBC (Advanced Space Business Corporation). Este equipo estaba formado por Mitsubishi Electric Corp., Hitachi Ltd., y GNSS Technologies Inc.

El diseño inicial consiste en tres satélites situados en órbita muy elíptica. Con una elevación mayor de 70º durante la mayor parte del día, y de 60º durante todo el día. También está previsto que sea compatible con Galileo además de con GPS. En el segmento de tierra, están previstas 9 estaciones de seguimiento. Al menos un satélite del sistema se posiciona en torno al zenit la mayor parte del tiempo, de ahí el adjetivo *"cuasi - cenital"*.

El diseño del primer satélite, QZS-1 comenzó, oficialmente, en noviembre de 2006. La revisión de la interfaz y el comienzo de la fabricación del hardware del vehículo espacial, se produjo en junio de 2007. Los satélites se denominan QZS-1, QZS-2 y QZS-3, de los cuales QSZ-1 (llamado *Michibiki*) fué lanzado en Septiembre de 2010. QSZ-2 y QSZ-3 serán lanzados en años posteriores.



El satélite QZS-1 sigue una órbita geosincrónica inclinada, y está dotado de una antena para las frecuencias de la banda L (L-ANT en la imagen) y otra antena diferente LS-ANT, para la emisión de una señal L1- SAIF, acrónimo que hace referencia a la emisión de mensajes de aumentación con parámetros de integridad y precisión submétrica (Sakai et al., 2009). Esta señal para aumentación mejora la posición del usuario en el rango de 1 metro y se basa en la técnica de área amplia (*wide-area*) para GPS. Los satélites están dotados de una matriz retroreflectora láser (LRA), para permitir mediciones de distancia precisas utilizando la técnica *Satellite Laser Ranging*.

Figura 1.12: QZSS-1. (Cortesía de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, 2014)

El concepto de diseño de QZSS difiere de las implementaciones de los sistemas GPS, GLONASS y Galileo porque los requisitos de Japón son muy diferentes en términos de servicio, área de cobertura, y, más importante aún, la política de desarrollo espacial nacional les subyace (Inaba et al., 2007). El objetivo de QZSS es proporcionar un medio de mejora y referencias seguras de navegación para ser utilizado en todo el país para muchas aplicaciones en todas las facetas de la tecnología moderna. En ese sentido, una ley fue aprobada por el gobierno japonés en Agosto de 2007, para regular el uso y la aplicación del servicio.

QZSS ocupa una ubicación única dentro del espectro de los sistemas de navegación por satélite y está pensado también como aumentación de otro sistema de navegación por satélite (en este caso, GPS), pero no se limita a una transposición de señales emitidas desde tierra a través de un satélite de comunicaciones. En lugar de ello, los satélites QZSS ocupan órbitas elípticas inclinadas geoestacionarias con visibilidad alta en una elevación óptima en el área de cobertura. Está previsto que la constelación QZSS, cuando esté terminada, funcione más como GPS, con satélites independientes operativos o los satélites de navegación Galileo, que como un simple sistema de aumentación, (Pullen, 2007), con una constelación más densa que la inicial diseñada (hasta 7 satélites).

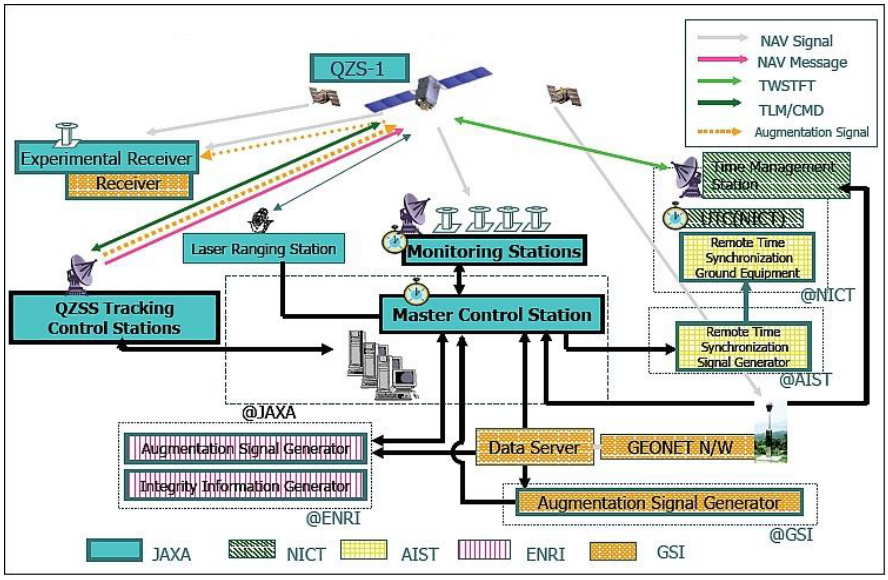


Figura 1.13: Vista esquemática del funcionamiento de QZSS (Quasi-Zenith Project Team, 2009)

1.1.6. Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)

IRNSS es un sistema de navegación autónomo regional por satélite desarrollado por la ISRO (Organización de Investigación Espacial de la India). El Gobierno de la India aprobó el proyecto en mayo de 2006, con la intención de que el sistema fuera completado y puesto en órbita en un despliegue que abarcaría hasta el año 2016 inicialmente.

El objetivo del proyecto es implementar un sistema de navegación independiente y regional de vehículos espaciales para aplicaciones nacionales. Los requisitos de diseño IRNSS exigen una precisión de la posición de navegación en torno a 20 m en un área de servicio extendida con cobertura que abarca hasta 1500 kilómetros más allá de sus fronteras, y mejor que 10 m para el espacio territorial del país. En concreto, el área de servicio extendida, comprende la superficie de la tierra situada entre la superficie del país y el rectángulo que abarca desde la latitud 30º Sur – 50º Norte, y longitud 30º Este - 130º Este.
Se espera que el sistema proporcione posición precisa en tiempo real y observables de tiempo para los usuarios, para una variedad de plataformas con una disponibilidad de servicio de 24 horas x 7 días bajo todas las condiciones climáticas, (Majithiya, 2011)

El IRNSS está siendo desarrollado en paralelo al programa GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation), que constituye un sistema de aumentación de los sistemas GNSS.

El diseño del Sistema Regional de Navegación por Satélite IRNSS consta de 3 satélites geoestacionarios (GEO) situados a una inclinación de 32,5 ° E, 83 ° E y 131,5 ° E, así como de dos pares de satélites en órbita geosíncrona (GSO) inclinada con sus nodos ascendentes a 55 ° E y 111,5 ° E y una inclinación de 29° con respecto al plano ecuatorial (figura 1.14). El primer satélite de la constelación propuesta fue lanzado con éxito el 1 de julio de 2013, se trataba del IRNSS-1A, uno de los satélites geosíncronos que componen la constelación. A pesar de que el primer lanzamiento fue ejecutado un poco más tarde de lo planificado, el plan inicial contemplaba lanzamientos regulares cada seis meses, y en Octubre de 2014, desde ISRO se anunció el lanzamiento con éxito de su tercer satélite de navegación IRNSS-1C.

Tal disposición significa que los siete satélites tendrían cobertura continua con las estaciones de control de la India a una altura de 36000 km.

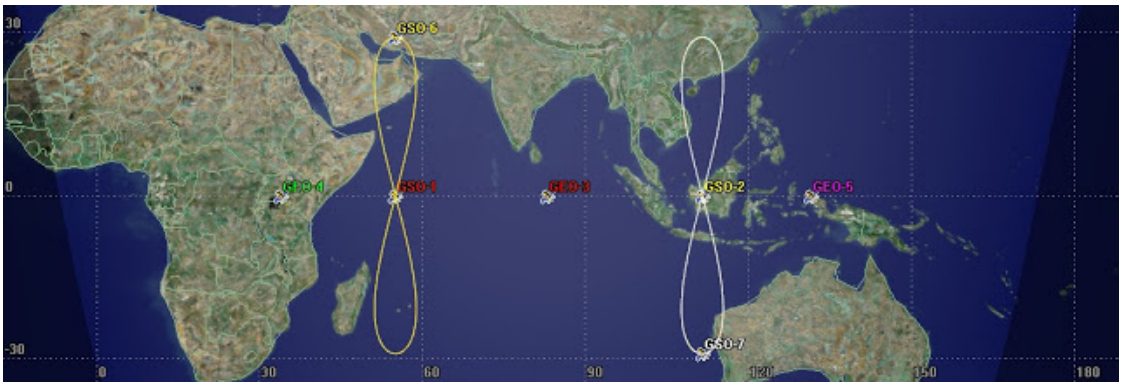


Figura 1.14: Cobertura de los satélites IRNSS (Cortesía de ISRO, http://irnss.isro.gov.in/.Visitado:Octubre, 2014)

Como patrón de frecuencia primaria se utiliza un reloj atómico de rubidio. Los satélites están equipados con la técnica Satellite Laser Ranging, por medio de una matriz retrorreflectora láser.

La arquitectura de la constelación IRNSS consta de los siguientes elementos:

- Segmento espacial: Los satélites IRNSS llevan a bordo una configuración redundante e incluyen un transpondedor en la banda C y son capaces de aplicar el método de multi-plexación CDMA *(Code Division Multiple Access)*. Las funciones principales son la transmisión de la información de navegación en las bandas L5 y en la banda S y la generación de datos de navegación de a bordo.

- Segmento terreno: El segmento terrestre es el responsable del mantenimiento y operación de la constelación IRNSS. Contiene todos los elementos necesarios para el control de la constelación básica y se compone principalmente del centro de control maestro para el control de la nave espacial y la navegación, estaciones de seguimiento y monitorización de integridad IRNSS, estaciones de enlace ascendente y de telemetría, enlaces de comunicaciones y centro de temporización de la red. Está previsto emitir la diferencia entre el tiempo en IRNSS y el tiempo de las otras constelaciones para permitir al segmento usuario aprovechar todas las constelaciones. El número de estaciones en tierra con la misión de generar y transmitir parámetros de navegación, realizar el control orbital de los satélites y monitorización, es aproximadamente de 15 en el territorio del país.

Los tipos de servicios previstos son:

- Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS), proporcionado a todos los usuarios.
- Servicio de precisión (PS), proporcionado a los usuarios autorizados.

Ambos servicios se realizarán en la banda L5 y la banda S. La estructura de datos de SPS y PS se encuentra en desarrollo. Se está planteando aprovechar el hecho de que el número de satélites se reduce a 7 en lugar de los 30 que se utilizan en otras constelaciones, para elaborar otros servicios de valor añadido como la determinación ionosférica a través de un modelo regional para una red de 80 puntos para dar servicio a los usuarios de equipos mono-frecuencia. Las correcciones de estado de reloj, efemérides, y el almanaque de datos de los 7 satélites IRNSS está previsto que se emitan con los mismos criterios de integridad y precisión que en otras constelaciones.

1.2. Sistemas de referencia convencionales

La definición conceptual de sistema de referencia que nos va a permitir conocer la tripleta de coordenadas y velocidades del marco de estudio en el contexto que se presenta, viene especificada de modo concreto por un conjunto de constantes numéricas y parámetros, de manera que define de manera inequívoca el sistema de referencia terrestre internacional convencional que rota de manera solidaria con la Tierra en su movimiento diurno en el espacio. El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra, (IERS), es el encargado de definir y mantener las constantes numéricas y parámetros del

ITRS, (*International Terrestrial Reference System*), conforme a las resoluciones de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica del año 1991, (IUGG,1991).

1.2.1. Sistema de referencia y Marco de referencia terrestre internacional (ITRS/ITRF)

El sistema de referencia se materializa a través de las coordenadas y velocidades de una serie de estaciones distribuidas por todo el mundo, constituyendo el marco ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Estas coordenadas definen implícitamente los ejes coordenados X, Y, Z, del sistema de referencia, por lo que proporcionan su orientación (Altamimi et al., 2002).

El sistema es geocéntrico, con su centro de masas definido por el de toda la Tierra incluyendo la atmósfera y los océanos, y la orientación de sus ejes tal y como fue establecido desde el año 1984 por el BIH (*Bureau International de l'Heure)*:

- Eje Z: Paralelo al polo medio determinado por la IERS y llamado *IERS Reference Pole* (IRP) o *Conventional Terrestrial Pole* (CTP).
- Eje X: Meridiano de Greenwich Convencional determinado por el IERS y llamado *IERS Reference Meridian* (IRM) o *Greenwich Mean Origin* (GMO).
- Eje Y: Forma una tripleta dextrógira con los ejes anteriores sobre el plano del ecuador convencional.

El marco ITRF emplea el elipsoide de referencia Geodetic Reference System 1980 (GRS80), cuyas constantes y parámetros fueron definidos en 1979 por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, (IUGG).

En su determinación se utilizan distintas técnicas de Geodesia Espacial, además de GNSS, con el fin de determinar sus coordenadas y velocidades. Estas técnicas son las siguientes:

- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS), coordinada por el International DORIS Service, (IDS), desde el año 1994.
- SLR o sistema Satellite Laser Ranging y sistema LLR o Lunar Laser Ranging.
- Interferometría de muy larga base VLBI (Very long Baseline Interferometry).

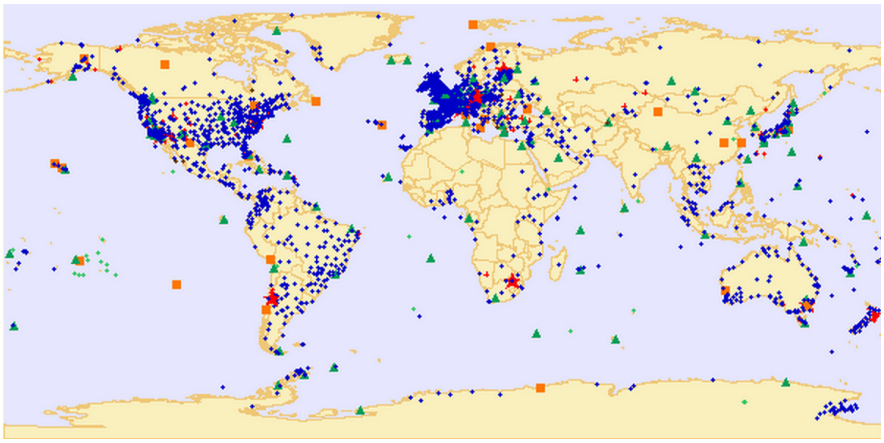


Figura 1.15: Estaciones que forman el marco ITRF. (http://itrf.ensg.ign.fr/. Última visita: Octubre, 2014)

Las distintas técnicas que a veces conviven en una estación ITRF, son enlazadas mediante el establecimiento de los denominados enlaces "*local-tie*" entre ellas, es decir observaciones realizadas entre las marcas físicas, (*marker points*), de cada estación de medida, (entre una estación GNSS y un sistema SLR por ejemplo).

Figura 1.16: Representación de estaciones IGS en Europa junto con otras técnicas de geodesia espacial (Imagen cedida por el CDDIS –Nasa ESDS[14] , Noll, 2010)

La materialización de un marco de referencia de precisión es una tarea compleja, ya que la Tierra es un volumen en constante cambio y sufre deformaciones debido a su carácter elástico. Las precisiones en las observaciones que alcanzan las distintas técnicas dentro de la Geodesia Espacial, son cada vez mayores, por lo que se puede conseguir un grado de exactitud enorme si además las observaciones son corregidas por varios efectos entre los que cabe citar:

- Mareas terrestres.
- Carga atmosférica y oceánica.
- Tectónica de placas.
- Movimientos locales y regionales…

La materialización de los diferentes marcos ITRF comenzó en 1984, y, a partir de ahí se han obtenido las soluciones 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 2000, 2005 y la del 2008. Estas soluciones difieren unas de otras debido principalmente a la alineación con las placas tectónicas, y a que las redes son equipadas con instrumental de alta precisión que evolucionan y se amplían con el tiempo con lo cual la cantidad de datos se incrementan así como su calidad, siendo posible actualizar los marcos que definen con la consiguiente mejora en la precisión. La definición del marco vigente durante la mayor parte del desarrollo del presente trabajo, ITRF08, viene ampliamente desarrollada por Boucher y Altamimi, (2011), siendo la versión ITRF2013 o ITRF2014 la siguiente materialización, cuya preparación comenzó durante el año 2014. Un ejemplo de la evolución de los últimos marcos es la siguiente, cuya definición en detalle es posible conocer también a través de los autores anteriores (Altamimi et al., 2002 y 2007):

- ITRF2000: El **marco ITRF2000** está basado en 800 determinaciones de cerca de 500 sitios. Está referido a la época 1997.0 (t_0=1997.0), quedando determinado a partir de soluciones globales y soluciones de densificaciones a lo largo del tiempo.

- ITRF2005: El **marco ITRF2005**, referido a la época 2000.0 (t_0=2000.0), se ha basado únicamente en determinaciones SLR, VLBI, DORIS y GPS en 608 estaciones situadas en 338 localizaciones diferentes, quedando definido a partir de series temporales continuas de observaciones. Debido a que la solución ITRF2005 presentó una inconsistencia en escala entre las soluciones SLR y VLBI del valor de 1.0 ppb en la época 2000.0 y una ratio de variación anual de la escala de 0.08 ppb/año, y el hecho de que finalmente la escala del ITRF05 viene definida por las series VLBI, se decidió sacar una solución para los usuarios de SLR, derivada de ITRF2005 pero re-escalada de acuerdo a las discrepancias encontradas.

- ITRF2008: El **marco ITRF2008**, referido a la época 2005.0 (t_0=2005.0), se basa en el reprocesamiento de todas las series de observaciones de las cuatro técnicas espaciales SLR, VLBI, DORIS y GPS, de manera que utilizan las convenciones actuales y mayor homogenización para la reducción, modelización y corrección de observaciones.

[14] *Crustal Dynamics Data Information System –NASA's Earth Science Data Systems*

El Datum de la solución ITRF2008, empleado en la mayoría de los modelos utilizados o implementados en este trabajo, queda definido de la siguiente manera:

- Origen: Parámetros de traslación nulos en la época 2005.0 (variación nula respecto al origen definido en la época 2005.0) y variación nula de estos parámetros entre ITRF2008 y las series SLR.
- Escala: Variación de escala nula entre ITRF2008 y el promedio de la escala definida por las series VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), y SLR (*Satellite Laser Ranging*).
- Orientación: Parámetros de rotación nulos para los ejes en la época 2005.0 y variaciones nulas entre ITRF2008 y ITRF2005 (en las estaciones ITRF seleccionadas).

A continuación se muestran los 14 parámetros de transformación entre ITRF2005 e ITRF2008:

	T1 mm	T2 mm	T3 mm	D 10-9	R1 mas	R2 mas	R3 mas
	-0.5	-0.9	-4.7	0.94	0.000	0.000	0.000
+/-	0.2	0.2	0.2	0.03	0.008	0.008	0.008
Rates	0.3	0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000
+/-	0.2	0.2	0.2	0.03	0.008	0.008	0.008

Tabla 1.5: Parámetros de la transformación en la época 2005 y ratios entre ITRF2005 a ITRF2008 (http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/tp_08-05.php. Visitado: Noviembre, 2014)

Estos parámetros de trasformación se han estimado utilizando las 171 estaciones que se observan en la imagen siguiente:

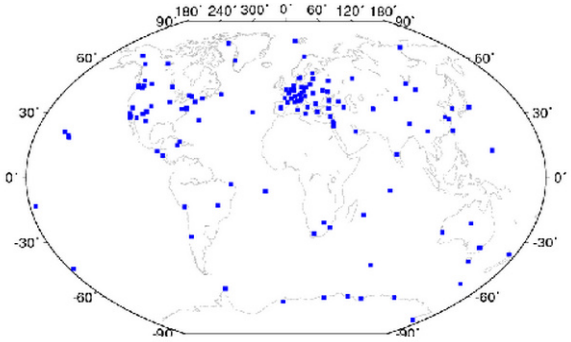


Figura 1.17: Estaciones ITRF para el cambio de marco ITRF2008.
(http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/tp_08-05.php. Visitado: Septiembre 2014)

1.2.1.1. Definición de la materialización posterior a ITRF2008

Desde la publicación del marco ITRF2008, se han producido diversas mejoras que cabe señalar:

- Existen cinco años de observaciones adicionales a finales de 2013.
- Hay nuevas estaciones inscritas para formar parte del proceso de determinación del marco ITRF.
- Se están empleando nuevos métodos de colocación y de enlaces *"local-tie"* entre las distintas técnicas que conviven en algunas estaciones ITRF.
- Las estrategias de procesamiento se van optimizando y por tanto se puede contribuir con soluciones más consistentes a la nueva definición del marco.
- Se cuenta con un conocimiento más avanzado de los distintos efectos de carga y efectos a modelar en los procesamientos.

Con el fin de aprovechar las ventajas de estos nuevos desarrollos, los coordinadores del ITRF junto con distintos centros de análisis y cálculo, han llevado a cabo la planificación para generar una nueva solución ITRF (Altamimi et al., 2014). Para ello se utilizan las series temporales disponibles que abarquen el mayor periodo de tiempo posible cubriendo todas las ventanas de observaciones de todas las técnicas que contribuyen. Por ejemplo, se cuenta con datos desde la década de los 80 de las técnicas VLBI y SLR.

1.2.2. Sistema y Marco de Referencia Terrestre Europeo.

En 1989, dado que, sobre la parte estable de Europa, la precisión de las posiciones individuales se encontraba en el rango de unos pocos centímetros en X, Y y Z, se decidió que las coordenadas ITRF89 de las estaciones europeas existentes entonces definieran el Marco de Referencia Terrestre Europeo, el cual rota con la parte estable de la placa euroasiática y es coincidente con el ITRF en la época 1989, (Euref Resolutions, 1990).

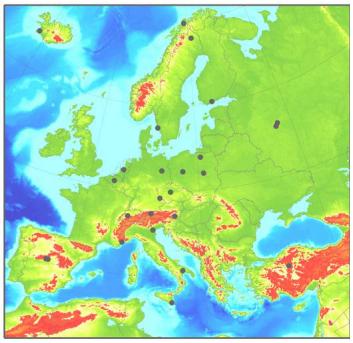


Figura 1.18: Densificación preliminar Europea (Bruyninx et al., 2001)

Los principales objetivos que, en un principio, debía cubrir el marco de referencia Europeo eran:

- Establecer un marco de referencia geocéntrico de cara a cualquier proyecto de ingeniería y geodinámico en Europa.
- Constituir una referencia de precisión para geodesia y navegación.
- Eliminar los datums locales en Europa, de manera que constituyese un marco de referencia moderno, continuo y preciso que los diferentes servicios cartográficos nacionales adoptasen.

En la placa euroasiática el marco de referencia, denominado ETRF, (*European Terrestrial Reference Frame*), queda materializado físicamente por la existencia de la red de Estaciones Permanentes de EUREF (*European Reference Frame),* siendo EUREF la subcomisión europea para la definición del marco de referencia de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG).

Fue a partir de la solución ITRF de 1997 cuando se comenzó a incluir por parte del IERS, las soluciones del marco ETRF materializado por la red de estaciones europea. Es necesario resaltar, que actualmente el IERS[15] realiza la actualización del marco de referencia aproximadamente cada cinco años, esto puede producir saltos en las coordenadas de las estaciones que se reflejan en la definición del marco ETRF del año correspondiente. Un ejemplo de ello son los saltos detectados entre las materializaciones de ETRF2000 y ETRF2005, equivalente al salto existente en el eje Z entre ITRF2000 e ITRF2005 de 1.8 mm/año, (Boucher y Altamimi, 2008 y 2011).

El marco de referencia se ha ido densificando poco a poco, sobre todo gracias a las determinaciones GPS. En 1990 se añadieron 30 estaciones más a las originales, desde entonces diversos estados miembros han ido aportando nuevas estaciones, sobretodo de Europa del Este. Actualmente cerca de 250 estaciones conforman la denominada red EUREF permanente, (*Euref Permanent Network* -EPN), de más de 100 instituciones públicas o universidades.

Con el fin armonizar todas las materializaciones de ETRS89 en todo el continente, y evitar saltos y discontinuidades entre los distintos marcos ETRF adoptados por los estados miembros de Europa, se decidió adoptar el ETRF2000 como marco de referencia convencional definitivo, estableciendo así un único marco de forma convencional común para toda Europa. Así lo establecen las resoluciones de la subcomisión EUREF para el marco de referencia de la Asociación Internacional de Geodesia durante el Symposium celebrado en Gavle en el año 2010:

> *"Considering the Technical Working Group recommendation of adopting the ETRF2000 as a conventional terrestrial reference frame of the realisation of ETRS89*
>
> *Noting the great benefit of harmonising the ETRS89 realisations at the national level of the European countries and consequently minimizing possible discrepancies in geo-referencing applications through Europe*
>
> *Recommends that the NMCAs adopt the ETRF2000 as the basis for future national implementations of ETRS89"*

[15] *International Earth Rotation Service*

Para el mantenimiento del marco se utiliza la solución cumulativa procedente de un ajuste multi-anual de las soluciones semanales obtenidas para las estaciones GNSS de EUREF y comprende datos desde la GPS WEEK 834 hasta las soluciones más recientes. La frecuencia de actualización es de 15 semanas, con el fin de disponer de las coordenadas y velocidades del marco lo más actualizadas posible.

1.3. Organismos, consorcios y redes GNSS de ámbito global o continental

1.3.1. El International GNSS Service.

El International GNSS Service (IGS), es una federación voluntaria a nivel mundial que ha estado ofreciendo productos GNSS de alta calidad con acceso abierto desde la década de los 90, (Dow et al., 2009). Estos productos se utilizan en aplicaciones a escala mundial, ya sean científicas, educativas y/o comerciales. Es un consorcio compuesto por más de 200 agencias de todo el mundo que comparten recursos y datos de estaciones multi-constelación y multi-marca permanentes distribuidas globalmente con el fin de generar productos GNSS de alta precisión, (órbitas de los satélites de las constelaciones GNSS, estado de los relojes de los satélites, parámetros de rotación terrestres, modelos atmosféricos etc...).

El marco definido por las estaciones del IGS está compuesto por cerca de 400 estaciones, que cuentan únicamente con las técnicas espaciales GPS y GLONASS. Por ello, si se utilizan únicamente las observaciones de estas estaciones se puede formar un marco de referencia, (el marco IGS), que será más consistente con las observaciones GNSS que el ITRF, ya que no utiliza ni mezcla observaciones de otras técnicas espaciales. Para preservar el Datum, (origen, escala y orientación), de la solución ITRF en la solución IGS, el marco IGS se alinea al marco ITRF mediante una transformación Helmert obtenida utilizando una selección de estaciones, por lo que podemos encontrar coordenadas para una misma estación en los dos marcos de referencia, IGS e ITRF, que pueden llegar a variar algunos milímetros.

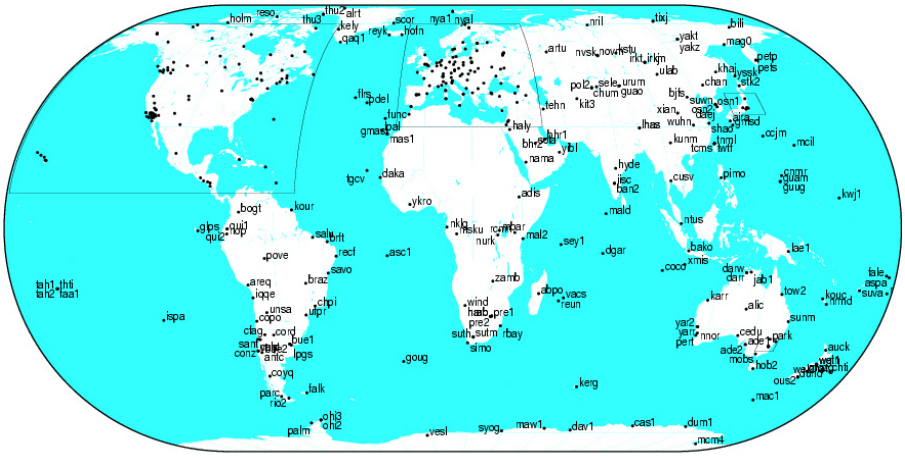


Figura 1.19: Estaciones GNSS pertenecientes al IGS (www.igs.org, 2014)

La primera materialización de la red fue el IGS00 (alineada al marco ITRF00 mediante 54 estaciones fiduciales seleccionadas), que posteriormente se actualizó al IGSb00. Por ejemplo, otras materializaciones han sido la realización del ITRF2005, ITRF2008, etc..., con sus correspondientes marcos de estaciones IGS (IGS05, IGS08).

Todos los resultados relacionados con productos de órbita/reloj, parámetros de orientación de la tierra, o de *bias* de observables, deben estar directamente en ITRF y no deben mostrar variaciones de escala/origen. Por otra parte, todas las aplicaciones globales que estén utilizando productos de órbita finales del IGS se referirán a un geocentro medio y tendrán una escala semanal (épocas), por lo tanto, se podrían apreciar pequeñas variaciones en origen/escala con respecto a ITRF (variaciones semanales). Desde el 5 de noviembre de 2006 todas las soluciones obtenidas con la técnica de posicionamiento absoluto preciso o Precise Point Positioning, basadas en productos IGS finales deben mostrar sólo una pequeña variación de escala semanal. Utilizando los productos finales del IGS, todas

las variaciones en origen/escala probablemente pueden ser obviadas o despreciadas, por encima de un nivel de precisión de unos 10 mm.

No obstante, es necesario resaltar que las materializaciones del marco a través del IGS no están exentas de mejoras. Tal es el caso del establecimiento de IGb08 como marco actualizado del IGS08. El marco IGb08 principalmente incluye nuevos conjuntos de coordenadas de aproximadamente 33 estaciones, que se han visto afectadas por discontinuidades en la serie desde la época 2009.5, y contempla estaciones que han sido reemplazadas (Rebischung, 2012), con la finalidad de poder basar la definición del marco en una red más densa. Adicionalmente, en este marco se contempló las modificaciones de las coordenadas de 65 estaciones que se veían afectadas por el uso de diferente modelo de calibración de antena en la materialización del ITRF2008, el modelo denominado igs05.atx, mientras que el modelo utilizado actualmente en los centros de análisis GNSS en el procesamiento, corresponde a la versión posterior igs08.atx.

1.3.2. La subcomisión Europea EUREF

EUREF es la subcomisión para Europa, antes citada, integrada en la Comisión de Marcos de Referencia regionales de la Asociación Internacional de Geodesia, fue fundada en 1987 en la asamblea General de la IUGG, (Unión Internacional de Geodesia y Geofísica), celebrada en Vancouver.

Esta subcomisión se encarga de definir, realizar y materializar el marco de referencia europeo a través de la red de estaciones permanentes GNSS de ámbito europeo Euref Permanent Network (EPN). La red EPN está conformada por estaciones GNSS, (en torno a 200), pertenecientes a distintas agencias de los estados miembros con competencias en cartografía, geodesia y geofísica, (Bruyninx et al., 2012). Las actividades de EUREF van orientadas al establecimiento y mantenimiento del sistema ETRFxx/ETRS89 y del sistema unificado para las altitudes EVRS (European Vertical Reference System) para el Datum Vertical.

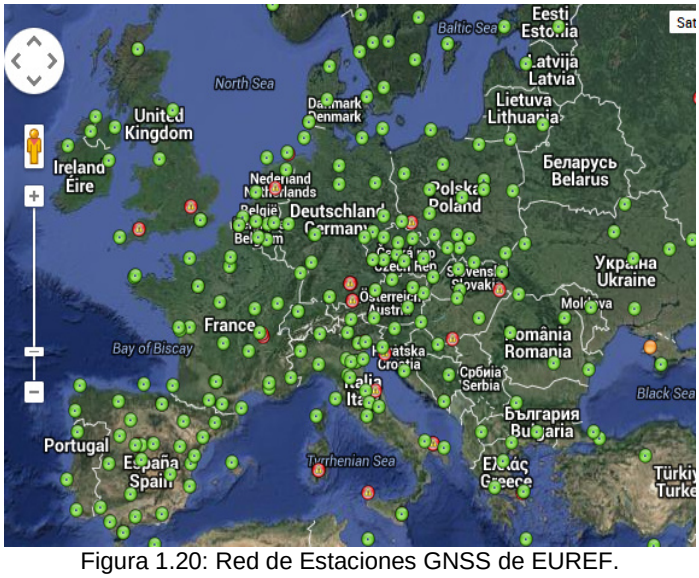


Figura 1.20: Red de Estaciones GNSS de EUREF.
(http://epncb.oma.be/_trackingnetwork/stationmaps.php. Visitado: Noviembre 2014)

En el caso de EUREF, desde 1995 se decidió coordinar el proceso para el mantenimiento del marco ETRF a través del trabajo cooperativo entre distintos centros de análisis europeos. De manera que existen una serie de centros de análisis vinculados a las Agencias Estatales de Cartografía y Geodesia o a Institutos de investigación que realizan el procesamiento continuo de la red EPN. A su vez existe un coordinador de centros de análisis en EUREF, que es el encargado de combinar las soluciones individuales del cálculo por zonas o por *clusters* aportadas periódicamente por cada centro de análisis. El contraste y combinación que se realiza de estas soluciones garantiza una calidad similar en cada una de ellas y, asimismo, la repetitividad de los resultados.

Del mismo modo, contribuyen con sus datos, productos y soluciones no solo a la definición del marco ETRF, sino también al marco ITRF global, y constituye una infraestructura esencial para otros proyectos científicos relevantes como EGVAP, (Eumetnet EIG GNSS water vapour programme), que consiste en la determinación horaria del contenido de vapor de agua de la atmósfera a través de una distribución densa de estaciones permanentes. Otras actuaciones, van orientadas a la monitorización del nivel del mar, el cálculo y control de deformaciones y campos densos de velocidades, cuyo desarrollo promueve a través de las resoluciones que aprueba periódicamente.

Algunas de estas resoluciones, contribuyen a dinamizar el uso de redes GNSS, no solo de EUREF o de las agencias nacionales, sino también desplegadas por administraciones públicas sub-estatales para las aplicaciones científicas.

Cabe citar la resolución número 3 de la subcomisión europea EUREF del año 2013 acerca del necesario aprovechamiento de todas las estaciones existentes en la determinación de un campo denso de velocidades, la resolución número 4 de la subcomisión europea EUREF en el año 2010 acerca del valor científico de los datos generados por estaciones no integradas en EUREF (por ejemplo, las que densifican a la red nacional). En cuanto a las aplicaciones meteorológicas, es necesario mencionar el Informe de la Red Europea de Servicios Meteorológicos-EUMETNET, (2011), acerca del aprovechamiento de los resultados del procesamiento de la mayor cantidad de estaciones GNSS posibles, que densifiquen a las redes estatales, para disponer de una mayor resolución a nivel local en las determinaciones troposféricas del vapor de agua en la atmósfera.

1.3.3. Los centros de análisis y centros de datos. Productos y Servicios.

En la actualidad, la labor realizada por los centros de análisis y centros de datos resulta realmente encomiable e imprescindible. Los Centros de Análisis, tanto de EUREF como del IGS, están constituidos por distintos grupos de investigadores o instituciones, reconocidos por la junta de Gobierno de estos consorcios, que se comprometen a entregar datos y productos en forma de órbitas y modelos de estados de reloj de satélites GNSS entre otros, con prontitud y de forma fiable, a partir de los datos proporcionados por redes de estaciones permanentes. Los Centros de Análisis ponen estos productos a disposición del resto de la comunidad científica y mantienen actualizado un archivo de información que describe las estrategias y modelos de análisis seguidos.

Algunos de los Centros de Análisis del IGS que ofrecen dichos productos son:

CODE /AIUB	Center for Orbit Determination in Europe, AIUB, Switzerland.	Centro para determinación orbital en Europa, Suiza
ESOC /ESA	European Space Operations Center, ESA, Germany.	Centro de operaciones espaciales EUROPEO de la Agencia Espacial Europea (ESA)
GFZ	GeoForschungsZentrum, Germany.	Centro de Investigación en Geociencias de Alemania
GRGS	GRGS-CNES/CLS, Toulouse, France.	Centro Nacional de estudios espaciales (Francia)
JPL	Jet Propulsion Laboratory, USA.	Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Nasa, EEUU
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration / National Geodetic Survey, USA.	Agencia Nacional para la Atmósfera y el Océano, EEUU, y Atmosférica y Servicio Nacional de Geodesia de EEUU
NRCan	Natural Resources Canada, Canada.	Administración para la gestión de Recursos naturales de Canada
SIO	Scripps Institution of Oceanography, USA.	Instituto de Oceanografía de los EEUU
USNO	U.S. Naval Observatory, USA.	Observatorio Naval de los EEUU
MIT	Massachusetts Institute of Technology, USA.	Instituto Tecnológico de Massachusetts. EEUU
GOP-RIGTC	Geodetic Observatory Pecny, Czech Republic.	Observatorio Geodésico de Pecny –República Checa
WHU	Wuhan University, China	Universidad de Wuhan en China

Tabla 1.6: Centros de análisis del IGS, (www.igs.org, 2014)

A los que hay que añadir otros centros globales de datos como el CDDIS[16], o centros regionales como la Agencia de Cartografía y Geodesia de Alemania (BKG). En la siguiente imagen podemos ver la situación de los Centros de Análisis, en este caso los de la Comisión para el marco europeo EUREF:

BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie -Alemania
NKG: Nordic Geodetic Commission, Lantmäteriet and Onsala Space Observatory-Suecia
ROB: Royal Observatory of Belgium, Bruselas-Bélgica
IGN: Institut Geographique National , Francia
IGE: Instituto Geográfico Nacional, España
LPT: Bundesamt für Landestopographie, Suiza
COE: Centre for Orbit Determination in Europe, Astronomical Inst.University of Bern,Suiza
BEK: Bayerische Akademie der Wissenschaften, Munich-Alemania
UPA: University of Padova, Padova-Italia
GOP: Geodetic Observatory Pecny, República Checa
MUT: Military University of Technology Polonia
WUT: Warsaw University of Technology, Warsaw-Polonia
SUT: Slovak University of Technology, Bratislava
SGO: FOMI Satellite Geodetic Observatory, Budapest-Hungria
RGA: Republic Geodetic Authority, Serbia
OLG: Institute for Space Research (ISR/ASS), Graz-Austria
ASI: Centro di Geodesia Spaziale G. Colombo, Matera-Italia

Figura 1.21: Centros de análisis de EUREF. (http://epncb.oma.be/images/maps/analysiscentres.png. Visitado: Septiembre 2014)

Los productos básicos que generan los centros de análisis y el *International GNSS Service*, (https://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html), son empleados en cualquier tipo de procesamiento de precisión con GNSS, bien con la técnica de dobles diferencias o bien con la técnica absoluta de Posicionamiento Preciso de Punto (PPP). Actualmente los podemos clasificar en productos finales, los productos rápidos, los de publicación ultrarrápida y los emitidos en tiempo real.

-Productos finales: Los productos finales se determinan para cada día de la semana GPS y se entregan en un plazo establecido de 10-15 días después del final de esa semana.

- Efemérides de los satélites y valores de los relojes GNSS (GPS + GLONASS), tabulados en intervalos diarios.
- Parámetros de orientación terrestres.
- Valores del reloj de la estación, tabulados en intervalos diarios.
- Coordenadas y velocidades de las estaciones de la red.
- Modelo mapeado de la ionosfera, y modelos troposféricos.

-Productos diarios rápidos (IGR): Los productos rápidos se determinan para cada día y se entregan en un plazo establecido (17 horas después del final de ese día).

- Efemérides de los satélites y valores de los relojes GPS, tabulados para cada día.
- Parámetros de orientación terrestres.
- Valores del reloj de la estación, tabulados en intervalos diarios, etc..

-Producto ultrarrápido (IGU): Los productos ultrarrápidos se determinan cuatro veces cada día y se entregan en un plazo establecido, (hasta 3 horas después de la última época del intervalo de tiempo ajustado).

- Efemérides de los satélites y valores de los relojes GNSS, tabulados en intervalos específicos.
- Parámetros de orientación terrestres, etc....

[16] *Crustal Dynamics Data Information System, NASA GSFC, USA*

Los productos finales combinados del IGS se forman a partir de una combinación de resultados independientes presentados por los Centros de Análisis. Las especificaciones detalladas para los productos combinados son establecidas por el Coordinador de Centro de Análisis. Al obtener unos productos que provienen de distintos centros y tratarlos mediante combinaciones adecuadamente ponderadas los resultados tienen una gran consistencia. De esta manera, los productos IGS aportan el beneficio de la precisión, exactitud, estabilidad, confiablidad y robustez en comparación con los resultados de cualquier Centro de Análisis individual.

Resulta esencial insistir dentro del contexto de la presente investigación, que si bien para la generación de productos para post-proceso las soluciones hoy en día están muy depuradas, no sucede igual con los productos y modelos generados en tiempo real de correcciones a las órbitas, a los estados de reloj, de retardos de la señal y de efectos atmosféricos. Algunos de estos modelos son difundidos vía internet por el conocido protocolo NTRIP[17], (Anexo I.3), procedentes de centros de análisis individuales o correspondientes a la combinación de varios centros de análisis. Por este motivo, este aspecto se tratará con más profundidad en capítulos posteriores. La generación de estos modelos se enmarca dentro de los proyectos piloto Real-Time del IGS o de EUREF. El formato en que se emiten vía NTRIP los modelos y productos se denomina RTCM[18] –*State Space Representation*, cuyas características se ampliarán en los siguientes capítulos.

Para los usuarios GNSS que utilicen productos ITRF o IGS en sus cálculos, (órbitas, parámetros de rotación de la Tierra, etc.), que es el caso que se presenta en la mayoría de observaciones de este trabajo, las coordenadas finales obtenidas estarán en el mismo marco que los productos. A su vez, estas coordenadas podrán expresarse mediante formulación conocida en el correspondiente marco regional, (Boucher y Altamimi, 2011).

1.3.4. Las iniciativas MGEX y CONGO

1.3.4.1. El proyecto MGEX (Multi-GNSS EXperimenT)

MGEX corresponde a las siglas Multi-GNSS EXperimenT. El proyecto ha sido impulsado por el IGS para rastrear, recopilar y analizar todas las señales GNSS disponibles, (Montenbruck et al., 2014). Esto incluye las señales de BeiDou, Galileo y del sistema *Quasi Zenith Satellite System*, (QZSS), así como de la fase de modernización de GPS de las últimas décadas, satélites GLONASS, y cualquier sistema de aumentación de interés.

Figura 1.22: Estado de la iniciativa MGEX en el año 2014. (http://igs.org/mgex/)

[17] *Network Transport of RTCM via Internet Protocol*
[18] *Radio Technical Comission for Maritime Services*

La red de seguimiento está en continua ampliación, de manera que se le añaden progresivamente nuevos receptores que puedan rastrear todas las señales de las constelaciones GNSS disponibles. El objetivo es que MGEX consolide la red de seguimiento y recogida de datos asociada, con el fin de mejorar el control de calidad, los procedimientos de análisis y los productos derivados en un escenario multi-constelación.

Los archivos de observación de MGEX están disponibles en varios repositorios alojados por el CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System), el IGN francés (Institut Geographique National), y el BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie). Los archivos proporcionan archivos RINEX diarios a 30 segundos de muestreo, así como de alto ratio, (1 Hz), para determinadas estaciones. El formato RINEX[19] versión 3 se admite como el formato de datos primario, en vista de su capacidad *a priori* para incluir mejor todas las constelaciones requeridas y tipos de observables.

Adicionalmente a las observaciones, MGEX consta de varios centros de análisis que contribuyen a la generación de productos multi-GNSS. Estos centros de análisis son el CNES, (Centro Nacional de Estudios Espaciales), el CODE (Centro para Determinación orbital en Europa), el GFZ (Centro de Investigación en Geociencias en Potsdam), el TUM (Universidad Técnica de Munich) y la Universidad de Wuhan, entre otros.

Los productos generados consisten en órbitas y modelos de reloj, distribuidos para cada semana GPS e identificados mediante un acrónimo de dos letras que indica la agencia contribuyente, seguido de la letra *m* de MGEX, por ejemplo: *gfmwwwwd.sp3.* En este caso *gf* corresponde al acrónimo del GFZ, seguido de la letra *m*, *wwww* es la semana GPS y *d* es el día de la semana para el producto en formato sp3 que contiene las órbitas de los satélites de varias constelaciones.

Además, los productos finales de órbita y reloj de la constelación QZSS se ponen a disposición de los usuarios generados por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) a partir de su red de apoyo a la misión QZSS. En cualquier caso los productos finales suelen basarse en arcos de 1 a 5 días para Galileo y arcos de 3 días para QZSS, proporcionándose en archivos diarios con 5 o 15 minutos de muestreo.

	GPS	Galileo	QZSS
Observables	L1 y L2	E1 y E5a	L1 y L5
Longitud de arco	3 días	5 días	3 días
Órbita de partida	CODE	Predicción del día anterior	Radiodifundida
Parámetros a estimar	Fijo	6 elementos Keplerianos y 5 parámetros de radiación	
Offset antena Satelite	igs08.atx	MGEX	MGEX L1
calibración al centro de fase	igs08.atx	No se considera	
offset antena del receptor	igs08.atx	calibraciones en laboratorio	

Tabla 1.7: Opciones de procesamiento para productos multi-constelación en el TUM (http://www.iapg.bgu.tum.de. Visitado: Septiembre 2014)

A través del servidor *broadcaster* alojado por el BKG, en tiempo real están disponibles las observaciones a través del flujo de datos o *streaming*, de una gran parte de las estaciones de MGEX.

El formato en que se emiten estos *streams* es la siguiente generación del formato RTCM 3.x[20], (Anexo I.2), denominado RTCM HP-MSM, que corresponde a las siglas *'High Precision Multiple Signals Messages'* y cuya definición vigente se incluye en posteriores capítulos de la investigación.

1.3.4.2. La red CONGO (Cooperative Network for GIOVE Observations)

Tras el lanzamiento por parte de la unión Europea en la pasada década, de los dos satélites prototipo, GIOVE-A y GIOVE-B, como parte del programa *In orbit validation element,* (GIOVE), se estableció una red global de seguimiento de los satélites Galileo-GIOVE formada por receptores con capacidad de rastreo de las nuevas señales.

[19] *Receiver Independent Exchange Format*
[20] *Radio Technical Comission for Maritime Services formato 3.x*

Esta iniciativa se caracteriza por ser Europea, y nace por la necesidad de establecimiento de una red para evaluar el rendimiento en la recepción de la señal y estimar modelos de correcciones de osciladores y de satélites, (Montenbruck et al., 2009). La red se constituyó como un proyecto cooperativo, siendo monitorizada por varios organismos: el DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt), el BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), y el GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum), los tres de Alemania.

A mediados de 2014, la red está constituida por 24 receptores instalados en 22 estaciones distintas. Los emplazamientos están equipados con los modelos de receptores Septentrio GeNeRx, Leica y Javad Triumph. Todas las estaciones almacenan observaciones de las dos frecuencias de los satélites Galileo en las bandas E1 y E5a, adicionalmente al rastreo de L1 ,L2-L2C y L5, de la constelación de NAVSTAR, algunas estaciones tienen capacidad de seguimiento SBAS, GLONASS, *Quasi Zenith Satellite System* (QZSS), y las señales restantes de Galileo (E5b, E6).

En la siguiente imagen se representa algunas de las estaciones de seguimiento que integran la red de seguimiento CONGO, (representado con cuadrados). La figura muestra a su vez parte de las estaciones de seguimiento que conforman el proyecto MGEX, (representado con rombos).

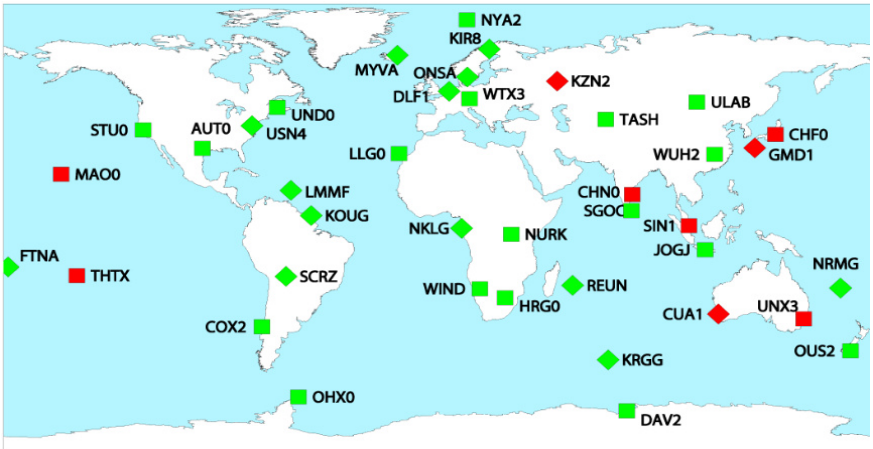


Figura 1.23: Red MGEX (Multi-GNSS EXperimenT) y Red CONGO (COoperative Network for GIOVE Observation). (http://www.iapg.bv.tum.de/mgex. Última visita: Noviembre 2014)

Las estaciones utilizadas para el seguimiento del sistema QZSS, y determinación de sus órbitas y estados de los osciladores de los satélites, se muestran en rojo.

Productos multi-constelación del proyecto CONGO.

La determinación de productos derivados multi-constelación de la red CONGO consiste en el siguiente proceso, (Hugentobler et al., 2010). A partir del flujo de datos en tiempo real de las estaciones se almacenan las observaciones. Este flujo de datos (*stream*), es monitorizado continuamente y convertido al formato RINEX 3.00. Los datos RINEX de la red CONGO son procesados con una versión modificada del software científico desarrollado por la Universidad de Berna (BERNESE).

En líneas generales, el proceso consiste en una primera estimación de las coordenadas de las estaciones, osciladores de los receptores y parámetros troposféricos empleando una solución utilizando únicamente la constelación GPS.

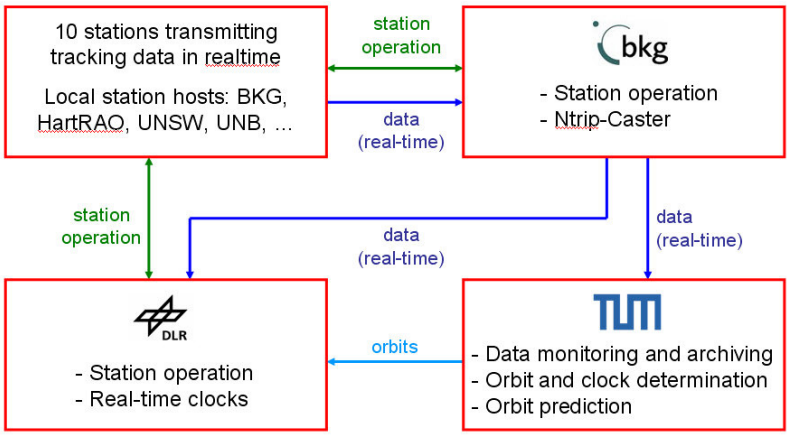


Figura 1.24: Procesamiento y flujo de trabajo de la red CONGO. (Cortesía del DLR[21], 2012)

En segundo lugar, los parámetros así determinados se toman como valores conocidos y fijos en una segunda estimación, en la que se determinan las correcciones de reloj y órbita de satélites Galileo. Adicionalmente, constriñendo la solución a las órbitas predichas, los modelos de osciladores en tiempo real se obtienen finalmente en uno de los centros de análisis involucrados.

Los productos de reloj y órbita en tiempo real de la red CONGO son almacenados en ficheros en el formato estándar denominado SP3 dedicado a soluciones orbitales, con muestreos entre 5-10 segundos, están disponibles a través de un servidor y adicionalmente son distribuidos por protocolo FTP.

En coordinación con la Agencia Espacial Europea diversos centros de análisis, elaboran los productos experimentales de las constelaciones en desarrollo, entre ellas Galileo, para los mismos periodos de tiempo acordados de manera consensuada. De esta manera, con el análisis del rendimiento de estos modelos, los centros de análisis pueden determinar qué estrategia es mejor para su elaboración en un futuro.

[21] *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*

Capítulo 2:
Descripción de los términos a modelar en GNSS. El caso de la técnica Precise Point Positioning.

La relación entre la observación GNSS *(Global Navigation Satellite System)*, y la distancia geométrica real entre un receptor y un satélite se expresa por la llamada ecuación de observación. Dentro de ella participan varios efectos individuales y fenómenos que sufre la señal generada por los satélites en su recorrido, que constituyen los términos a modelar en GNSS y forman parte de la ecuación de observación. En el siguiente apartado se exponen los términos a modelar en las observaciones, agrupando los diferentes efectos de acuerdo a su naturaleza y características.

2.1. Errores de reloj en GNSS.

La obtención de correcciones o modelos de comportamiento para los osciladores o relojes de los satélites GNSS ha constituido desde hace años un aspecto de estudio importante dentro de la Geodesia Espacial debido a distintas particularidades:

- La fuente de la frecuencia fundamental en la banda L, a partir de la cual se generan las frecuencias y señales utilizadas en todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite, está controlada por relojes atómicos de los satélites, por lo tanto es necesario controlar la estabilidad de los relojes. Los osciladores más recientes o de satélites de nueva generación presentan mayor estabilidad que los pertenecientes a las primeras generaciones. A mayor estabilidad en los osciladores mejor se puede modelar su comportamiento y deriva, generando "*a priori*" mejores correcciones de reloj.

- Es preciso conocer las correcciones de reloj con suficiente resolución, de lo contrario se debe interpolar valores, para disponer de correcciones cada cierto número de épocas. Por ejemplo, las aplicaciones en tiempo real y cinemáticas requieren la recepción de valores que se emitan a un alto ratio de transmisión. La continuidad y accesibilidad del producto en sí es fundamental. El IGS (*International GNSS Service*), es el principal suministrador de productos finales, rápidos, ultra-rápidos y en tiempo real, todos ellos como solución combinada de distintos centros de análisis, los cuales también ponen a disposición de libre acceso sus soluciones individuales.

- La disponibilidad de correcciones de reloj GLONASS y de las nuevas constelaciones en desarrollo GALILEO o QZSS[1] es fundamental. En el caso de la constelación GLONASS, debido al programa de revitalización llevado a cabo en la última década, han sido lanzados satélites de nueva generación de esta constelación, a lo que hay que añadir la consideración de las diferentes escalas de tiempo en las distintas constelaciones de los sistemas GNSS.

[1] *Quasi Zenith Satellite System*

En lo referente al estado del reloj del receptor, los *offsets* de estado, repercuten en la medida de la distancia, pudiéndose indicar el impacto en ella a través de la expresión:

$$(\delta t_{rec} - \delta t^{sat})\, c$$

correspondiendo *c* a la velocidad de la luz, y denotando los valores δt_{rec} , δt^{sat} como el estado del reloj del receptor y del satélite respectivamente.

Mientras que el valor δt_{rec} se estima de manera simultánea a las coordenadas del receptor, el comportamiento de la mayoría de los relojes de los satélites GNSS resulta más complejo de modelar y es necesario estimar los valores del *offset* para cada época. En los últimos tiempos el modelado de errores de reloj en satélites ha sido una de las áreas de investigación donde se han intentado realizar más avances. Se debe tener en cuenta el hecho de que todos los relojes de satélite se derivan de relojes atómicos cada vez más estables.

Es necesario resaltar que, en la técnica Precise Point Positioning (PPP), en la que se obtiene el posicionamiento con un solo receptor, (Zumberge et al., 1997), la estimación no es posible tal y como se realiza en el posicionamiento diferencial para los relojes de los satélites, sino que el vector de estado debe ser extraído de una fuente externa para obtener precisiones al nivel del decímetro o mejores. Un requisito importante para el uso de las correcciones de reloj de satélites de distintas constelaciones, es que correspondan a la misma escala de tiempo, y que sean consistentes con una combinación de señales específica utilizable en el cálculo de la posición, lo que resulta complejo en el actual entorno multi-constelación.

2.1.1. Clasificación y caracterización de osciladores existentes

Atendiendo a la descripción establecida por el Observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO, 2008) para los relojes de los satélites GPS, según la evolución en el tiempo de los distintos osciladores se puede establecer la siguiente clasificación:

-Para la constelación GPS, el Bloque I de satélites disponía de osciladores de menos fiabilidad que los empleados en la actualidad. Algunos eran de cuarzo, con precisiones de 10^{-10} . Posteriormente el Bloque II comenzó a incorporar osciladores de Cesio (Cs), cuya estabilidad es del orden de 10^{-13} - 10^{-14} s/día, pero que no terminaban de arrojar buenos resultados en cuanto a estabilidad y producían mayor contribución al error en la determinación de la diferencia de tiempo.

-Osciladores de Rubidio de la constelación GPS: Constituidos a su vez por dos generaciones de osciladores con mejor comportamiento que los de Cesio. Son los correspondientes al Bloque IIA y parte de los correspondientes al Bloque IIR y Bloque IIR-M. En la última generación de satélites GPS, adicionalmente, ya se contemplan osciladores atómicos de hidrógeno, conocidos como "máseres" de hidrógeno.

-Constelación GLONASS Cesio: Las características de los osciladores de los relojes GLONASS varían considerablemente de unos a otros. No obstante, los pertenecientes al bloque de satélites IIM, presentan una estabilidad al nivel de los relojes GPS de Rubidio, (Hesselbarth et al., 2008), y los últimos satélites de la generación GLONASS-K alcanzan una estabilidad que oscila entre 5-1 x10^{-14}.

En cuanto a la constelación Galileo, el diseño de los satélites contempla la inclusión de relojes extremadamente estables, constituyendo la primera generación de satélites GNSS que incluyen máseres de hidrógeno de tipo pasivo. A través de los satélites GIOVE–B ha podido ser comprobado por diversos autores como Waller y González (2008), el comportamiento de los osciladores del sistema Galileo, verificando su homogeneidad y estabilidad. Adicionalmente, lo mismo sucede con los osciladores de Rubidio fabricados más recientemente.

La estabilidad y comportamiento de los relojes de satélites GNSS se caracteriza normalmente por dos valores: estabilidad en largo período (*long term stability*) y estabilidad en corto período (*short term stability*), aunque generalmente sólo se nombra el segundo. La estabilidad en corto período se suele medir sobre ventanas de tiempo de segundos, y representa la dispersión de los valores de frecuencia (Hesselbarth et al., 2008). Por ejemplo: si durante un segundo la frecuencia de un oscilador, de 10 Megahercios (MHz), de frecuencia nominal, fluctúa 5 Hercios, (Hz), arriba y abajo, la dispersión, es de 10 Hz y, por tanto, tendría una estabilidad en corto período de 10^{-6}, ya que 10 Hz es la millonésima

parte de la frecuencia nominal. La estabilidad de largo período se suele representar para una ventana más amplia (sobre un año), y representa la "deriva" del oscilador, es decir: un oscilador de 10 MHz de frecuencia que al cabo de un año tenga 10,0001 MHz, habrá sufrido un incremento de 100 Hz, que es la cienmilésima parte de la frecuencia nominal, con lo que su estabilidad de largo período será de 10^{-5}.

A través del estudio de la desviación denotada como σ ζ de la función de Allan, establecida por este autor en 1966, se determina para un determinado intervalo de tiempo ζ, la desviación estándar que presenta el oscilador y por tanto su comportamiento aleatorio o ruido presente en el sistema, y a partir de ahí se permite calcular su contribución al rango de error en la función donde interviene el tiempo.

Por ejemplo, una desviación de Allan σ ζ de 1 nanosegundo (ns) supone un error de ±0.30 m. En Griffiths y Ray, (2009), se demuestra que para conseguir un modelado de los relojes GNSS acorde o al nivel de precisión promedio de 1.5 cm de las órbitas actuales de los satélites, se necesitaría una estabilidad en los relojes mejor que 40 picosegundos (40 x 10^{-12} segundos).

Los resultados de la función de Allan utilizada para describir el comportamiento de un oscilador GNSS son una medida en el espacio-tiempo (Allan et al., 1988):

$$\sigma_y^{\,2}(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i)^2$$

Donde:

$\sigma_y^{\,2}$ es la varianza de Allan

N es el número de medidas, correcciones de reloj en este caso

x_i valor de la corrección de reloj una época i en unidades de tiempo

τ es el intervalo de tiempo para el que se caracteriza la varianza y m que adopta el valor de la unidad

La desviación de Allan se obtiene como la raíz cuadrada de la varianza anterior, un ejemplo de la caracterización de distintos tipos de osciladores se muestra en la siguiente figura:

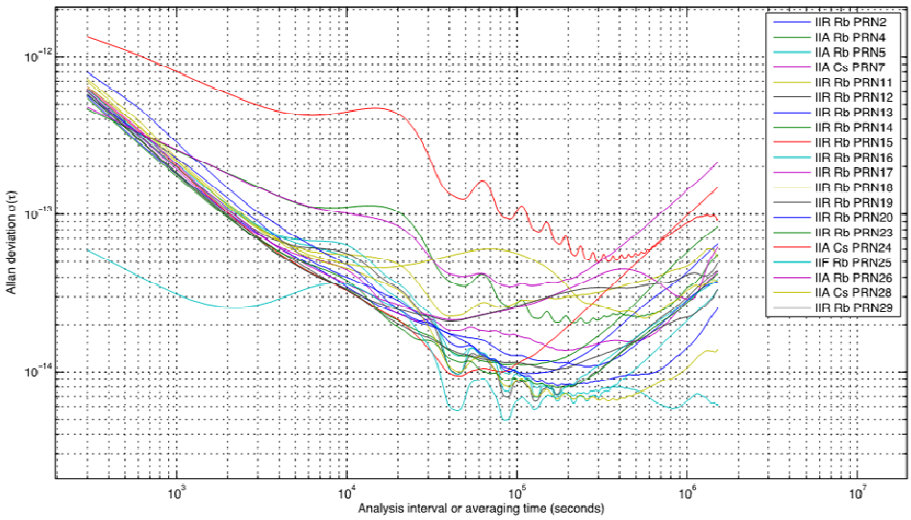


Figura 2.1. Estabilidad de distintos tipos de relojes obtenidos de productos finales del IGS.31/10/2010-4/12/2010. (http://www.insight-gnss.org/WP3.html , Ziebaert et al., 2011).

2.1.2. Modelo polinomial de representación del error de reloj

A efectos de transmisión de un modelo que contenga el *offset* del reloj del satélite, el valor δt^{sat} se representa a través de la conocida expresión (Sanz et al., 2011):

$$\delta t^{sat} = \tilde{\delta} t^{sat} + \Delta_{rel}$$

En la cual el término $\tilde{\delta} t^{sat}$ es calculado a partir de los valores transmitidos en el mensaje de navegación, en el caso del posicionamiento de navegación o standard point positioning (SPP), o por ejemplo, a través de productos o modelos precisos obtenidos en el IGS o los centros de análisis, para el caso de Precise Point Positioning (PPP). El segundo término corresponde a la corrección relativista.

En el caso de los sistemas GPS y GALILEO, tanto el mensaje de navegación radiodifundido como los modelos precisos del IGS y centros de análisis, proporcionan la información de reloj y los coeficientes del polinomio de segundo grado, estimados o como producto de un procesamiento continuo respectivamente, para una época de referencia dada, t_o, con el fin de calcular la corrección como:

$$\tilde{\delta} t^{sat} = C_0 + C_1(t - t_o) + C_2(t - t_o)^2$$

El significado físico de cada coeficiente C_i, corresponde al *offset* en corto periodo para C_o, C_1 representa la deriva y C_2 denota el ratio de variación de la deriva.

En el caso de los osciladores de los satélites GLONASS, solo se proporciona los coeficientes de un polinomio de primer grado, donde $C_0 = -\tau_n$, correspondería al offset del reloj y $C_1 = \gamma_n$, corresponde al offset relativo a la frecuencia con que emite el satélite según el tipo de emisión basado en FDMA[2].

2.1.3. Efectos relativistas

Según la teoría de la relatividad de Einstein, los relojes funcionan a frecuencias diferentes si se encuentran en movimiento uno con respecto del otro, o si se encuentran en lugares con diferentes potenciales gravitacionales. Los satélites de posicionamiento GNSS operan a altitudes de 19.000 km, (GLONASS), y hasta 24.000 km, (Galileo), e incluso en órbitas muy elípticas hasta 35.000 km para el caso de la constelación japonesa *Quasi Zenith Satellite System*. Puesto que el marco isotrópico en el caso de GNSS es inercial y centrado en la tierra, los satélites se ven afectados por ambos efectos, así como también el receptor situado en un punto de observación de la tierra, debido a que ambos están localizados en lugares de diferentes potenciales gravitacionales.

Concretando para los relojes atómicos de los satélites, éstos se ven afectados tanto por la diferencia de potencial gravitatorio como por los efectos relativistas especiales debidos a la diferencia de velocidad (Ashby, 2003). La altitud del satélite principalmente constante, hace que la porción predominante de los efectos relativistas sea constante. Por lo tanto se asume como un desplazamiento con respecto de la frecuencia patrón nominal del satélite GPS δf / f = -4.4647 E-10 Hz. La parte variable del efecto relativista, a menudo denotado como el efecto relativista periódico, es causado por la excentricidad de la órbita del satélite. Este efecto puede alcanzar hasta aproximadamente 50 ns. Según Spilker Jr., (1996), la aproximación de primer orden de este efecto se puede calcular como:

$$\delta t_{rel} = -2\frac{\sqrt{GM_E}}{c^2} e\sqrt{A}\sin(E)$$

Correspondiendo a GM_E, la constante de gravitación por la masa de la tierra, e la excentricidad, E es la anomalía excéntrica de la órbita del satélite, y A denota los términos de los coeficientes.

Si se utiliza la expresión más exacta dada por la fórmula anterior, los efectos relativistas deben restarse de los coeficientes polinómicos del reloj. En el caso del posicionamiento relativo el efecto se cancela, no siendo tan inmediato en posicionamiento PPP.

[2] *Frequency división multiple access*

2.2. Determinación orbital precisa.

El posicionamiento GNSS depende fundamentalmente del conocimiento de las órbitas descritas por los satélites.

Para aplicaciones que requieran un rango de precisión de decímetros, las posiciones de los satélites se pueden derivar a partir del mensaje de navegación transmitido por el propio satélite. Las fórmulas necesarias para este cálculo vienen ampliamente detalladas en los respectivos Interface Control Documents e Interface Specifications de las distintas constelaciones, (GPS, 2012, GLONASS, 2008 …).

De manera generalizada, para la definición de la posición de un satélite orbitando alrededor de la Tierra son precisos seis parámetros, que corresponden a seis constantes de integración. La órbita teórica así definida, se corresponde con una elipse de Kepler (Hofmann-Wellenhof et al., 1992), y los parámetros que definen el movimiento Kepleriano vienen dados por:

- w Argumento del perigeo o punto de la órbita en que el satélite se haya más cerca del centro.
- Ω Ascensión recta del nodo ascendente
- I Inclinación del plano orbital
- a Semieje mayor de la órbita elíptica
- e Excentricidad de la elipse
- T_o Época de paso por el perigeo.

Las efemérides radiodifundidas normalmente están basadas en observaciones de las estaciones que conforman el segmento de control o terrestre de las distintas constelaciones. Partiendo de los datos más recientes se calculan las órbitas de referencia para cada uno de los satélites. Posteriormente, los datos que resultan del seguimiento de los satélites pueden introducirse en algún filtro recursivo y de mejora (como los filtros Kalman), obteniéndose las órbitas mejoradas por extrapolación, (Wells et al., 1987). En esencia las efemérides radiodifundidas contienen los parámetros para describir la elipse de Kepler en una época de referencia, además de otros términos de corrección secular y periódica y coeficientes de corrección. Estos parámetros son radiodifundidos periódicamente, y no deben ser usados mas allá de un periodo aproximado de cuatro horas siguientes a la obtención de los mismos.

Pero como bien se ha indicado antes, la órbita Kepleriana es una órbita teórica, y no tiene en cuenta las posibles perturbaciones del movimiento del satélite. Si tenemos en cuenta las distorsiones reales del vector aceleración del satélite, se observa cómo se producen variaciones temporales de los seis parámetros orbitales.

Para aplicaciones que requieran más precisión, en el rango milimétrico o centimétrico, las órbitas radiodifundidas no son suficientes, por lo que son necesarios los productos orbitales precisos de fuentes externas, procedentes de los centros de análisis o del International GNSS Service (IGS). Estos productos resultan imprescindibles en posicionamiento absoluto con Precise Point Positioning.

El objetivo de la determinación orbital precisa es resolver la ecuación del movimiento del satélite, tomando la expresión descrita en Springer (1999):

$$\ddot{\vec{X}}^{sat}_{gcrs} = -G\,M_E \frac{\vec{X}^{sat}_{gcrs}}{|\vec{X}^{sat}_{gcrs}|^3} + \vec{a}\,(t^t, \vec{X}^{sat}_{gcrs}, \dot{\vec{X}}^{sat}_{gcrs}, q_1, q_2, \ldots \ldots q_n)$$

La ecuación se puede dividir en dos términos: las fuerzas gravitatorias en función de la constante de gravitación y la masa de la tierra, (GM_E), y la aceleración perturbadora total del término a, siendo esta aceleración perturbadora función de:

t^t tiempo de transmisión
$\vec{X}^{sat}_{gcrs}$ la posición del centro de masas del satélite
$\dot{x}^{sat}_{gcrs}$ la velocidad del centro de masas del satélite y $q_{1\ldots\ldots}q_n$ los parámetros dinámicos orbitales.

Los productos calculados por los centros de análisis y el IGS[3], a su vez presentan varias latencias. Existen órbitas emitidas en *streaming* que son muy útiles para PPP en tiempo real, y órbitas de latencia ultra-rápida, rápida y finales, para procesamientos estáticos, tal y como se reseñaba en el Capítulo 1. Las precisiones estimadas para los modelos de órbitas y relojes emitidos a distintas latencias se pueden ver a continuación:

GLONASS Satellite Ephemerides		Sample Interval	Accuracy	Latency	Continuity	Availability
Final		15 min	~3 cm	12-18 days	weekly, every Thursday	99%
GPS Satellite Ephemerides / Satellite and Station Clocks		**Sample Interval**	**Accuracy**	**Latency**	**Continuity**	**Availability**
Broadcast (for comparison)	Orbits	1s	~100 cm	real time	Continuous	99.99%
	Sat. Clocks		~5 ns RMS; ~2.5 ns Sdev			
Ultra-Rapid (predicted half)	Orbits	15 min	~5 cm	predicted	4x daily, at 03, 09, 15, 21 UTC	95%
	Sat. Clocks		~3 ns RMS; ~1.5 Sdev			
Ultra-Rapid (observed half)	Orbits	15 min	~3 cm	3-9 hours	4x daily, at 03, 09, 15, 21 UTC	95%
	Sat. Clocks		~150 ps RMS; ~50 ps Sdev			
Rapid	Orbits	15 min	~2.5 cm	17-41 hours	daily, at 17 UTC	95%
	Sat. & Stn. Clocks	5 min	~75 ps RMS; ~25 ps Sdev			
Final	Orbits	15 min	~2 cm	12-18 days	weekly, every Thursday	99%
	Sat. & Stn. Clocks	Sat: 30 s; Stn.: 5 min	75 ps RMS; 20 ps Sdev			
Real-time	Orbits	5-60 s	~5 cm	25 seconds	Continuous	95%
	Sat. Clocks	5 s	300 ps RMS; 120 ps Sdev			

Tabla 2.1: Órbitas y relojes del IGS: Precisión, latencia y muestreo (© International GNSS Service Central Bureau, 2013)

En realidad, son muchos los factores los que provocan distorsiones de la aceleración de un satélite, ocasionando variaciones temporales de los parámetros Keplerianos. En un sentido amplio, estos factores pueden ser divididos en dos grupos, los de origen gravitacional y los de origen no gravitacional. Los de orden gravitacional son la no esfericidad del campo de la gravedad de la tierra, fuerzas gravitacionales de otros cuerpos, la luna, el sol, o el efecto de las mareas (directo e indirecto) etc. Los de orden no gravitacional son la presión de radiación solar (directa e indirecta), el rozamiento del aire, efectos relativistas y otros como el viento solar o las tormentas geomagnéticas. Es posible encontrar una descripción detallada de estas fuerzas a modelar en Curtis (2005).

Con el fin de resolver la ecuación del movimiento de manera inequívoca, se requieren seis condiciones iniciales. Estas son dadas por la posición del satélite y los vectores de velocidad en el momento de partida. Debido a la complejidad de la función, la ecuación de movimiento no se puede solucionar analíticamente. Por este motivo, es corriente resolverla a través de integración numérica, tal y como se describe en Beutler (2005). Finalmente, una vez que el vector de estado del satélite y las fuerzas que actúan sobre él son conocidos, su posición puede ser calculada para cualquier instante.

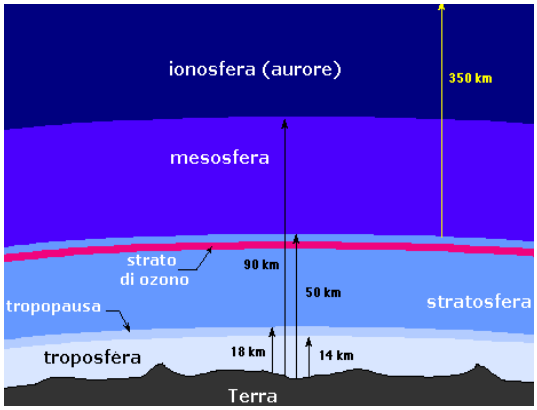
De cualquier forma, con el objetivo de tener en cuenta las inexactitudes en el conocimiento de las aceleraciones que actúan sobre el satélite, se necesita adicionalmente la estimación de modelos empíricos de comportamiento de determinadas fuerzas sobre los satélites de las distintas constelaciones, para conocer en detalle efectos como la presión de radiación solar.

2.3. Efectos sobre la propagación de la señal en la atmósfera.

La velocidad de propagación de la señal multiplicada por el intervalo de tiempo en que se propaga la señal nos proporciona una medida de la distancia y puede ser expresada en términos del índice de refracción para un medio. La señal GNSS en su viaje, desde el satélite hasta la superficie de la Tierra donde se encuentra el receptor GNSS, debe atravesar la atmósfera, la cual no es homogénea ya que está constituida por capas de diferentes índices de refracción.

[3] *International GNSS Service*

Hipotéticamente, si una onda electromagnética se propaga por el vacío, su velocidad de propagación, sea cual sea su frecuencia, es la velocidad de la luz *c*. Pero como dichas señales GNSS atraviesan capas atmosféricas, éstas sufren interacciones con las partículas cargadas que provocan retrasos en la trayectoria, y consecuentemente, un cambio en la velocidad y dirección de propagación. Las capas atmosféricas que presentan una mayor influencia son la troposfera y la ionosfera.



En un medio dispersivo, la velocidad de propagación, (o el índice de refracción), es una función de la frecuencia de la onda y el efecto de dispersión es causado por la interacción electromagnética entre el campo del medio, eléctricamente cargado y el campo externo asociado a la onda. En el caso de las señales GNSS, la ionosfera es un medio dispersivo para las frecuencias, es decir, que las señales de ambas frecuencias experimentan un retardo diferente al atravesar la ionosfera, mientras que al atravesar la troposfera experimentan el mismo retardo. Por lo tanto, en un medio dispersivo, no es igual la velocidad de propagación de una onda portadora que para un grupo de ondas.

Figura 2.2: Capas atmosféricas. (http://astroentrerios.com.ar/, 2014)

Si bien el objetivo de la investigación no es profundizar en estos efectos, es necesario reseñar los aspectos básicos y esenciales de su impacto.

2.3.1. Retardo troposférico

La troposfera se encuentra dentro de la parte inferior de la atmósfera, que abarca hasta unos 13-14 km. aproximadamente sobre la superficie terrestre. Se denomina refracción troposférica al efecto de la atmósfera neutral sobre las señales recibidas de los satélites. En realidad, la parte de la atmósfera que se extiende hasta unos 50 km de altitud, incluye, además de la troposfera, la estratosfera, pero debido a que la primera tiene mayor influencia, para denotar el efecto normalmente se utiliza el término refracción troposférica.

La troposfera no es un medio dispersivo y su impacto en la distancia medida no depende de la frecuencia de la portadora, todas las ondas comprendidas en la banda *L* utilizada en GNSS, experimentan el mismo retardo. Es por ello que afecta de igual manera tanto a la modulación del código como a la fase de la portadora, y no puede eliminarse con medidas de doble frecuencia.

Este retardo depende de la temperatura, la presión y la humedad relativa y varía con la altura del receptor en el terreno sobre el que éste se encuentra, y con el ángulo de elevación del satélite, y podría oscilar desde, aproximadamente 2,4 metros para satélites en el zenit y un usuario ubicado a nivel del mar, hasta 25 metros para satélites con un ángulo de elevación de aproximadamente 5º, (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

El retardo troposférico se denota como:

$$\Delta S_{trop} = \int_{Satélite}^{Receptor} (n_t - 1) \times dS$$

Donde:

ΔS_{trop} es el retardo troposférico expresado en m.
n_t corresponde al índice de refracción del medio troposférico.
dS denota el diferencial de arco de la trayectoria.

Tomando como N la refractividad del medio troposférico, la fórmula anterior puede expresarse como:

$$\Delta S_{trop} = 10^{-6} \int_{Satélite}^{Receptor} N \times dS$$

La refractividad en la troposfera puede ser modelada a través de su componente seca o hidrostática y su componente húmeda o denotada como no hidrostática. La componente seca provoca el 90% del retardo troposférico y puede ser estimado con precisión. La componente húmeda, que proviene de la cuantificación de vapor de agua, es más difícil de estimar debido a las incertidumbres en la distribución atmosférica y es el principal problema para la determinación del retardo troposférico. Ambas componentes se extienden a alturas diferentes en la troposfera, la capa seca se extiende a una altura de aproximadamente 40 Km., mientras que la componente húmeda a los 10 Km. aproximadamente.

El retardo producido por la componente seca se puede determinar con un 2 – 5 % de error. La determinación de la componente húmeda, mediante medición de parámetros meteorológicos en superficie, conlleva errores del 10 – 20 %, lo que corresponde aproximadamente a 3 – 5 cm. de error. Debido a que el contenido de vapor de agua en la troposfera presenta una fuerte correlación planimétrica, para distancias menores de 50 Km. y desniveles pequeños, gran parte de estos errores se eliminan al trabajar con métodos relativos, pudiendo obtener errores troposféricos residuales por debajo de 1 -3 cm.

Para conocer el retardo troposférico, por tanto, es necesario poder expresar la refractividad *N* de la capa atmosférica como una función de la presión, temperatura y presión del vapor de agua. En Thayer (1974), se propone la siguiente expresión para *N:*

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}$$

Donde:

P_d es la presión de la componente seca (unidades hPa)
e es la presión del vapor de agua (unidades hPa)
T temperatura (grados K)
Z_d y Z_w son factores de compresividad de las componentes seca y húmeda respectivamente, usualmente aproximados a la unidad

k_1 , k_2 , k_3 son coeficientes empíricos para los cuales pueden adoptarse varias aproximaciones. En Ahmed, (2010) se asume como k_1= *77.60 +/- 0.05 K/mbar,* k_2= *70.4 +/- 2.2 K/mbar y* k_3= *(3.730+/-0.012)* 10⁵ K²/mbar.*

El primer término de la ecuación es la componente seca de la refractividad N_{dry} y el segundo y el tercero conforman el efecto inducido por la componente húmeda $N_{wet.}$ Sustituyendo en la expresión del retardo troposférico tendríamos la expresión para el retardo total en columna para la posición de un receptor a una altura z_r:

$$\Delta S_{trop} = 10^{-6} \left(\int_{z_r}^{\infty} k_1 \frac{P_d}{T} dz + \int_{z_r}^{\infty} k_2 \frac{e}{T} dz + \int_{z_r}^{\infty} k_3 \frac{e}{T^2} dz \right)$$

Con esta fórmula se determina el valor *N* en el punto donde se encuentra estacionado el receptor. Para conocer el valor total de la corrección troposférica es necesario conocer el valor de la refractividad en todos los puntos de la trayectoria de la señal a lo largo de la troposfera. Para ello, se recurre no solo a los modelos troposféricos, entre los cuales se encuentran Hopfield, Hopfield modificado, Saastamoinen, Black, Niell etc.., sino también al cálculo y la estimación continuos de parámetros de retardo con el fin de aproximarse a las incertidumbres que presenta la componente no hidrostática (Priego et al., 2014), (Valdés et al., 2012).

En concreto, muchas de estas estimaciones son realizadas con cálculo horario a través del procesamiento relativo, (con dobles diferencias), pero por otro lado el procesamiento con un solo receptor mediante la técnica Precise Point Positioning es la estrategia utilizada por algunos centros de análisis como el GFZ[4] o el NGAA[5] para la determinación del retardo troposférico. Si bien las

[4] *Geo-forschungs zentrum potsdam*

estimaciones realizadas arrojan resultados en tiempo *quasi-real*, el desafío actual pasa por optimizar los procesos para disminuir la latencia de los productos y los mecanismos para obtener estimaciones en tiempo real (Stürze et al., 2014).

El ZTD[6] es la proyección cenital del retardo total en la dirección oblicua del rayo satélite-receptor, engloba los retardos oblicuos como un único retardo total en la dirección del cenit. A partir de este retardo troposférico cenital, se puede estimar la cantidad de vapor de agua integrada en la dirección del cenit con la misma precisión que otros métodos.
El retardo del trayecto troposférico se expresa comúnmente como un producto del retardo cenital (ZPD[7]) y lo que se denomina como "*mapping function*" (M), que proporciona el retardo troposférico de la señal GNSS en una dirección cualquiera. Un ejemplo de una *mapping function* como función de mapeo simple, dependiente del coseno del ángulo cenital (z), vendría dada por:

$$M = \frac{1}{\cos(z)}$$

Las *mapping function* desarrolladas actualmente, se construyen a partir de una fórmula truncada de varias componentes fraccionales como la presentada en Herring (1992):

$$\delta trop = \frac{1+\dfrac{a}{1+\dfrac{b}{1+c}}}{\sin(\varepsilon)+\dfrac{a}{\sin(\varepsilon)+\dfrac{b}{\sin(\varepsilon)+c}}} \cdot ZPD$$

Donde a, b, c son los coeficientes de la *mapping function*, siendo ε el ángulo de elevación del satélite respecto a la posición del receptor GNSS considerado.

Es necesario citar los casos de las funciones más empleadas actualmente como las desarrolladas por Niell (1996, 2000), o la *Vienna Mapping Function* (Boehm et al., 2006), existiendo una recopilación exhaustiva de todas ellas en Priego (2012). En concreto para la *Vienna Mapping Function* la función se distribuye a través de una malla, con una frecuencia estipulada de 4 veces al día. Diversos estudios han contrastado este modelo con otros, proporcionando diferencias a nivel milimétrico en la componente vertical y a nivel sub-milimétrico en la componente horizontal.

2.3.2. Retardo ionosférico.

El efecto ionosférico constituye una importante contribución de error a modelar para usuarios GNSS que requieran elevadas precisiones.

La ionosfera es un medio dispersivo que comprende la región de la atmósfera entre, aproximadamente, los 60 y los 2000 Km. por encima de la superficie de la Tierra. Dentro de esta región, los rayos ultravioletas del sol ionizan una porción de las moléculas gaseosas, liberando electrones. Se trata de un plasma débilmente ionizado o gas, que puede afectar a la propagación de ondas de radio de diversas maneras sobre todo en lo que respecta a su velocidad, pero también a su dirección y polarización (Sanz et al., 2013). La variabilidad de la ionosfera terrestre es mucho mayor que la de la troposfera resultando más difícil de modelar.

Los electrones libres afectan a la propagación de las radiaciones electromagnéticas y, por lo tanto, repercuten sobre las señales que proceden de los satélites GNSS. El carácter dispersivo de la ionosfera afecta de modo diferente a las distintas portadoras y contenido de la señal GNSS. Siendo el error negativo para la medida de fase, en el sentido en que se produce un avance de la portadora y se miden

[5] *Nordic Geodetic Commission of* Sweden
[6] *Zenith Total Delay*
[7] *Zenith Path Delay*

distancias más pequeñas, y positivo para las pseudodistancias, ya que se produce un retardo y se miden distancias más largas.

El número de electrones libres por m^3 o densidad de electrones n_e es un parámetro que varia con la altura. Una vez cuantificado, permite formular modelos que se aproximan a la descripción del comportamiento de las ondas electromagnéticas en su propagación. Normalmente, el impacto sobre la velocidad de propagación de las ondas se representa por el parámetro Total Electron Content (TEC) o contenido total de electrones en una columna vertical de un metro cuadrado de sección y que se extiende desde el receptor hasta el satélite, definido de manera generalizada como:

$$TEC = \int_{Satélite}^{Receptor} n_e dl$$

Donde l es el trayecto recorrido por la señal entre el satélite y el receptor. El TEC se expresa en unidades de electrones/m^2 o en TECU (TEC Units), donde 1 TECU es igual a 10^{16} electrones por m^2. El error por refracción ionosférica es proporcional a la densidad de electrones TEC y está en función del cuadrado de la longitud de onda y es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la portadora. El índice de refracción para una onda portadora de la señal GNSS puede expresarse como (Seeber, 1993):

$$n_f = 1 + c_2/f^2 + c_3/f^3 + c_4/f^4 + \ldots$$

Los coeficientes c_i dependen de la frecuencia de la señal y están en función de la densidad de electrones. Una expresión similar se utiliza para el índice de refracción de grupo, que se expresa como:

$$n_g = 1 - c_2/f^2 - 2c_3/f^3 - 3c_4/f^4 - \ldots$$

Para las señales que provienen de los satélites GPS, el coeficiente c_2 es, aproximadamente, tres veces mayor que el resto de los coeficientes c_i y su valor, en función de la densidad de electrones, se estima en -40,3 n_e, por lo tanto, se pueden realizar las siguientes aproximaciones con menos de un 0.1% de error (Sanz et al., 2013):

$$n_f = 1 - 40{,}3\, n_e/f^2$$

$$n_g = 1 + 40{,}3\, n_e/f^2$$

Donde se puede verificar que el índice de refracción de fase n_f es menor que la unidad, lo que demuestra que las distancias obtenidas a partir de la fase de las ondas portadoras son siempre menores que las reales. El índice de refracción de grupo n_g es mayor que la unidad, lo que pone de manifiesto que se producen distancias mayores que las reales ya que los observables de código se ven retardados a su paso por la ionosfera.

El error ionosférico cenital en unidades de longitud, se obtiene integrando a lo largo de toda la trayectoria de la señal:

$$I_f = \int (n_f - 1)\, dh = \int -40{,}3\, n_e\, dh / f^2 = -40{,}3\, TEC / f^2$$

Un ciclo expresado en metros es c/f, por lo tanto el retardo ionosférico cenital de la portadora expresado en ciclos es:

$$I_f / (c/f) = I_f f / c = -40{,}3\, TEC / (c f)$$

De forma análoga, el retardo ionosférico cenital en metros para el grupo se expresa como sigue:

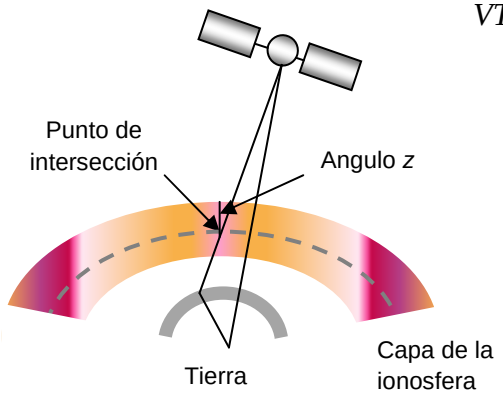
$$I_g = \int (n_g - 1)\, dh = +40{,}3\, TEC / f^2$$

Las expresiones anteriores reflejan el retardo ionosférico en la dirección vertical con un ángulo de elevación de los satélites de 90º. Para otros ángulos de elevación, es necesario aplicar un factor de oblicuidad, también llamado "*mapping function*".

Por razones de simplicidad, la trayectoria de propagación se asume generalmente que sigue la distancia geométrica. Por tanto, el valor del TEC a lo largo de este camino se conoce como el valor *slant-TEC* (STEC).

Adicionalmente, con el fin de hacer los diferentes valores estimados del TEC comparables y permitir la aplicación de modelos de ionosfera a nivel mundial, los valores STEC son convertidos al valor VTEC[8] o contenido total de electrones vertical. La representación del valor VTEC condensa o proyecta el impacto de la ionosfera a lo largo de una capa de cobertura global, como se muestra en la figura elaborada siguiente. La ecuación para la obtención del contenido total VTEC viene expresada en Schaer (1999), como:

$$VTEC = \frac{1}{M} \; TEC$$



Siendo M una *mapping function* que emplea el ángulo cenital que forma la trayectoria de propagación con la capa ionosférica en el punto de intersección, según la figura.

$$M = \frac{1}{\cos(z)}$$

Figura 2.3. Gráfico de la trayectoria de la señal y ángulo z.
Elaboración propia

Debido a que el retardo ionosférico está en función de la frecuencia, puede ser mitigado si trabajamos con receptores de doble frecuencia, ya que si utilizamos dos señales con diferentes frecuencias, como el retardo depende de la longitud de onda, será distinto para cada frecuencia y podremos obtener un retardo diferencial entre ambas. El error ionosférico en L1 puede expresarse como:

$$\Delta S_{L1} = f_{L2}^2 / (f_{L2}^2 - f_{L1}^2) (\rho_{L1} - \rho_{L2})$$

La diferencia de longitud en L2 queda estimada de forma: $\Delta S_{L1} (f_{L1} / f_{L2})^2$

Normalmente se generan combinaciones de observables, que por su naturaleza, estén libres del efecto ionosférico. Es el caso de la combinación llamada *"ionosphere-free"*, o libre de ionosfera, donde los efectos ionosféricos de primer orden dependen al 99.9% de la inversa del cuadrado de la frecuencia (Sanz et al., 2013). Por lo que los receptores de dos frecuencias pueden mitigar este efecto a través de dicha combinación lineal para las medidas de fase y pseudodistancia, como se verá en apartados posteriores.

En caso de trabajar con una sola frecuencia, estas combinaciones no pueden ser utilizadas, por lo tanto, se tienen que emplear modelos empíricos para corregir el retardo ionosférico. Un ejemplo importante es el modelo Klobuchar, que puede llegar a reducir en un 50 % los efectos de la ionosfera en latitudes medias, a través de una serie de coeficientes incluidos en el mensaje de navegación. Para las constelaciones GPS, Beidou, y Galileo existen modelos diseñados para ser transmitidos en el mensaje de navegación, no existe sin embargo un modelo emitido para la constelación GLONASS, aunque se le puede aplicar el modelo ionosférico para GPS, o las otras constelaciones, mediante la aplicación de un factor de corrección determinado por la variación relativa en función de la frecuencia.

El retardo ionosférico depende del ángulo de elevación del satélite, siendo menor en el cenit y mayor cuando disminuye el ángulo de elevación. Por otro lado, en observaciones nocturnas, los niveles de TEC son menores que durante el día, lo que implica un error menor en la pseudodistancia. Para una señal incidiendo verticalmente, el retardo se extiende aproximadamente de 10 ns (3 m.) por la noche

[8] *Vertical Total Electron Content*

hasta 50 ns (15 m.) durante el día. En ángulos de elevación bajos (0º a 10º) el retardo se extiende de 30 ns (9 m.) durante la noche, a 150 ns (45 m.) durante el día. Un valor típico (1σ) para el retardo ionosférico residual en promedio para los ángulos de elevación es de 7 m.

2.4. Pérdida de ciclo y multipath

Cuando acaece una pérdida de ciclo en la señal GNSS, se produce un salto en el registro de la medida de fase, que es producido por alguna interrupción o pérdida de la señal enviada por el satélite. Dichas pérdidas suelen ser producidas por obstrucciones de la señal debidas a la presencia de edificios, puentes o árboles. También se pueden producir debido a bajas calidades señal-ruido, por malas condiciones ionosféricas, receptores en movimiento o baja elevación del satélite.

En concreto en el efecto multipath, la señal emitida por el satélite sufre múltiples reflexiones en superficies cercanas al receptor. Las señales reflejadas serán por tanto más largas por tener un tiempo de propagación mayor y pueden distorsionar considerablemente la amplitud y forma de la onda.

2.5. Efectos de sitio, cargas y mareas. Parámetros de orientación terrestre.

Hablando en un sentido global, una estación sufre unos movimientos periódicos bien reales o aparentes. Dado que la mayoría de los movimientos periódicos de la estación son muy parecidos en amplias zonas de la Tierra, a menudo se omite este efecto en posicionamiento relativo de líneas base de menos de 100 km. Sin embargo, si se quiere realizar un procesamiento científico de alta precisión consistente con los marcos de referencia internacionales actuales ITRF[9], los movimientos de una estación deben ser modelados como se establece en las recomendaciones del IERS[10]. Esto se logra alineando la solución de coordenadas ITRF, para separar el movimiento aparente del movimiento verdadero, de manera que estos efectos son modelados y eliminados de las ecuaciones de observación. El *offset* entre la posición verdadera (ecef)[11] y la aparente (site) es la contribución de varios efectos, adicionalmente a los efectos tectónicos con respecto a la época de referencia t_o (Schönemann, 2014):

$$\delta\vec{X}_{ecefsite} = \delta\dot{\vec{x}}(t-t_0) + \delta\,\vec{x}_{set} + \delta\,\vec{x}_{pt} + \delta\,\vec{x}_{oc} + \delta\,\vec{x}_{al}$$

Donde:

$$\delta\,\vec{x}_{set}, \delta\,\vec{x}_{pt}, \delta\,\vec{x}_{oc}, \delta\,\vec{x}_{al}$$

corresponden a las mareas terrestres sólidas, mareas del polo, carga oceánica y carga atmosférica respectivamente.

2.5.1. Mareas terrestres sólidas

El cuerpo rígido de la tierra se encuentra afectado por efectos de marea debido a la fuerza gravitacional. Los desplazamientos periódicos tanto en vertical como en horizontal causados por las mareas están representados por armónicos esféricos de grado *n* y orden *m*. Los valores de estos desplazamientos dependen débilmente de la latitud de la estación y de la frecuencia de las mareas, y hay que tenerlos en cuenta cuando se busca una precisión milimétrica y submilimétrica.
En Kouba, (2009), se desarrolla la expresión para los desplazamientos, en la que la corrección por mareas puede alcanzar unos 30 cm en la componente radial, (altitud), y hasta 5 cm en la dirección horizontal, y consiste en una parte permanente y una parte periódica con períodos diurnos y semi-diurnos. La parte periódica es, en gran medida, promediada para un posicionamiento estático durante un período de 24 horas. Sin embargo, la parte permanente, puede alcanzar hasta los 12 cm en las latitudes medias (en la componente altimétrica), manteniendo el valor durante 24h.

[9] *International Terrestrial Reference Frame*
[10] *International Earth Rotation Service*
[11] *Earth Centered Earth Fixed*

En otras palabras, la corrección completa (llamada "marea-free"), que incluye tanto los desplazamientos permanentes como los periódicos de las mareas, se debe aplicar para ser coherentes con el marco ITRF. Para posicionamiento diferencial de líneas base hasta 100 km, ambas estaciones sufren los mismos desplazamientos, por lo que los resultados realmente apenas se van a ver afectados.

2.5.2. Deformación de la rotación debido al movimiento del polo

Los cambios del eje de rotación de la Tierra con respecto a la corteza terrestre, es decir, el movimiento del polo, producen deformaciones periódicas denominadas mareas del polo.

La mayoría de Centros de Análisis utilizan esta corrección cuando generan las órbitas y las soluciones de reloj, por tanto los productos combinados de órbitas y relojes IGS son consistentes con esta corrección. Para una mayor precisión en la posición, (nivel sub-centimétrico), las correcciones por mareas del polo se consideran en la solución del procesamiento con el fin de ser coherentes con el marco ITRF. El movimiento del polo puede repercutir en desplazamientos máximos de unos 25 mm en altura y unos 7 mm en la dirección horizontal. El desarrollo y formulación de estos efectos viene detallado en las convenciones adoptadas por el IERS[12], tal y como se formula en Petit y Luzum (2010).

2.5.3. Carga oceánica

La carga oceánica es similar a las mareas terrestres sólidas, ya que está dominada por períodos diurnos y semi-diurnos, pero los desplazamientos son de un orden de magnitud más pequeños que las producidas por mareas terrestres sólidas, estando la carga oceánica más localizada, y por convención no tiene una parte permanente. Para un posicionamiento estático durante un periodo de 24 horas y/o para las estaciones que están lejos de los océanos, y por tanto de la carga oceánica, esta corrección puede ser obviada. Por otra parte, para el posicionamiento cinemático a nivel centimétrico de un punto o el posicionamiento preciso y estático a lo largo de las regiones costeras en intervalos de observación significativamente inferior a 24 horas, este efecto hay que tenerlo en cuenta.

Para una precisión centimétrica se debe utilizar un modelo global de mareas reciente, tal y como el FES2004 e incluso puede ser necesario aumentar el modelo global de mareas con cartas de mareas locales.

2.5.4. Carga atmosférica

A diferencia con el efecto causado por la carga oceánica, que incide principalmente en las estaciones en las regiones costeras, las cargas atmosféricas afectan principalmente a las estaciones en las placas continentales. Al igual que el anterior efecto citado, la carga atmosférica afecta principalmente a la componente de altura, pudiendo provocar desplazamientos en el rango de varios centímetros (Boy, 2011). Existen modelos o mallas espaciadas regularmente con la representación de las correcciones por carga atmosférica proporcionadas por el *IERS Special Bureau for Loading*.

2.5.5. Parámetros de orientación de la tierra.

Los parámetros de rotación de la Tierra (es decir, la posición del polo Xp, Yp y UT1 (tiempo universal) – UTC (tiempo universal coordinado)), junto con las convenciones para el tiempo sidéreo, y los efectos de la precesión y nutación, proporcionan las transformaciones precisas entre los marcos de referencia terrestre e inercial requeridas en el análisis global con GNSS según las convenciones IERS. Por lo tanto, las órbitas resultantes estarán en el marco de referencia convencional terrestre, al igual que los productos de órbitas del IGS, y llevan implícitos los parámetros de orientación de la tierra.

En consecuencia, los usuarios que constriñen fuertemente el procesamiento a las órbitas IGS y trabajan directamente en ITRF los utilizan implícitamente. Sin embargo, si se utilizan herramientas

[12] *International Earth Rotation Service*

formuladas en un marco inercial, los parámetros de orientación de la tierra, se deben utilizar junto con modelos sub-diarios de parámetros de acuerdo con las convenciones IERS[13].

2.6. Retardos y *offsets* dependientes de la antena

De todos es sabido que las antenas, en función de su propósito (receptor *rover*, estación de referencia o satélite), tipo, diseño o electrónica interna (filtro o amplificador), muestran características y comportamientos diferentes. Por lo tanto, es común la práctica de aplicar tablas de calibración de la antena para el procesamiento y análisis de observaciones de fase.

En lo referente a las antenas de los receptores, todas las señales GNSS se reciben en un solo punto, denotado como el centro de fase de la antena (APC). El APC es un punto virtual, en la parte interior/superior de la antena, que no se puede utilizar como punto físico para referir la medición sobre el punto de estacionamiento. Por esta razón, se utiliza como punto de referencia de la antena el denominado Antenna Reference Point (ARP).

Existen diferentes técnicas para la calibración de los distintos modelos de antenas de receptores que se han desarrollado y establecido en la práctica. Básicamente, hay tres enfoques diferentes ampliamente estudiados y desarrollados en bibliografía de varios autores: calibraciones en campo relativas (Rotacher et al., 1996), calibraciones en campo absolutas (Wübbena et al., 1996) y calibraciones absolutas realizadas en cámara (Schupler y Clark, 1991). En contraste con las calibraciones en campo, las calibraciones en cámara hacen uso de señales artificiales, generalmente frecuencias portadoras no moduladas. Por razones de consistencia, la mezcla de calibraciones relativas y absolutas no es, en absoluto, aconsejable. Las calibraciones relativas de antena del IGS fueron el método a utilizar hasta noviembre de 2005 (Gendt, 2006). Este método hacía uso de una antena de referencia, cuyo modelo es del tipo AOADM_T[14], asumiendo que sus valores de centro de fase eran cero. Este supuesto, junto con otras limitaciones de esta técnica, conducía a errores sistemáticos. Por lo que desde entonces, el IGS ha hecho uso únicamente de calibraciones absolutas para antenas de receptores.

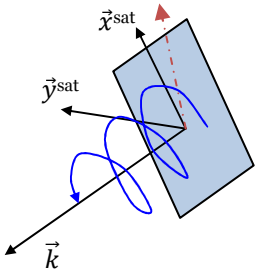
En el caso de los satélites, la calibración de las antenas aún resulta un proceso más complejo. Una característica a conocer de los satélites es la separación entre su centro de masas (COM) y el centro de fase de la antena del satélite (APC). Debido a que los modelos de órbitas de los satélites se refieren al centro de masas, las coordenadas precisas del satélite calculadas por parte de los centros de análisis y los productos del reloj, también se refieren al centro de masas, a diferencia de las efemérides difundidas en el mensaje de navegación, que se refieren al centro de fase de la antena del satélite. Sin embargo, las mediciones se realizan respecto al centro de fase de la antena, por lo tanto es necesario conocer la diferencia y disponer de la orientación del vector *offset* entre ambos puntos en el espacio.

El grupo de trabajo del IGS dedicado a calibraciones de antenas ofrece un conjunto coherente de calibraciones para antenas de satélite, que son resultado de observaciones a satélites y ajustes secuenciales mínimo-cuadráticos a nivel global, tal y como viene detallado en Schmid et al., (2007).

2.7. Polarización en la señales por la actitud del satélite: *Phase wind-up*

Las señales GNSS, son en general, radio-ondas que se polarizan circularmente. Cuando se producen cambios relativos en la orientación de la antena del satélite, la señal, polarizada, da lugar a diferentes medidas. Es decir la medida de fase de la portadora depende de la orientación entre las antenas de satélite y el receptor. Una rotación de cualquier receptor o antena de satélite alrededor de su eje vertical provoca un cambio en la fase de hasta una longitud de onda, que corresponde a una revolución completa de la antena. Este efecto se denomina "*phase wind-up*".

[14] *Allen Osborne Associates Dorne Margolin T*



La antena del receptor no gira y generalmente está orientada hacia el norte. Sin embargo, las antenas de satélites están sometidas a rotaciones lentas, debido a que sus paneles solares están orientados hacia el Sol. En Wu et al., (1993), se detalla cómo puede ser calculado este efecto.

La corrección por orientación de la antena o actitud del satélite por lo general suele omitirse, ya que es bastante insignificante si se usa dobles diferencias en las líneas base y en redes que abarcan unos cientos de kilómetros. Sin embargo, se ha demostrado que puede alcanzar un máximo de 4 cm para una línea base de 4000 km.

Figura 2.4: Efecto "wind-up". Elaboración propia.

Puede verse representado en la figura diseñada, basada en Schönemann (2014), donde $\vec{k}$ es el vector unitario entre el receptor y el satélite.

2.8. Retardos de señal no calibrados y *bias* entre observables.

Los retardos de la señal no calibrados, se producen en los observables de la fase de la portadora (*uncalibrated phase delays* -UPD) y de código (*uncalibrated code delays* -UCD). Se definen como una combinación de numerosos efectos diferentes no separables que sufre la señal no incluidos hasta ahora (Schönemann, 2014). Estos efectos incluyen retardos de las señales debidos al hardware, retardos por propagación no modelados, inexactitudes de los modelos, la parte fraccional de las ambigüedades y aproximaciones empleadas (por ejemplo modelos PCV[15]) o incluso multipath.

En el estudio de los retardos no calibrados o sesgos entre observables, y en la cuantificación del retardo se obtienen valores relativos, tomando como referencia uno de los observables GNSS y frecuencia dada o combinación de frecuencias tal y como se muestra en Leandro, (2009). Por ello, el retardo calculado adopta la denominación de sesgo relativo o *bias,* (en inglés), pudiendo ser cuantificado en unidades de tiempo o de longitud.

La denominación de *bias* se utiliza a menudo en la teoría de la Geodesia Espacial. Por este motivo, también es importante distinguir entre valores de *bias* entre sistemas (*inter-system bias* -ISB), *bias* entre distintas frecuencias (*inter-frequency bias* -IFB) o *bias* entre observables dentro de la misma frecuencia. Por ejemplo, algunos de los retardos del observable código se proporcionan como *bias* diferenciales entre los distintos códigos rastreados por el instrumental. Un sesgo C1-P1, es un *bias* entre observables de código que pertenecen a una misma frecuencia.

Su estudio debe ser tenido en cuenta a la hora de procesar y obtener productos GNSS combinados en el escenario multi-constelación actual (Dach et al., 2010).

Es necesario resaltar, que también se utiliza la denominación *bias* para denotar simplemente a la fracción de ciclo de las ambigüedades de fase cuando esta tiene el valor flotante.

2.8.1. *Bias* entre sistemas (ISB) y *bias* entre frecuencias (IFB)

Hasta hace poco en las observaciones con dos frecuencias los retardos de señal no calibrados solían ser absorbidos en el mismo proceso que las estimaciones de reloj siendo mitigado en el cálculo de las dobles diferencias. Sin embargo, esta situación ha cambiado tan pronto como otras señales intervienen, como en el caso del procesamiento conjunto de observaciones GPS y GLONASS (Schönemann, 2014). Por esta razón, es una práctica común que los llamados sesgos o *bias* entre sistemas, (*ISB*)[16], que aparecen en este caso sean valores estimados, cuando los centros de análisis elaboran productos multi-constelación.

[15] *Phase Center Values*
[16] *Inter-system Bias*

En cuanto a los sesgos entre frecuencias, (*IFB*)[17], son los sesgos entre observables que son rastreados en diferentes frecuencias de la señal GNSS. Es de destacar que en la constelación GLONASS la presencia de este *bias* es relevante al modular cada satélite la señal con una frecuencia distinta.

En el caso de la constelación GLONASS, cada satélite o cada par de satélites situado cada uno en zonas anti-podas de la constelación, emite la señal con una frecuencia propia dentro de las bandas L1 y L2, por lo que es necesario conocer el sesgo existente entre estas frecuencias emitidas.

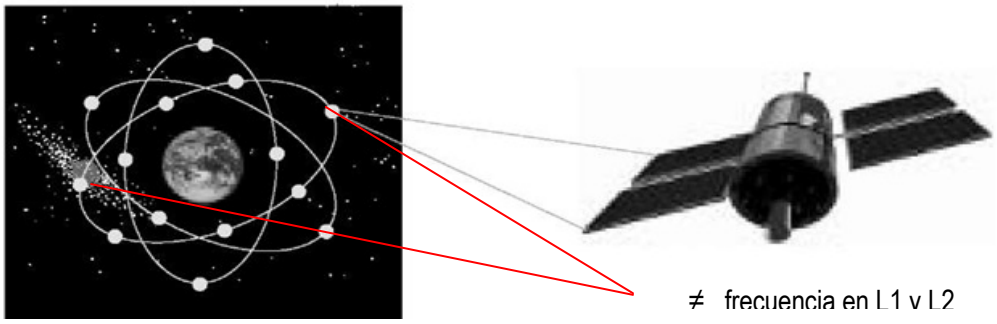


Figura 2.5: Constelación GLONASS (http://what-when-how.com/gps/other-satellite-navigation-systems-gps/ . Visitado: 2013)

En el caso de utilizar satélites GLONASS + GPS para la generación de los productos GNSS, por lo tanto, los centros de análisis contemplan no solo el sesgo entre sistemas (*ISB*) sino también el sesgo entre frecuencias *IFB* (Dach et al., 2010). En su caso más general esta combinación de sesgos (*ISB +IFB*), puede dar, estrictamente hablando, como producto un *bias* entre el producto GPS y cada una de las frecuencias emitidas en GLONASS.

Hasta la mitad de la década del 2000, no obstante, la obtención de productos combinados GPS +GLONASS resultaba muy compleja, debido a la distribución tan dispersa de estaciones GLONASS a nivel global. Esta situación provocaba que la estimación de los *biases* entre sistemas y entre frecuencias fuera poco fiable, y que las series de productos (modelos de reloj etc…), presentara muchas discontinuidades. La mejora de la distribución de estaciones de rastreo GLONASS y el aumento de dicha constelación de satélites, han supuesto que este proceso se haya podido optimizar por parte de los centros de análisis ya a finales de la década del 2000.

El *bias* entre observables de distintas frecuencias, también es importante en la estimación de retardos ionosféricos (Leandro, 2009), puesto que en el estudio del retardo ionosférico interviene la comparativa entre observables de distintas frecuencias para calcular la diferencia de la afección en la señal cuando atraviesa esa capa de la atmósfera.

2.8.2. Retardos de fase no calibrados (UPD)

A diferencia con el procesamiento relativo en dobles diferencias, los retardos de fase no calibrados adquieren presencia en la solución del método Precise Point Positioning, arrojando una solución flotante para la ambigüedad, es decir corresponden a su parte fraccional. El carácter flotante del número de longitudes de onda en PPP estándar (que en dobles diferencias alcanza valor entero), se debe a que los retardos de fase no calibrados, (UPD[18]), quedan embebidos en el valor de la ambigüedad no siendo posible alcanzar el valor entero. Por ello existen varias investigaciones enfocadas a las técnicas de resolución de ambigüedad para PPP que en dicho proceso de resolución inciden en la obtención de los retardos de fase no calibrados.

Los retardos de fase no calibrados son muy estables en el tiempo, pero no pueden ser separados fácilmente del valor entero de las ambigüedades en el procesamiento secuencial, destruyendo consecuentemente el carácter entero que deberían tener las ambigüedades. Este entero puede ser recuperado para una solución PPP si los valores de los UPD, correspondientes a la parte fraccional de

[17] *Inter-frequency Bias*
[18] *Uncalibrated Phase Delays*

las ambigüedades, se determinan mediante procesamiento continuo con dobles diferencias de observaciones GNSS a partir de una red de estaciones de referencia, y aplicando estos valores para un posicionamiento PPP.

En Ge et al., (2008), se desarrolla como se realiza la estimación de los UPD, considerando estos como un *bias* que corresponde a la parte fraccional de la ambigüedad. En este caso, se promedia solamente la parte fraccional de todas las estimaciones de ambigüedad en un conjunto de estaciones de referencia. Para ello, se efectúa la diferencia de las observaciones entre satélites desde un solo receptor, para la estimación de la ambigüedad de cada estación de referencia eliminando los UPD dependientes del receptor y determinando los de cada satélite. La precisión de la estimación de los retardos de fase no calibrados, con las combinaciones de observables denominadas *wide-lane* y *narrow-lane*, es crucial para precisión en el posicionamiento, puesto que contribuye a obtener el valor fijo para la ambigüedad.

Otros autores como Laurichesse y Mercier (2008), tratan los retardos de fase no calibrados obviando la combinación de observables *narrow-lane,* pero los asimila durante la estimación de los modelos de reloj.

Ambas aproximaciones se desarrollarán en los apartados posteriores como métodos para la recuperación de ambigüedades enteras para PPP.

2.8.3. Sesgos entre observables de código.

En este apartado se considera los sesgos estudiados como sesgos *intra-frecuencias* ya que corresponden a los sesgos entre observables de código que se rastrean dentro de una misma frecuencia. Dependiendo de los observables que rastree un determinado equipo, (C1, P1, P2, C2 ..), debe considerarse su cálculo dentro del proceso de estimación de todos los parámetros que intervienen en el posicionamiento, (Leandro,2009). Sobre todo en posicionamiento absoluto preciso (PPP) o no diferencial.

Cuando el sesgo se calcula entre los códigos que se rastrean se denomina *"bias"* diferencial entre códigos *(differential code bias -DCB),* y existen en varias constelaciones.

El sesgo entre códigos es útil conocerlo potencialmente en diversas aplicaciones, como por ejemplo el proceso de datos en solución de red para tiempo real, dada las diferentes características de rastreo que puede presentar el instrumental perteneciente a una misma red. Hay que tener en cuenta que normalmente las redes GNSS están compuestas de receptores de distintos tipos, que rastrean distintos códigos dentro de las portadoras de la señal (C1, P1, P2, C2 ..), y donde el usuario dispone a veces de receptores que no rastrean los mismos observables que los empleados para calcular las correcciones de red. Debido a este motivo, el usuario necesitaría disponer de una estimación de los sesgos entre códigos.

Más concretamente, es necesario distinguir entre tres grupos de receptores basándose en la tecnología o técnica implementada en ellos de rastreo del código (Schaer et al., 2012):

- Receptores de algoritmo de correlación cruzada, por lo tanto el código P1 se obtiene a partir de $C1_{raw} + DCB_{P1\text{-}C1}$ ...etc...
- Receptores que no disponen de algoritmo de correlación cruzada y solamente rastrean los códigos P1 y P2.
- Receptores que no disponen de algoritmo de correlación cruzada y solamente rastrean los códigos C1 y P2.

2.8.3.1. *Bias o sesgo (DCB)* entre los códigos C1 y P1

Los productos IGS y de los centros de análisis de estado de reloj y órbitas, de gran uso en posicionamiento absoluto preciso, (PPP), se obtienen a partir de la combinación del observable libre de ionosfera o corregidos del efecto ionosférico (*"iono free"*). Por lo tanto la aplicación de estos productos es solo rigurosamente correcta si se aplican sobre la misma combinación de observables y sus correspondientes medidas de fase. No obstante, esta combinación de observables solo es posible

del lado del usuario si el receptor rastrea los mismos códigos empleados en la generación del producto, situación que sabemos que a veces no se produce con determinados receptores. Cuando esto sucede, la solución pasa porque en el procesamiento se "convierta" el observable, por ejemplo el código C1 rastreado por el receptor, al código P1 empleando el sesgo conocido entre ambos observables (Hauschild et al., 2010).

La manera más simple para su determinación es por comparación de dos códigos que están siendo rastreados simultáneamente en dos receptores. Este sesgo contendrá una parte correspondiente al receptor y una componente correspondiente al satélite. El *bias* debe ser estimado de manera que se garantice la consistencia entre el sesgo y los modelos de correcciones de reloj, y para que pueda considerarse un valor prácticamente constante a lo largo del tiempo para estimar las correcciones de reloj.

Existen diversas aproximaciones para la determinación del sesgo entre los códigos C1-P1. En Leandro, (2009), se desarrolla una técnica que parte de la ecuación de pseudodistancia, tomando como datos conocidos los productos de correcciones de reloj del IGS que a su vez han sido determinados usando la combinación de observables libre de efecto ionosférico. Sin embargo la parte de la observación que no es modelada (ruido *multipath* y errores residuales del resto de afecciones de la señal), hace insuficiente la precisión obtenida si se utiliza un solo receptor, por consiguiente el problema es mucho más complejo de resolver.

Para la constelación GLONASS, el correspondiente *bias* entre los códigos de una misma frecuencia (P1-C1, P2-C2) se estima a partir del *bias* entre sistemas que lo relaciona con la constelación GPS.

2.8.3.2. *Bias o sesgo (DCB)* entre los códigos P2 y C2

Dentro del plan de modernización de la constelación GNSS, a finales de los 90 y durante la reciente década del 2000, se llevaron a cabo diversas actuaciones. Entre otras, el diseño de los satélites del Bloque IIR-M, los cuales eran capaces de emitir el nuevo observable código de uso civil L2C, dentro de la frecuencia L2. El primero de estos satélites fue lanzado en el año 2005.

Hasta esa fecha el *bias* intra-frecuencia dentro de la L2, nunca había sido considerado, puesto que solo se emitía el código P2. Con la nueva generación de satélites, aparecía por tanto el código L2C (denominado C2 según la nomenclatura RINEX), y surgía la necesidad de determinar el sesgo diferencial entre códigos cuando se combinaban los dos observables en las mediciones GNSS, más aún cuando se mezclaban distintos modelos de receptor con diferente capacidad de rastreo (P2 o C2). Conociendo este valor, es posible utilizar el observable C2 para posicionamiento, si se están aplicando los modelos de estado de reloj de satélite calculado normalmente utilizando solamente el código P2.

2.9. La técnica Precise Point Positioning.

El fundamento teórico de la técnica Precise Point Positioning (PPP) fue establecido en Zumberge et al., (1997), como técnica de posicionamiento absoluto a partir de mediciones de código y/o de fase de un solo receptor. El segundo receptor, que se necesitaría para resolver el posicionamiento relativo, quedaba sustituido teóricamente, entre otras cosas, por la aplicación de modelos de estado de relojes, órbitas, de propagación y de otros términos a modelar, obtenidos a partir de una red continua de receptores GNSS y gracias a los algoritmos y combinaciones de observables que emplea esta técnica.

El posicionamiento absoluto de precisión con un solo receptor constituía un hito realmente inviable hasta muy recientemente, por la dificultad en la cancelación de errores y resolución de ambigüedades al trabajar con observaciones absolutas. Sin embargo, esta situación ha ido evolucionando a medida que el conocimiento, la precisión y la latencia de los modelos de errores iban mejorando por parte del IGS (*International GNSS Service*) y diversos centros de análisis.

Sin necesidad de aplicar el algoritmo que supone la base del posicionamiento diferencial, (las ecuaciones de dobles diferencias), la técnica PPP constituye un método en desarrollo de gran potencial en la que se emplean observaciones no diferenciales con la modelización aportada por los productos de estado de reloj, de satélite, de correcciones a la parte fraccional de las ambigüedades y de correcciones

atmosféricas. Queda patente, entonces, que el rendimiento del método depende directamente de la calidad, control, evolución con el tiempo los productos, y de la capacidad de alcanzar la solución fija de ambigüedades de fase.

La investigación y evolución de la técnica, constituye una gesta de gran relevancia que potencialmente hace del posicionamiento PPP con un único receptor una futura técnica competitiva frente al posicionamiento relativo entre dos receptores o entre un receptor y una red de estaciones. El logro de conseguir una alta precisión con un solo receptor es, probablemente, tan innovador y revolucionario como la introducción del GPS en sí, y puede ser muy útil en zonas donde no se haya desarrollado una infraestructura cercana de estaciones permanentes GNSS, áreas de alta montaña, desérticas o zonas polares.

Por definición, la técnica PPP utiliza los modelos matemáticos obtenidos de las combinaciones entre mediciones de código y fase de observaciones GNSS, conducentes a obtener la solución libre de efecto ionosférico *(ionosphere-free)*, que sufren los observables al atravesar la capa de la ionosfera. Dicha combinación minimiza el efecto ionosférico de primer orden en torno a un 99%,(Sanz et al., 2013).

Sean las medidas de pseudodistancia y fase, P_i y Φ_i (i=L1,L2), definidas como una modelización del conjunto de efectos que sufren las señales debido a su propagación, retardos instrumentales y *offsets* de reloj, (Sanz et al., 2013):

$$P_i = \rho + c\,(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + Tr + \tilde{\alpha}_i\,(I + K_{21}) + M_i + \varepsilon_i$$

$$\Phi_i = \rho + c\,(\delta t_{rec} - \delta t^{sat}) + Tr - \tilde{\alpha}_i\,(I + K_{21}) + N_i' + \lambda_i\,\omega + m_i + \varepsilon_i$$

Donde:

- ρ, es la distancia geométrica entre el satélite y el centro de fase de la antena (APC) del receptor en la época de transmisión y recepción respectivamente.
- c, es la velocidad de la luz.
- δt_{rec} y δt^{sat}, son los *offsets* de los relojes, del receptor y satélite respecto a la escala de tiempo GNSS.
- Tr, es el retardo en la señal provocado al atravesar la capa de la troposfera.
- I, es el efecto ionosférico producido por el paso de la señal por la capa de la ionosfera, y que dado su carácter dispersivo, el término va a depender de la frecuencia.
- K_{21}, representa los retardos o *bias* instrumentales de los satélites y el receptor y son dependientes de la frecuencia ($K_{21}=K_{21,rec} - K_{21}^{sat}$). Independientemente de si se refieren al receptor o al satélite, el término K_{21} se obtiene como el retardo entre frecuencias, f_{L1} y f_{L2}.
- M_i, son los errores debidos al efecto multicamino (multipath) del observable código.
- ε_i, contiene los errores debidos a otros efectos no modelados que contribuyen al ruido de la observación.
- $\lambda_i\,\omega$ es el efecto *wind-up* de polarización circular de la señal electromagnética.
- m_i , contiene los efectos multipath de la fase portadora.

El resto de términos o coeficientes denotan:

$$\lambda_i = \frac{c}{f_i}\,,\ \tilde{\alpha}_1 = \frac{1}{\gamma_{12}-1}\,,\ \tilde{\alpha}_2 = \gamma_{12} - \tilde{\alpha}_1 = 1 + \tilde{\alpha}_1,\ \gamma_{12} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2}$$

El término N_i' es de especial importancia puesto que representa a la ambigüedad de carácter flotante de manera que:

$$N_i\,' = b_i + \lambda_i N_i,$$

siendo b_i un número real que corresponde al *bias* del valor entero N_i de la ambigüedad, que denota su parte fraccional. Como se ha visto antes, este valor también se denomina UPD, (*uncalibrated phase delay*). Esta parte fraccional se descompone a su vez en una parte dependiente del receptor y una parte dependiente del satélite como $b_i = b_{i,rec} - b_i^{sat}$.

Es necesario resaltar que el origen de los efectos a modelar representados en los distintos términos ha quedado definido anteriormente en el presente capítulo.

2.9.1. Combinaciones de observables empleadas en PPP

El carácter dispersivo de la ionosfera conduce a que al medir los observables en más de una frecuencia, sea posible con la combinación de los mismos, mitigar el impacto del retardo ionosférico. Partiendo de las ecuaciones que modelan la observación de pseudodistancia y fase, se plantea la combinación libre de ionosfera, (*iono-free*), para P_c y Φ_c, también denominadas P_3 y L_3, (Kouba, 2009), dependientes de la inversa del cuadrado de la frecuencia para medidas de P_i y Φ_i en las dos frecuencias, (Sanz et al., 2013), de manera que:

$$P_C = \frac{f_{L1}^2 P_{L1} - f_{L2}^2 P_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}, \qquad \Phi_C = \frac{f_{L1}^2 \Phi_{L1} - f_{L2}^2 \Phi_{L2}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}$$

Como se ha introducido anteriormente no todas las fuentes de error de las observaciones GNSS van a poder ser modeladas completamente. Por ello se hace uso frecuente en la teoría clásica de Geodesia Espacial del desarrollo de distintas combinaciones lineales con el fin de mitigar las distintas afecciones. Estas combinaciones dan lugar a nuevos observables con distintas longitudes de onda que optimizan las características de la observación, facilitando la obtención de las ambigüedades enteras, a costa de perder las características físicas originales de las observaciones crudas. Además de la combinación libre de ionosfera, entre las combinaciones lineales de observables GNSS más frecuentes encontramos la combinación de libre geometría L_4, la combinación *wide-lane* o también denominada de banda ancha L_w o L_5, la combinación *narrow-lane* o de banda estrecha L_6 y la combinación *Melbourne-Wübbena*.

La combinación lineal del observable fase, por ejemplo, es una expresión muy simple que se lleva a cabo por la expresión:

$$\Phi = N_1 \Phi_1 + N_2 \Phi_2$$

siendo Φ_i la medida sobre la portadora correspondiente.

La combinación libre de ionosfera, vista antes, describe el modelo lineal de observación para PPP donde las medidas de fase y de la pseudodistancia son modeladas de la siguiente forma:

$$P_C^j = \rho^j + c\,(\delta t_{rec} - \delta t^j) + Tr^j + M_C^j + \varepsilon_C^j$$

$$\Phi_C^j = \rho^j + c\,(\delta t_{rec} - \delta t^j) + Tr^j + \lambda_N \omega^j + B_C^j + m_C^j + \varepsilon_C^j$$

donde P_C^j es la combinación de pseudodistancia no suavizada para el satélite j rastreado y Φ_C^j es la correspondiente a la medida de fase. Es importante resaltar que ρ está referida al centro de fase de la antena en esta combinación y que el resto de términos son análogos a los descritos anteriormente.

El término B_C^j corresponde a la ambigüedad flotante de la combinación libre de ionosfera, pudiéndose expresar a su vez en función de términos obtenidos de otras combinaciones de observables denominadas *wide-lane*, *narrow-lane* y de la combinación *Melbourne-Wübbena,* como se muestra a continuación*:*

$$B_C = b_C + \lambda_N\,(N_1 + (\lambda_W / \lambda_2)\,N_W)$$

Con $\lambda_N = c / (f_{L1} + f_{L2})$ procedente de la combinación *narrow-lane,* $\lambda_W = c / (f_{L1} - f_{L2})$ y N_W que proceden de la combinación $N_1 - N_2$ *(wide lane).*

La combinación *wide-lane* L_w también denominada en alguna bibliografía como L_5 tiene como objetivo formar un observable por sustracción entre las portadoras. Esta combinación es clave para la obtención de ambigüedades. La expresión general resulta para una época determinada t_i:

$$\Phi_{L1}\ (t_i)\ - \Phi_{L2}\ (t_i)$$

$$L_W = (f_{L1}\ \Phi_{L1}(t_i)\ \lambda_{L1}\ - f_{L2}\,\Phi_{L2}(t_i)\ \lambda_{L2}\,/(f_{L1} - f_{L2})$$

Para la medida de pseudodistancia se desarrolla de manera similar. Siendo para el resto de las magnitudes:

$$f_W = f_{L1}\ - f_{L2}$$

Dando lugar a un observable de frecuencia f_w= 347.82 MHz y de longitud de onda mayor λ_w = 86.2 cm, superior a las nominales de L1 y L2.

De manera análoga la combinación *narrow-lane* o L_6, viene dada por la adición entre las portadoras:

$$\Phi\ (t_i) = \Phi_{L1}\ (t_i)\ + \Phi_{L2}\ (t_i)$$

El efecto ionosférico sobre la combinación de observables L_6 es aproximadamente 1.28 veces el efecto sobre L_1. Sin embargo el ruido sobre la combinación *narrow-lane* es más pequeño.

La combinación Melbourne-Wübbena propuesta por Melbourne (1985), y Wübbena y Goad (1985), realmente es una combinación del observable de fase generado mediante la combinación *wide-lane* y observables de código sobre los que se efectúa la combinación *narrow-lane*. El nuevo observable resultante minimiza efectos de propagación, y otros errores como los estados de reloj.

Tiene la ventaja de que utiliza la combinación *wide-lane* obtenida como $\lambda_W = c / (f_{L1} - f_{L2})$, con una longitud de onda más larga que cada señal tratada individualmente. Mediante esta combinación se proporciona la estimación de la ambigüedad *wide-lane* (flotante) denotada como B_W, de acuerdo con la siguiente ecuación, (Sanz et al., 2011):

$$B_W\ =\ \lambda_W N_W\ +\ b_W\ +\ \varepsilon_{MW} = \Phi_W\ -\ P_N$$

Donde:

N_W son las ambigüedades enteras *wide-lane* estimadas
b_W incluye los *biases* del satélite y el receptor
ε es una medida del ruido donde se incluye tanto el multipath de la fase como del código. La medida del ruido se reduce por la combinación *narrow-lane* de los observables de código minimizando a través de esta combinación los valores de dispersión alrededor de su *bias*.

Por último, la combinación de libre geometría cancela la parte geométrica de la medida, quedando únicamente el retardo ionosférico, las constantes instrumentales y los efectos debidos al multipath y ruido de la señal. Puede aplicarse sobre el observable de fase y el de código, resultando muy útil para la detección de saltos de ciclo de fase y para la modelización ionosférica.

Se obtiene a partir de dos medidas en diferentes frecuencias, con la ventaja de que todos los errores no dependientes de la frecuencia se cancelan, denotando la expresión de libre geometría de la observación de fase como:

$$\Phi_4 = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}$$

Y para la observación de pseudodistancia:

$$P_4 = P_{L2}\ -\ P_{L1}$$

2.9.2. Modelo lineal de observación en PPP

Para cada satélite j con $j= 1... n$, el modelo lineal de observación $y=Gx$ para las combinaciones de pseudodistancia y fase, P_c^j y Φ_c^j, puede ser escrito como se muestra a continuación (Sanz et al., 2013):

$$y = \begin{bmatrix} P_C^1 - \rho_0^1 + c\delta t^1 - Tr_0^1 \\ \Phi_C^1 - \rho_0^1 + c\delta t^1 - Tr_0^1 - \lambda_N \omega^1 \\ \dots \\ \dots \\ P_C^n - \rho_0^n + c\delta t^n - Tr_0^n \\ \Phi_C^n - \rho_0^n + c\delta t^n - Tr_0^n - \lambda_N \omega^n \end{bmatrix}$$

El *offset* del reloj del satélite δt^j puede incluir la corrección relativista del reloj del satélite debido a la excentricidad orbital.

En el modelo lineal de observación para PPP, el término Tr_o es el valor nominal de la corrección troposférica. El retardo troposférico puede descomponerse en el término nominal $Tr_o(E)$, y en la desviación de este término denominada como componente húmeda del retardo troposférico, y denotada como $M_{wet}(E)\,\Delta Tr_{z,wet}$. Es decir:

$$Tr(E) = Tr_o(E) + M_{wet}(E)\,\Delta Tr_{z,wet}$$

$$Tr_o(E) = Tr_{z,dry}\ M_{dry}(E) + Tr_{zo,wet}\ M_{wet}(E)$$

Donde $Tr_{z,dry}\ M_{dry}(E)$ hace referencia a la componente seca.
$M_{wet}(E)$, denota a una *mapping function* o función de mapeo utilizada para la troposfera, y es un elemento de la matriz de diseño G, y $\Delta Tr_{z,wet}$ es una componente del vector de parámetros a determinar x. La matriz del sistema de ecuaciones G y el vector de parámetros x resultan:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{x_0-x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0-y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0-z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{x_0-x^1}{\rho_0^1} & \frac{y_0-y^1}{\rho_0^1} & \frac{z_0-z^1}{\rho_0^1} & 1 & M_{wet}^1 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_0-x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0-y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0-z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{x_0-x^k}{\rho_0^k} & \frac{y_0-y^k}{\rho_0^k} & \frac{z_0-z^k}{\rho_0^k} & 1 & M_{wet}^k & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_0-x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0-y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0-z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{x_0-x^n}{\rho_0^n} & \frac{y_0-y^n}{\rho_0^n} & \frac{z_0-z^n}{\rho_0^n} & 1 & M_{wet}^n & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = [dx, dy, dz, \delta t, \Delta Tr_{z,wet}, B_C{}^1, \dots, B_C{}^k, \dots, B_C{}^n]^T$$

Las observaciones simultáneas procedentes de varios satélites se procesan conjuntamente en un filtro que resuelve las diferentes incógnitas del vector x. Existen distintas implementaciones para la resolución del problema en PPP.
Algunas implementaciones utilizan un filtro secuencial, que puede ser adaptado según la dinámica del receptor, no se constriñe la evolución del estado del reloj y las ambigüedades son consideradas como constantes en cada secuencia. Otras soluciones para PPP utilizan un algoritmo iterativo, *(batch algorithm)*. En este caso el estado del reloj del receptor es estimado época a época, las coordenadas pueden ser ajustadas tanto en modo estático como en modo cinemático, y las ambigüedades son estimadas en cada paso.

El rendimiento de la técnica PPP depende del modelado de varios términos incluidos en las expresiones anteriores, como el conocimiento de estados de reloj del satélite, las posiciones orbitales conocidas de manera precisa, y los términos referentes a los efectos atmosféricos de propagación. Estudios previos, (Martín et al., 2011), ponían de manifiesto la convergencia a nivel centimétrico en post-procesamiento tras un largo periodo de inicialización, en ocasiones de más de 1 hora. En lo referente al tipo de productos, un post-procesamiento PPP con productos rápidos o ultra-rápidos produce resultados con un grado de acuerdo al nivel del centímetro con respecto al procesamiento con productos finales del IGS.

Por otro lado, existen una serie de efectos que no se consideran en el cálculo de dobles diferencias pero que en cálculo PPP pueden causar variaciones centimétricas al no utilizar diferencias entre observaciones de código y fase de dos o más receptores, (Lachapelle et al., 2006), (RTCM SC-104, 2013).

Dependiendo de la aplicación, si existen ciertas exigencias de precisión, un procesamiento con PPP, debe considerar que ciertos efectos, no son modelados de igual modo que en el caso de dobles diferencias, como por ejemplo los desplazamientos de sitio, efectos relativistas, efecto *wind-up*, valores del centro de fase de la antena del satélite y antena del receptor, retrasos atmosféricos, efectos de carga oceánica o mareas terrestres.

Incluso está estipulado que el posicionamiento PPP en tiempo real con un *rover* pueda soportar estas correcciones a través de los modelos recibidos en el formato estandarizado RTCM, *(Radio Technical Comission for Maritime Services)*, (Anexo 1.2), con el fin de determinar su posición en el sistema de coordenadas convencional de acuerdo con las convenciones IERS desarrolladas en Petit y Luzum (2010). Según la propuesta para los nuevos mensajes en tiempo real para PPP, (RTCM SC-104, 2013, versión 3-V05), los procesos utilizados para la generación de modelos de correcciones deben contemplar estos efectos.

Adicionalmente, existen otras limitaciones:

-El tiempo de inicialización, que limita su uso en aplicaciones en tiempo real.
-El término de la ambigüedad pierde su naturaleza entera, apareciendo el factor del *bias* del observable fase, al no utilizar diferencias entre observables de al menos dos receptores.
-En el caso de tiempo real no existen controladores GNSS que apliquen la técnica directamente a través del firmware instalado. El único receptor comercial existente en la fecha de la presente investigación, Novatel Flex6 (OEM628), con cierta capacidad para PPP, no soporta todavía los mensajes completamente definidos en el nuevo estándar. Por tanto, se debe efectuar la corrección en un ordenador con un cliente NTRIP[19], (Anexo 1.3), del tipo de las librerías desarrolladas por el BKG *(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie),* el RTKLIB, o alguna otra herramienta que se desarrollará en capítulos posteriores, que si que soporten los modelos para tiempo real.
-La continuidad, disponibilidad y la latencia de los modelos.
-La precisión de la solución.
-No existen modelos atmosféricos completos para ser aplicados en la técnica PPP en tiempo real.
-Se debe considerar el cambio de marco de coordenadas para los resultados expresados en el marco global de los productos IGS, y poder expresar el resultado en los marcos regionales como ETRF00.

En cuanto a la determinación del número entero de ambigüedades, al disponer únicamente de las observaciones de un solo receptor, en principio no es posible plantear las diferencias convencionales entre observaciones simultáneas de al menos dos receptores y dos satélites donde la ambigüedad resultaba un valor entero.

Hasta no hace mucho tiempo, en la resolución de ambigüedades enteras de portadora, en las observaciones GNSS solo se podía alcanzar solución fija en observaciones relativas o diferenciales. En este proceso se eliminaban errores comunes entre instrumentos, los sesgos o *biases* entre observaciones, y se cancelaba la parte fraccional de las ambigüedades durante el planteamiento de las ecuaciones de dobles diferencias de fase. Por todo ello, la capacidad de uso de la técnica PPP recuperando el carácter entero del valor de la ambigüedad, es un aspecto que requiere especial estudio,

[19] *Network Transport of RTCM via Internet Protocol*

y que se expone a continuación, enfocándolo también a las aplicaciones con necesidad de posicionamiento PPP en tiempo real.

2.9.3. Métodos para la recuperación de ambigüedades enteras en PPP

Existen varios métodos para la recuperación de la naturaleza entera de las ambigüedades que pueden ser aplicados para post-proceso o incluso en tiempo quasi-real, (Geng et al., 2011), o para aplicaciones en las que se tengan que obtener resultados ultra-rápidos (como el caso de meteorología). No obstante, es necesario resaltar que es complejo satisfacer el requerimiento de posicionamiento preciso instantáneo en tiempo real donde la solución fija de ambigüedad debe ser lograda en un periodo de algunos segundos.

Teóricamente, la técnica Precise Point Positioning, (PPP), (Zumberge et al., 1997), puede proporcionar precisiones centimétricas e incluso milimétricas con un único receptor GPS de doble frecuencia. En el caso de tiempo real, esta técnica necesita proporcionar fácilmente precisiones centimétricas en la posición, con fijación de ambigüedades en un tiempo de inicialización razonable. La deficiencia de la que adolece la técnica es que la resolución entera de ambigüedades de la portadora de fase en un solo receptor es normalmente ignorada o no llevada a cabo en PPP en el modelo lineal de observación.

No obstante, recientemente ha sido demostrado por distintos autores, bajo la asimilación de ciertas premisas, que fijar ambigüedades enteras en observaciones absolutas desde un solo receptor (es decir en observaciones donde no se pueden plantear las dobles diferencias de fase), sí que es posible incluso en tiempo real, dando lugar a la técnica de posicionamiento absoluto denominada PPP-RTK o PPP-AR (Ambigüity Resolution). Entre estas premisas, encontramos la asunción de la estabilidad de determinados errores y *biases* o retardos de fase no calibrados (UPD[20]) que afectan a las observaciones GNSS, (Ge et al., 2008).

De entre las propuestas investigadas, se recopilan varias a continuación, de las cuales alguna va a ser aplicada en los capítulos de análisis al caso de tiempo real. Por un lado, es posible la estimación diaria de los valores de los UPD con la solución *wide-lane*, y la estimación para la *narrow-lane* con una frecuencia sub-diaria debido a su mayor variabilidad temporal, (Ge et al., 2008), (Geng et al., 2011). Con la introducción de los retardos de fase no calibrados *wide-lane* en la estimación de la ambigüedad y llevando a cabo la resolución del valor entero, en los autores anteriores se muestra la mejora en la precisión diaria del posicionamiento en aproximadamente un 10%, y en precisión horaria en un 70%, pudiendo constituir así un modelo conceptual de partida para obtener ambigüedades fijas en posicionamiento PPP en tiempo real. Por otra parte, Laurichesse y Mercier (2008), y Collins (2008), evitan las estimaciones directas con la combinación *narrow-lane*, pero las absorben en la estimación de correcciones de los relojes de los satélites, demostrando que tras aplicar los modelos de reloj, se puede mejorar las precisiones de las estimaciones horarias con valores fijos de ambigüedad.

2.9.3.1. Aproximación a través de la estimación del "bias" fracción de ciclo (Fractional Cycle Biases –FCB).

La aproximación basada en estimar el *bias* que constituye la fracción de ciclo común para las ambigüedades de fase, consiste en promediar los valores del *bias* de fase estimado en las combinaciones de observables *wide-lane* y *narrow-lane,* es decir la parte fraccional de la ambigüedad. En este proceso, se aborda la siguiente secuencia de operaciones a partir de la solución de un conjunto de estaciones permanentes:

-Cálculo del *bias* o fracción de ciclo (FCB[21]) dependiente del satélite, a partir de ambigüedades de la combinación de observables *wide-lane*.
-Cálculo del *bias* fracción de ciclo (FCB) a partir de ambigüedades de la combinación de observables *narrow-lane*.

En ambos casos lo normal es promediar la parte fraccionaria en la estimación de ambigüedades a intervalos de 15 minutos.

[20] *Uncalibrated Phase Delays*
[21] *Fractional cycle biases*

Por último, se utiliza el resultado anterior para reconstruir en el posicionamiento PPP, las ambigüedades *wide-lane* y *narrow-lane* para las observaciones del receptor en posicionamiento absoluto y alcanzar el valor de carácter entero. De este modo se culmina el proceso de fijación de ambigüedades. A continuación se muestra el proceso detallado (Geng et al., 2011).

Planteamiento de las combinaciones wide-lane y narrow-lane en el lado del servidor

En primer lugar, se estima los *bias* de fase promediando solamente la parte fraccional de todas las estimaciones de ambigüedad en un conjunto de estaciones de referencia. Desde cada estación, se obtiene la diferencia de observaciones entre satélites para obtener la estimación de la ambigüedad. De este modo se determina la parte fraccional de las ambigüedades o también los denominados retardos de fase no calibrados (UPD).

Basándonos en este método, es posible descomponer las ambigüedades del observable dentro de las combinaciones *wide-lane y narrow-lane*. Esta descomposición se puede llevar a cabo porque la ambigüedad del observable no es un valor entero, y porque la ambigüedad *wide-lane* puede ser fijada posteriormente como entero usando la combinación de observaciones *Melbourne-Wübbena*.

Para los satélites *i y j*, se parte del retardo de fase no calibrado (UPD) denotado como $\phi_w^{i,j}$, que para la combinación *wide-lane* se estima según la aproximación basada en Geng et al., (2011):

$$\phi_w^{i,j} = \langle [B_{wk}^{i,j}] - B_{wk}^{i,j} \rangle$$

$\langle \dots \rangle$ denota el promedio de todas las partes fraccionales estimadas de las ambigüedades, $B_{wk}{}^{ij}$ es la estimación de la ambigüedad flotante obtenida a través de las diferencias entre satélites con una combinación *wide-lane* para la estación *k*. $[B_{wk}^{i,j}]$ denota el término de la ambigüedad flotante redondeado a su valor entero. La determinación de $\phi_w{}^{ij}$ es necesaria como paso previo para la recuperación de la naturaleza entera de la ambigüedad *wide lane* $N_{wk}{}^{ij}$.

A continuación se llevaría a cabo la combinación *narrow-lane* para determinar el retardo de fase no calibrado $\phi_n{}^{ij}$ (UPD) correspondiente a dicha combinación, y se efectúa la misma operación, es decir, el promedio de la parte fraccional de las estimaciones de ambigüedad para esa combinación**:**

$$\phi_n^{i,j} = \langle [B_{nk}^{i,j}] - B_{nk}^{i,j} \rangle$$

$$B_{nk}^{i,j} = \frac{f_{L1} + f_{L2}}{f_{L1}} B_{ck}^{i,j} - \frac{f_{L2}}{f_{L1} - f_{L2}} N_{wk}^{i,j}$$

Siendo:
f_{L1} *y* f_{L2} las frecuencias L1 y L2 respectivamente.
$B_{nk}{}^{ij}$ la estimación de la ambigüedad para la combinación *narrow-lane* entre una estación y dos satélites
$B_{ck}{}^{ij}$ la estimación de la ambigüedad de la combinación libre de ionosfera entre una estación y dos satélites
$N_{wk}{}^{ij}$ es la notación adoptada en la ambigüedad entera para la *wide-lane*.

Reconstrucción de ambigüedades enteras en el lado del usuario.

Partiendo de las estimaciones del apartado anterior, es posible corregir la solución flotante de las ambigüedades de las combinaciones *wide-lane y narrow-lane* en una sola estación (Geng et al., 2011). A continuación, se lleva a cabo una fijación secuencial para las resoluciones de ambigüedad *wide-lane*, y se aplica el método LAMBDA[22] descrito en Teunissen, (1994), para la resolución de ambigüedad de la *narrow-lane*.

[22] *Least-squares AMBiguity De-correlation Adjustment*

El valor entero N_{wk}^{ij} de la ambigüedad *wide- lane,* puede ser recuperado por la ambigüedad flotante B_{wk}^{ij} y el retardo de fase no calibrado estimado ϕ_w^{ij}:

$$N_{wk}^{i,j} = B_{wk}^{i,j} + \phi_w^{i,j}$$

Debido al ruido de las observaciones de pseudodistancia utilizadas en la estimación de B_{wk}^{ij}, esta estimación debe ser suavizada promediando durante un lapso de tiempo específico. Este lapso está sujeto principalmente a los valores detectados del ruido real de la pseudodistancia, efectos multipath en la observación acaecidos y retardos atmosféricos.
Si N_{wk}^{ij} se fija satisfactoriamente a un entero, entonces la propiedad de entero de la correspondiente ambigüedad de la combinación *narrow -lane* puede ser recuperada de forma análoga (Geng et al., 2011). Es decir:

$$N_{nk}^{i,j} = B_{nk}^{i,j} + \phi_n^{i,j}$$

$$N_{nk}^{i,j} = \frac{f_{L1} + f_{L2}}{f_{L1}} B_{ck}^{i,j} - \frac{f_{L2}}{f_{\mathrm{L1}} - f_{L2}} N_{wk}^{i,j} + \phi_n^{i,j}$$

En el momento en que N_{nk}^{ij} puede fijarse también como entero, las soluciones fijas de las ambigüedades se pueden alcanzar ponderando la siguiente pseudo-observación en la estimación:

$$B_{ck}^{i,j} = \frac{f_{L1}}{f_{L1} + f_{L2}} (N_{nk}^{i,j} - \phi_n^{i,j}) + \frac{f_{L1} f_{\mathrm{L2}}}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} N_{wk}^{i,j}$$

Se observa que las estimaciones de los *bias* de fase de la *narrow-lane*, contribuyen al restablecimiento del carácter entero de la ambigüedad. Por lo tanto, la precisión de la estimación ϕ_n^{ij} de la *narrow-lane* es crucial para la precisión en el posicionamiento.

2.9.3.2. Aproximación a través de la determinación del estado del reloj y de la recuperación de su parte entera (Integer Recovery Clocks –IRC).

En estudios recientes se ha demostrado que el valor entero de las ambigüedades de fase puede obtenerse aplicando productos que contengan el *bias* de la parte fraccional de las ambigüedades, que son consideradas como magnitudes muy estables en el tiempo, (Laurichesse et al., 2008). Este método recibe el nombre de *Integer Recovery Clocks* (IRC), y consiste en conseguir una solución o productos de reloj especiales que contengan este *bias*.

La estimación de los valores correspondientes a los *Integer Recovery Clocks*, se lleva a cabo fijando ambigüedades de observaciones desde un solo receptor, (no diferenciadas), en un conjunto de estaciones GNSS con antelación. El usuario final aplica los valores correspondientes de los productos IRC estimados, en lugar de aplicar productos de reloj del IGS, lo que conduce a obtener el valor entero de las ambigüedades de observaciones realizadas desde un solo receptor.

La diferencia con el método anterior, (FCB[23]), consiste en que en lugar de promediar la parte fraccionaria de las ambigüedades cada 15 minutos, se absorbe la parte fraccional de las ambigüedades durante el proceso de estimación, con el valor correspondiente a cada una de las épocas del reloj.

Partiendo de las ecuaciones de pseudodistancia y fase, nótese que se adopta la simplificación incluida en Laurichesse et al., (2009), donde viene la demostración completa, consistente en denotar como D los términos $\rho + Tr$, (distancia geométrica, término de la troposfera y otros efectos), W es el efecto *wind-up* e I engloba los retardos ionosféricos. Δh es la diferencia entre los relojes del receptor y satélite obtenidos de la combinación libre de ionosfera, con Δh_p para la ecuación de la pseudodistancia, $\Delta\tau$ es la diferencia entre los *offsets* del receptor y del satélite obtenidos de la diferencia entre los relojes

[23] *Fractional Cycle Biases*

de la ecuación de fase, y los relojes de la combinación de libre ionosfera. Se adopta $\Delta\tau_P$ para la pseudodistancia, siendo su significado físico el correspondiente al retardo de grupo.

$$P_1 = D + I + \Delta\tau_P + \Delta h_P$$

$$P_2 = D + \gamma(I + \Delta\tau_P) + \Delta h_P$$

$$\lambda_1 L_1 = D - (I + \Delta\tau) + \Delta h - \lambda_1 N_1 + \lambda_1 W$$

$$\lambda_2 L_2 = D - \gamma(I + \Delta\tau) + \Delta h - \lambda_2 N_2 + \lambda_2 W$$

Con $\gamma = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}}\right)^2$ y $\lambda_1 = \frac{c}{f_{L1}}, \lambda_2 = \frac{c}{f_{L2}}$

N_1, N_2, denotan las ambigüedades que por definición corresponderían al valor entero. Para resolver las ambigüedades de observaciones con un solo receptor, se aplican dos combinaciones de frecuencias, la combinación de *Melbourne-Wübbena* y una combinación libre de ionosfera.

La combinación de *Melbourne-Wübbena* se expone de nuevo según nomenclatura expresada anteriormente:

$$MW = B_W = \lambda_W N_W + b_W + \varepsilon$$

Los biases de la combinación *wide –line,* b_{wrec} y b_w^{sat}, forman parte de la combinación Melbourne-Wübbena, donde la ambigüedad *wide-lane* entera promediada se obtiene de $N_W = N_2 - N_1$, siendo:

$$\tilde{N}_1 = \frac{P_1 - 2I_P}{\lambda_1} - L_1 \quad , \quad \tilde{N}_2 = \frac{P_2 - 2\gamma I_P}{\lambda_2} - L_2 \quad \text{y} \quad I_P = \frac{P_1 - P_2}{1 - \gamma}$$

Sustituyendo P_1, P_2, L_1, L_2, se llega finalmente a:

$$\langle \tilde{N}_W \rangle = N_W + b_{wrec} - b_w^{sat}$$

La resolución *wide-lane* utiliza estos *bias* y una estimación realizada en un proceso basado en una ventana de 30 minutos. Esto asegura una estimación *wide-line* rápida y robusta. Finalmente, el término de la ambigüedad se resuelve utilizando la combinación de libre ionosfera de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_c = L_c + \lambda'_W N_W = D + \lambda_C W + t_{rec} - t^{sat} - \lambda_C N_1$$

La técnica ha sido adoptada por el sistema denominado PPP-WIZARD, (www.ppp-wizard.net), y es una prueba del método de resolución de ambigüedades para observaciones en PPP, llevado a cabo por el CNES[24], que se desarrolla y aplica en capítulos posteriores.

Adicionalmente, este método se puede aplicar a la técnica en tiempo real y permite también obtener precisiones centimétricas en la posición. La diferencia es que en tiempo real la aproximación estandarizada elimina el valor $\Delta\tau$ para cumplir con lo propuesto por el grupo de estandarización de mensajes del RTCM-Working Group. Este término es reemplazado por los bias estimados de código y fase, (Δb_p e Δb_L), que corresponden en concreto a la parte dependiente del satélite, (Laurichesse, 2014).

[24] *Centre National d'Etudes Spatiales*

Dicha propuesta para los mensajes de sesgos de fase, se basa en la idea de que el valor del *bias* es inherente a cada frecuencia y no debe ser obtenido por combinaciones de observables. Por lo tanto, en vez de hacer combinaciones específicas, se debe calcular un *bias* de fase por observable (RTCM SC-104, 2013). En este caso la definición del estado del reloj es crucial, ya que como los *biases* no se derivan de ninguna combinación de observables dependen directamente del estado de los relojes. El método se desarrolla en capítulos a posteriores junto con su análisis a efectos prácticos.

Las ventajas del método residen en que puede aplicarse globalmente con un ancho de banda adicional requerido muy bajo comparado con PPP estándar sin resolución de ambigüedades. En particular, este ancho de banda es comparable a lo que se utiliza en los sistemas SBAS o lo que se utilizará en el servicio comercial Galileo.

En cuanto a la comparativa del rendimiento de ambos métodos, la diferencia principal reside en la respuesta según la densidad y distribución del clúster de estaciones GNSS. Es decir para un conjunto disperso de estaciones el método de determinación de la parte fraccional de la ambigüedad solo cada 15 min (en lugar de cada época como en el método IRC), proporciona peor rendimiento (Geng et al., 2011).

2.9.3.3. Otras aproximaciones para la obtención de ambigüedades enteras en PPP.

En los apartados anteriores se han mostrado las aproximaciones principales utilizadas para la recuperación de ambigüedades enteras en el posicionamiento PPP. No obstante, existen otros métodos investigados. En Collins, (2008), se resuelve el problema simultáneamente a la determinación de los modelos de reloj de manera disociada o separada a los relojes del IGS. Es el denominado *'decoupled clock model'*. Este modelo tiene la capacidad de absorber cualquier *bias,* (constante o variable en el tiempo), que puede ocurrir entre los observables de una misma frecuencia y facilita la estimación de las ambigüedades enteras. La única limitación en el posicionamiento de un solo receptor es que para cada observable utilizado deben determinarse varios parámetros de reloj del satélite.

Un concepto similar a los anteriores, es el que se utiliza en el modelo presentado en Mervart et al., (2008). La resolución de las ambigüedades para un solo receptor, requiere de información adicional que puede ser estimada paralelamente a los modelos de reloj de satélite. Es posible añadir a la estimación de las correcciones de reloj el *bias* que haga posible resolver las ambigüedades *wide-lane* y *narrow-lane* en las ecuaciones para que estas recuperen su valor entero.

El término a estimar es el retardo de fase no calibrado (UPD), para las frecuencias f_{L1} y f_{L2}, y los *bias* del observable código. Estos retardos presentan poca variabilidad temporal, con lo cual pueden ser estimados del lado del servidor simultáneamente a los modelos de reloj y añadidos a estos, de tal forma que al aplicarlos a las observaciones del receptor este sería capaz de recuperar la naturaleza entera de las ambigüedades.

Por último, otra aproximación fue introducida por Bertiger et al., (2010), para llevar a cabo la resolución de ambigüedades enteras en PPP, empleando el *bias* de fase estimado utilizando la combinación *wide-lane* (WLPB)[25] a partir de una red global de estaciones GNSS. Este método ha sido el implementado en el software científico GYPSI/OASIS (V 5.2 y superiores), del laboratorio de propulsión a chorro de la Nasa (JPL)[26]. A través del cálculo científico con los algoritmos de esta herramienta, es posible resolver el posicionamiento PPP para un solo receptor con ambigüedades fijas utilizando la información del *bias* del observable fase o retardo de fase no calibrado proporcionado por el JPL. El sistema necesita como valores de entrada órbitas, estados de oscilador, información estimada en la combinación *wide-lane* y los *bias* de fase no calibrados, calculados por los procesos operativos continuos de GIPSY-OASIS.

Con esta aproximación, la precisión mejoraba en un 10-30% en PPP en posicionamiento estático, comparada con el método PPP convencional con ambigüedades flotantes.

[25] *Wide-lane phase bias*
[26] *Jet Propulsion Laboratory*

Capítulo 3:
Modelos de distribución de errores para posicionamiento PPP en tiempo real

3.1. Aproximación a través del concepto clásico "Observation Space Representation- OSR"

Tradicionalmente, en posicionamiento en tiempo real la posición de un receptor se corregía enlazando a estaciones de referencia fijas aprovechando la correlación que presentaban los errores comunes entre el usuario y la base o la red de estaciones GNSS. Este modo de emisión recibía el nombre de "*broadcast*" o uni-direccional, al ser la emisión en un solo sentido del tipo punto-multipunto si se enlazaba a una estación física, o bien bi-direccional si se enlazaba a una solución basada en el modelo de correcciones generado por una infraestructura de red (Capilla et al., 2007).

Las correcciones diferenciales a su vez, siempre se han presentado en distintas versiones de formatos, siendo el estándar el definido por el *Special Comittee-SC-104* del grupo *Radio Technical Comission for Maritime Services* (RTCM SC-104, 2006 y 2007), (Anexo I.2).

Estas estandarizaciones se llevan a cabo hoy en día no sin ciertos obstáculos en el momento de encapsular los datos, o de decodificar los mensajes contenedores de datos, debido a las limitaciones e interpretaciones que hace cada fabricante. Para posicionamiento diferencial, los formatos en uso más utilizados corresponden a las versiones RTCM 2.3 y RTCM 3.x, (Anexo I.2), habiendo el formato RTCM evolucionado desde el encapsulamiento inicial de mensajes únicamente con finalidad de corrección diferencial de código de la constelación GPS, hasta ser capaz de transportar corrección de fase de varias constelaciones (GPS+GLONASS, etc..) o correcciones de solución de red, entre otra información. El modelo de correcciones para el posicionamiento diferencial se obtiene de la información que se extrae de la observación entre receptores. Su representación mediante correcciones estandarizadas se denomina, por tanto, "representación del espacio observado" o *"Observation Space Representation" (OSR).*

La alternativa en posicionamiento absoluto preciso, (PPP), para tiempo real, utiliza la aproximación para la distribución de errores a través del concepto denominado *SSR (State Space Representation)*, que proporciona directamente la información sobre la componente de error pero a nivel global, formando un vector de estado de las fuentes de error, es decir no solo entre un receptor y una red de estaciones. Para corregir la posición de un solo receptor, teóricamente esta aproximación debería representar con precisión los estados de los relojes de los satélites, sus órbitas, el modelado de la

ionosfera y troposfera, entre otros, y convertirse a un formato estándar para enviar estos modelos al receptor. En la actualidad, el formato RTCM[1] ha evolucionado de tal manera que, teóricamente, es posible la distribución de correcciones basadas en el concepto *"state space representation" (SSR)*, como formato de emisión de modelos de corrección de osciladores en forma de polinomio de segundo grado, órbitas de satélites representadas a través de las componentes radial, transversal y longitudinal, y de los valores de *bias* de los observables (Wübbena et al., 2005), siendo necesaria la estimación en tiempo real de los modelos ionosféricos y troposféricos, así como su estandarización. Esta estandarización actual para las fuentes de error recibe el nombre de formato RTCM-SSR y el comité encargado de definirlo es el *RTCM State Space Representation Working Group* que forma parte del *Special Comittee-SC-104*.

El concepto *OSR* se caracteriza porque modela los errores en el *"espacio observación"* entre un usuario final y una red de estaciones, pero siempre arrastra errores dependientes de las estaciones de referencia (multipath, sesgos, marco específico de la red), y adicionalmente, la aplicación del modelado de errores se restringe al área de cobertura de la estación o de una red. Sin embargo, el concepto *SSR* modela los errores en el *"espacio estado"*, describiendo mejor las fuentes de error individuales, empleando, entre otros, modelos físicos realistas de comportamiento de propagación de señales. Adicionalmente, el usuario final puede emplear todos los satélites y señales que rastree, mientras que en el concepto *OSR* solo puede emplear los satélites comunes rastreados por la red de posicionamiento diferencial, (o por la estación de referencia más cercana), y el usuario.

Sin embargo, Wübbena, (2008) y diversos autores, afirman que llevar a la práctica el concepto *SSR* en tiempo real, implica grandes esfuerzos para conseguir por un lado la estimación lo más fiable posible de las componentes del vector de estado global, y por otro lado, la estandarización completa para la diseminación de fuentes de error a los usuarios finales.

3.1.1. Materialización del concepto OSR en tiempo real a través de la solución de red GNSS.

Desarrollando el concepto "*Observation space representation"*, el modelo de correcciones generado por una red GNSS, debe ser lo suficientemente descriptivo a lo largo de toda la zona de cobertura de la red. Estas correcciones modelan residuales de toda la red debido a errores orbitales de satélites y de propagación por la ionosfera y la troposfera. Son los errores dispersivos y no dispersivos de la señal GNSS, de los cuales se obtendrán sus valores interpolados para la posición del usuario que lleva un receptor *rover* GNSS. Al contrario que los errores dispersivos, los errores no dispersivos son aquellos que son idénticos para todas las componentes y frecuencias de la señal GNSS. Adicionalmente, un servidor de red RTK[2] se ayuda también de las efemérides ultrarrápidas, para producir correcciones de red calculando los residuos entre órbitas radiodifundidas y las órbitas precisas, para así minimizar los errores orbitales, (Capilla et al., 2008).

En cuanto a las técnicas para modelizar errores a través de posicionamiento diferencial en tiempo real, la aplicación del concepto OSR, queda materializada actualmente por los servicios de corrección diferencial de precisión centimétrica, a partir de una estación o conjunto de estaciones. Las distintas técnicas de generación de solución de red se enumeran a continuación:

-Solución de Red de Estaciones de Referencia Virtuales (VRS): Una solución de red en tiempo real de estaciones de referencia, es un ejemplo del modelado de errores en el espacio observación entre el usuario y las estaciones. En concreto, esta técnica modela residuales de todas las estaciones o subconjunto de estaciones, generando las correcciones que emitiría una estación de referencia virtual próxima al *rover* (Landau et al., 2002). Es decir, la solución que se envía al receptor del usuario contiene datos modelados a partir de soluciones orbitales ultra-rápidas y modelos locales de troposfera y ionosfera estimados a partir de la red de estaciones. Ha sido una de las técnicas más popularizadas en los últimos años en las redes GNSS y su creación se debe al fabricante TRIMBLE. Dentro de esta técnica se pueden emplear distintos formatos de emisión, tales como RTCM 2.3, RTCM 3.x o el formato propietario binario de TRIMBLE denominado CMR (Compact Measurement Record).

[1] *Radio Technical Comission for Maritime Services*
[2] *Real Time Kinematic*

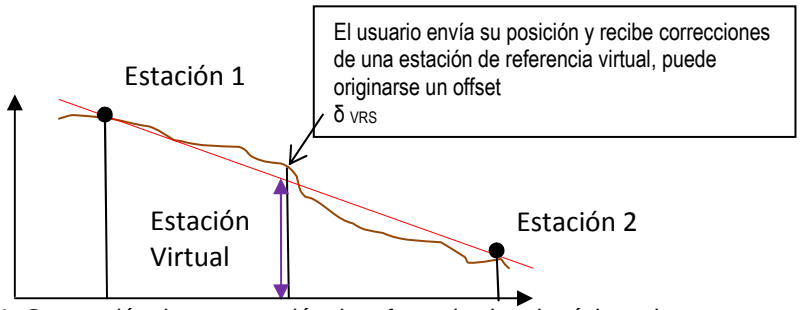


Figura 3.1: Generación de una estación de referencia virtual próxima al rover. (Elaboración propia, basada en Wübbena (2008))

-SAPOS Flächenkorrekturparameter- FKP: Modelo de correcciones de red, en el que se emiten parámetros de corrección de área en modo unidireccional sobre el formato *RTCM* 2.3, empleando una extensión propietaria a través de un mensaje tipo 59, (Wübbena, 2008). Este modelo fue diseñado para la distribución de correcciones en Alemania a partir de su red de estaciones SAPOS.

En este modelo se asume que las variaciones parciales de los errores pueden ser representados a lo largo de un plano, mediante un modelo lineal se describe la corrección ionosférica y troposférica linealmente sobre la posición del *rover*, derivándola de un servidor de red utilizando múltiples estaciones de referencia.

Los parámetros lineales determinados, intentan describir los cambios de los efectos ionosféricos y troposféricos en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste, pero evidentemente, la representación de estos errores no tiene en cuenta efectos atmosféricos locales, lo que puede causar residuos grandes en la observación. Haciendo uso del método de un simple modelo lineal, los parámetros FKP solo pueden ser utilizados para un área muy limitada alrededor de una sola estación de referencia.

-Master-Auxiliary Concept (MAC): Esta técnica, impulsada por el fabricante Leica, se considera precursora del formato estandarizado para emisión de solución de red RTCM 3 NETWORK y fue inicialmente introducida por Euler et al., (2001).

Una estación de la red es la *Master Station (MS)* de la cual se emiten los datos íntegros y los errores absolutos que la afectan. Las ecuaciones de simples y dobles diferencias entre estaciones y satélites y el cálculo de un nivel común de ambigüedades para toda la red (es decir se lleva a cabo la resolución de ambigüedades enteras para cada observable de fase de las estaciones que conforman la red), dan lugar a los incrementos en correcciones relativos entre la *Master Station* y el resto de estaciones que son enviados al usuario final (Wübbena, 2008).

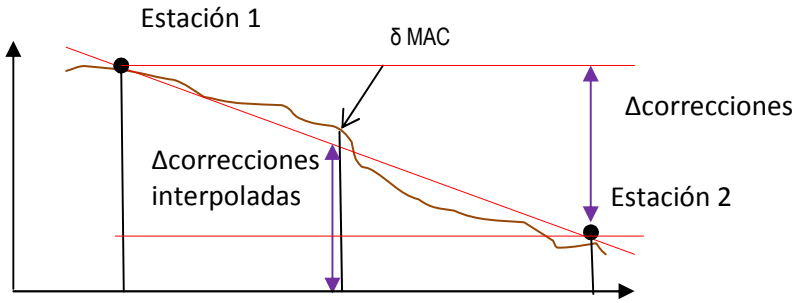


Figura 3.2: Master Auxiliary Concept. (Elaboración propia, basada en Wübbena (2008))

Las correcciones, tanto de la *Master Station* como de las auxiliares, se distribuyen separando en mensajes diferentes los errores dispersivos y los no dispersivos, para reducir el ancho de banda, ya que los errores troposféricos y orbitales cambian lentamente en el tiempo, por lo que la frecuencia de emisión de los datos no necesita ser tan alta como con los errores dispersivos (ionosfera).

-Técnica RTCM 3 NETWORK: Finalmente, el estándar diseñado RTCM 3.1 o RTCM 3 de Red soluciona el problema de estandarización de mensajes que contengan solución de red, emitiendo los mensajes RTCM 3 del rango 1014-1018 (RTCM SC-104 paper, 2006).

Mensaje	Contenido	Bytes
1014	Información auxiliar de la estación	14625
1015	Incremento en la corrección ionosférica GPS	9+3.75 * Ns
1016	Incremento en la corrección geométrica GPS	9+4.5 * Ns
1017	Correccion combinada geométrica y inosférica GPS	9+6.625 * Ns

Tabla 3.1: Mensajes RTCM 3.1 definidos para la encapsulación de solución de red

En Dai et al., (2003), se desarrollan los distintos métodos de interpolación de los modelos generados por una solución de red bajo el concepto OSR.

3.2. Aproximación a través del concepto "State Space Representation".

En el apartado anterior, se ha resumido la aproximación al posicionamiento diferencial que se lleva a cabo empleando los datos del "espacio observación" denominado "*observation space representation*" (OSR). Como alternativa a este concepto, surge la aproximación denominada "*state space representation*" (SSR), o "representación de estado" basada en la representación o descripción estocástica y funcional del estado de cada una de las fuentes de error individuales (Wübbena et al., 2005). Teóricamente, el objetivo de ambos conceptos es el mismo, se resume en que dada una posición concreta de un receptor móvil en tiempo real, la información acerca del "vector de estado" a nivel global puede ser reproducida y es equivalente al "espacio observación" a nivel local entre el receptor y una red de estaciones, y empleada para corregir las observaciones del *rover* en tiempo real.

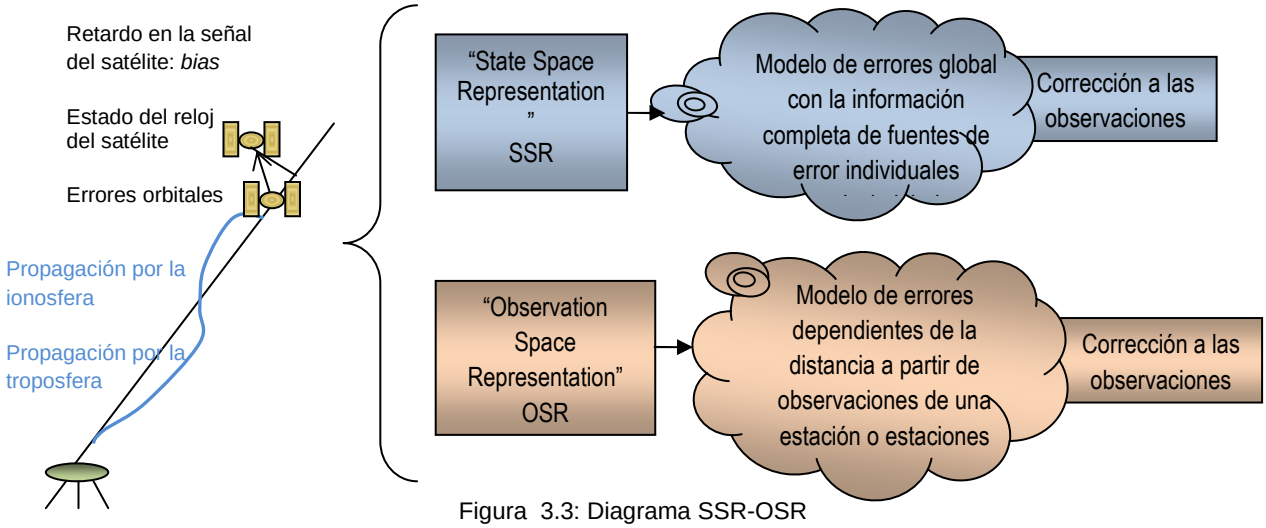


Figura 3.3: Diagrama SSR-OSR

En el post-procesamiento de las observaciones, la información completa del vector de estado de las fuentes de error, almacenada en ficheros estándar, es directamente utilizada. En concreto, el post-procesamiento científico en dobles diferencias y en PPP, utilizan órbitas y productos de reloj precisos, así como modelos atmosféricos derivados de redes de estaciones de referencia de ámbito global, o parámetros de orientación de la tierra entre otros productos.

En tiempo real, como claro precursor de transmisión de correcciones en el dominio "*state space*" SSR, cabe citar la emisión de correcciones de los servicios SBAS (Satellite Based Augmentation System), materializados con los sistemas de aumentación WAAS (Wide Area Augmentation System) y EGNOS

(European Geostationary Navigation Overlay Service). A su vez estos servicios empleaban el estándar denominado RTCA (Radio Technical Comission for Aeronautics), diseñado inicialmente para la navegación orientada a los usuarios de servicios de área extensa, como la aviación. En concreto el formato RTCA proponía un conjunto de mensajes con una estructura que optimizaba los errores y proporcionaba estructuras de datos más reducidas, siendo entendible por los receptores de navegación asistida por los sistemas SBAS de precisión métrica. Los parámetros transportados según el estándar RTCA consisten en efemérides, correcciones de reloj y una malla definida en latitud y longitud geodésica en la cual se han mapeado las componentes del contenido de electrones TEC, (*Total Electron Content*), en la ionosfera.

Hasta muy recientemente, las precisiones de rango sub-decimétrico se alcanzaban con la técnica PPP en estático tras transcurrir un largo periodo de inicialización. La puesta en práctica del concepto "*state space representation*", ha sido demostrada en la técnica PPP en estático con productos IGS para post-proceso y se emplea de modo directo en diversos softwares. Para tiempo real sin embargo, únicamente había sido puesto en práctica a lo largo de la última década de modo indirecto. De manera que algunos softwares de servicios de red RTK, derivan parcialmente sus correcciones de la aproximación de los vectores de error para cada fuente de error individual, reproduciéndolo o transformándolo en fuentes de error dependientes de la distancia, (espacio observación).

3.2.1. Composición del vector de estado en la aproximación por SSR

Teóricamente, las componentes del vector de estado para ser transmitido en tiempo real según la estandarización definida RTCM-SSR deben incluir los siguientes parámetros (RTCM-SSR SC 104, 2007):

-Componente de error en la posición del satélite y en las velocidades muestreadas a distintas épocas.

-Componente de error del oscilador de satélite para distintas épocas de observación.

-*Bias* de los distintos observables y retardos de fase no calibrados.

-Indicador del marco en que están los modelos, bien en el marco global internacional, ITRFxx, o bien en el marco regional al que vienen referidos los sistemas de referencia de coordenadas continentales (ETRFyy)[3], y, por tanto regionales, en los que se materializan los marcos estatales.

-Parámetros de modelado de errores de propagación de ionosfera y troposfera.

3.2.1.1. Correcciones a la órbita del satélite

Para cada satélite, se establece la siguiente expresión para la corrección de su órbita, (Schmitz et al., 2012), que en general se representa por:

$$X_{orbit} = X_{Broadcast} - \delta X$$

Donde:

- X_{orbit} es la posición del satélite corregida a partir del mensaje SSR de corrección de órbita.
- $X_{Broadcast}$ es la posición del satélite calculada y transmitida mediante efemérides radiodifundidas de acuerdo con los convenios establecidos en los *Interface Control Documents* respectivos de las diferentes constelaciones.

[3] *European Terrestrial Reference Frame*

- δX es la corrección a la posición del satélite.

A su vez, las correcciones a la posición del satélite en la órbita en un instante determinado se deben representar en tres componentes e_i, *radial*, *along* y *cross-track* (radial, longitudinal y transversal a la trayectoria del satélite), tal y como se muestra en el siguiente gráfico basado en Schmitz (2012).

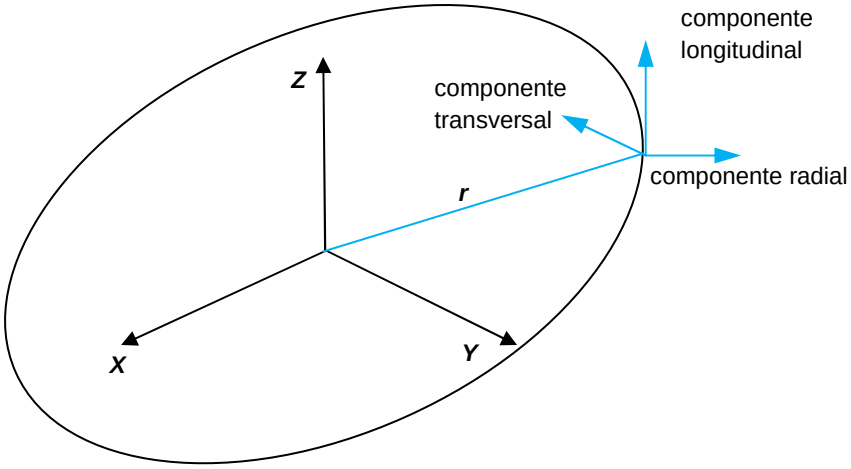


Figura 3.4: Componentes de la órbita del satélite.

Estas componentes se definen en el marco de las efemérides radiodifundidas. Para un observador en éste marco, la componente longitudinal (*along-track*), en la dirección de desplazamiento, está alineada en la misma dirección y sentido que el vector velocidad del satélite, la componente trasversal (*cross-track*), es perpendicular al plano definido por la posición del satélite y el vector velocidad y la componente radial es perpendicular a las dos anteriores.

Los valores para esta representación se pueden obtener a partir de las siguientes expresiones:

$$\delta X = \left[e_{radial} \quad e_{along} \quad e_{cross} \right] \delta O$$

$$e_{along} = \frac{\dot{r}}{|r|} \qquad e_{cross} = \frac{r * \dot{r}}{|r * \dot{r}|} \qquad e_{radial} = e_{along} \times e_{cross}$$

Donde:

- e_i son las componentes radiales, longitudinales y transversales (i= {radial, along, cross})
- $r = X_{\text{Broadcast}}$, es el vector de posición obtenido a partir de los parámetros radiodifundidos del satélite
- $\dot{r} = \dot{X}_{\text{Broadcast}}$ es el vector de velocidad obtenido a partir de los parámetros radiodifundidos del satélite
- δO es el vector de correcciones de las componentes orbitales

Por otra parte, el vector de corrección de las componentes orbitales se obtiene a partir de la corrección de la posición del satélite y de la expresión de corrección de velocidad de éste como se muestra a continuación.

$$\delta O = \begin{bmatrix} \delta O_{radial} \\ \delta O_{along} \\ \delta O_{cross} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{O}_{radial} \\ \delta \dot{O}_{along} \\ \delta \dot{O}_{cross} \end{bmatrix} (t - t_o)$$

Donde:

- δO , $\delta \dot{O}_i$ son términos de la corrección de posición de la órbita y velocidad del mensaje RTCM- SSR (componentes i = {radial, along, cross})
- t instante de la observación
- t_o instante de referencia expresado en el mensaje RTCM-SSR de corrección orbital

Esta estandarización para el envío de correcciones a la posición del satélite, junto con las correcciones a la velocidad, está diseñada de tal manera que permite reducir de manera considerable el ancho de banda en su transmisión con respecto a la corrección geométrica que emite el estándar clásico RTCM 3.1.

3.2.1.2. Correcciones del oscilador de los satélites y términos para correcciones a alto ratio.

La corrección al oscilador del satélite queda representada a través del polinomio de segundo grado conocido:

$$\tilde{\delta t}^{sat} = C_0 + C_1 (t - t_o) + C_2 (t - t_o)^2$$

Donde:

- C_i son los coeficientes del polinomio del mensaje RTCM-SSR de corrección del reloj, i = {0, 1, 2}
- t es el instante de la observación
- t_o instante de de referencia expresado en el mensaje RTCM-SSR de corrección del reloj

Los términos transmitidos en formato SSR de corrección de reloj, son los valores *C0, C1, C2*, es decir los coeficientes de los polinomios a aplicar, y el valor t_o a partir de la siguiente expresión:

$$t_{Satellite} = t_{Broadcast} - \frac{\tilde{\delta t}^{sat}}{c}$$

Donde:

- $t_{Satellite}$ es el tiempo del oscilador del satélite corregido a partir del mensaje SSR de corrección del reloj
- $t_{Broadcast}$ es el estado de reloj radiodifundido
- $\tilde{\delta t}^{sat}$ es la corrección del reloj en forma de polinomio de segundo grado

Asimismo, también se ha estandarizado un modelo de correcciones de alto ratio, que añade a la anterior corrección de reloj de satélite otros mensajes adicionales, permitiendo una mayor resolución y mayores frecuencias de actualización. Básicamente, las dos componentes emitidas constan de la parte polinomial descrita y una componente formada por correcciones a alto-ratio a aplicar al resultado de la corrección polinomial.

3.2.1.3. Mensajes para la especificación del marco de referencia.

En posicionamiento diferencial el sistema de referencia oficial es transmitido por el proveedor de servicios / correcciones RTCM, o identificado por los mensajes de transformación (Capilla et al.,

2009), y por lo tanto no se necesita efectuar transformación alguna en el receptor rover si el usuario quiere obtener su posición en el marco oficial.

Sin embargo, en la aplicación del concepto SSR en tiempo real, para definir el sistema de referencia de coordenadas es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos. El marco de referencia para los modelos transmitidos en formato SSR puede venir en el marco ITRF, (International Terrestrial Reference Frame), para servicios globales, o representado en los productos transmitidos a través de la realización regional alineada de los modelos con las placas tectónicas (por ejemplo ETRF[4], NAD[5], GDA[6], ...).

Por el momento, la solución adoptada consiste en especificar en el *stream* de datos el parámetro indicador del Datum que viene asignado al valor "0" si los productos se envían en el marco global ITRF, o "1" si los productos son regionales, generados por ejemplo por EUREF. No obstante, los productos emitidos por EUREF se encuentran todavía en fase de desarrollo siendo necesario investigar las estrategias de generación de estos productos para alcanzar un rango de mejora óptimo.

3.2.1.4. Mensaje SSR con *bias* del observable de código del satélite y para transmisión del *bias* de fase.

En los mensajes SSR se transmite el valor del *bias* estimado para cada observable de código P1, P2, C1, C2 de las distintas frecuencias (capítulo 1). Se trata de términos de corrección absoluta a añadir a los valores de la pseudodistancia, que corrigen el retardo por hardware producido en la señal.

Por cada satélite *i,* existirá un *bias* b^i *o1...o2* correspondiente a los observables *o1, o2*. De manera que para cada satélite se dispone del *bias* del observable código b_{CA} , b_{P1}, b_{P2} , b_{C2} que debe ser añadido a las medidas de pseudodistancia. Dentro del mensaje SSR emitido, existe un identificador para diferenciar el *bias* para cada tipo de observable código.

En lo referente al *bias* de fase, es necesaria su determinación para la recuperación de la naturaleza entera de las ambigüedades en tiempo real en PPP, ya que engloba la parte fraccional de las ambigüedades. Es decir, la estandarización actual también tiene en cuenta los *bias* o retardos no calibrados de los observables de fase (*uncalibrated phase delays*), (Wübbena et al., 2014), (RTCM SC-104, 2013).

MT+6	Sesgo del observable de fase de la constelación GPS
MT+8	Sesgo del observable de fase de la constelación GALILEO
MT+9	Sesgo del observable de fase de la constelación GLONASS

Tabla 3.2: Estandarización de retardos de fase no calibrados para RTCM -SSR

En cuanto a la estimación experimental de los *bias* de fase para la recuperación de la naturaleza entera de las ambigüedades b_{L1}, $b_{L2,...}$ en PPP, tal y como se ha desarrollado en el capítulo 2, cabe citar a algunos centros de análisis u organismos como el CNES[7] que han sido pioneros en su estimación en tiempo real y emisión junto con un identificador propio en el mensaje SSR de manera experimental, (Laurichesse, 2012).

3.2.1.5. Consistencia temporal y frecuencia de actualización de los mensajes SSR

Dentro de los mensajes SSR emitidos se incluye espacio reservado para el User Range Accuracy (URA). Es el indicador de calidad de las correcciones que se utiliza para la serie completa de los mensajes RTCM SSR transmitidos.

[4] *European Terrestrial Reference Frame*
[5] *North American Datum*
[6] *Geocentric Datum of Australia*
[7] *Centre National D'Etudes Spatiales-Francia*

EL URA se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$URA[mm] \leq 3^{URA_CLASS}\left(1+\frac{URA_VALUE}{4}\right)-1[mm]$$

Donde URA_CLASS hace referencia a un parámetro indicador que puede ser de baja o alta resolución y URA_VALUE es el valor para cada corrección individualmente.

Por otro lado, la consistencia dentro del conjunto de mensajes SSR que están siendo transmitidos es fundamental debido a que representan un conjunto completo de correcciones que describen el vector de estado de las componentes de error en un momento determinado. Los parámetros del vector de estado, por otro lado tienen cierta correlación espacial, lo que resulta esencial para asegurar su consistencia.

Para ello es necesario indicar la frecuencia de actualización, puesto que define el instante en que se producen los cambios en las componentes de los mensajes SSR. Si este aspecto es conocido y está asegurada esa frecuencia de actualización, se garantiza la consistencia de los datos en el tiempo.

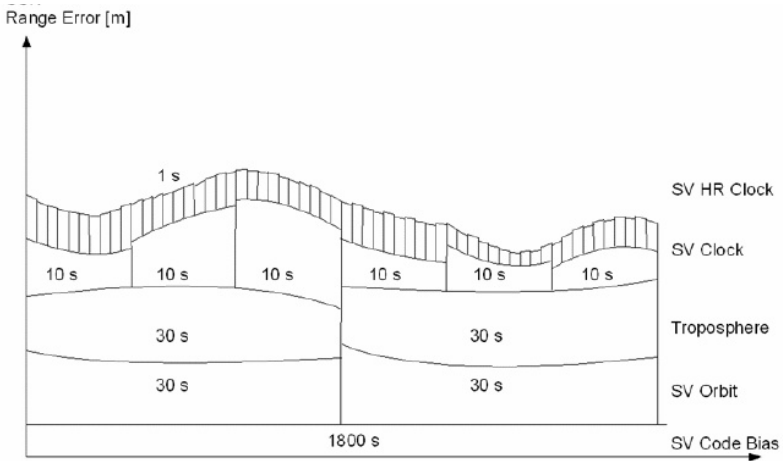


Figura 3.5.: Mensajes RTCM SSR- Ejemplo de frecuencia de actualización (Schmitz, 2012)

En el gráfico se muestran distintas componentes del vector de estado SSR tales como las correcciones de reloj emitidas con alto ratio (SV HR Clock, High Rate correction Clock), componentes de troposfera, correcciones orbitales o el sesgo del observable código.

Por último, es necesario resaltar que lo normal es que todos los parámetros vengan referidos al centro de fase de la antena (APC) del satélite para guardar consistencia con las efemérides radiodifundidas. No obstante, en muchos centros de análisis también se efectúa su cálculo referido al centro de masas del satélite (COM), con propósitos de evaluación.

3.2.2. Encapsulación y transmisión de los modelos estandarizados RTCM-SSR de correcciones CLKxx en tiempo real.

Tal y como se ha desarrollado anteriormente, la fase operativa actual de las componentes del vector de estado SSR estandarizadas, para el caso de generación de modelos de correcciones con los que se pueda llevar a la práctica el posicionamiento PPP en tiempo real, contiene los siguientes valores:

-Corrección de órbitas y velocidades para las efemérides transmitidas.
-Coeficientes del polinomio de segundo grado del reloj del oscilador y/o correcciones de alto ratio de los osciladores.

-*Bias* estimado de las observaciones.
-Indicador del rango de precisión del usuario (URA), marco y frecuencia de actualización.

Estos modelos se encapsulan y distribuyen con denominaciones adoptadas por convenio. Así pues, se emplea la denominación CLKnn para modelos generados por centros de análisis individuales, IGSnn para productos combinados del IGS, EUREFnn para productos del marco europeo generados por EUREF etc. . En la tabla siguiente puede observarse distintos modelos experimentales generados por centros de análisis de manera individual, producidos de manera combinada por el International GNSS Service para el marco ITRFxx o incluso calculados para obtener productos en un marco regional, tal y como se indica en la columna de marco de referencia:

Caster IP:Puerto	Mountpoint /Stream	Punto Ref.	Rastreo	Mensajes	Órbitas	Marco de referencia	Centro de análisis/ Software
products.igs-ip.net:2101	IGS01	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	SE Combination RETINA
products.igs-ip.net:2101	IGS02	APC	GPS	1057,1058,1059	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	KF Combination BNC
products.igs-ip.net:2101	IGS03	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	CODE Ultra-rápida	ITRF2008	KF Combination BNC
www.euref-ip.net:2101	EUREF01	APC	GPS	1059, 1060	IGS Ultra-rápida	ETRF2000	KF Combination BNC
www.euref-ip.net:2101	EUREF02	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	CODE Ultra-rápida	ETRF2000	KF Combination BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK00	CoM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK01	CoM	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	CODE Ultra-rápida	ITRF2008	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK10	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK11	APC	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	CODE Ultra-rápida	ITRF2008	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK12	CoM	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	CODE Ultra-rápida	ITRF2008	KF Combination BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK15	CoM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	Wuhan PANDA + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK16	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	Wuhan PANDA + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK20	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GSOC/DLR RETICLE
products.igs-ip.net:2101	CLK22	APC	GPS	1059,1060	Internal Ultra-rápida	ITRF2008	NRCan HPGPSC
products.igs-ip.net:2101	CLK30	CoM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	ESA/ESOC COMBI + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK31	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	ESA/ESOC COMBI + BNC
products.igs-ip.net:2101	NAD8301	APC	GPS	1057,1058,1059	IGS Ultra-rápida	NAD83[8]	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	NAD8302	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	IGS Ultra-rápida	NAD83	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	GDA9401	APC	GPS	1057,1058,1059	IGS Ultra-rápida	GDA94[9]	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	GDA9402	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	IGS Ultra-rápida	GDA94	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	SIRGAS20000	APC	GPS	1057,1058,1059	IGS	SIRGAS	BKG

[8] *North American Datum*
[9] *Geocentric Datum of Australia*

	1				Ultra-rápida	2000[10]	RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	SIRGAS20000 2	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	IGS Ultra-rápida	SIRGAS 2000	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	SIRGAS9501	APC	GPS	1057,1058,1059	IGS Ultra-rápida	SIRGAS95	BKG RTNet + BNC
products.igs-ip.net:2101	SIRGAS9502	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	IGS Ultra-rápida	SIRGAS95	BKG RTNet + BNC
www.gref-ip.de:2101	DREF9101	APC	GPS	1059, 1060	IGS Ultra-rápida	DREF91	KF Combination BNC
www.gref-ip.de:2101	DREF9102	APC	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	CODE Ultra-rápida	DREF91	KF Combination BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK50	CoM	GPS	1059,1060	NAPEOS 2h Update	ITRF2008	ESA/ESOC RETINA + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK51	APC	GPS	1059,1060	NAPEOS 2h Update	ITRF2008	ESA/ESOC RETINA + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK52	CoM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	ESA/ESOC RETINA + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK53	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	ESA/ESOC RETINA + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK60	CoM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	TUW RTIGSMR + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK61	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	TUW RTIGSMR + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK70	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GFZ Epos-RT + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK71	COM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GFZ Epos-RT + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK80	APC	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	Internal Ultra-rápida	ITRF2008	GMV magicGNSS
products.igs-ip.net:2101	CLK81	COM	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	Internal Ultra-rápida	ITRF2008	GMV magicGNSS
products.igs-ip.net:2101	CLK90	COM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	CNES PPP-WIZARD + BNC
products.igs-ip.net:2101	CLK91	APC	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	CODE Ultra-rápida	ITRF2008	CNES PPP-Wizard + BNC
http://178.33.109.250:2101	CLK92	COM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	CNES PPP-WIZARD + BNC
http://178.33.109.250:2101	CLK93	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	CNES PPP-Wizard + BNC
igs-ip.gmv.com:2101	GMVAPC	APC	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GMV magicGNSS + BNC
igs-ip.gmv.com:2101	GMVCOM	COM	GPS	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GMV magicGNSS + BNC
gnss.gsoc.dlr.de:2101	CLKA1	APC	GPS,GLO /CONGO	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GSOC/DLR RETICLE
gnss.gsoc.dlr.de:2101	CLKC1	COM	GPS,GLO /CONGO	1059,1060	IGS Ultra-rápida	ITRF2008	GSOC/DLR magicGNSS
wox.geopp.de:2101	RTCMSSR	APC	GPS GLO	1057,1058 1059,1063 1064,1065	Dynamic GNSMART	ITRF2008	Geo++ GNSMART
wox.geopp.de:2101	$RTCMSSR_{1060}$	APC	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	Dynamic GNSMART	ITRF2008	Geo++ GNSMART

Tabla 3.3: Modelos emitidos en streaming para PPP en tiempo real de distintos centros. (http://igs.bkg.bund.de, Noviembre -2014)

La abreviatura CoM (Center of Mass) se refiere al centro de masas de la antena y APC (Antenna Phase Center) al centro de fase de la antena del satélite. En la columna órbitas, primero se indica el centro en

[10] *Sistema de Referencia Geodésico para las Américas*

el cual se basa la solución orbital de entrada y cada cuando se actualizan estos datos de entrada para formar parte del cálculo.

Después de aplicar las correcciones, si estas están referidas al APC, la posición del satélite está referida al centro de fase de la antena, que es compatible con la posición que dan las efemérides radiodifundidas. Además es una solución "libre de ionosfera", puesto que en el proceso de obtención de las correcciones de reloj y satélite se ha utilizado esa combinación de observables. A efectos prácticos, para su transmisión, los distintos centros de análisis indican si las correcciones a las órbitas de los satélites se refieren al centro de fase de la antena (APC) del satélite o a su centro de masas (COM). En el campo mensajes se indica que mensajes RTCM-SSR en concreto se emiten, los cuales se describirán a continuación. Por último, se incluye en la tabla el campo que informa sobre el centro de análisis y sistema o software empleado para generar el modelo, lo que resulta importante debido a que las estrategias varían de un centro a otro. En el caso de las combinaciones de productos se indica si se ha realizado época a época (SE-*single epoch*) o a través de un filtro Kalman (KF).

Asimismo, es posible el almacenamiento de los modelos emitidos vía *streaming*. La convención para almacenar las correcciones transmitidas en tiempo real sigue la norma de generar un fichero ASCII a excepción del último sufijo que se establece con la letra "C" (BKG, 2012).

Los modelos transmitidos, contienen una serie de bloques donde se diferencian las correcciones para cada constelación GNSS (GPS, GLONASS…), los mensajes o época de referencia. El inicio de un bloque se indica con una de las siguientes líneas:

! Orbits/Clocks: 30 GPS 0 Glonass
! Orbits/Clocks: 0 GPS 19 Glonass

Cada línea informa sobre el número de satélites GPS y/o GLONASS (en el ejemplo 30 , 19), disponibles en el modelo de correcciones. A continuación, se emiten los siguientes 5 parámetros comunes para cada bloque y tipo de correcciones:

-En primer lugar, el número de mensaje transmitido: 1057, 1058, 1063 etc.…
-A continuación el indicador SSR, de la frecuencia de actualización:

Id	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Segundos	1	2	5	10	15	30	60	120	240	300	600	900	1800	3600	7200	10800

-Semana GPS
-Segundos de la semana GPS o instante *t* para las correcciones transmitidas.
-Indicador del número pseudo- aleatorio del satélite GNSS.

Como ha quedado expuesto, las correcciones de las órbitas de los satélites se dividen en tres componentes para su transmisión en modo de *streaming*, dos sobre la trayectoria del satélite (along-track y cross-track) y una radial.

Existen centros análisis que realizan una estimación de las correcciones a la posición del satélite y prefieren encapsularla en los mensajes 1057 para GPS y 1063 para GLONASS, separadamente del modelo de correcciones de reloj. De esta manera, en otros mensajes transmiten los coeficientes del polinomio de segundo grado de la corrección del oscilador del satélite (mensajes 1058 para GPS o 1064 para GLONASS), como es el caso del producto CLK11 del BKG [11]. Sin embargo, otros centros de análisis como el CNES[12], emiten en los mensajes 1060 para GPS o 1066 para GLONASS, conjuntamente las correcciones a las efemérides y los coeficientes de la corrección del polinomio de segundo grado del reloj del satélite.

[11] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie -Alemania*
[12] *Centre National D'Etudes Spatiales-Francia*

A continuación veremos la descripción concreta de los mensajes que contienen el estándar RTCM-SSR:

-Mensajes RTCM –SSR 1057 y 1063: En el caso de los mensajes RTCM del tipo 1057 para la constelación GPS, o 1063 (para la constelación GLONASS) los 5 primeros parámetros están seguidos por los siguientes valores:

-IOD que se corresponde con las efemérides transmitidas. IOD hace referencia al "Issue of Data", es decir al identificador del conjunto de datos.
-Corrección de la componente radial de la órbita de las efemérides transmitidas (m)
-Corrección de la componente longitudinal de la órbita de las efemérides transmitidas (m)
-Corrección de la componente transversal de la órbita de las efemérides transmitidas (m)
-Velocidad de la corrección de la componente radial de la órbita de las efemérides transmitidas (m/s)
-Velocidad de la corrección de la componente longitudinal de la órbita de las efemérides transmitidas (m/s)
-Velocidad de la corrección de la componente transversal de la órbita de las efemérides transmitidas (m/s)

```
...
1057 0 1686 283200.0 G02 21 1.062 -0.791 1.070 -0.00025 -0.00031 -0.00005
1057 0 1686 283200.0 G03 25 1.765 -2.438 -0.290 -0.00009 -0.00060 0.00028
1057 0 1686 283200.0 G04 14 1.311 -0.862 0.334 0.00005 -0.00038 -0.00015
...
1063 0 1686 283200.0 R01 39 0.347 1.976 -1.418 0.00048 -0.00091 0.00008
1063 0 1686 283200.0 R02 39 0.624 -2.092 -0.155 0.00005 -0.00054 0.00053
1063 0 1686 283200.0 R03 39 0.113 5.655 -1.540 0.00003 -0.00079 -0.00003
...
```

-Mensajes RTCM SSR 1058 y 1064: En el caso de los mensajes RTCM del tipo 1058 o 1064 los 5 parámetros comunes están seguidos por los coeficientes de la corrección en forma de polinomio de segundo grado de reloj del satélite. Los parámetros no definidos por el centro de análisis que genera el producto adoptarán el valor "0.000":

-IOD (Issue of Data), establecido a "0"
-Coeficiente *Co* del polinomio de corrección del reloj (m)
-Coeficiente C1 del polinomio de corrección del reloj (m/s)
-Coeficiente C2 del polinomio de corrección del reloj (m/s^2)

Ejemplo:

```
1058 0 1538 211151.0 G18 0 1.846 0.000 0.000
1058 0 1538 211151.0 G16 0 0.376 0.000 0.000
1058 0 1538 211151.0 G22 0 2.727 0.000 0.000
...
1064 0 1538 211151.0 R08 0 8.956 0.000 0.000
1064 0 1538 211151.0 R07 0 14.457 0.000 0.000
1064 0 1538 211151.0 R23 0 6.436 0.000 0.000
```

-Mensajes RTCM-SSR 1060 y 1066: En el caso de los mensajes RTCM del tipo 1060 o 1066 los parámetros transmitidos contienen lo siguiente,

-IOD
-Coeficiente *Co* del polinomio de la corrección del reloj (m)
-Corrección de la componente radial de la órbita de las efemérides transmitidas (m)
-Corrección de la componente longitudinal de la órbita de las efemérides transmitidas (m)
-Corrección de la componente transversal de la órbita de las efemérides transmitidas (m)
-Coeficiente *C1* del polinomio de la corrección del reloj (m/s)
-Velocidad de la corrección de la componente radial de la órbita de las efemérides transmitidas (m/s)
-Velocidad de la corrección de la componente longitudinal de la órbita de las efemérides transmitidas (m/s)
-Velocidad de la corrección de la componente transversal de la órbita de las efemérides transmitidas (m/s)
-Coeficiente *C2* de la corrección polinomial del reloj(m/s^2)

Ejemplo:

1060 0 1538 211610.0 G30 82 2.533 0.635 -0.359 -0.598 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
1060 0 1538 211610.0 G31 5 -4.218 -0.208 0.022 0.002 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
1060 0 1538 211610.0 G32 28 -2.326 0.977 -0.576 0.142 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
...
1066 0 1538 211610.0 R22 27 1.585 2.024 2.615 -2.080 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
1066 0 1538 211610.0 R23 27 6.277 2.853 4.181 1.304 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
1066 0 1538 211610.0 R24 27 0.846 1.805 13.095 6.102 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

-Mensajes RTCM SSR 1059 y 1065: En el caso de los mensajes RTCM del tipo 1059 o 1065 estos parámetros están seguidos por:

-Indicador del tipo de corrección *bias*, (sesgo), del observable código.
-Indicador que especifica el observable 1
-*Bias* del observable código 1
-Indicador que especifica el observable 2
-*Bias* del observable código 2 ....

1059 0 1538 211151.0 G18 2 0 -0.010 11 -0.750
1059 0 1538 211151.0 G16 2 0 -0.040 11 -0.430
1059 0 1538 211151.0 G22 2 0 -0.630 11 -2.400

Laurichesse y Mercier (2012), además definen el retardo de fase no calibrado como b_{L1}, $b_{L2,...,}$ para incluir las estimaciones de la parte fraccional de las ambigüedades y ser incluido de manera experimental en los mesajes RTCM-SSR, asignándoles un indicador propio.

bias	**Indicador /unidades**
b_{CA}	0 / m
b_{P1}	2 / m
b_{P2}	11 / m
b_{C2}	9 / m
b_{L1}	21 / cycle
b_{L2}	22 / cycle

Tabla 3.4: Indicadores asociados a cada bias según observable

Siguiendo la versión del estándar RTCM SC-104, (2013), se establece que los mensajes que deben contener este *bias* de fase deben ser los que abarcan del 1265 -1270.

Mensaje RTCM SSR	**Descripción**
1265	Bias de fase para GPS
1266	Bias de fase para GLONASS
1267	Bias de fase para GALILEO
1268	Bias de fase para QZSS
1269	Bias de fase para SBAS
1270	Bias de fase para Beidou

Tabla 3.5: Rango de mensajes reservados al bias. RTCM SC-104 paper, (2013). Versión 2014 ssr_2_phase_bias_v05

3.2.3. Perspectivas futuras en el desarrollo del estándar SSR.

Junto con la definición de los mensajes tipo *State Space Representation*, SSR, para su aplicación es necesario que la codificación y decodificación forme parte de las prestaciones del firmware de receptor. Adicionalmente, en lo que a la emisión de modelos se refiere, el IGS, con las soluciones combinadas de los centros de análisis para correcciones de reloj y orbitales, se ha constituido a nivel global como proveedor de servicios para posicionamiento PPP en tiempo real a través del Real-time Service (RTS), mientras que EUREF se debe consolidar a nivel continental y las correspondientes agencias nacionales pueden mejorar los modelos globales con productos regionales a partir de más estaciones, mediante densificaciones a nivel nacional.

A día de hoy, las investigaciones que han realizado diversos Centros de Análisis a nivel mundial, permiten enviar de manera experimental en tiempo real en el estándar RTCM–SSR, las correcciones orbitales, de reloj y los *bias* de los diferentes códigos C1,P1,C2,P2 …, necesarios para posicionamiento PPP. Por un lado, cada centro de análisis ha ensayado sus estimaciones para la estimación en tiempo real de los modelos, su estandarización y su encapsulación, y, en segundo lugar, el IGS es capaz de generar una solución combinada experimental de todos los centros de análisis.

Tras el desarrollo de mensajes para correcciones de reloj y de parámetros orbitales de satélite se ha logrado alcanzar cierta disponibilidad para estos mensajes, lo que ha facilitado poder comenzar a analizar la técnica PPP en tiempo real para receptores de doble frecuencia, técnica representada por el acrónimo correspondiente a Double Frequency –Real Time –PPP (DF-RT-PPP). Esta evolución ha sido definida como la Fase-1 del desarrollo del nuevo estándar.

Adicionalmente, en la determinación de las componentes del vector de estado SSR, es relevante realizar ciertas consideraciones debido a que es un método todavía frágil para el posicionamiento absoluto en el que se calcula la posición con observaciones de un solo receptor:

-Es necesario llevar a cabo una monitorización de su rendimiento, con el fin de garantizar su disponibilidad así como estudiar los aspectos clave necesarios para optimizarla: inicialización, precisión, combinación de productos, determinación de modelos para marcos regionales o ventajas del entorno multi-constelación.

-Consolidación de la técnica para la recuperación de la naturaleza entera de las ambigüedades de fase.

-Son fundamentales la estimación en tiempo real y la estandarización del modelo ionosférico para su representación por SSR. Esta representación consiste en la componente del retardo producido por la ionosfera en sus componentes vertical VTEC de precisión aproximada o sus parámetros slant-TEC de alta resolución.

-Resulta también esencial, la estimación en tiempo real de la componente del retardo producido por la troposfera, consistente en la desviación del estado actual de la troposfera con respecto a un modelo tomado como referencia o la estimación de la componente vertical total de retardo, así como su estandarización para su transmisión en tiempo real.

En general, para poder formar parte de los modelos en formato SSR operativos actualmente, los modelos atmosféricos (ionosféricos y troposféricos), deben desarrollarse de manera que aumenten su disponibilidad y su latencia. El desarrollo de este tipo de mensajes, entra dentro de las siguientes fases a culminar en el programa de estandarización del *RTCM State Space Representation Working Group*, que han sido definidas como Fase-2 SSR y Fase-3 SSR , *(*Schmitz, 2012), (Wübbena et al., 2014) .

-Fase-2 SSR: En esta fase se ha desarrollado la estandarización de mensajes que incluyen los sesgos o *biases* de la fase de portadora para conseguir alcanzar el carácter entero de las ambigüedades. En principio, estaba previsto que la estandarización de los mensajes que emitieran este *bias* se llevara a cabo en la tercera etapa de desarrollo prevista inicialmente (Fase-3 SSR), pero finalmente se ha trasladado a la segunda etapa de desarrollo de los mensajes SSR, (Wübbena et al., 2014), ya que las aplicaciones PPP que utilizaban las primeras estandarizaciones SSR de mensajes han puesto de manifiesto la necesidad de acelerar el desarrollo de las técnicas resolución de la ambigüedad en tiempo real y su estandarización.
En lo referente a los modelos ionosféricos, esta fase conlleva, la implementación de modelos para receptores mono-frecuencia, para posibilitar de este modo el uso de la técnica PPP de manera optimizada en tiempo real con ellos (Single Frequency –Real Time-PPP, SF-RT-PPP). De manera que los mensajes contienen la componente vertical del contenido total de electrones (VTEC).

-La Fase-3 de definición del formato RTCM-SSR, supone la evolución del formato hasta contener modelos de correcciones que permitan posicionamiento a un nivel de precisión centimétrica a través del desarrollo de mensajes estandarizados que transporten la componente STEC (slant TEC) y componentes para modelizar la troposfera. De este modo se maximizaría el rendimiento del posicionamiento en tiempo real con la técnica PPP y el tiempo de inicialización.

No está claro, si la densidad actual de estaciones permanentes integradas en los marcos regionales de EPN o en la red global del IGS, resulta suficiente para alcanzar la fase 3 de desarrollo del SSR, para

posicionamiento PPP en tiempo real. Weber y Söhne (2011), indican que sería necesaria una distribución redundante de estaciones con una separación máxima de 100 km, para generar los modelos y correcciones para PPP. En ese sentido el trabajo de las Agencias Nacionales o Institutos Geográficos Nacionales competentes, junto con el resto de gobiernos a otros niveles de la administración (autonómicos), es fundamental para, no solo conseguir una separación de 100 km entre estaciones, sino además para que la infraestructura tenga suficiente redundancia de datos que generen productos capaces de modelar efectos más locales.

3.2.3.1. Estandarización de las componentes del mensaje SSR para la constelación GALILEO.

En el contexto de desarrollo actual, la evolución de los mensajes RTCM SSR, conlleva la inclusión de los mensajes correspondientes a la constelación GALILEO. Por el momento, las definiciones contempladas para la estandarización de los mensajes GALILEO contienen los siguientes parámetros (Schmitz, 2012).

Mensaje reservado	Nombre del mensaje
1240	Correcciones orbitales Galileo SSR
1241	Correcciones de reloj Galileo SSR
1242	Sesgo del observable código de Galileo
1243	Correcciones combinadas orbitales y de reloj de la constelación Galileo SSR
1244	Indicador User Range Error (URE)
1245	Emisión de correcciones de reloj de alto ratio

Tabla 3.6: Estandarización del vector de estado para satélites Galileo en RTCM-SSR

Respecto a las correcciones orbitales, se emitirá el vector de componentes radial, longitudinal y transversal. Para las correcciones de reloj, tanto el *bias* de los osciladores GALILEO como su deriva y ratio de variación, pueden representarse a través de un polinomio de segundo grado, al igual que en la constelación GPS. Por tanto el mensaje SSR contendrá los coeficientes estimados $C_{0,}\ C_{1\ ,}\ C_{2\ ,}$ por los centros de análisis para posicionamiento PPP.

3.2.3.2. Estandarización de las componentes del mensaje SSR para el modelado ionosférico y troposférico.

Como se ha comentado, la evolución del estándar contempla la inclusión de la representación de la componente vertical del contenido total de electrones (VTEC) de la ionosfera. Actualmente, existen varias propuestas de representación para ser transmitidas en los mensajes. La primera de ellas sería la encapsulación de la representación de armónicos esféricos a nivel global de la ionosfera, y la segunda de ellas sería la distribución de un modelo de alta resolución en formato de malla que modelara la ionosfera a nivel regional o continental. La aplicación de estos mensajes posibilita el posicionamiento PPP para receptores de una sola frecuencia.

MT+10	Representación SSR de la componente vertical del contenido total de electrones a partir de armónicos esféricos
MT+11	Representación SSR de la componente vertical del contenido total de electrones distribuida en formato de malla de alta resolución

Tabla 3.7: Mensajes RTCM-SSR para modelado ionosférico

La denominada fase tres citada anteriormente, es la que pretende definir la estandarización de la componente slant-TEC para los mensajes de la ionosfera y, por último, los mensajes que contengan el modelado troposférico.

3.3. Encapsulación y transmisión de los modelos estandarizados RTCM-MSM de observaciones multi-constelación.

Ante el desarrollo en la última década de los programas de modernización de NAVSTAR –GPS, la revitalización y completado del sistema GLONASS, y los avances en el despliegue de Beidou y Galileo, el grupo de trabajo para los mensajes Galileo del RTCM SC-104 veía necesario ampliar el conjunto de mensajes encargados de difundir observables GNSS en tiempo real.

Como en el caso del formato RTCM 3.x, (Anexo I.2), es evidente que, el nuevo conjunto de mensajes debía ser aprobado como un nuevo estándar para poder ser aceptado por todos los receptores del mercado independientemente de su marca.

A tal efecto surge la generación siguiente de mensajes multi-señal para distribución de observaciones en tiempo real, el estándar definido como RTCM-MSM (*RTCM multi-signal messages*). Este formato tiene su extensión en el RTCM HP-MSM (*RTCM high precission multi-signal messages*) que corresponde a los mensajes diseñados multi-señal de alta precisión, que contiene información completa sobre las pseudo-distancias, portadoras, efecto Doppler y relación señal-ruido. Al igual que los formatos anteriores es un estándar abierto y no propietario, para difundir la información contenida en los nuevos observables que van surgiendo a medida que todas las constelaciones GNSS evolucionan.

Este estándar debe garantizar la interoperabilidad entre diferentes receptores GNSS, lo que conlleva que todas las observaciones de fase, estén alineadas con la banda de frecuencia de la señal definida como referencia. Es fundamental, destacar que en la definición futura de los nuevos mensajes se contempla soportar por completo observaciones de las constelaciones QZSS[13], COMPASS (Beidou), y SBAS[14], como se puede observar en la figura elaborada:

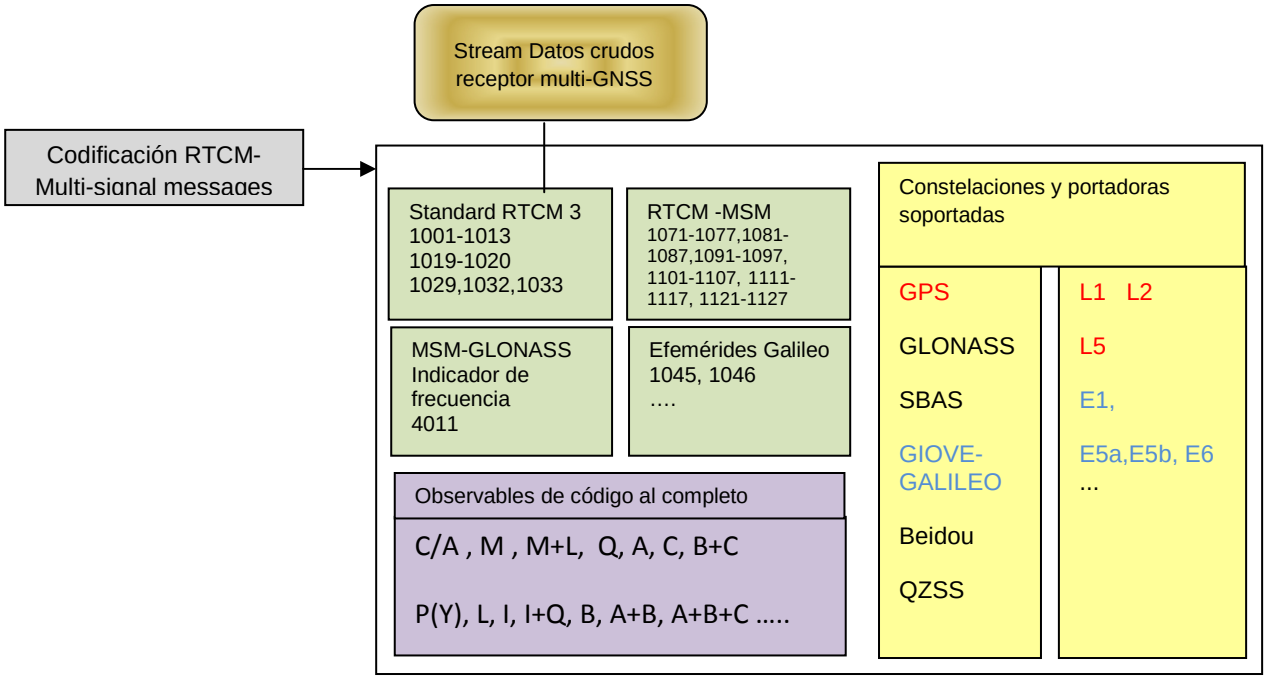


Figura 3.6: Mensajes, constelaciones, códigos y frecuencias incluidos en el estándar RTCM-MSM para GPS, GLONASS y GALILEO. Elaboración propia.

Algunos de los aspectos críticos en la definición de esta generación de mensajes, que ha habido que abordar ante la co-existencia de observables de distintas constelaciones han sido:

-Que no existiera ninguna ambigüedad en su interpretación.

-La resolución del problema de la alineación de ciclo o *bias* entre observables: El indicador del desplazamiento o alineación de la portadora, es un elemento que aparece en los mensajes RTCM para evitar inconsistencias entre las diferentes aproximaciones que efectúan distintos fabricantes de hardware GNSS, al gestionar los desplazamientos de ciclo entre los observables de la fase portadora en la misma frecuencia. Con este indicador se conoce por ejemplo para el observable L2C (C2), su alineación o desfase con el observable P2, o para el observable L1P (P1), con respecto al código C/A.

[13] *Quasi Zenith Satellite System*
[14] *Satellite Based Augmentation System*

-La presencia de observables GLONASS, debía completarse con identificadores en los mensajes que indicaran los números de frecuencia GLONASS. Esta constelación utiliza la técnica de acceso múltiple a división de frecuencias (FDMA), en la que cada satélite (o par de satélites) emite sobre una frecuencia diferente.

-Los campos contenidos en los mensajes RTCM-MSM deben contener toda la información necesaria para convertir esos datos en formato RINEX, (versión 3), a partir del contenido del mensaje RTCM: estación, receptor, modelo de antena, y todos los observables de todas las constelaciones.

-La inclusión de mensajes que contuviesen un indicador de la precisión, a través de las magnitudes de las varianzas-covarianzas.

La asignación de los rangos de mensajes quedaría del siguiente modo, (Söhne et al., 2013):

Rango de mensajes	Constelación
1071-1077	GPS
1081-1087	GLONASS
1091-1097	Galileo
1101-1107	SBAS
1111-1117	QZSS
1121-1127	BeiDou

Tabla 3.8: Rangos de mensajes para el formato RTCM-MSM.

En concreto, la definición del rango de mensajes RTCM-MSM para GPS, GLONASS y GALILEO, se encuentra aprobada desde febrero de 2013, y con posterioridad se ha discutido la definición para QZSS, COMPASS y SBAS:

1823	Tipo 1071, Observable GPS compacto pseudo-distancias
1824	Tipo 1072, Observable GPS compacto fase de la portadora
1825	Tipo 1073, Observable GPS compacto pseudo-distancias y fase de la portadora
1826	Tipo 1074, Observable GPS completo pseudo-distancias y fase de la portadora más ruido de la señal
1827	Tipo 1075, Observable GPS completo pseudo-distancias, fase de la portadora, Doppler y ruido de la señal
1828	Tipo 1076, Observable GPS completo pseudo-distancias y fase de la portadora más ruido de la señal (alta resolución)
1829	Tipo 1077, Observable GPS completo pseudo-distancias, fase de la portadora, Doppler y ruido de la señal (alta resolución)
1830	Tipo 1081, Observable GLONASS compacto pseudo-distancias
1831	Tipo 1082, Observable GLONASS compacto fase de la portadora
1832	Tipo 1083, Observable GLONASS compacto pseudo-distancias y fase de la portadora
1833	Tipo 1084, Observable GLONASS completo pseudo-distancias y fase de la portadora más ruido de la señal
1834	Tipo 1085, Observable GLONASS completo pseudo-distancias, fase de la portadora, Doppler y ruido de la señal
1835	Tipo 1086, Observable GLONASS completo pseudo-distancias y fase de la portadora más ruido de la señal (alta resolución)
1836	Tipo 1087, Observable GLONASS completo pseudo-distancias, fase de la portadora, Doppler y ruido de la señal (alta resolución)
1837	Tipo 1091, Observable GALILEO compacto pseudo-distancias
1838	Tipo 1092, Observable GALILEO compacto fase de la portadora
1839	Tipo 1093, Observable GALILEO compacto pseudo-distancias y fase de la portadora
1840	Tipo 1094, Observable GALILEO completo pseudo-distancias y fase de la portadora más ruido de la señal
1841	Tipo 1095, Observable GALILEO completo pseudo-distancias, fase de la portadora, Doppler y ruido de la señal
1842	Tipo 1096, Observable GALILEO completo pseudo-distancias y fase de la portadora más ruido de la señal (alta resolución)
1843	Tipo 1097, Observable GALILEO completo pseudo-distancias, fase de la portadora, Doppler y ruido de la señal (alta resolución)

Tabla 3.9: Desglose de mensajes multi-constelación. RTCM SC-104 paper, (2013)

Entre las herramientas de código abierto, con capacidad para decodificar los nuevos formatos, cabe citar las librerías del BKG[15], implementadas para soportar la versión nueva de RTCM con mensajes multi-constelación y multi-señal contenidos en el estándar HP-MSM. Al igual que las librerías del BKG, han surgido otras herramientas desarrolladas que convierten los mensajes contenidos en RTCM HP-MSM en RINEX v. 3.

Las prestaciones de la definición del nuevo estándar multi-señal se muestran en la siguiente tabla:

	Estándar actual RTCM 3	Mensajes Multi-señal RTCM MSM
Constelaciones	GPS, GLONASS, SBAS	GPS,GLONASS, GALILEO BEIDOU
Señales	Solo soporta 1 señal u observable por frecuencia, un solo código C/A y P1 en L1/L2	Múltiples señales por frecuencia. Se emiten todas las contempladas en la versión 3 de RINEX
Tipos de observable	Pseudodistancia , portadora, señal/ruido C/NO	Pseudodistancia, portadora, efecto doppler, señal ruido C/NO
Resolución	Pseudodistancia: 20 mm Portadora: 0.5 mm C/NO: 0.25 Db-Hz	Pseudodistancia: 0.6 mm Portadora: 0.14 mm C/NO: 0.1 Db-Hz Efecto doppler: 0.1 mm/s

Tabla 3.10: Diferencias entre el estándar RTCM 3.0 y RTCM MSM (Weber et al., 2011)

Además, en su definición está contemplado espacio reservado para la emisión de los observables que vayan apareciendo en las nuevas constelaciones.

3.4. Discusión sobre las aproximaciones SSR y OSR.

En los apartados anteriores, se han expuesto las características del concepto SSR, que actualmente se encuentran en desarrollo. No obstante la aproximación por la representación del vector de estado de las fuentes de error individuales, presenta determinadas ventajas con respecto al método de representación de errores del posicionamiento diferencial (OSR), que se enumeran a continuación:

-Área de validez: En la aproximación por SSR, los parámetros correctores de órbitas y relojes de satélite tienen una validez de ámbito global y los parámetros atmosféricos presentan una validez continental o global dependiendo de la resolución y nivel de precisión en su generación, o incluso sub-regional para tener en cuenta efectos mucho más locales de la troposfera, (Wübbena, 2012).

-Necesidad de frecuencia de actualización: Los errores dispersivos y no dispersivos de la señal GNSS presentan una variabilidad temporal de diferente ratio, y, adicionalmente, de distinta variabilidad espacial. Este hecho provoca que según la naturaleza del error que modelen, los parámetros correctores puedan ser transmitidos a distinta frecuencia. Debido a que los errores atmosféricos producidos en la troposfera y los errores orbitales presentan, teóricamente, una alta correlación en el tiempo, los ratios de actualización o emisión no necesitan ser muy elevados, cada 30 segundos mínimo o más bajos puesto que, por ejemplo, los parámetros orbitales derivados de un cálculo de efemérides pueden tener una validez de 3 horas. Los parámetros correctores de reloj y ionosféricos requieren una frecuencia de emisión mayor de aproximadamente 10 segundos. Sin embargo, el conocimiento de los errores dependientes de la distancia para aplicaciones RTK en la aproximación OSR, requiere, en ciertas correcciones, una alta frecuencia de actualización de 1 Hz. Por tanto, en la aplicación del concepto SSR se estaría produciendo una gran optimización, al solo ser necesario emitir parámetros con la décima parte de la frecuencia requerida (0.1 Hz) que en el concepto OSR.

-Ancho de banda requerido: Como consecuencia del aspecto anterior el ancho de banda se reduce drásticamente con respecto a la aproximación OSR.

-Las correcciones dejan de ser dependientes de la estación de referencia más cercana, y de la capacidad de rastreo común de las diferentes frecuencias y señales entre un receptor móvil y una estación o subconjunto de estaciones. La alternativa por SSR, sin embargo, debe aplicarse a través de productos

[15] *Bundesamt für Kartographie Und Geodäsie*

que hayan sido generados teniendo en cuenta el *"bias"* de la pseudodistancia y de la fase y el sesgo entre señales.

Actualmente y durante los próximos años se está estableciendo el uso de nuevas señales GNSS, tanto por los programas de modernización de las constelaciones operativas NAVSTAR y GLONASS, como por el despliegue de las nuevas constelaciones COMPASS y GALILEO. A este respecto, es habitual la necesidad de rastreo y decodificación de diferentes códigos en una sola frecuencia, que se lleva a cabo no sin ciertos problemas asociados (como es el caso del código P2 y C2).

En el caso de un proveedor de servicios de correcciones de red, el problema puede resultar complejo puesto que no todas las estaciones que conforman la red pueden ser capaces de rastrear las mismas constelaciones, frecuencias u observables. El modelado de errores en el área de influencia de una red se tiene que llevar a cabo entre tipos de observables comunes, y con los mismos satélites rastreados por las estaciones y el receptor móvil, para que su aplicación sea efectiva. La existencia de distintos observables de código por parte del proveedor o del usuario se produce con frecuencia cuando se trabaja en el modo "*observation space representation*". En cambio, empleando los parámetros del vector de estado según el concepto "*state space representation*", un receptor móvil debe poder reconstruir el modelado de las fuentes de error para todas las señales y observables que rastree una red de ámbito global.

-Otra ventaja es que los errores residuales asociados a las estaciones de referencia se reducen. La pérdida de observaciones o *"outliers"* en una estación de referencia no repercute en la reproducción de las fuentes de error representadas bajo el concepto "*state space*."

-También es posible generar distintos servicios basados en el concepto SSR, con diferentes precisiones asociadas a cada uno de ellos. Por ejemplo, los usuarios portadores de receptores mono-frecuencia podrían aplicar parámetros de estado y además una representación de la ionosfera mapeada en forma de grid o rejilla para minimizar la sensibilidad de la frecuencia L1 a esta afección en ausencia de la portadora L2.

No obstante hay que considerar algunos problemas asociados:

-La estandarización de la representación de la información de cada una de las fuentes de error tiene una fase de definición laboriosa para algunos modelos, aspecto necesario en todo lo que se refiere a su difusión en tiempo real. No solo hay que modelar y difundir los errores de propagación, orbitales y de reloj de satélite, a través de productos, sino también otras fuentes de error expuestas.

-Existe mayor dificultad en la implementación de los algoritmos a ejecutar en la parte del receptor móvil, para aplicar los modelos de error definidos en el vector de estado y los pendientes de estandarización.

-El marco de referencia en que se obtiene la solución, es el marco de los productos. Con lo cual es necesario llevar la solución al marco regional en muchos casos o la generación y optimización de productos regionales o continentales.

-El uso de la estandarización para incluir en los cálculos los efectos locales (carga oceánica, mareas terrestres o desplazamiento de placas tectónicas). Estos parámetros, por tanto, deben ser aplicados también por los centros de análisis en la generación de los productos, (RTCM SC-104 paper, 2013).

-Por otro lado, cuando se usan los términos de la corrección polinomial de los relojes, es muy importante saber que estos no están corregidos de los efectos relativistas periódicos. En las convenciones publicadas por el International Earth Rotation Service (o en las especificaciones del Interface Specification-GPS-200, Revision D, 7 March 2006), se establece que la corrección periódica de los relojes por los efectos relativistas (que se añadirá a los relojes transmitidos) se calcula como:

$$dt = -2\,(R * V) / c^2$$

donde:

R, V son respectivamente las componentes de la posición y velocidad del satélite y c es la velocidad de la luz.

Capítulo 4:
Revisión de los procesos y alternativas de generación en tiempo real de modelos del vector de estado

A lo largo de los últimos años de la pasada década y los primeros de la presente, distintos centros de análisis se han embarcado en la tarea de investigar, iniciar los procesos e implementar algoritmos para la generación en tiempo real de modelos y productos GNSS, adicionalmente a las rutinas de cálculo y procesamiento continuo que ya venían llevando a cabo para la producción de efemérides precisas, parámetros de orientación de la tierra, modelos de reloj, modelos troposféricos o ionosféricos para post-proceso.

Para el caso concreto de los modelos para la técnica Precise Point Positioning, (PPP), en tiempo real, cada centro de análisis ha desarrollado sus aproximaciones y rutinas para generar los productos (Retina, Reticle, GNSSWizard…), y posteriormente encapsularlos para su emisión siguiendo el estándar definido para el *"State Space Representation*". En los siguientes apartados, en primer lugar se presenta un estudio de diversas aproximaciones llevadas a cabo por varios centros de análisis para generar sus modelos propios. En segundo lugar, se muestra la estrategia de combinación llevada a cabo por el IGS[1] a través del grupo coordinador de centros de análisis para la producción de modelos finales calculados en el marco global y, por último se muestra la generación de productos combinados finales calculados en marcos regionales tales como el marco ETRF (*European Terrestrial Reference Frame)* para Europa.

4.1. Aproximación a nivel de centros de análisis y herramientas científicas

4.1.1. Modelos de reloj para posicionamiento PPP -estándar con medidas de fase en RTNET

De entre las diversas aproximaciones para generar modelos de estado de osciladores y órbitas en tiempo real, se puede citar el sistema RTNET (Real Time Network). El sistema, inicialmente desarrollado por la empresa GPS SOLUTIONS Inc. para generación de aplicaciones en tiempo real, permite adicionalmente, la obtención de modelos de correcciones para la técnica Precise Point Positioning, (PPP), en tiempo real.

[1] *International GNSS Service*

El conjunto de algoritmos se estructura en dos partes:

-RTES: RT EPOCH SERVER, para gestionar el flujo de datos en tiempo real. A su vez, se compone de diversos módulos para trabajar con diferentes tipos de formatos en que pueden presentarse los *streams*. Tras la recepción de los datos, los decodifica y los transfiere al software encargado de la parte de procesamiento (RTNET).

-RTNET propiamente dicho: Recibe los datos procedentes de RTES, y a su vez puede recibir datos RINEX o procedentes de soluciones *Near real time*. Es donde se efectúa todo el proceso de cálculo. Este software es empleado por instituciones como la Agencia Estatal Alemana de Cartografía y Geodesia (BKG[2]), para la generación de los modelos contenedores de parámetros correctores de reloj y órbitas (CLK10, CLK11…), que posteriormente se distribuyen a través de *streams*.

El esquema es el siguiente:

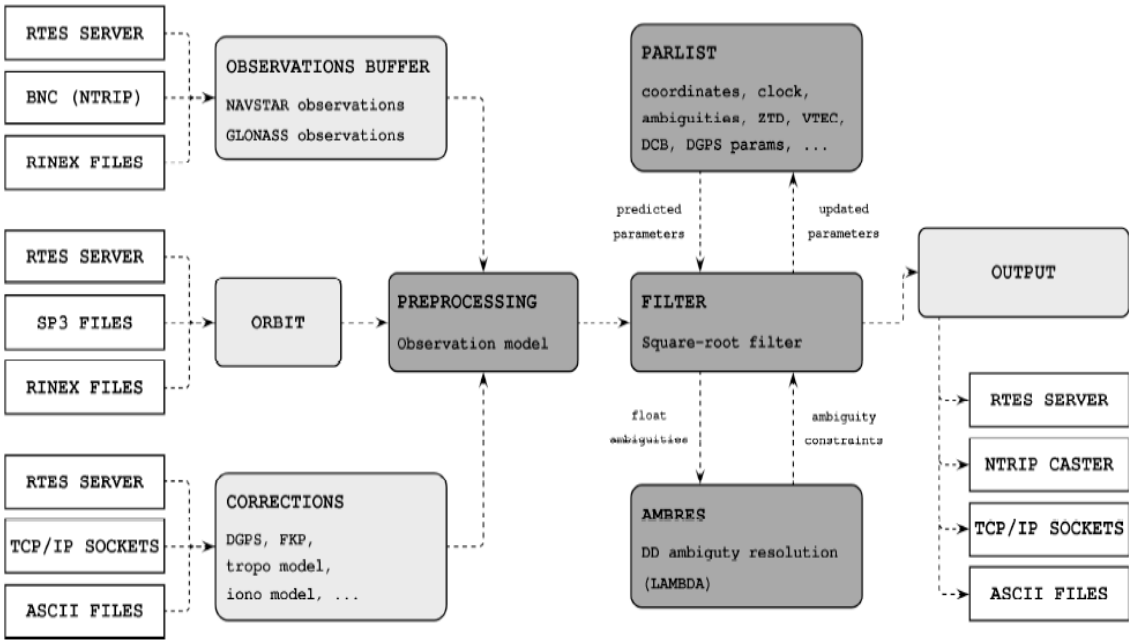


Figura 4.1: Diagrama del sistema RTNET. (Imagen cedida, Mervart et al., 2008)

El principio en el que se basa RTNET consiste en trabajar al nivel de las simples diferencias entre satélites y épocas desde un solo receptor. La aproximación para estimar modelos de reloj para PPP estándar se realiza utilizando únicamente observaciones de fase, de esta manera se evita el tener que introducir en la estimación de los relojes las observaciones de código y por tanto los valores del *bias* (Mervart et al., 2008). Para esta primera aproximación, consecuentemente, los modelos resultantes para los osciladores se corresponden a los obtenidos en el planteamiento de las diferencias entre satélites y épocas.

$$(\delta t^{i} - \delta t^{j})_{tk} - (\delta t^{i} - \delta t^{j})_{tl}$$

Denotando en este caso δt^{i}, δt^{j} a las correcciones de reloj de los satélites i,j para las épocas tk, tl.

Por lo tanto, los modelos obtenidos serán totalmente consistentes para ser aplicados en la observación si en la posición del *rover* solo se utilizan observaciones de fase en modo PPP. En ese caso, las

[2] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*

ecuaciones de observación para dos satélites *i, j* y dos épocas *t1, t2* son las correspondientes a la combinación en su forma general:

$$\Phi^{i}_{3}(t_1) = \rho^{i}(t_1) + c\delta t_r(t_1) - c\,\delta t^{i}(t_1) + \lambda_3 B^{i}_{3}$$

$$\Phi^{j}_{3}(t_1) = \rho^{j}(t_1) + c\delta t_r(t_1) - c\,\delta t^{j}(t_1) + \lambda_3 B^{j}_{3}$$

$$\Phi^{i}_{3}(t_2) = \rho^{i}(t_2) + c\delta t_r(t_2) - c\,\delta t^{i}(t_2) + \lambda_3 B^{i}_{3}$$

$$\Phi^{j}_{3}(t_2) = \rho^{j}(t_2) + c\delta t_r(t_2) - c\,\delta t^{j}(t_2) + \lambda_3 B^{j}_{3}$$

Φ_3 corresponde a la combinación ionosphere-free
ρ es la distancia geométrica al satélite
δt_r es el reloj del receptor
δt^i es el reloj del satélite
B_3 es el valor real de la ambigüedad para la combinación Φ_3

Si se plantean las diferencias entre satélites y épocas para la combinación Φ_3 :

$$\Phi^{ij}_{3}(t_1) - \Phi^{ij}_{3}(t_2) = \rho^{ij}(t_1) - \rho^{ij}(t_2) - c\,[(\delta t^{i}(t_1) - \delta t^{j}(t_1)) - (\delta t^{i}(t_2) - \delta t^{j}(t_2))]$$

Quedan eliminados los parámetros de reloj del receptor δt_r para las épocas *t1, t2* y las ambigüedades B^{i}_{3}, B^{j}_{3}.

4.1.1.1. Estimación de retardos de fase no calibrados para PPP -RTK

Es bien conocido que, debido a las particularidades de los observables GNSS sólo se preserva el carácter entero de las ambigüedades cuando se plantean las ecuaciones de dobles diferencias. La resolución de las ambigüedades para un solo receptor (en simples diferencias), requiere información adicional sobre la parte fraccional de las ambigüedades, que puede ser estimada paralelamente a los modelos de reloj de satélite (Mervart et al., 2008). De manera que es posible añadir a la corrección de reloj antes estimada un término que haga posible resolver las ambigüedades *wide-lane* y *narrow-lane* en las ecuaciones de simples diferencias para que estas recuperen su valor entero.

El término a estimar es el retardo de fase no calibrado (UPD), b_1^{ij} y b_2^{ij}, para las frecuencias f_1 y f_2, y los *bias* del observable código denotados aquí como p_1^{ij} p_2^{ij} a efectos de seguir la formulación original y distinguirlo del *bias* de fase *b*.

Las ecuaciones de simples diferencias para las observaciones de código P_{1k}^{ij}, P_{2k}^{ij} y de fase Φ^{ij}_{1k}, Φ^{ij}_{2k}, de una estación k a los satélites *i,j,* se representarían del siguiente modo:

$$P_{1k}^{ij} = \rho^{ij}_{k} + I^{ij}_{k} - c\,\delta t^{ij} + p_1^{ij}$$

$$P_{2k}^{ij} = \rho^{ij}_{k} + \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} I^{ij}_{k} - c\,\delta t^{ij} + p_2^{ij}$$

$$\Phi^{ij}_{1k} = \rho^{ij}_{k} - I^{ij}_{k} - c\,\delta t^{ij} + \lambda_1 (N^{ij}_{1k} + b_1^{ij})$$

$$\Phi^{ij}_{2k} = \rho^{ij}_{k} - \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} I^{ij}_{k} - c\,\delta t^{ij} + \lambda_2 (N^{ij}_{2k} + b_2{}^{ij})$$

I^{ij}_{k} es la diferencia entre los retardos ionosféricos experimentados por la señal para un satélite i, y un satélite j, y λ_1, λ_2, son las respectivas longitudes de onda en L_1 y L_2.

Estos valores $b_1{}^{ij}$ y $b_2{}^{ij}$, no dependen del receptor y presentan poca variabilidad temporal, con lo cual se demuestra que pueden ser estimados del lado del servidor simultáneamente a los modelos de reloj y añadidos a estos, de tal forma que al aplicarlos a las observaciones, el receptor sería capaz de recuperar la naturaleza entera de las ambigüedades N^{ij}_{1k} y N^{ij}_{2k}.

4.1.2. Sistema "RETICLE" de estimación en tiempo real de estados de reloj

Las predicciones de los *offsets* y derivas de reloj de satélites, pueden llegar a presentar discrepancias con respecto a los valores verdaderos del orden de decímetros o metros (Hauschild et al., 2010). Esta desviación es producida en parte por la naturaleza estocástica del ruido de reloj y las variaciones de la frecuencia de los osciladores atómicos de los satélites.

Adicionalmente, al igual que sucede con las componentes de los productos ultra-rápidos, una parte de estos productos es predicha mientras que la otra es calculada a posteriori. Los productos predichos, con una edad de los datos (*age-of-data*), de muchas horas no son útiles por si mismos para aplicaciones PPP en tiempo real.

La solución a este problema se basa en la utilización de *offsets* de reloj, que hayan sido estimados en tiempo real a partir de observaciones continuas en tiempo real GNSS, procedentes de una red de estaciones, de manera que se realice la estimación a partir de una solución de dobles diferencias procesada continuamente.

En el contexto del *Real-Time Pilot Project* del *International GNSS Service* (IGS), cabe destacar la investigación del Centro de Operaciones espaciales Alemán (DLR[3]/GSOC) que emplea los algoritmos que conforman el software RETICLE, para proporcionar productos de reloj. RETICLE, (Real Time System for CLock Estimation), incluye un conjunto de desarrollos implementados para producir estimaciones en tiempo real de correcciones de reloj.

En Hauschild y Montenbruck (2008), viene detallado el complejo proceso de estimación que se basa en el cálculo secuencial a través de filtros KALMAN, que procesan observaciones de código y fase procedentes de un conjunto de estaciones recibidas en *streaming* de datos en tiempo real vía protocolo NTRIP[4], (Anexo I.3), y a continuación se sucede la siguiente secuencia de operaciones:

-El procedimiento emplea la información orbital de la parte predicha de la solución ultra-rápida orbital más reciente del producto *IGUyyyyn.sp3* del IGS.

-Se estiman los *offsets* y derivas de los relojes de la constelación al completo, de manera consistente con las órbitas ultra-rápidas.

-Inclusión del *bias* conocido entre códigos *P1- C1* (differential code biases), debido a que no todas las estaciones contienen el observable P1, sino que algunas rastrean solo el código C1 debido a las características del instrumental.

-Conocidos los *bias* generados por el CODE[5] es posible obtener la combinación libre de ionosfera (ionosphere-free) formada por las posibles combinaciones de observables en las dos frecuencias L1 y L2, conforme a la siguiente formulación:

[3] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*
[4] *Network transport of RTCM via Internet Protocol*
[5] *Center for orbit Determination in Europe*

$$P_3 = \frac{f^2_{L1}}{f^2_{L2} - f^2_{L2}} P_{L1} - \frac{f^2_{L2}}{f^2_{L1} - f^2_{L2}} P_{L2} \qquad \Phi_3 = \frac{f^2_{L1}}{f^2_{L2} - f^2_{L2}} \Phi_{L1} - \frac{f^2_{L2}}{f^2_{L1} - f^2_{L2}} \Phi_{L2}$$

Donde P_3 y Φ_3 son las combinaciones de libre –ionosfera para la pseudodistancia y portadora respectivamente, f_{L1} *y* f_{L2} son las frecuencias en L1 y L2, y, P_{L1} , Φ_{L1} , P_{L2} , Φ_{L2} *son* las correspondientes medidas de pseudodistancia y fase sobre L1 y L2.

Por último, se procede a la inclusión de estimaciones para cada estación del estado de reloj y del retardo troposférico para las épocas de estimación de relojes.

Las ecuaciones para P_3 y Φ_3 , de la observación al satélite j , tal y como se desarrolla en Hauschild y Montenbruck (2008), incluyen los siguientes efectos a modelar en el sistema RETICLE, resultando:

$$P_3{}^j = | r^j - r_n | + c\,(\delta t_n - \delta t^j) + c\delta t_{rel} + Tr_n + MdTr_n + b_{p1c1} + b_{PCO} + b_{PCV}$$

$$\Phi_3{}^j = | r^j - r_n | + c\,(\delta t_n - \delta t^j) + c\delta t_{rel} + Tr_n + MdTr_n + b_{PWU} + b_{PCO} + b_{PCV} - B_{Cn}{}^j$$

$|r^j - r_n|$ es el vector satélite - receptor, es decir la distancia geométrica $\rho_n{}^j$

c es la velocidad de la luz

δt^j y δt_n son, respectivamente, los *offsets* del reloj del satélite y del receptor

δt_{rel} es el término de corrección que considera los efectos relativistas y que a su vez consta de dos componentes, el primero de ellos considera las variaciones periódicas a los que se ve sometido el oscilador del satélite y la segunda es la variación espacio temporal por curvatura.

Tr_n es el retardo troposférico obtenido inicialmente a partir del modelo de la Universidad de New Brunswick (UNB3) conocida la posición del usuario, instante y ángulo de elevación, y dTr_n es el retardo troposférico cenital estimado para cada estación. En este caso es necesario emplear una *Mapping* function *(M)* para su determinación.

b_{P1C1} hace referencia al *bias* entre los observables de código correspondientes.

b_{PCO} y b_{PCV} denotan las correcciones debidas al offset del centro de fase (*PCO –phase center offset*) del satélite y a las variaciones a las que está sometido el centro de fase de la antena del receptor (*PCV-phase center variations*).

b_{PWU} es el término que incluye las correcciones que afectan a las medidas de fase y son debidas a la orientación y actitud del satélite debido a la rotación para mantener orientados sus paneles solares (*phase wind up).*

Finalmente $B_{Cn}{}^j$ es el término correspondiente a las ambigüedades flotantes.

Nótese que, en esta aproximación al contrario que la anterior para posicionamiento PPP estándar con el sistema RTNET, en el modelado de la ecuación del observación por la combinación libre de ionosfera, si que se utilizan pseudodistancias y observaciones de código, calculando por tanto los *bias* o sesgos entre los distintos códigos rastreados, y se modelan otros efectos como *phase wind-up*, la corrección relativista del reloj y otros efectos de carga.

Las coordenadas de partida de las estaciones de referencia, obviamente se toman de los ficheros SINEX y no son parte del proceso de estimación. Adicionalmente se emplean parámetros de orientación terrestre (EOP) para el cálculo de mareas terrestres. A través de los ficheros NANUS[6], se

[6] *Notice Advisories for Navstar Users*

discriminan del cálculo los satélites que estén siendo sometidos en un determinado momento a reposicionamientos, maniobras orbitales o mantenimientos.

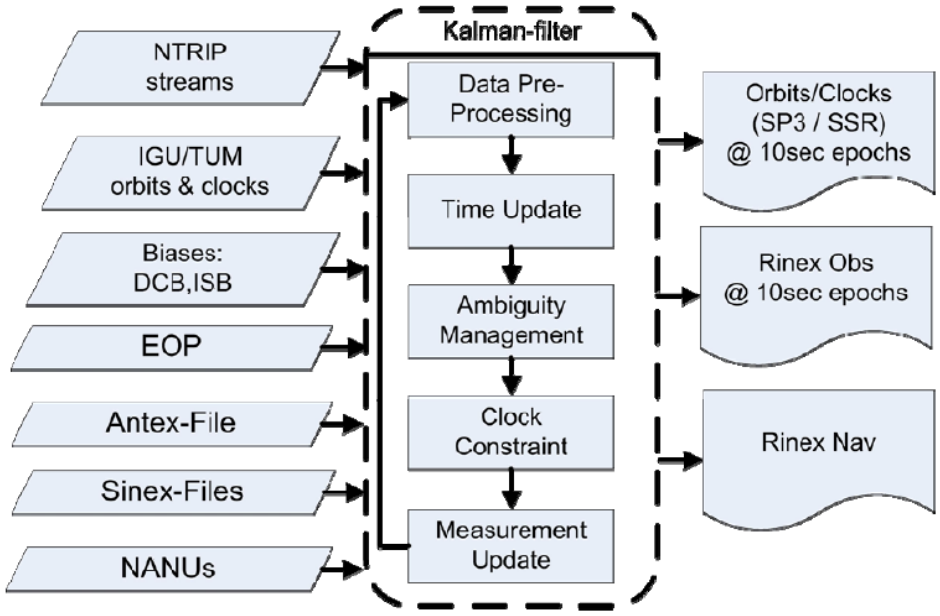


Figura 4.2: Esquema del filtro recursivo Kalman de estimación en tiempo real (Hauschild et al., 2010)

El proceso de entrada de datos en el filtro Kalman se lleva a cabo cada 4 segundos y los resultados de relojes de satélites se encapsulan conjuntamente con las órbitas. Se obtiene una solución para el modelo de reloj con constreñimiento a soluciones previas. Adicionalmente, se constriñe el valor medio de los relojes estimados al valor medio de los relojes ultra-rápidos predichos.

Como producto final se envía la encapsulación y estandarización de la corrección de reloj para ser accesible en tiempo real a través de un *stream* emitido cada 5-10 segundos. No obstante, la latencia total desde la época de medida hasta que la estimación de la corrección de reloj está disponible puede llegar a ser de 7 segundos. Adicionalmente, también se generan archivos SP3 muestreados a intervalos de 10 y de 30 segundos.

El sistema ha sido ampliado para proporcionar también soluciones de reloj en tiempo real para los satélites Galileo existentes, partiendo de las observaciones en tiempo real de los receptores con capacidad de rastreo GALILEO de la Red Cooperativa para Observaciones GIOVE -CONGO (Steigenberger et al., 2011). Para ello era necesario determinar las predicciones de órbitas diarias para los satélites GIOVE, los sesgos o *bias* entre sistemas GPS y Galileo, y entre frecuencias, proporcionados por el Instituto de Astronomía y Geodesia Física de Munich (IAPG), y por último las estimaciones de las correcciones polinomiales de reloj basadas en las señales de las frecuencias de E1b y E5a. La solución en tiempo real de órbitas y relojes combinados GPS+GIOVE, ha continuado con la predicción de valores para la misión de satélites IOV[7], generando los parámetros correctores de reloj, a partir de combinaciones *iono-free* de observaciones a las frecuencias GALILEO *E1, E6, y E5a*.

4.1.3. Algoritmo RTIGSMR

El algoritmo RTIGSMR corresponde a las siglas Real Time IGS Multicast Receiver implementado por el National Resources of Canada, y emplea tanto observaciones de código como de fase. Su función es el procesamiento continuo proporcionando un *streaming* de productos GNSS en tiempo real. Surge a raíz del proyecto piloto del IGS para implementar modelos en tiempo real de datos GNSS.

[7] *In orbit Validation*

El sistema que se va a detallar a continuación, es empleado también por la Universidad de Viena (TUW), para sus aportaciones al IGS generando productos *real time* y *near-real time*, utilizables tanto en la técnica PPP en tiempo real, como en la generación de productos de latencia *quasi-real,* aptos para procesamientos horarios en aplicaciones que requieran resultados con baja latencia, como por ejemplo en meteorología.

En Thaler y Weber, (2010), partiendo de la premisa de que la predicción de relojes de satélite en los productos ultra-rápidos tiene problemas especialmente en los osciladores de los satélites más antiguos, se establece que basándose en la solución pre-procesada de las estaciones ITRF, se puede realizar un cálculo en tiempo *quasi-real* de los modelos de los osciladores y las órbitas, para, de manera recursiva, efectuar una comparación con la solución orbital ultra-rápida predicha.

El conjunto de secuencias que esquematizan el proceso de generación de productos en tiempo real es el siguiente:

-Suavizado inicial de las observaciones de código y detección de pérdidas de ciclo.

-Combinación libre de ionosfera, para ello se parte también de los valores del *bias* conocido a través del CODE. Las pseudodistancias sobre las frecuencias L1 y L2 se combinan en el observable libre del retardo ionosférico de las señales para formar el observable P_3 *(*P_{R3} en la figura 4.3*)*.

-Corrección de efecto troposférico a partir del retardo total cenital (ZTD) de cada estación, estimado a partir del retardo hidrostático cenital (ZHD) y retardo húmedo cenital (ZWD) empleando el modelo de la *Vienna Mapping Function* hidrostática (VMF1).

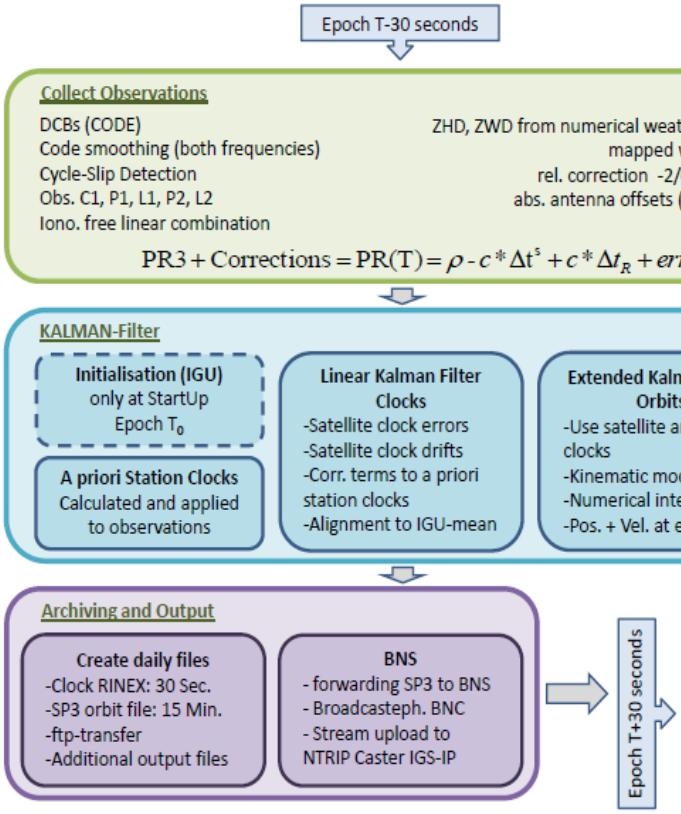


Figura 4.3: Secuencia de operaciones de generación de modelos con el sistema RTIGSMR (Thaler et al., 2010).

-Aplicación de filtros Kalman a la determinación de los modelos de osciladores de satélites: Dentro de este cálculo se obtienen los errores de reloj, así como la deriva lineal. Debido al comportamiento, a veces impredecible de los osciladores, se parte de unos valores iniciales de una fase de pre-cálculo. En

el filtrado inicial, solo se estiman las componentes de las correcciones. El promedio de todos los *offsets* de los osciladores de los satélites se alinea con la solución de reloj ultra-rápida.

-Aplicación de filtros Kalman a las órbitas: Los valores predichos se obtienen mediante integración numérica y se actualizan mediante observaciones. Este paso conduce a obtener tanto posiciones como velocidades de las órbitas de los satélites.

-Para cada época de observación se obtienen unas órbitas calculadas y los términos correctores para los modelos de reloj, los cuales se re-direccionan a los módulos del servidor del BKG, quien a su vez genera los mensajes encapsulados de los parámetros correctores y los publica a través de un servidor en tiempo real.

4.1.4. Sistema RETINA

Durante la última década, la Agencia Espacial Europea (ESA), a través del European Space Operations Centre (ESOC), se ha embarcado en la tarea de implementar herramientas para generación de productos GNSS en tiempo real. Como fruto de este trabajo, ha surgido el sistema RETINA (system for REal Time NAvigation). El conjunto de rutinas y algoritmos así denominado, ha permito al ESOC establecerse como Centro de Análisis y como parte fundamental de la coordinación de Centros de análisis del IGS, en el proyecto piloto Real Time Pilot Project, como veremos más adelante.

El ensamblado de algoritmos que conforman RETINA, permiten el procesamiento, distribución y almacenamiento de productos de órbitas y relojes del tipo Tiempo real y Near Real Time (Pérez et al., 2006). En concreto, los archivos de latencia Near Real Time son generados por un conjunto de procesos por lotes programados, mientras que los emitidos a través de *streams* cada segundo, (tiempo real), se generan a través de una estimación realizada en tiempo real a partir de las órbitas ultra-rápidas y datos recibidos cada segundo de las estaciones GNSS. De este modo, los productos tiempo real generados por RETINA, se distribuyen con una latencia inferior a 10 segundos.

La generación de productos en tiempo real con parámetros correctores de reloj y órbitas, es bastante compleja, interviniendo los siguientes procesos:

-Recepción de las observaciones GNSS cada segundo de las estaciones.
-Algoritmos propios de RETINA para re-direccionar y dar formato tanto a las observaciones como a los datos de navegación.
-Procesos para intercambio de datos de observación y navegación de diferentes fuentes.
-Procesos para la estimación en tiempo real.
-Procesos para la combinación de los productos en tiempo real.
-Asimismo, se generan dos juegos de productos. Uno de ellos se encuentra referido al Centro de Masas del satélite (COM), y el otro al Centro de fase de la antena del satélite (APC).

Por último, se lleva a cabo la encapsulación de órbitas y relojes en formato SSR tanto de la solución final individual que genera ESOC como del producto combinado de las soluciones procedentes de distintos centros, para poder llevar a cabo la diseminación de los productos en el formato RTCM definido según los principios del State Space Representation (SSR).

4.1.5. El sistema PPP-Wizard

El sistema denominado PPP-WIZARD, (*PPP- With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator)*, es una prueba del método de resolución de ambigüedades para observaciones con la técnica PPP, desarrollado por el CNES[8]. Este método obtiene modelos de correcciones para aplicar en PPP en tiempo real (Laurichesse et al., 2010).

[8] *Centre National d'Etudes Spatiales-Francia*

El sistema PPP-Wizard está fundamentado en 3 partes:

-Cálculo SSR: Consiste en el cálculo de las órbitas y los relojes de los satélites GPS y GLONASS en el formato *State Space Representation,* a partir del procesamiento continuo de una red global de estaciones.
-Transmisión: Consiste en la transmisión de las órbitas y los relojes a los usuarios usando el protocolo y formato estándar y predefinido (RTCM-SSR).
-Monitorización PPP continua: A partir de órbitas/relojes generados y las mediciones de un receptor, se realiza posicionamiento preciso con la resolución entera de ambigüedad en tiempo real, así como la comparación con la posición absoluta de referencia para analizar la calidad de las soluciones transmitidas.

La siguiente figura muestra la arquitectura general del sistema:

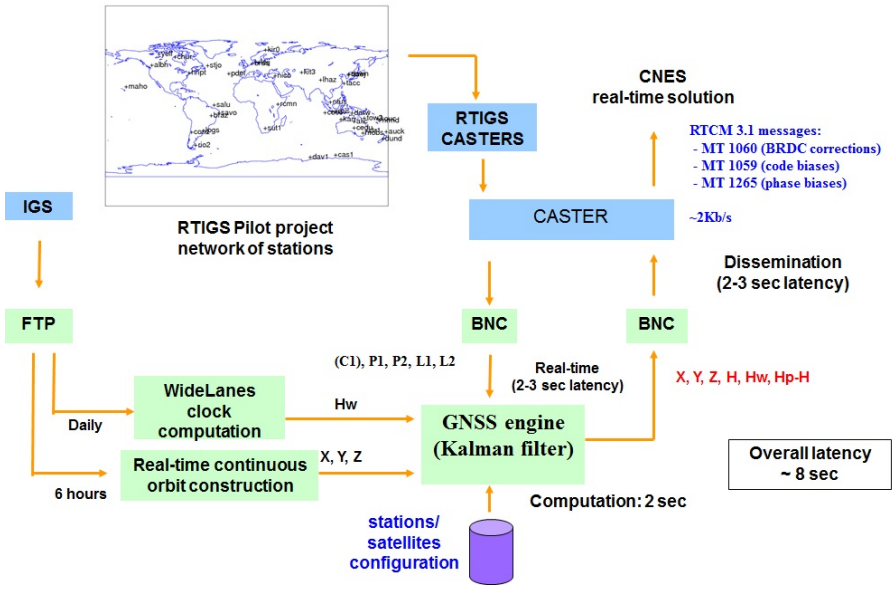


Figura 4.4: Sistema PPP-Wizard. (http://www.ppp-wizard.net/ Sitio web del Cnes. © CNES (2014)).

En concreto el proceso de obtención de las correcciones de las órbitas y relojes que son necesarios para PPP, principalmente utiliza como entrada *streams* en tiempo real proporcionados por redes GNSS, procedentes del servidor del IGS, del servidor del GFZ[9], del servidor NrCan[10] y de su propio servidor.

El módulo de cálculo de obtención del vector de estado con los modelos de órbitas, osciladores, y *bias*, recibe el nombre de módulo SSR y el cálculo lo hace por medio de un filtro de Kalman. Además de las mediciones en tiempo real, el módulo SSR obtiene datos diariamente del IGS para recuperar las mediciones necesarias para el procesamiento de los relojes *wide-lane*. Adicionalmente también utiliza como solución orbital de entrada las órbitas ultra-rápidas del IGS para alimentar el filtro Kalman.

El núcleo de la implementación del tiempo real es el filtro Kalman trabajando en modo mixto (con ambigüedades de fase flotantes y con valores enteros). El pre-procesamiento llevado a cabo permite detectar pérdidas de ciclo y salvar las ambigüedades enteras *wide-lane*. La latencia total en la determinación y difusión de los modelos oscila entre 5-8 segundos.

Además de transmitir las correcciones de las órbitas y relojes GPS y GLONASS dentro del marco del proyecto Real Time del IGS, en el CNES se implementa la técnica IRC, *(Integer Recovery Clocks)*, vista anteriormente para recuperación de ambigüedades enteras en tiempo real. De manera que se obtienen los *bias* del observable experimentales (b_{L1}, b_{L2}, b_{L5}). Estos *bias* contienen la parte fraccional que se añade a las mediciones de fase para resolver las ambigüedades enteras.

[9] *Deutsches GeoForschungsZentrum*
[10] *National Resources of Canada*

Teóricamente, la recuperación de la ambigüedad entera mejora la calidad total de las órbitas y relojes, y da una solución fija, es decir, la capacidad de un receptor de usuario para fijar sus propias ambigüedades utilizando solo las nuevas órbitas y relojes, el cual es un enfoque del PPP clásico con características de ambigüedades enteras. Los resultados obtenidos tienen una precisión al nivel del centímetro.

4.2. Implementación del filtro Kalman en los centros de análisis.

En general, en todos los centros de análisis del proyecto *Real-Time International GNSS Service* (RT-IGS), se utiliza el filtro Kalman para la estimación en tiempo real de las órbitas de los satélites, los estados de los osciladores u otros efectos a modelar en tiempo real. En el IGS, adicionalmente, también se utiliza para la creación de productos combinados finales.

El filtro Kalman, se implementa en los procesos descritos anteriormente para poder predecir variables, términos o parámetros no medibles de un sistema dinámico lineal, conocidas las varianzas que afectan a esos términos. Tiene la propiedad de poder aplicarse al caso de tiempo real y su aplicación sigue dos fases fundamentales: predicción y corrección. En la primera fase de predicción de valores, se realiza una estimación a priori y se conoce la covarianza del error asociada a la estimación.

Los parámetros estimados por el filtro Kalman y su proceso de optimización, pueden variar ligeramente de un centro de análisis a otro. A continuación se detallan los estimados por el CNES[11]:

Parameter nature	Quantity	Typical number
satellite phase clock	1 per satellite	34
station phase clock	1 per station	50
code/phase satellite clock bias	1 per satellite	34
code/phase station clock bias	1 per station	50
zenith troposphere delay	1 per station	50
station coordinates corrections	3 per station	50*3
satellite orbit corrections (R,T,N)	3 per satellite	34*3
Phase ambiguities	12 per station (max)	50*12
		1070

Figura 4.5: Parámetros determinados en el sistema PPP-Wizard. Sitio web del Cnes. © CNES (2010). (Laurichesse et al., 2010)

En otros centros como el DLR[12], siguiendo la aproximación de Hauschild et al., (2008), para el sistema RETICLE, el vector de estado para una constelación de 32 satélites estaría formado por:

[11] *Centre National d'Etudes Spatiales-Francia*
[12] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

$$x = \begin{bmatrix} (dt^1 & \dots & dt^{32})^T \\ (df^1 & \dots & df^{32})^T \\ (dt_1 & \dots & dt_n)^T \\ (dT_1 & \dots & dT_n)^T \\ (N'_{1,1} & \dots & N'_{1,12})^T \\ \dots & \dots & \dots \\ (N'_{n,1} & \dots & N'_{n,12})^T \end{bmatrix}$$

Donde dt^i es el error del oscilador del satélite y df la deriva, en este caso el vector de estado incluye el estado del reloj del receptor dt_i, el retardo troposférico cenital dT_i y las ambigüedades flotantes. Considerando una constelación de 32 satélites, y un número de satélites rastreados máximo de 12, da lugar a un número de ambigüedades flotantes a estimar según el número de estaciones n que intervengan multiplicado por 12 satélites visibles desde cada estación.

4.2.1. Predicción de valores

Para reducir la complejidad del filtro, las órbitas son estimadas utilizando filtros mínimo cuadráticos basados en datos de productos orbitales anteriores de generación ultra-rápida *a priori*. Con el fin de mitigar las interrupciones que se producen en las soluciones orbitales individuales, estas órbitas pueden ser obtenidas de varias fuentes o ser determinadas por el propio centro de análisis:

- IGU (Coordinador IGS)
- ESA (ESOC)
- CODE (BERN)
- SGU (IGN Francés)

La parte útil de estas órbitas, la parte en tiempo real, corresponde a la parte extrapolada. Otros datos de entrada consisten en datos crudos, efemérides transmitidas y parámetros de orientación terrestres.

A veces, la parte predicha de las órbitas ultra-rápidas no es lo suficientemente precisa para realizar resoluciones de ambigüedad correctas, en procesamientos con combinaciones de observables como la combinación *narrow-lane*. Para superar este problema, la solución es ajustar estas órbitas y relojes en tiempo real en el filtro Kalman. Esto requiere una modificación significativa en el filtro para incluir las ecuaciones de la dinámica orbital (Laurichesse et al., 2013). A pesar de la complejidad de la estimación de los modelos de órbitas y osciladores en tiempo real, la carga de cálculo puede reducirse significativamente utilizando técnicas especiales de optimización en el filtro, las cuales permiten la ejecución de un ciclo completo Kalman en solo 10 segundos.

Los datos crudos son pre-procesados y las trayectorias de los satélites son reconstruidas. El filtro principal Kalman calcula órbitas y relojes y se ocupa de la resolución de ambigüedad entera de medidas de fase. En la fase de predicción, se lleva a cabo el pre-procesamiento, utilizando las pseudodistancias y las medidas de fase (P1, P2, L1, L2..), para detectar saltos de fase y medidas erróneas, con el fin de construir pasadas continuas de satélites.

4.2.2. Fase de actualización y corrección del filtro Kalman.

En la segunda fase de corrección, se actualizan los valores de la medición de entrada, se determina la ganancia de Kalman y se procede a la estimación a posteriori.

La formulación general del filtro Kalman es de la forma P=UDU', siendo U una matriz triangular superior y D una matriz diagonal cuadrada. La actualización de la matriz solución sigue el algoritmo basado en Bierman (1976), mientras la propagación de la solución utiliza el algoritmo establecido por Thornton (1977).

En algunos centros de análisis, se han realizado algunas adaptaciones específicas con el fin de acelerar

el proceso. Por ejemplo, en el CNES una de estas adaptaciones consiste en que se puede realizar la eliminación de una sola medición de la solución en la fase de actualización sin la necesidad de volver a procesar todo el conjunto de mediciones.

Con el fin de realizar la actualización del filtro Kalman, lo más rápidamente posible, el vector de estado $\boldsymbol{x}$ debe ser propagado para la siguiente época utilizando un modelo de predicción.
El estado de propagación afecta principalmente a las componentes de la trayectoria del satélite, (radial, longitudinal y transversal), los otros parámetros (relojes, retardos troposféricos, sesgos) son modelados época a época. En Hauschild y Montenbruck, (2008), por ejemplo, los relojes de los satélites GNSS se predicen linealmente en el tiempo, mientras que la deriva del reloj y todos los demás parámetros de estado se suponen constantes (puesto que varían muy lentamente en el tiempo). En Laurichesse et al., (2013), se detalla que el movimiento del satélite se calcula mediante la integración de un modelo dinámico de fuerza que incluye el modelo de geopotencial, mareas sólidas, carga oceánica, relatividad y presión de radiación solar, de manera que estas fuerzas empíricas son estimadas en el filtro Kalman.

En este último caso, (sistema utilizado en el CNES), el integrador es del tipo Runge-Kutta (orden 6) con un paso de integración nominal de 60 segundos. El esquema de integración es el siguiente partiendo de:

$$y(t_o) = y_o \;\; \text{->} \;\; y' = f(t,y):$$

siento t la época de cálculo del vector de estado, se toma como el vector de estado para la posición del satélite p y las velocidades v:

$$y = \frac{p}{v} \quad , \quad y' = \begin{pmatrix} v \\ a_{tot} \end{pmatrix}$$

La matriz "de transición" del vector de estado requerida para la actualización puede adoptar la siguiente forma para una constelación de 32 satélites:

$$\Phi = \begin{bmatrix} I_{32,32} & I_{32,32}\Delta t & 0_{32,14n} \\ 0_{32,32} & I_{32,32} & 0_{32,14n} \\ 0_{14n,32} & 0_{14n,32} & I_{14n,14n} \end{bmatrix}$$

Donde I denota la matriz unitaria y Δt representa el intervalo de tiempo entre dos actualizaciones del filtro.

Los relojes de las estaciones y el retardo troposférico, también están sujetos a variaciones que deben ser contempladas por el filtro Kalman para la estimación en tiempo real. En el sistema RETICLE, (Hauschild et al., 2008), para compensar estas desviaciones se introduce en el proceso el ruido en los elementos correspondientes del vector de estado. Sin esta inclusión, la covarianza del vector de estado disminuiría con el tiempo y conduciría a la divergencia del filtro. La matriz de transición de estado Φ se utiliza para propagar o actualizar el estado del vector x, a la época k+1, así como la matriz de varianzas- covarianzas Q conocida, ya que también se actualiza en el filtro:

$$x_{k+1} = \Phi x_k$$

$$P_{k+1}^{-} = \Phi P \Phi^T + Q$$

La fase de corrección del filtro Kalman implica el modelado de las mediciones en la época actual con los *streams* de entrada. La combinación utilizada es la combinación de pseudo-distancia y de fase libre de ionosfera. En la estimación, se calculan los términos y modelos correspondientes a la ionosfera, mareas terrestres sólidas, phase *wind-up*, troposfera, valores del centro de fase de las antenas, coeficientes de carga oceánica y efectos relativistas.
La salida del filtro contiene principalmente las correcciones de las órbitas y el juego completo de los relojes, que son enviados en el formato estandarizado RTCM-SSR.

4.3. Generación de productos combinados en el IGS y distribución a través del servicio RTS.

La generación de un producto final combinado tiene la finalidad de detectar y eliminar *outliers,* o pérdidas de datos de las soluciones individuales aportadas por cada uno de los centros de análisis, así como mejorar la precisión del producto final.

En su rol de coordinador de centros de análisis para el IGS Real Time Pilot Project, en Abril del año 2010, y basándose en su experiencia previa, el ESOC[13] comenzó a producir un producto combinado en tiempo real empleando órbitas y modelos de reloj recibidos en tiempo real a través de protocolo NTRIP, (Anexo I.3), empleando nuevas funcionalidades incorporadas en el software RETINA, (Agrotis et al., 2010)

En su fase inicial, se partió de las aportaciones de tres centros de análisis (BKG[14], DLR[15] y el propio ESOC), siendo el principal problema la disponibilidad y fiabilidad de los modelos en tiempo real. Actualmente el producto combinado del IGS se genera con las aportaciones de muchos más centros de análisis.

Como consecuencia de los avances desarrollados desde entonces hasta ahora, para la combinación de productos, el IGS ha creado el servicio en tiempo real RTS, (Real Time Service), para su distribución (http://beta.igs.org/rts) .

A través del Servicio en tiempo real RTS, el IGS amplía su capacidad de soportar y dar cobertura, al menos de manera experimental, a aplicaciones que requieren acceso en tiempo real a sus productos. El *streaming* de datos en tiempo real que distribuye, proporciona órbitas GNSS y correcciones a los modelos de los osciladores con el objetivo de posibilitar el posicionamiento absoluto preciso (PPP) con un solo receptor en tiempo real y aplicaciones relacionadas, tales como la sincronización de tiempo y potencial uso en monitorización de desastres, con cobertura global. RTS se basa en la infraestructura global IGS de estaciones pertenecientes a la red, y diferentes servidores de datos y centros de análisis.

El RTS se ofrece actualmente como un servicio-beta para el desarrollo y análisis del rendimiento de los productos. Los productos referidos a la constelación GLONASS, se ofrecen inicialmente como un producto experimental, estando previsto añadir gradualmente otras constelaciones GNSS a medida que estén disponibles.

Figura 4.6: Red del Real Time Service-IGS http://rts.igs.org/network/ . Visitado: Junio de 2014

[13] *European Space Operations Center*
[14] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*
[15] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*

Este servicio es posible gracias a las alianzas entre distintas instituciones como el NRCAN[16], el BKG , y el centro de la ESA / ESOC en Alemania. De manera que la estructura del RTS queda del siguiente modo:

- ESOC : Coordinador de centros de análisis para tiempo real
- BKG : Coordinador para la distribución de datos
- NRCan : Dirección del grupo de trabajo

4.3.1. Proceso de combinación de productos.

Los productos RTS consisten en correcciones a las componentes orbitales de satélites GNSS y correcciones polinomiales de los osciladores de los satélites. El *streaming* de datos en tiempo real se efectúa según el estándar RTCM -SSR para la representación espacial de vector de estado y se transmite mediante el protocolo NTRIP, (Anexo 1.3). Todos los productos se expresan dentro del Marco de Referencia Terrestre Internacional vigente, ITRFxx[17]. ITRF08, es el marco de los productos durante la realización de la mayor parte de esta investigación, iniciándose la definición del siguiente marco ITRFyy a adoptar durante los años 2013-2014.

El *streaming* de datos disponible a través del RTS corresponde a las soluciones combinadas generadas por el procesamiento de soluciones individuales a partir de los centros de análisis (AC) en tiempo real participantes. El objetivo de generar la combinación de los diferentes resultados de los AC es alcanzar un rendimiento más fiable y estable que el del producto de un solo Centro de análisis.

Centro	Solución individual aportada
BKG	Órbitas y relojes GPS RT[18] utilizando órbitas ultra-rápidas del IGS, órbitas y relojes GPS + GLONASS RT
CNES	Órbitas y relojes GPS RT basadas en órbitas ultra-rápidas del IGS, órbitas y relojes GPS+GLONASS RT
DLR	Órbitas y relojes GPS RT basadas en órbitas ultra-rápidas del IGS, órbitas y relojes GPS+GLONASS RT
ESA/ESOC	Órbitas y relojes GPS RT utilizando órbitas near-real time del ESOC con ejecución cada 2 horas, órbitas y relojes GPS RT utilizando órbitas ultra-rápidas del IGS
GFZ	Órbitas y relojes GPS RT utilizando órbitas ultra-rápidas del IGS
GMV	Órbitas y relojes GPS RT basadas en solución orbital near-real time propia, órbitas y relojes GPS+GLONASS
Geo++	No contribuye, solo desarrolla el standard RTCM-SSR
NRCan	Órbitas y relojes GPS RT utilizando órbitas near-real time cada hora propias
TUW	No contribuye
WUHAN	Relojes GPS RT basados en órbitas ultra-rápidas del IGS

Tabla 4.1: Aportación de los distintos centros de análisis al servicio RTS. (http://rts.igs.org/ .Visitado: Mayo 2014)

4.3.1.1. Combinación de productos individuales época a época.

Se trata de una combinación de productos que se basa en un conjunto de algoritmos generados por la ESA/ESOC. Como consecuencia, el valor de corrección del producto para cada época de observación es completamente independiente del valor para otras épocas, lo cual proporciona la ventaja de garantizar una precisión independiente del producto en cualquier instante.

[16] *Natural Resources Canada*
[17] *International Terrestrial Reference Frame*
[18] *Real Time*

El proceso de combinación consiste en lo siguiente:

-En primer lugar, para cada época de observación se elimina el *offset* para el oscilador de cada satélite, determinado por pares de soluciones de dos centros de análisis distintos.

Los relojes así alineados son depurados con el fin de eliminar *outliers* uno a uno, y combinados a través del cálculo de una media ponderada del valor de la corrección del reloj δC para cada satélite *s,* en cada época *i*.

$$\overline{\delta C}^{s}_{t_i} = \frac{\delta C^{s}{}_{CLK1,t_i} * w_1 + \delta C^{s}{}_{CLK2,t_i} * w_2 + ... + \delta C^{s}{}_{CLKn,t_i} * w_n}{w_1 + w_2 + ... + w_n}$$

Siendo:

CLK1, CLK2… CLKn las aportaciones de modelos de reloj de cada centro de análisis, donde se conoce el valor de la corrección de reloj para cada satélite y cada época *i* calculada, siendo transmitidos en el modelo *CLK* los coeficientes de la corrección polinomial de segundo grado de cada satélite:

$$\delta C = C_0 + C_1(t - t_o) + C_2(t - t_o)^2$$

Las componentes orbitales se determinan promediando los valores recibidos de cada centro de análisis referidos a las componentes radial, longitudinal y transversal a la trayectoria del satélite así como sus velocidades.

El producto se ofrece referido al APC (Antenna Phase Center). Este es el proceso en el que se genera el modelo IGS01 que ocupa un ancho de banda de 1.8 kbits/segundo, y que emite los mensajes 1059 y 1060 cada 5 segundos, (descritos en el capítulo 3). Paralelamente se genera otro producto referido al centro de masas del satélite denominado por las siglas IGC01.

En el análisis continuo del rendimiento del producto IGS01 desde el año 2011, se ha intentado establecer un mecanismo de detección de *outliers* en cada producto individual, para conseguir que el producto sea consistente y estable. De este modo se han llegado a alcanzar desviaciones estándar de reloj (sigma) de 0,1-0,15 ns, comparado contra la solución rápida del IGS.

4.3.1.2. Generación de productos combinados GPS a través de filtros KALMAN

La combinación a través de filtros Kalman es otro de los métodos que se emplea para la generación de productos combinados finales en tiempo real. El proceso necesita varios minutos de convergencia para alcanzar un resultado robusto, y mientras transcurre este periodo los datos en tiempo real no se emiten, siendo vigilada esta circunstancia a través de un mecanismo de control. Una vez alcanzado el instante de convergencia, la precisión se mantiene a menos que se deba reiniciar el proceso de convergencia de nuevo.

El proceso arranca partiendo de la siguiente información orbital de partida:

-Soluciones orbitales ultra-rápidas entrantes.

-Los modelos de reloj estimados de los satélites por los Centros de Análisis individuales se utilizan dentro del Filtro de Kalman como pseudo-observaciones dentro del proceso de ajuste recursivo.

Cada una de estas pseudo- observaciones es modelada como una función lineal de tres parámetros estimados:

-La corrección de reloj actual del satélite resultado de la combinación de las aportaciones.

-El o*ffset* específico de la solución de cada Centro de Análisis con respecto al producto combinado, tal y como se define en Kouba y Springer, (2001), pero determinado en un proceso en tiempo real.

-El o*ffset* específico del oscilador de cada satélite común para todos los centros de análisis.

Estos tres tipos de parámetros difieren en sus propiedades estadísticas. Los errores del reloj del satélite se supone que son parámetros estáticos mientras que los *offsets* específicos de cada centro de análisis y de cada satélite son parámetros estocásticos con ruido blanco, es decir que sus valores para dos épocas diferentes pueden no guardar correlación estadística.

La solución se estabiliza a través del establecimiento de constreñimientos mínimos. Los valores atípicos orbitales o *outliers* se detectan a través de algoritmos recursivos. De manera que, se determina la diferencia entre las posiciones determinadas por cada centro de análisis y la media de las posiciones. Si es mayor que un umbral de tolerancia, entonces la corrección aportada en la solución individual del centro de análisis se ignora para la época afectada.

Este proceso de combinación es uno de los seguidos por los algoritmos C++ del BKG por su software BKG Ntrip Client (BNC), con el fin de determinar el modelo combinado emitido en tiempo real para los satélites de la constelación GPS denominado IGS02, referido al centro de fase de la antena (APC) del satélite. Los mensajes emitidos son el 1057 cada 60 segundos, el 1058 cada 10 segundos, y el 1059 cada 10 segundos, (reseñados en el capítulo 3), ocupando un ancho de banda de 0.6 kbits/segundo.

4.3.1.3. Filtrado Kalman para la combinación de modelos GPS+GLONASS

De manera análoga al caso anterior, se sigue una aproximación similar con la salvedad de que se añaden correcciones GLONASS a los modelos.

Para ello, los relojes son combinados por ambos sistemas a través de un filtrado Kalman, y las órbitas se extraen de los *streaming* de entrada que contienen los valores generados por cada uno de los centros de análisis individuales, efectuando sobre ellos un test de errores groseros. Los centros de análisis que realizan la contribución, parten de la información orbital procedente de la parte predicha de los productos ultra-rápidos del IGS o bien difunden sus propias estimaciones basadas en sus productos ultra-rápidos generados. Esto produce que no haya total homogeneidad en el proceso de generación de productos individuales que contribuyen al producto combinado.

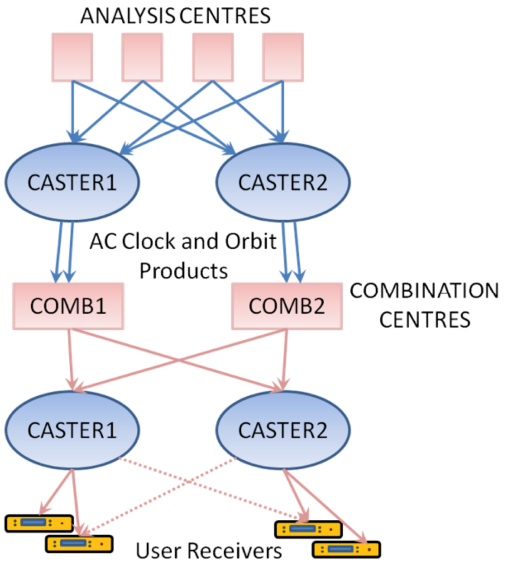
Las correcciones de reloj se encapsulan en el formato SSR (State Space Representation) en forma de coeficientes de los términos de corrección de reloj.

En este proceso se genera el modelo IGS03 que ocupa un ancho de banda de 0.8 kbits/segundo, y emite los mensajes 1057(60), 1058(10), 1059(10), 1063(60), 1064(10), 1065(10).

Adicionalmente, el formato SSR se encuentra preparado para proporcionar los *bias* de los observables de código. Estos *bias*, teóricamente son necesarios para aplicar a las pseudodistancias. No obstante, en los actuales *streams* de los productos combinados estos *bias* se transmiten con valor cero, debido a la dificultad del proceso de combinación de trabajar con los distintos observables (C1-C2, P1-P2 ..) que son rastreados y procesados a la hora de generar los productos por cada uno de los centros de análisis.

4.3.1.4. Mecanismos de distribución robusta

Con el fin de asegurar una distribución robusta de los productos del IGS en tiempo real, así como su disponibilidad, desde el IGS se han diseñado unidades de distribución redundantes por parte del coordinador de centro de análisis y el resto de centros.



El flujo de datos se ilustra en la figura. Se basa en la combinación paralela de cada uno de los productos combinados en varios centros independientes denominados COMB1, COMB2, donde la combinación se puede llevar a cabo.

A continuación los productos combinados se envían como *streams* RTCM a dos servidores diferentes que actúan de *caster*, en ellos el *stream* está disponible asignándole el mismo punto de montaje o *mountpoint*. Para asegurar la redundancia, por tanto, cada producto combinado es suministrado por dos o más centros de combinación al mismo tiempo. Si un centro que realiza la combinación no está disponible, la distribución cambia automáticamente al segundo centro de combinación, sin que el usuario sea consciente de la interrupción.

Figura 4.7: Diagrama de combinación de productos del IGS
http://www.igs.org/rts/monitor (Noviembre, 2014)

4.4. Generación de Modelos en tiempo real para marcos regionales

Los modelos combinados del IGS distribuidos en el servicio RTS se refieren al Marco Internacional de Referencia Terrestre vigente, ITRFyy. Pero es posible a partir de ellos generar productos referidos al marco de referencia regional adoptado como pueda ser ETRF2000 para Europa, GDA94 para Australia, NAD83 para Norte-América, SIRGAS95 o SIRGAS2000 para Sud-américa. En este caso la aplicación de la órbita y de correcciones de reloj regionales en una solución de PPP en tiempo real conduce automáticamente a obtener las coordenadas en el marco de la placa correspondiente.

Para ello se lleva a cabo la aplicación de la transformación de Helmert, conocidos los parámetros y los ratios de variación anual desde una época origen t_0. Estos valores para el cambio de marco entre ITRF2008 y cada marco regional se representan a continuación:

Regional System	Tx, Ty, Tz (m)	dTx, dTy, dTz (m/y)	Rx, Ry, Rz (mas)	dRx, dRy, dRz (mas/y)	S (10**-9) dS (10**-9/y)	T0 for Rates
ETRF2000	0.0521 0.0493 -0.0583	0.0001 0.0001 -0.0018	0.891 5.390 -8.712	0.081 0.490 -0.792	1.34 0.08	2000.0
NAD83	0.99343 -1.90331 -0.52655	0.00079 -0.00060 -0.00134	-25.91467 -9.42645 -11.59935	-0.06667 0.75744 0.05133	1.71504 -0.10201	1997.0
GDA94	-0.08468 -0.01942 0.03201	0.00142 0.00134 0.00090	0.4254 -2.2578 -2.4015	-1.5461 -1.1820 -1.1551	9.710 0.109	1994.0
SIRGAS2000	0.0020 0.0041 0.0039	- - -	0.17 -0.03 0.07	- - -	-1.0 -	no rates
SIRGAS95	0.0077 0.0058 -0.0138	- - -	0.00 0.00 -0.03	- - -	1.57 -	no rates
DREF91	-0.0118 0.1432 -0.1117	0.0001 0.0001 -0.0018	3.291 6.190 -11.012	0.081 0.490 -0.792	12.24 0.08	2000.0

Tabla 4.2: Cambio de marco entre ITRF08 y cada marco regional. (http://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits, visitado Marzo 2014)

4.4.1. Estrategia de transformación de productos

Sea la ecuación generalizada del observable pseudodistancia del receptor al satélite planteada:

$$P_r^s = c(\tau_r^s - \delta t^s + \delta t_r) + Tr + I + M_i + \varepsilon_i$$
$$= \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + Tr + I + M_i + \varepsilon_i$$

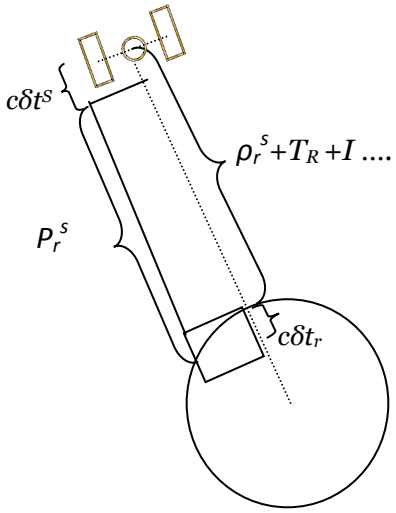


Figura 4.8: Gráfico pseudodistancia

Donde:

c es la velocidad de propagación de la señal.
τ_r^s es el tiempo de propagación de la señal.
ρ_r^s es la distancia geométrica del receptor al APC del satélite.
δt_r es el error en el reloj del receptor.
δt^s es el error en el reloj del satélite.
M_i, ε_i, son el efecto multipath y otros errores no modelados

Si, a continuación se realiza una translación y rotación de marco de referencia, se aplica la siguiente expresión general:

$$x' = d + R\,x$$

donde d es el vector de traslación y R es la rotación aplicada. Si se aplica esta expresión a la ecuación de la observación general, se infiere que las distancias geométricas tras la traslación y rotación son iguales, ya que se observa como las ecuaciones resultantes no dependen de estos factores (Huisman et al., 2013):

$$\rho_r^s = \rho'^s_r$$
$$P_r^s = \rho'^s_r + c(\delta t_r - \delta t^s) + Tr + I + M_i + \varepsilon_i$$

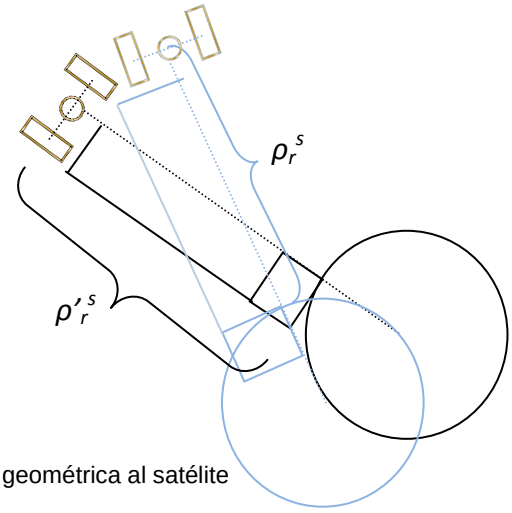


Figura 4.9: Rotación y traslación simulada sobre la distancia geométrica al satélite

Finalmente se aplica el factor de escala resultando: $x' = d + (1 + \Delta s)\,R\,x$, tras lo que se produce una variación sobre la distancia geométrica.

$$P_r^s = \| x^{'s} - x_r^{'} \| - \Delta S \| x^s - x_r \| + c(\delta t_r - \delta t^s)$$
$$= \rho^{'s}_r - \Delta s \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s)$$
$$= \rho^{'s}_r - \frac{\Delta s}{1+\Delta s}\rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s)$$
$$= \frac{1}{1+\Delta s}\rho^{'s}_r + c(\delta t_r - \delta t^s)$$

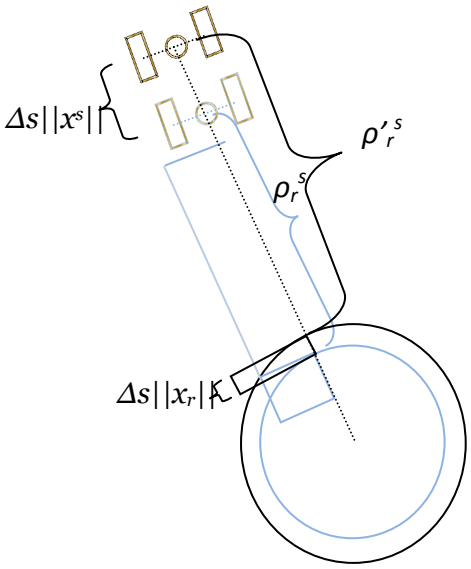


Figura 4.10: Cambio de escala sobre la distancia geométrica al satélite

Y de manera análoga para la ecuación de fase:

$$\Phi_r^s = \rho^{'s}_r + c(\delta t_r - \delta t^s) + Tr - I + m_i + N'_i + \varepsilon_i \ldots$$

Siendo afectados el resto de términos *I* y *Tr* al desvirtuar la transformación el significado físico de los efectos de propagación. Tal y como establecen Huisman y Teunissen, (2012), la mayor contribución al error del producto regional es el factor de escala aplicado que altera cada una de las pseudodistancias.

$$\rho_r^s \text{ pasa a ser } \frac{1}{1+\Delta s}\rho^{'s}_r$$

Ello provoca que los resultados aplicando directamente un producto regional tengan un cierto sesgo o falta de consistencia final, estando en curso todavía la búsqueda de soluciones alternativas. Realmente el factor de escala, afecta a la combinación lineal utilizada para PPP, y normalmente no es tenida en cuenta en el modelo lineal puesto que está pensado para el caso de productos en el marco ITRF. Teniendo en cuenta este efecto, algunos autores han propuesto introducir una variación en las ecuaciones de observación para PPP, que contemple la variación en escala expresándola de este modo:

$$\rho^S_{r,GRF} = \left\| x^S_{GRF} - x_{r,GRF} \right\| = \frac{1}{s}\left\| x^S_{RRF} - x_{r,RRF} \right\| = \frac{1}{s}\rho^S_{r,RRF}$$
$$\Delta\rho^S_{r,GRF} = -\frac{1}{s}(u_{r,RRF})^T \Delta x_{r,RRF}$$

Donde:

$\left\| x^S_{GRF} - x_{r,GRF} \right\|$ son los vectores de posición del satélite y antena respectivamente

$u_{r,RRF}$ es el vector unitario desde la antena del receptor al satélite

$\Delta x_{r,RRF}$ es la variación del vector de posición del receptor

El método tiene la desventaja de ser más difícil de implementar para resolver el posicionamiento PPP, ya que debe ser implementado tanto del lado del servidor como del lado del cliente .

Como se puede observar, la generación de los productos y modelos generados en tiempo real en general no sigue aproximaciones idénticas en los distintos centros de análisis, y no son procesos tan depurados como los de los productos precisos generados a posteriori como las órbitas precisas, los parámetros de orientación de la tierra, modelos troposféricos o ionosféricos. Tampoco el proceso de combinación o de transformación del producto al marco regional está exento de mejora. En capítulos

posteriores se analizará en varios escenarios el rendimiento de diferentes modelos presentados, proponiendo estrategias de optimización.

Es necesario resaltar, los aspectos de mejora detectados en los productos combinados del IGS y de los centros de análisis, que posteriormente se ampliarán en la fase de análisis de la investigación:

-Es fundamental la depuración del proceso de detección de *outliers* en los productos individuales y en el combinado.

-Se debe buscar un mecanismo para emitir dentro del producto combinado la componente del *bias* de cada observable código.

-En Agrotis et al., (2010), se establece que deben dedicarse todavía bastantes esfuerzos a la hora de reducir, tanto la latencia en la generación del producto emitido como su frecuencia de emisión en tiempo real y por tanto, la edad de las correcciones. Los productos combinados del IGS tienen una latencia estimada que puede alcanzar hasta los 25 segundos, (Capítulo 2).

-Se debe contemplar dentro del producto combinado la emisión del *bias* de fase correspondiente a los retardos no calibrados, que contengan la parte fraccional de las ambigüedades para que estas puedan recuperar su naturaleza entera.

-Como se ha visto en la relación de estrategias seguidas en cada centro de análisis en este capítulo, se siguen distintas tácticas a la hora de determinar el vector de estado de órbitas, osciladores, *bias* y modelizar efectos de la señal. Adicionalmente, se plantean distintos parámetros y modelos que forman parte de la estimación, se utiliza información orbital de partida diferente etc… . Por lo tanto, los centros de análisis deben establecer un proceso más homogéneo para obtener los productos en tiempo real.

Capítulo 5:

Herramientas existentes para posicionamiento PPP en tiempo real y software desarrollado.

Durante los primeros años de la actual década, no existen todavía muchas librerías y softwares desarrollados, que ofrezcan a través de versiones estables resultados aplicando la técnica Precise Point Positioning, (PPP), en tiempo real. Las que existen se pueden ejecutar en Laptop o estaciones de trabajo bajo varios sistemas operativos, sin solventar el problema por completo de poder resolver un posicionamiento PPP en tiempo real en los controladores de campo de los equipos GNSS, o proporcionar una interface amigable para análisis directo. Las herramientas disponibles, en su mayoría en versión *beta*, de código abierto o uso restringido, permiten la aplicación en tiempo real de la técnica, mediante la configuración in situ de un equipo portátil conectado al receptor GNSS. Entre las librerías en desarrollo cabe citar el BKG NTRIP Client (BNC), el RTKLIB, EPOS –RT[1], el GNUT/GEB, el sistema PPP-WIZARD o el software GINPOS, implementados por distintos grupos de investigación o instituciones. Por ello en la presente investigación se decidió programar rutinas de cálculo que posibilitaran más funciones, personalizadas y orientadas a las necesidades de análisis detectadas, para obtener resultados adicionales para el posicionamiento PPP en tiempo real.

En primer lugar se resumen algunas de las soluciones citadas que se encuentran en desarrollo por parte de diversos centros de investigación:

5.1. Herramientas existentes para posicionamiento PPP en tiempo real

5.1.1. Librerías de G-Nut/GEB.

El desarrollo de las librerías de G-Nut/GEB en lenguaje C++ se está llevando a cabo por el grupo de investigación perteneciente al Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography del Observatorio Geodésico de Pecny de la República Checa, (http://www.pecny.cz), para proporcionar herramientas programadas de cálculo GNSS tanto en tiempo real como en post-proceso (Dousa et al., 2012). Se caracterizan por ser librerías multi-plataforma, soportan observables de casi todas las constelaciones existentes y permiten el cálculo con PPP. La estructura de la programación se construye sobre clases de C++ orientadas a objetos. Parte de las librerías que realizan las funciones

[1] *Earth satellite Positioning and Orbit determination System in Real-Time*

básicas se distribuyen como código abierto, pero se encuentran todavía en forma de versión *beta* desde el año 2013. En concreto, las funciones que soporta son:

-Decodificación en tiempo real y cálculo de la posición.
-Cálculo PPP *offline* en estático y cinemático.
-Estimación de valores en tiempo *quasi-real* para estudios de la troposfera en meteorología.
-Permite otras aplicaciones como monitorización o control de calidad de los observables GNSS.

5.1.2. EPOS -RT

El sistema para posicionamiento de satélites y determinación orbital en tiempo real EPOS-RT, (*Earth satellite Positioning and Orbit determination System in Real-Time),* ha sido un software desarrollado principalmente por el Dr. Maorong Ge con contribuciones de otros co-autores del Centro de Investigación de Geociencias alemán (GFZ). En principio surgió como herramienta de análisis de redes GNSS, fundamentalmente para análisis de deformaciones en tiempo real y para proporcionar servicios para aplicaciones basadas en la técnica Precise Point Positioning, (Chen et al., 2009).
Entre las funciones desarrolladas que permite cabe citar:

-Cálculo en tiempo real y post-proceso.
-Posicionamiento estático y cinemático.
-Permite cálculos de soluciones con alta resolución temporal y espacial.
-Como en la mayoría de las herramientas soporta el entorno multi-constelación.
-Permite la estimación de la calidad del estado de los relojes de los satélites y otros productos.

5.1.3. BKG Ntrip Client

Entre todas las herramientas existentes cabe destacar la aplicación de software cliente BKG Ntrip Client (BNC) que desarrolla el BKG[2].

El BNC es un programa para realizar al mismo tiempo, la decodificación de las correcciones y la aplicación de los modelos para posicionamiento PPP en tiempo real. Ha sido desarrollado en el marco de la IAG[3] y el IGS *(International GNSS Service)*. Aunque es una herramienta para tiempo real, contiene algunas funciones para post-proceso PPP.

Una de sus características es la decodificación del formato RTCM-SSR, *(State Space Representation)*, que la hace válida como input de entrada para realizar análisis sobre la técnica. Algunos de los propósitos y características del BNC se muestran a continuación:

- Transmitir y recibir los flujos de datos GNSS en tiempo real a través del protocolo NTRIP[4], (Anexo I.3), y vía TCP[5] directamente desde una dirección IP.
- Generar ficheros de observación en el formato estándar RINEX, (*Receiver Independent Exchange Format)*, archivos de navegación, efemérides sincronizadas con las observaciones época a época y transmisión de las mismas a través de un puerto IP.
- Transmitir correcciones de reloj y órbita a través de un puerto IP o aplicarlas a observaciones L1/L2 para PPP, procedentes de un receptor GNSS, conectado por un puerto serie o bien conectado vía IP.

BNC soporta la decodificación de distintos formatos de transmisión de datos GNSS y tipos de mensajes como son el RTCM 2.3, RTCM 3, (Anexo I.2), y el formato RTCM- State Space Representation descrito en anteriores capítulos. El software es de código abierto y multiplataforma, también se puede descargar el código fuente en C++, en continuo desarrollo, y compilarlo por el usuario.

A continuación se muestra un ejemplo de conexión con el *caster servidor* de productos del IGS a través del software BNC:

[2] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*
[3] *International Association of Geodesy*
[4] *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*
[5] *Transmission Control Protocol*

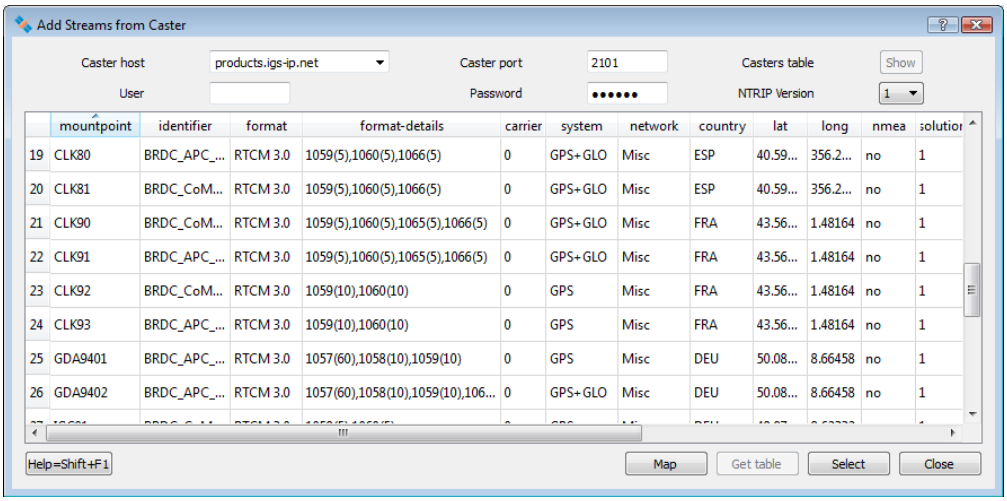


Figura 5.1 Conexión con el caster products.igs-ip.net del IGS mediante el BNC.

5.1.4. RTKLIB

El RTKLIB es un paquete de programas para el posicionamiento estándar, posicionamiento diferencial y PPP con GNSS (http://www.rtklib.com/). Ha sido desarrollado por el investigador Tomoji Takasu de la *Tokyo University of Marine Science and Technology*. Algunas de sus características se muestran a continuación:

- Compatible con los sistemas de posicionamiento globales tales como: GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou y SBAS.
- Permite varios modos de posicionamiento GNSS tanto en tiempo real como post-proceso: Simple, DGPS/DGNSS (*Differential GPS/ Differential GNSS*), cinemático, estático, en movimiento con la línea base, fijos, PPP-cinemático, PPP-Estático etc...
- Compatible con muchos formatos y protocolos para GNSS estándar: RINEX 2.x , RINEX 3.x , RTCM 2.x , RTCM 3.x, 3.2 , NTRIP 1.0 , NMEA 0183, (Anexo I.4), o RTCA, (Capítulo 3).
- Permite comunicación externa a través de puerto Serie, TCP/IP, NTRIP y FTP/HTTP.

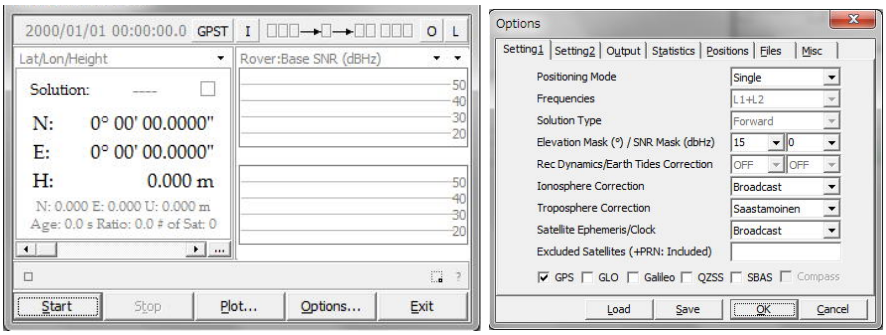


Figura 5.2 Programa RTKLIB

5.1.5. GINPOS

El software GINPOS, es un software para posicionamiento mediante la resolución de ambigüedades de forma instantánea, desarrollado por la universidad de Warmia-Mazury de Polonia.

La herramienta es propiedad de la universidad, y no está disponible para el público general. Entre sus principales características está la posibilidad de poder usarlo para la técnica PPP en tiempo real y en post-proceso. Además, como se describe en Paziewski et al., (2012), se caracteriza por utilizar nuevas técnicas de resolución de ambigüedades, lo que permite tener una convergencia más rápida en los resultados, y se encuentra orientado al caso de obtención de resultados *near real-time*, enfocado a la estimación del contenido de vapor de agua en la atmósfera a partir de observaciones GNSS.

5.1.6. PPP-Wizard

La herramienta PPP-Wizard, es una librería para la resolución de posicionamiento mediante la técnica PPP, desarrollada por el CNES[6] (http://www.ppp-wizard.net/).

En realidad PPP-Wizard, (*Precise Point Positioning With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator),* no es un software de por sí, sino que es una librería que ofrece un prototipo para resolver el posicionamiento PPP en tiempo real mediante la aplicación de un modelo experimental producido por el CNES que contenga los *bias* de fase que ayuden a recuperar la naturaleza entera de las ambigüedades. Para su utilización, el CNES ha compilado una versión de BNC incluyendo su librería PPP-Wizard.

Las ventajas que propone este algoritmo PPP frente a los estándar, es la mejora en precisión que supone trabajar con ambigüedades fijas en lugar de flotantes. Para ello utiliza la combinación *Melbourne-Wübbena* para fijar las ambigüedades en las dos frecuencias. Durante este proceso las correcciones de los relojes asociadas a la combinación *iono-free* son calculadas dando como resultado un numero entero de ambigüedades, lo cual permite acelerar el proceso de convergencia de la solución (Grinter et al., 2013), (Laurichesse, 2011).

5.1.7. GMV MAGIC-PPP

GMV es una empresa privada que ha desarrollado su propia herramienta para generar y distribuir productos de correcciones de órbitas y relojes de los satélites. En el producto distribuido por GMV los satélites GPS y GLONASS son procesados juntos para conseguir una solución consistente.
El rendimiento de la técnica se puede evaluar para varios escenarios en PPP tiempo real (cinemático, estático etc…), empleando el simulador MagicPPP en modo tiempo real. Aplicando esta técnica, la precisión horizontal se encuentra por debajo de 10 cm después de 30 minutos de tiempo de convergencia a partir de una posición desconocida. Cuando el usuario cliente se inicializa desde una posición conocida, MagicPPP puede ofrecer una precisión completa en pocos minutos.

5.1.8. GNSS-WARP

GNSS-WARP corresponde a las siglas GNSS-*Wroclaw Algorithms for Real-time Positioning*, que agrupan un conjunto de algoritmos desarrollados por la Universidad de Wroclaw (Polonia), (Bosy et al., 2014). Las funciones que engloba posibilitan el cálculo con PPP en tiempo real y post-proceso. Se deriva de librerías en Matlab, y adicionalmente se encuentra orientado al cálculo y estimación en tiempo real de los valores del ZTD, *(Zenith Tropospheric Delay),* de la troposfera.

A todas estas herramientas hay que añadir otros servicios comerciales que han surgido a lo largo de los últimos años como el caso de Trimble RTX, (www.trimble.com), o de Terrastar-D, (www.terrastar.net), que no disponen en estos momentos de cobertura totalmente global y precisa para tiempo real de orden centimétrico o que solo alcanzan precisión tras un largo tiempo de inicialización. Para el caso de post-proceso existen las ya conocidas herramientas científicas (Bernese, GYPSI, NAPEOS etc…) o aplicaciones on-line (GAPS, CSRS, AUTOGNSS..).

5.2. Programación de nuevas rutinas de cálculo en lenguaje *Python*.

A lo largo de los anteriores capítulos se ha puesto de manifiesto que resulta esencial analizar y optimizar ciertos aspectos de la técnica PPP si se quiere aplicar en tiempo real: la optimización de productos combinados, el aprovechamiento de todas las constelaciones posibles, la determinación de modelos en marcos regionales, la necesidad de evaluar la posibilidad de recuperación de ambigüedades enteras, las pérdidas de convergencia y el potencial real de la técnica mediante la evaluación continua de la disponibilidad de los modelos y su rendimiento. A esto hay que añadir que no todas las herramientas y receptores existentes nos ofrecían información directa sobre estos aspectos, no utilizaban todos los mensajes del nuevo estándar RTCM-SSR, o no posibilitaban la

[6] *Centre National d'Etudes Spatiales-FRANCE*

combinación de productos propia. Tan solo parte de las librerías del BNC o del PPP-Wizard resultaban aprovechables para el propósito de la investigación, por lo que se decidió programar una serie de librerías adicionales para realizar cálculos de manera más inmediata en tiempo real (cada pocos segundos), y *quasi-real* (frecuencia horaria o sub-horaria), y para arrojar resultados más fácilmente interpretables a la hora de realizar el análisis.

Una vez detectada la necesidad de programar y desarrollar software de cálculo para poder aplicar y analizar la técnica PPP en tiempo real, en los escenarios de análisis de la presente investigación se presentaba como paso previo la necesidad de elegir un lenguaje de programación. El objetivo de las librerías a desarrollar era que pudieran interactuar con distintas aplicaciones, para realizar análisis de resultados o para llevar a cabo otras funciones como se verá a continuación, como la generación de productos propios en tiempo *quasi-real*. Para realizar la programación de estas rutinas, existen gran cantidad de lenguajes de programación (C, C++, Java…), pero en el presente trabajo se ha utilizado el lenguaje de programación *Python* para desarrollar las aplicaciones que se describirán posteriormente.

El lenguaje *Python* fue creado por el programador Guido van Rossum a finales de los años 80, para el Centro para las Matemáticas e Informática de los Países Bajos que buscaba un lenguaje de programación para ser utilizado bajo el sistema operativo Amoeba. Este lenguaje fue concebido como un lenguaje de programación de alto nivel diseñado con una sintaxis muy limpia que permitiese obtener códigos fáciles de leer, multiplataforma y que soportara la orientación a objetos, programación imperativa e, incluso, programación funcional. En 1991, Van Rossum publicó la versión 0.9.0 del lenguaje. El sistema de programación ha ido evolucionando hasta ser un proyecto de código abierto bajo licencia GPL (*General Public License*), de hecho desde el año 2001, se creó la *Python Software Foundation* (PSF), (https://www.python.org/psf/), y se lanzó la versión *Python* 2.1 bajo la licencia Python Software Foundation License. Esta fundación sin ánimo de lucro, a día de hoy, es la que salvaguarda todo el código de *Python* y toda su documentación, fomenta la comunidad de desarrolladores y es la encargada de impulsar el desarrollo de este lenguaje. Desde entonces, *Python* ha seguido evolucionando hasta llegar a las versiones 3.3 y posteriores.

Los principales motivos de elegir *Python* como lenguaje de desarrollo son los siguientes:

- *Python* es un lenguaje libre, bajo licencia GPL (General Public License), esto quiere decir que cualquier persona puede descargar *Python* y el código de las librerías puede ser fácilmente interpretado por otro programador, y posteriormente, ampliar o re-utilizar las librerías de forma gratuita si las aplicaciones diseñadas en *Python* también se publican bajo licencia GPL.

- Es dinámico e interpretado, en lugar de compilado (Cano, 2014). En lenguajes compilados como Fortran o C, después de escribir el programa en el fichero fuente este se compila, dando lugar a un archivo binario que llamamos ejecutable. Aquí un intérprete lee las instrucciones contenidas en el fichero fuente secuencialmente cada vez que queremos ejecutar el programa.

- Es dinámico, en lugar de estático. No es necesario declarar explícitamente el tipo de las variables: es el intérprete quien hace automáticamente la asignación, al contrario de lo que ocurre en lenguajes como Fortran o C.

- Este lenguaje permite dividir un programa en módulos reutilizables desde otros programas, o también en *scripts* de tratamiento masivo de datos portables a plataformas distintas. También viene con una gran colección de módulos estándar que proporcionan E/S de ficheros, llamadas al sistema, interfaces gráficas de usuario (GUI), y sockets para conectar una aplicación a un protocolo de red para enviar y recibir mensajes y paquetes por TCP/IP, (Alegsa, 2014).

- *Python* es un lenguaje de programación que ha ido evolucionando y cada vez está más presente en prestigiosos softwares de fabricante hoy en día y plataformas para software libre. Por ejemplo: los *"Smartphone"* permiten instalar *Python* y desarrollar aplicaciones funcionales para estos, todas las distribuciones de Linux llevan instalada una versión de *Python* por defecto o una interface que proporciona el entorno para el desarrollador, así mismo es un lenguaje multi-plataforma puesto que las mismas librerías pueden ser ejecutadas en LINUX o en distintas versiones de WINDOWS, (XP,7,8), indistintamente. Otros softwares de fabricantes, por ejemplo los desarrollados por ESRI, incorporan *Python* en sus herramientas ARCGIS, para el desarrollo de aplicaciones y scripts.

Para desarrollar las aplicaciones que se verán a continuación, se ha utilizado la versión de *Python* 3.3.2 que se puede obtener de la página web de *Python, (* http://www.*Python*.org/), que incorpora en detalle, información y documentación de las librerías y bibliotecas estándar en que se basa.

5.2.1. Llamada a librerías de cálculo científico

Las aplicaciones que se han desarrollado utilizan además de los paquetes que vienen con la instalación de *Python,* una serie de librerías adicionales programadas en este mismo lenguaje, necesarias para el cálculo científico, la manipulación y creación de gráficos así como la gestión de *arrays* (vectores y matrices), creación de interfaces graficas de usuario (GUI), o gestión de escalas de tiempo. Seguidamente se muestra un esquema donde se muestra todas las librerías descargadas e instaladas además de *Python* (http://www.lfd.uci.edu/~gohlke/*Python*libs/) :

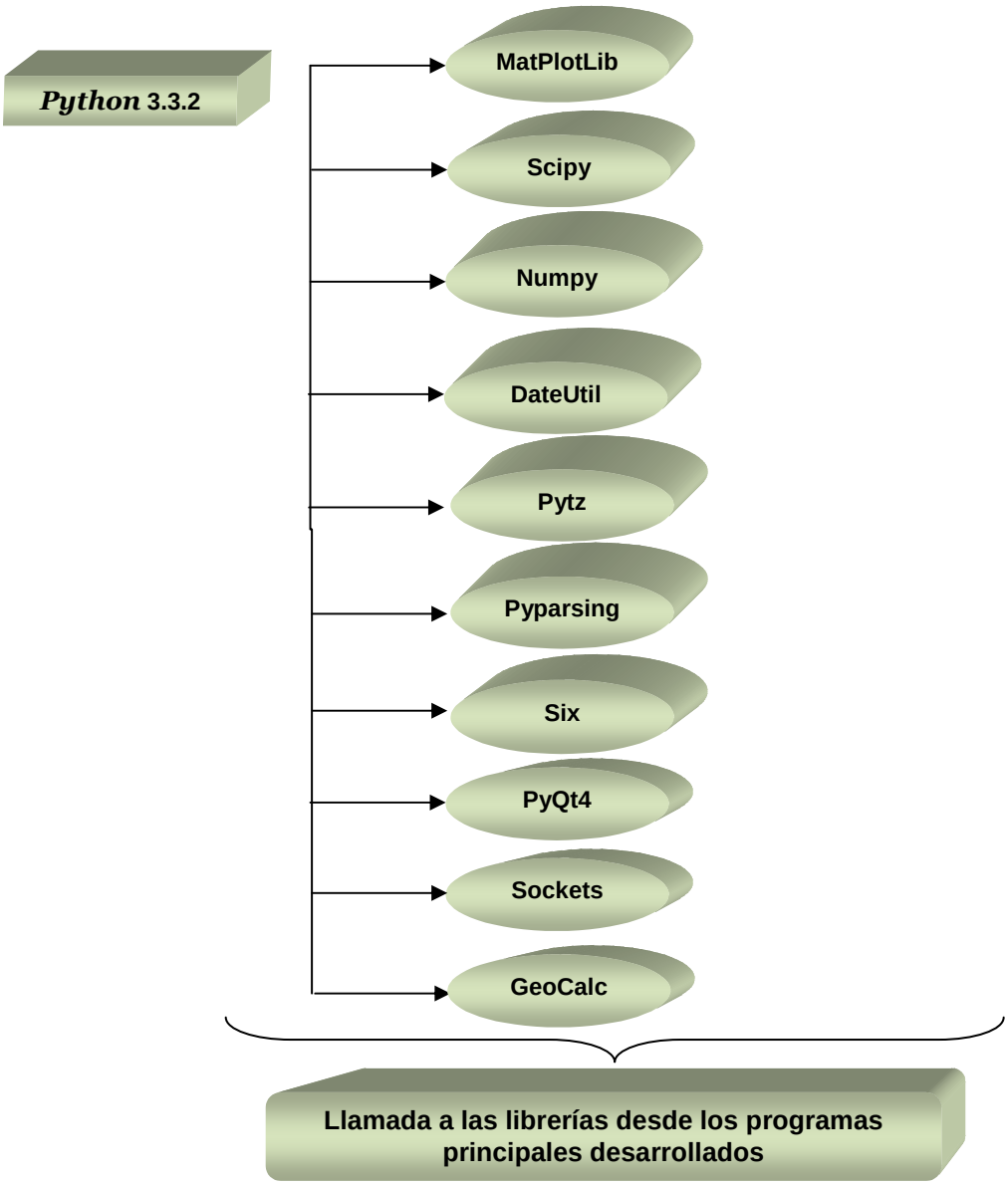


Figura 5.3 Librerías utilizadas de *Python*

En concreto, Matplotlib es un módulo orientado a cálculo científico para la representación de gráficos planos en dos dimensiones, (Hunter, 2007). Si bien algunas librerías, como MatplotLib necesitan de otras para su correcto funcionamiento, otras se pueden instalar y usar de forma independiente:

- Scipy: Es un conjunto de módulos para cálculo numérico y científico, optimización, álgebra lineal, integración, interpolación, funciones especiales, procesamiento de señales y de imagen.

- Numpy: Librería que se emplea para computación numérica. Permite disponer de un nuevo contenedor objeto de variables o constantes que es un *array* multidimensional, es decir vectores y matrices, así como realizar operaciones sobre ellos.

- Dateutil: Extensión de la librería estándar de *Python Datetime*, para gestión de fechas y poder relacionar escalas de tiempo.

- Pytz: *Python Time Zone* library, que proporciona definiciones para los distintos husos horarios.

- Pyparsing: Conjunto de clases creadas para *Python* para facilitar la construcción del lenguaje.

- Six: Librería que gestiona la compatibilidad entre *Python* 2 y *Python* 3.

- Pyqt4: Librería gráfica para *Python* para desarrollo de la interface grafica, que además es multi-plataforma e incluso sirve para teléfonos móviles.

- Sockets: Librería estándar de *Python* que permite crear instancias o conexiones para establecer comunicaciones en tiempo real entre un cliente y un servidor a través de un puerto TCP e intercambiar paquetes de datos en forma de *stream*. Por lo tanto, esta librería es muy útil para gestionar la salida en tiempo real de la información del receptor GNSS, los productos recibidos en tiempo real o también la información de salida para PPP que generan otros softwares como las librerías C++ del BNC[7], que también pueden comunicarse mediante sockets.

Por último, la librería GeoCalc es una librería desarrollada durante la presente investigación, en la que se han implementado ciertas aplicaciones para posteriormente diseñar, por ejemplo, una rutina que gestione los datos en Tiempo Real. Con todas estas librerías, se ha confeccionado una extensión del BNC que gestiona en tiempo real las sentencias para obtener el resultado del posicionamiento PPP en tiempo real, así como el análisis directo, permitiendo realizar una serie de cálculos que de otra forma serian una tarea laboriosa debido al volumen de datos que se pueden llegar a generar con observaciones registradas a alto ratio. Las rutinas que se han programado se desglosan a continuación, y es conveniente que estén en las carpetas de librerías de instalación de *Python* (por ejemplo: C:*Python*33\Lib\site-packages\GeoCalc).

5.2.2. Programación de módulos avanzados de cálculo

5.2.2.1. Librería GeoCalc.

Seguidamente se detallará el contenido de la librería GeoCalc, que cuenta con los siguientes módulos:

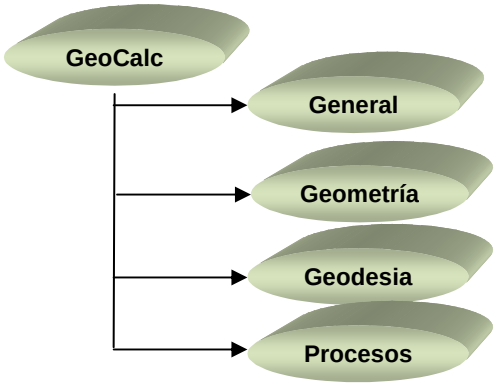


Figura 5.4: Módulos generados

[7] *BKG NTRIP Client*

Esta librería ha sido creada dentro de esta línea de investigación para contener paquetes, módulos básicos u otras librerías, clases y funciones, a los cuales hacer llamadas desde otras funciones, además de organizar todo el código creado de una forma lógica para su posterior utilización.

-Paquete General

Operacionesarchivos.py

Mueve, copia, extrae la ruta de un archivo o parte del nombre para generar otros ficheros de resultados derivados.

Conversionesangulares.py

Módulo que se encarga de transformar ángulos entre varios sistemas angulares.

-Paquete Geometría

El siguiente paquete tiene como objeto añadir diferentes módulos que se encargan de organizar las diferentes geometrías en clases o tipos de elementos que se han necesitado como base para otros módulos o apelaciones desarrolladas (puntos, ángulos ....).

Punto2D.py y Punto3D.py

Módulo que define a la clase que se encarga de almacenar la información espacial de un punto de manera bidimensional y tridimensional respectivamente.

PuntoGeodesico.py y PuntoUTM.py

PuntoGeodesico.py es el módulo que contiene la clase que se encarga de almacenar la información de un punto geodésico (latitud longitud y altura elipsoidal), y PuntoUTM.py es el que contiene a la clase que se encarga de almacenar las coordenadas X e Y de un punto en la proyección U.T.M. Adicionalmente se puede almacenar más información como la convergencia de meridianos del punto y el factor de escala.

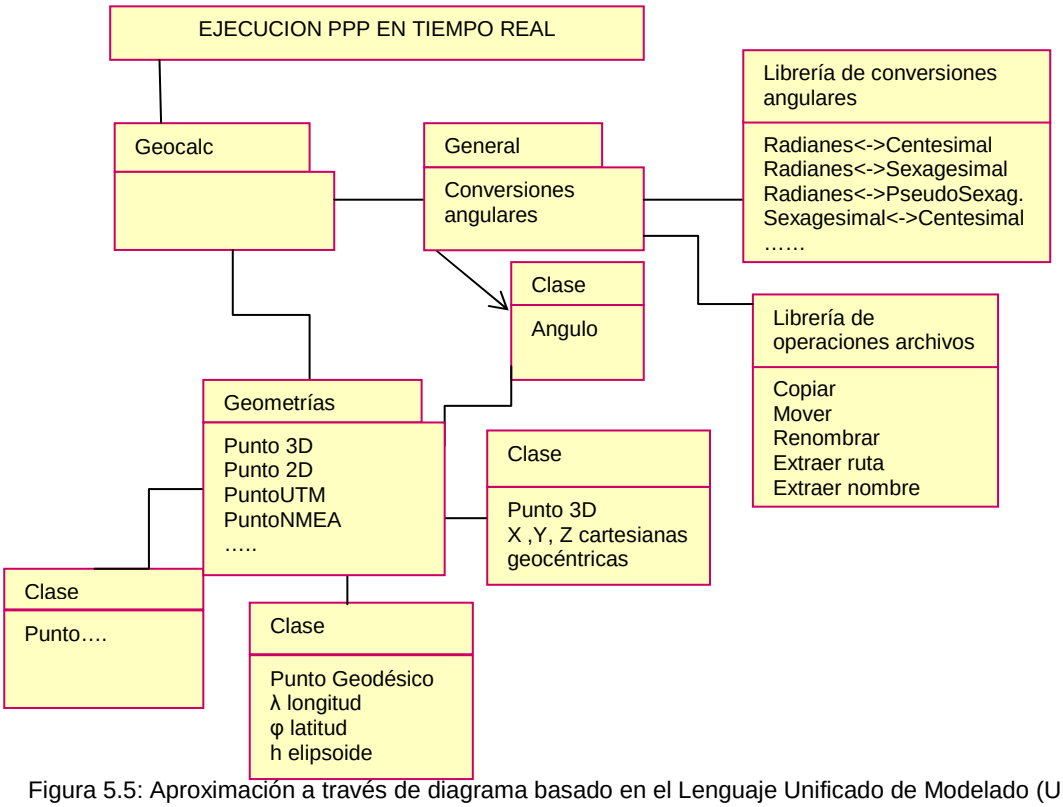


Figura 5.5: Aproximación a través de diagrama basado en el Lenguaje Unificado de Modelado (UML) del esquema de librerías

-Paquete Geodesia.

En este paquete se albergan diferentes aplicaciones con el objeto de realizar diferentes cálculos geodésicos.

ConversionDeCoordenadas_Punto.py

Estas librerías programadas en *Python* contienen la función que se encarga de realizar diferentes conversiones entre sistemas de coordenadas tales como conversión de coordenadas geodésicas a cartesianas geocéntricas, conversión de coordenadas cartesianas geocéntricas a geodésicas, conversión de coordenadas geodésicas a UTM y viceversa.

ParametrosElipsoides.py

El siguiente módulo contiene la clase que se encarga de cargar información de un elipsoide elegido y asociarle los los parámetros del mismo, para ello este módulo consta de un archivo de texto denominado "Elipsoides" que contiene la información básica de varios elipsoides.

NMEA.py

Realiza la función de leer posiciones en formato NMEA[8], (Anexo I.4), con las sentencias estándar resultado del posicionamiento en tiempo real y devolver la información del fichero en forma de coordenadas geodésicas. El módulo programado soporta registros a alto-ratio (1 Hz) y puede leer también ficheros con las posiciones almacenadas que abarquen un periodo de hasta dos meses.
Una sentencia NMEA estándar con estos mensajes tiene la siguiente estructura:

```
$GPRMC,081412,A,5047.885,N,00421.515,E,,,070214,,*16
$GPGGA,081412,5047.8845085,N,00421.5145249,E,1,14,2.0,159.030,M,0.0,M,,*72
$GPRMC,081413,A,5047.884,N,00421.514,E,,,070214,,*17
$GPGGA,081413,5047.8844748,N,00421.5142679,E,1,14,2.0,158.783,M,0.0,M,,*7A
```

Y se va repitiendo según un intervalo de tiempo establecido. La sentencia $GPGGA contiene las coordenadas geodésicas longitud y latitud de un punto en los valores situados a partir de la tercera y quinta coma, pero estos valores no están en un formato común para su utilización inmediata sino que antes se deben transformar a un formato decimal. Este paso lo realiza el módulo al introducirle una sentencia NMEA o leerla en un fichero, además de extraer otra información contenida en el fichero como:

- Hora de la observación y segundos de la semana GPS.
- Numero de satélites.

etc…

TransformacionesITRF.py

Esta rutina programada en *Python* se encarga de realizar la transformación entre marcos de referencia. Este módulo consta de una librería adicional denominada ParámetrosITRF donde deben constar los parámetros para la transformación deseada. Los valores de estos parámetros son los publicados en http://itrf.ign.fr/trans_para.php, siendo posible ampliar esta conversión al marco ITRF más reciente conforme se vayan materializando nuevos marcos (por ejemplo ITRF2013…), añadiendo la definición a la librería denominada ParámetrosITRF.
Para realizar el cambio entre diferentes marcos de referencia se han seguido las recomendaciones que se indican en Boucher y Altamimi, (2011), (http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf), donde a partir de las fórmulas, se realiza una transformación de Helmert de 7 parámetros (3 translaciones, 3 rotaciones y un factor de escala).

La diferencia de la transformación entre diferentes marcos de referencia, con otras transformaciones, es que en esta se deben propagar los parámetros de la transformación a la época en la que hayamos

[8] *National Marine Electronics Association*

realizado la medición. Para ello los parámetros de la transformación vienen acompañados por unos valores o ratios de variación.

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -Rz & Ry \\ Rz & D & -Rx \\ -Ry & Rx & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

http://itrf.ign.fr/trans_para.php

Donde los 7 parámetros de la transformación deben ser actualizados, desde la época en la que se fijaron, hasta la época de la observación de las coordenadas a transformar.
La actualización para cada parámetro se realiza empleando la siguiente fórmula indistintamente del parámetro.

$$P_t = P(t_o) + rP\ (t - t_o)$$

Donde:

- P_t, es el valor del parámetro propagado a la época de observación.
- P, es el valor del parámetro.
- rP, es la variación del parámetro por año.
- t, es la época actual de las coordenadas.
- t_o, es la época en la que se establecieron los parámetros P.

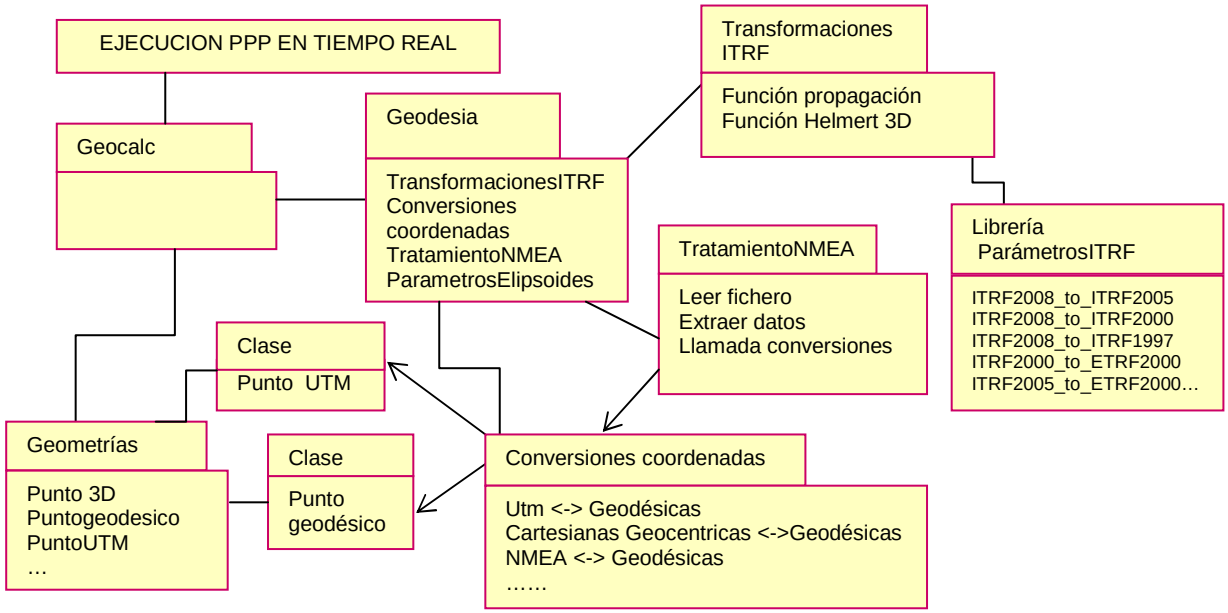


Figura 5.6: Diagrama UML con la implementación propia en *Python* del paquete Geodesia

-Paquete Procesos.

El siguiente paquete contiene diferentes procesos que se han generado a partir de los diferentes módulos de la librería GeoCalc.

Procesos.py

El siguiente conjunto de funciones se encarga de realizar diferentes cálculos a partir de un fichero con la solución cinemática PPP en tiempo real. Los cálculos que realiza el proceso consisten en:

- Carga de los registros para PPP en tiempo real y tratamiento.
- Transformación de marco de referencia.
- Cálculo de coordenadas UTM.
- Generación de gráficos.
- Análisis de resultados
- Generación de estadísticos.

A partir de la librería es posible ejecutar una rutina externa que la llame, (ejecutable desde cualquier directorio), con la que realizar todos los análisis en tiempo real.

Rutina de cálculo sobre datos recibidos en tiempo real

Las rutinas programadas descritas se han planteado también como una extensión del software BKG NTRIP Cliente (BNC). Es decir, permiten ser ejecutadas junto con otras herramientas y ofrecen diversas posibilidades. Junto con la aplicación BNC se pueden usar para realizar cálculos sobre "*streams*" de datos recibidos a través de un puerto asignado en el BNC en tiempo real con la librería *sockets*. También puede realizar los cálculos sobre ficheros que hayan almacenado las posiciones en tiempo real, o sobre los ficheros que se generan sobre el post-procesado en BNC. El software programado nos va a permitir visualizar en tiempo real resultados cinemáticos con la técnica PPP y el *offset* esperado con respecto a la posición teórica, entre otras utilidades, como el rastreo de satélites e información de parámetros estadísticos de la observación:

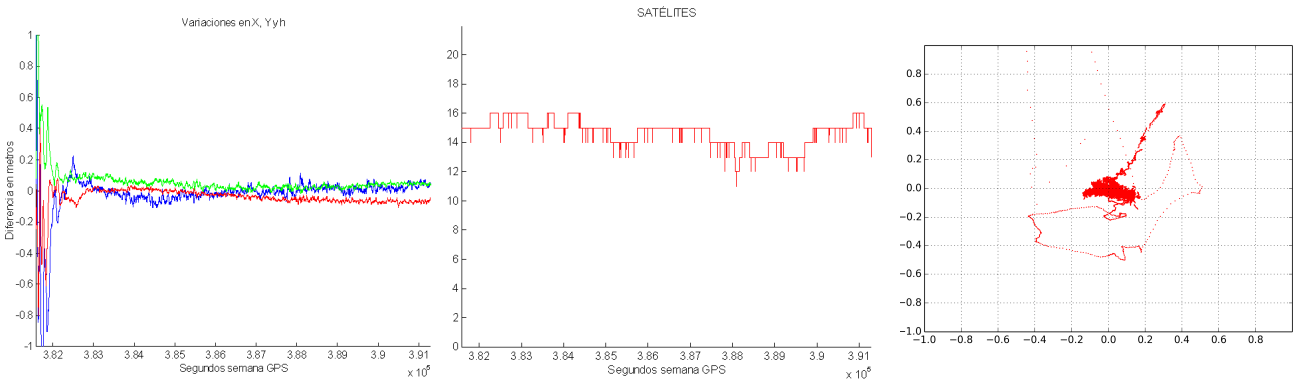


Figura 5.7: Gráficos de salida de las librerías

La rutina puede leer paquetes IP en tiempo real a través de *sockets*, leyendo época a época la información para el posicionamiento PPP que le envía el software BNC Ntrip Cliente. Se puede ejecutar en cualquier directorio que debe presentar la siguiente configuración previa:

- Una carpeta denominada DatosNMEA, en la que se almacenarán los ficheros NMEA obtenidos a través de "streams"
- Un fichero "config.txt", donde se almacena la configuración para el cálculo que se esté realizando: Coordenadas del punto, producto utilizado de correcciones, modelo de antena y receptor etc…
- El módulo y librerías de *Python* implementados en la investigación, que son los que se encargarán de procesar los datos a partir de la configuración establecida.

Del mismo modo, desde la rutina principal programada de *Python*, habrá una sentencia desde donde se invoca a la rutina programada Procesos.py del tipo:

```
from GeoCalc.Procesos import Procesos as pro
```

A la hora de ejecutar la aplicación, el fichero de configuración es uno de los elementos más importantes, ya que dependiendo de la configuración establecida la aplicación tratará los datos de

forma diferente. El fichero config.txt puede estar en la misma carpeta que la rutina principal programada de *Python*. En él podemos elegir entre varios tipos de transformación de marco, según el marco ITRF en que estén calculados los productos y el marco final (ITRF o ETRF), en que queramos los resultados:

> -Con cambio de marco: Esta opción se puede personalizar, lo lógico es que aplique una transformación desde el marco ITRF vigente en que se encuentran los modelos y productos utilizados para el cálculo (ITRF08 por ejemplo) al marco ETRF00.
> -Sin cambio de marco: Si lee en config.txt la opción SinCambioDeMarco, no aplicará la transformación, y los resultados finales se encontrarán en el marco de los productos IGS o centros de análisis.

Si en lugar de trabajar con el *stream* de datos se trabaja con ficheros de posiciones, en primer lugar, el directorio de trabajo debe de tener la configuración mínima descrita anteriormente. En la carpeta DatosNMEA se puede guardar los ficheros que se obtengan en la aplicación BNC. Tras la lectura del fichero, la aplicación realizará dos cálculos por cada ejecución. El primer cálculo lo realizará con la totalidad de los datos del fichero y el segundo cálculo lo efectuará sobre la franja horaria existente entre la última vez que se ejecutó, y el momento de ejecución actual.

Cada vez que se ejecuta, se generan dos nuevos directorios Resultados y tmp. El directorio "Resultados" contiene los resultados que se van generando en cada ejecución y el directorio tmp contiene una copia del fichero NMEA de la carpeta DatosNMEA para poder realizar la ejecución del fichero únicamente de la última franja horaria.

Con el fin de disminuir el tiempo de cálculo sobre los resultados que se generan en tiempo real, (por ejemplo podemos tener datos a 1 Hz), las sucesivas ejecuciones del programa se hacen sobre los nuevos datos registrados por un rover GNSS y no sobre todo el fichero de salida del BNC. Estos resultados, totales o parciales, se almacenan por directorios con un subíndice. Por ejemplo, el directorio _0 contiene la ejecución del fichero con todos los datos, y el fichero _1 la ejecución de la última franja horaria. Si la aplicación se va ejecutando con una cierta periodicidad, (a través de una tarea programada de Windows), se irán generando más directorios con sufijos correlativos _2, _3... Estos directorios contendrán distintas franjas horarias y en el directorio _0 se irán sobrescribiendo los archivos con el cálculo sobre la totalidad de los datos.

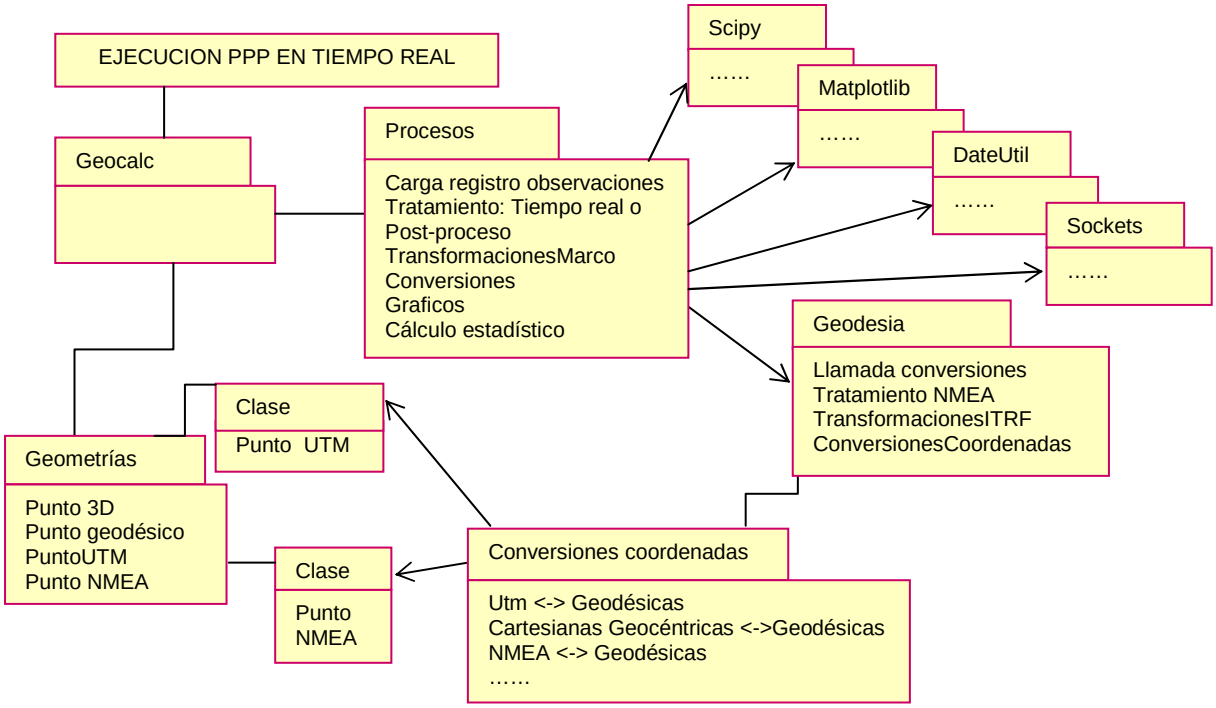


Figura 5.8: Representación por UML de las llamadas realizadas desde el paquete procesos

Python para el cálculo automatizado

Para el cálculo automatizado con una frecuencia determinada para cada análisis, el procedimiento general es llamar a la rutina principal programada de *Python* *.py desde un fichero *.bat, ese fichero puede estar en la misma carpeta que el programa de *Python*. El fichero .bat puede ser llamado desde el programador de tareas de Windows, de manera que se ejecuta de manera automatizada.

Otro ejemplo de aplicación de esta rutina, se muestra a continuación. En este ejemplo se ha automatizado el seguimiento de varias estaciones, entre ellas la estación de CONZ en Chile, creando una interface web para su visualización. La puesta a punto de esta *interface* para su posible uso en aplicaciones para tiempo real será desarrollada en posteriores capítulos:

Figura 5.9: Página inicial interface web

De manera que monitorizando la estación se podría utilizar el cálculo cinemático con PPP en tiempo real, como posible herramienta de visualización rápida de desplazamientos o sacudidas producidas por los eventos sísmicos y sus réplicas:

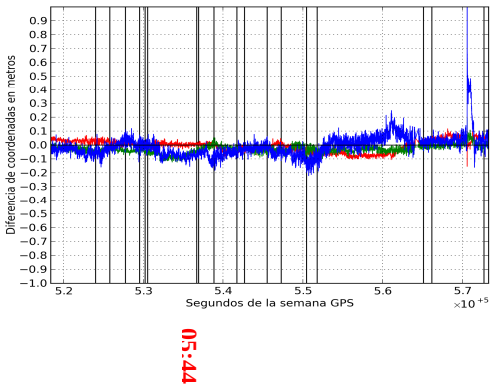


Figura 5.10: Cinemático PPP en tiempo real Estación Conz (Chile). Doy 95/2014.

Rutinas de *Python* para gestión en diferido de datos almacenados en tiempo real.

En el caso en que el cálculo no se haga en tiempo real, se puede realizar en diferido si previamente se han almacenado las posiciones registradas en tiempo real, o sobre los ficheros que se generan tras realizar un post-proceso cinemático. Los resultados también se proporcionarán época a época en modo cinemático.

Para ello, se selecciona el modo de cálculo "Diferido" en el fichero de configuración. En este modo de cálculo, por cada fichero que exista en el directorio "DatosNMEA" sólo se genera un único conjunto de resultados y no resultados por franjas como en el caso de ejecutarse en tiempo real.

5.2.2.2. Rutinas individuales

Fusión de relojes para cálculo diferido y post-procesado posterior.

Uno de los objetivos de la presente investigación, era realizar una aportación al cálculo con la técnica de posicionamiento PPP en tiempo real, y además, evaluar el rendimiento y su potencial mejora mediante alternativas a la generación de los productos y modelos de correcciones actuales. Tal y como se comentará en apartados posteriores, la generación de productos combinados es un aspecto crítico.

Por ello, también se han generado una serie de rutinas para combinación de productos de reloj y órbitas procedentes de distintos centros de análisis almacenados tras su recepción en *streaming*. La unión de estos ficheros no se puede realizar de forma directa, es decir, uniendo los ficheros directamente uno detrás del otro, por lo que la combinación se debe realizar época a época para cada corrección y para cada satélite. Para su implementación se han planteado varias estrategias de las cuales se determinará cuál es la más óptima en términos de ejecución y estabilidad de la solución:

-Unión época a época de los modelos de correcciones procedentes de centros de análisis individuales que contengan correcciones a las componentes orbitales de cada satélite GPS/GLONASS, correcciones a las velocidades, coeficientes del polinomio de segundo orden con la corrección de reloj y *biases* de los observables. De esta manera el producto final contiene todos los modelos.

-Combinación época a época de todos los modelos de correcciones procedentes de centros de análisis individuales GPS y GLONASS, que contienen los anteriores valores pero promediando cada componente de error.

-Por último, combinación época a época de todos los modelos de correcciones procedentes de centros de análisis individuales GPS y GLONASS, pero desechando el producto cuando para una determinada época y un determinado satélite, se presente un *offset* con respecto al promedio de los productos fuera de una tolerancia establecida o una desviación superior al valor esperado. Es decir se introduce un mecanismo de filtrado simultáneamente con la combinación.

Otras utilidades programadas

Existen, adicionalmente una serie de rutinas individuales programadas que se pueden ejecutar por separado del paquete procesos, sobre distintos juegos de coordenadas, estas son:

- conversionesITRF.py: Realiza el cambio de marco para una serie de datos. Si es invocada ella sola se debe editar la fecha, si es invocada desde otros procesos entonces ya se le pasa la fecha correcta automáticamente.

- plot.py: Elabora la salida gráfica a partir de ficheros de los *offsets* en x,y,h obtenidos desde cualquier procesamiento efectuado por separado o en tiempo real, de manera que puede representar las desviaciones en las posiciones cinemáticas en X,Y,h época a época, el sesgo en XY con respecto al valor ajustado y la discrepancia en h.

- Plot_satélites.py: Elabora la salida gráfica de la constelación rastreada durante la sesión en modo cinemático en tiempo real época a época.

- est.py: Calcula estadísticos, tiempo de inicialización de una determinada sesión o tiempo en el que la solución PPP en tiempo real se encuentra en un rango válido. En el mismo código se le pasa la variable con el criterio para establecer los umbrales de convergencia de la solución o el número de épocas a contabilizar para establecer que la solución está dentro del rango requerido etc...

- convergencia.py: Determina y genera la salida gráfica de la evolución de la solución PPP en tiempo real para una sesión, marcando los instantes en que la solución pierde la convergencia y calculando el tiempo en que la solución vuelve a converger dentro de un determinado umbral elegido por el usuario. Es posible personalizar en ella los criterios de convergencia de la solución fácilmente, con el fin de realizar un análisis detallado del comportamiento de la solución PPP en tiempo real.

- Control de productos de relojes y órbitas: En este caso se han elaborado dos conjuntos de rutinas. El primer grupo está orientado para trabajar con los productos de correcciones de órbitas y osciladores que se emiten en tiempo real, posibilitando realizar comparativas modelo a modelo por satélite, por día o para un conjunto de días. El segundo conjunto de rutinas está dedicado a analizar productos generados para post-procesado de datos, y se ha pensado para analizar el comportamiento de los productos multi-constelación.

5.3. Diagrama de la unidad de control

A continuación se plasma en diversos diagramas como resultaría el proceso de trabajo con las librerías existentes y las programadas para PPP en tiempo real. Se ilustra en la figura la entrada de datos que alimentaría al sistema trabajando en tiempo real, las operaciones del proceso y los datos de salida:

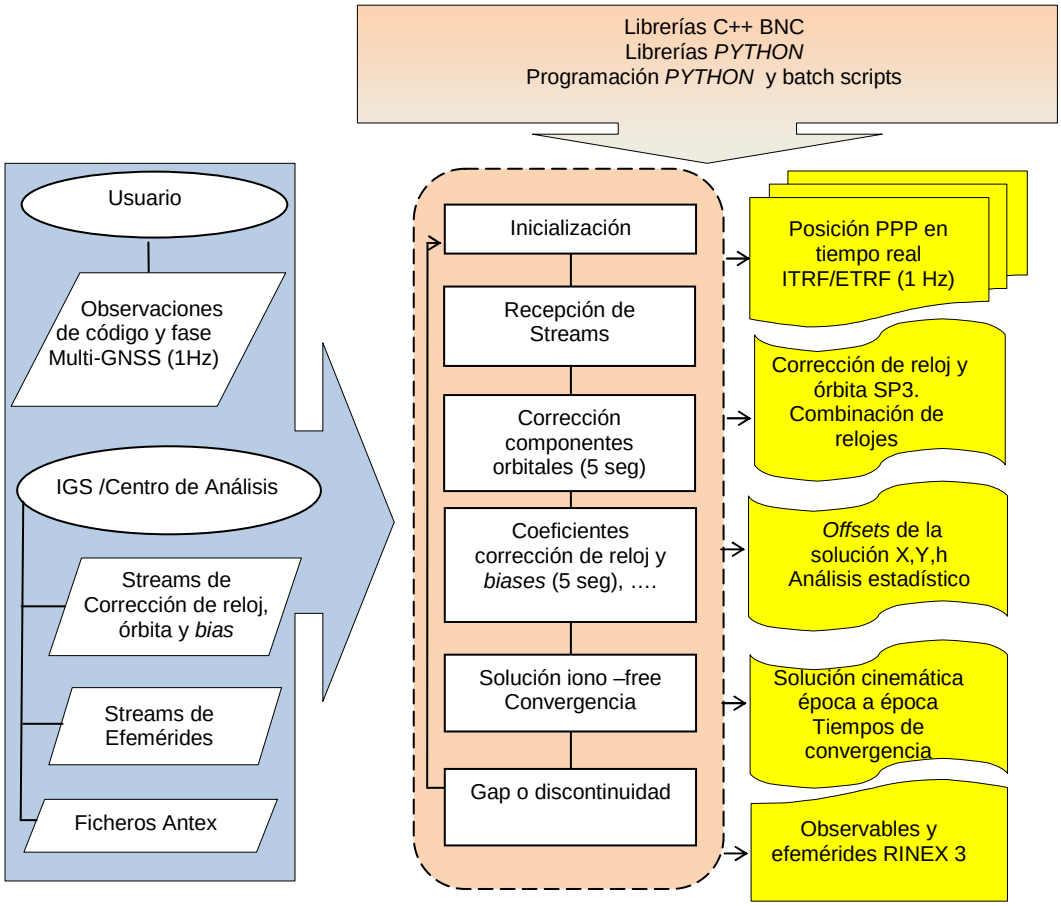


Figura 5.11: Diagrama de entrada de datos, operaciones y procesos de salida implementados para posicionamiento PPP en tiempo real

La ejecución puede llevarse a cabo en múltiples plataformas simultáneamente que a su vez, pueden volcar los resultados en un solo servidor vía protocolo FTP, por ejemplo. De esta manera pueden ejecutarse varias instancias del proceso simultáneas y realizar comparativas de distintas soluciones durante la misma ventana de tiempo, (Figura 5.12). También es posible efectuar el posicionamiento PPP en tiempo real con varios productos distintos pero sobre el mismo receptor. Si este vuelca el *streaming* sobre un *caster* NTRIP, (Anexo I.3), es posible conectar al equipo vía IP desde dos sistemas de monitorización y comprobar el rendimiento de los diferentes productos sobre idénticos observables.

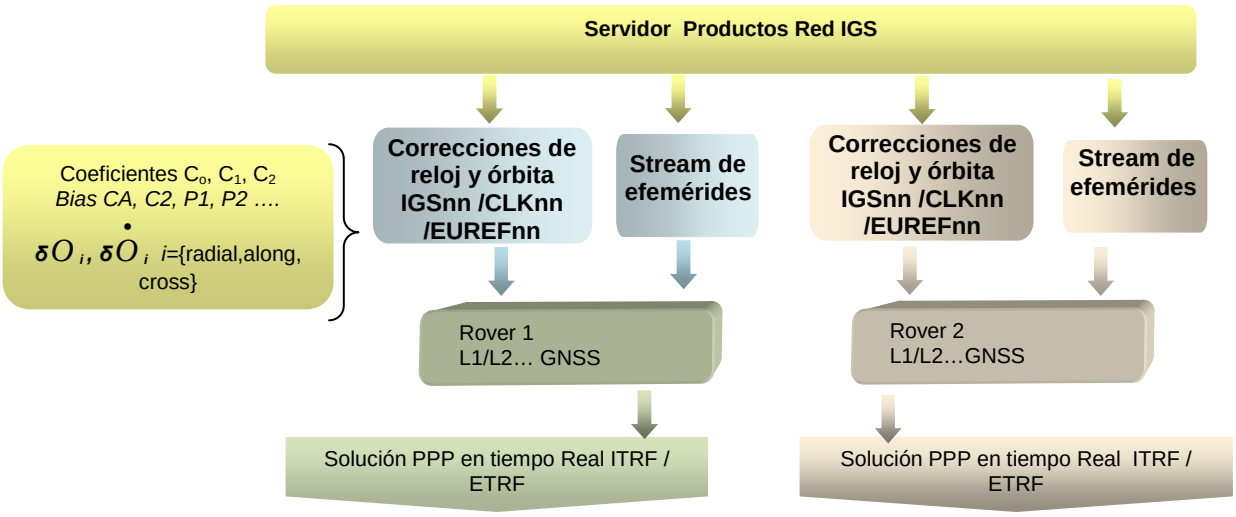


Figura 5.12: Esquema de Unidades de control/monitorización para PPP en tiempo real.

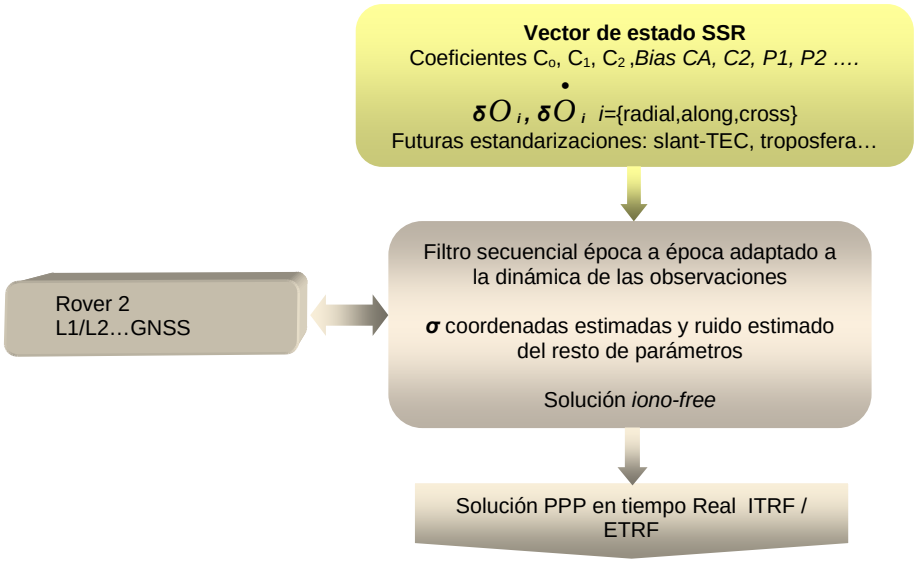


Figura 5.13: Diagrama de la solución PPP en tiempo real.

Las librerías utilizadas permiten ejecutar los algoritmos para PPP en tiempo real mediante un filtro secuencial. En este filtro se puede especificar un valor σ de entrada para las coordenadas estimadas del receptor así como para el resto de parámetros del vector de estado. Tiene la ventaja de que se ajusta a la dinámica del receptor, permitiendo especificar valores de ruido para los elementos a estimar, así como actualizarlos en el tiempo. Adicionalmente, no requiere gran capacidad de cálculo, sino que se puede ejecutar por pasos coincidentes con cada época de observación.

Capítulo 6:
Análisis del escenario multi-constelación existente para PPP.

Para las constelaciones en desarrollo como GALILEO o QZSS[1], los mensajes para tiempo real en el formato RTCM-SSR, (*State Space Representation*), son de reciente definición. Sin embargo, no existe distribución en *streaming* de modelos que contengan correcciones del vector de estado de estos satélites durante el periodo de la presente investigación. Si que existen efemérides del tipo *broadcast* de GALILEO, y productos para post-procesado multi-constelación. Se ha optado por este motivo, por evaluar el estado de la técnica de generación de estos últimos para post-proceso y el grado de acuerdo entre ellos. Posteriormente, en este capítulo se analizará la repercusión de los satélites GALILEO en la solución en tiempo real, así como la monitorización de modelos de la red de rastreo CONGO[2]. El capítulo, también presenta el impacto del uso de GLONASS en la solución PPP en tiempo real.

De entre todos los centros de análisis que hay a nivel mundial, existen varios que contribuyen al análisis continuo y generación de productos de las redes MGEX[3] y CONGO, (Capítulo 1), destacando la ESA[4], el CODE[5], el GFZ[6], el CNES[7] , el TUM[8] , o la Universidad de Wuhan entre otros.

6.1. Estado del arte en la estimación de productos multi-constelación para post-procesamiento

Entre los logros a destacar por parte de los centros de análisis que trabajan en los programas de seguimiento multi-constelación, cabe citar la generación de los modelos experimentales de órbitas y relojes para los satélites existentes de la constelación GALILEO y QZSS, gracias al esfuerzo conjunto y continuado de diversos grupos de investigación (Loyer et al., 2012, Uhlemann et al., 2012). Estos productos, junto con las estimaciones de parámetros de orientación de la tierra, o modelos de *bias*, están disponibles para su descarga vía ftp:

Institución	Modelos/ Productos y descripción		Constelaciones
CNES/CLS	grmyyyyd.sp3	Órbitas GNSS y estados de reloj (15 min)	GALILEO
CODE	codyyyyd.sp3	Órbitas GNSS y estados de reloj (15 min)	GPS+GLO+GIO/GAL

[1] *Quasi Zenith Satellite System*
[2] *Cooperative Network for Giove Observation*
[3] *Multi-GNSS Experiment*
[4] *European Spatial Agency*
[5] *Center for Orbit Determination in Europe*
[6] *GeoForschungsZentrum -Germany*
[7] *Centre National d'Etudes Spatiales-France*
[8] *Technische Universität München-Germany*

	comyyyy7.erp	Parámetros de orientación de la tierra	
ESA	esmyyyy.sp3	Órbitas GNSS (15 min)	GPS+GALILEO+Beidou
	esmyyyy.clk	Estados de reloj (5 min)	
GFZ	gfmyyyyd.sp3	Órbitas GNSS y estados de reloj (15 min)	GPS+GALILEO
	gfmyyyyd.clk	Estados de reloj (5 min)	
	gfmyyyyd.bia	*Bias* entre sistemas	
	gfmyyyy7.erp	Parámetros de orientación de la tierra	
JAXA-Japón	qzfyyyyd.sp3	Órbitas GNSS y estados de reloj (5 min)	GPS+QZSS
TUM	tumyyyyd.sp3	Órbitas GNSS y estados de reloj (5 min)	GALILEO+QZSS
Wuhan Univ.	Wumyyyyd.sp3 Wumyyyyd.clk	Órbitas GNSS y estados de reloj (15 min) Estados de reloj (15 min)	Beidou Satellite System

Tabla 6.1: Productos multi-constelación. (http://igs.org/mgex/products Noviembre 2014)

A su vez, existe también una extensión de los productos generados, a partir del *streaming* de datos en tiempo real del servidor *caster* del proyecto MGEX, que contiene la combinación de las efemérides GNSS, obtenidas del mensaje de navegación, para las distintas constelaciones.

Centro	**Productos de efemérides**	**Constelaciones**	**Emisión**
BKG	Fusión en brdcdddn.yyp	GPS+GLO+GALILEO	Streaming
TUM/DLR	Fusión en brdmdddn.yyp	GPS+GLO+GALILEO+Beidou+QZSS+SBAS	Streaming

Tabla 6.2: Efemérides *broadcast* ASCII. (http://mgex.igs-ip.net , http://igs.org/mgex . Diciembre 2013)

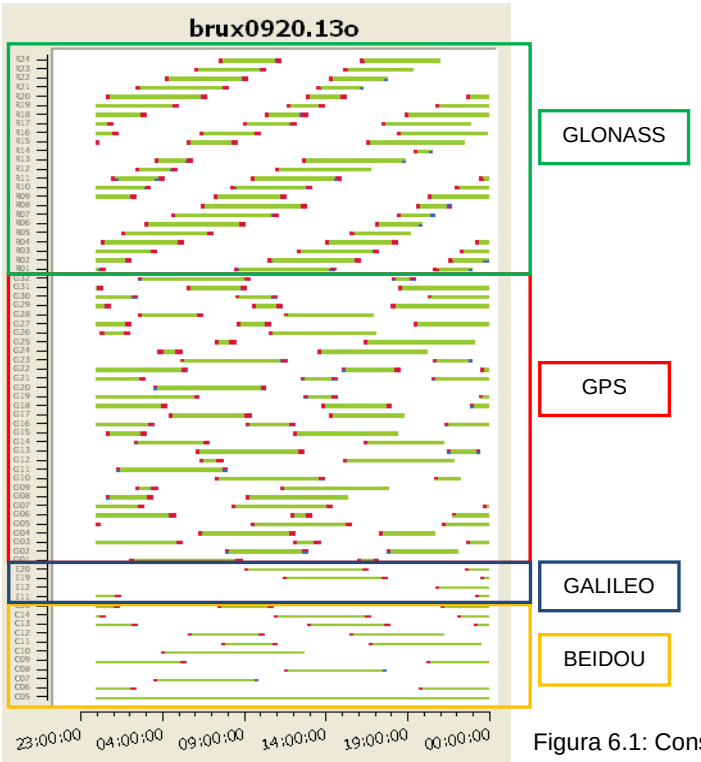


Figura 6.1: Constelaciones rastreadas, (2013)

Estas iniciativas permiten analizar el grado de acuerdo entre los distintos centros de análisis, a la hora de generar los productos, con el fin de optimizar las estrategias en su generación y detectar posibles inconsistencias o *outliers* para los nuevos satélites que se van poniendo en órbita.

Por lo tanto, las bases para la evaluación de la consistencia existente en las generaciones experimentales de productos multi-constelación, que incluyen las misiones actuales y FOC, *(Full Operational Capability),* de GALILEO, se presentan en el siguiente sub-apartado.

6.1.1. Análisis de modelos actuales para la constelación GALILEO

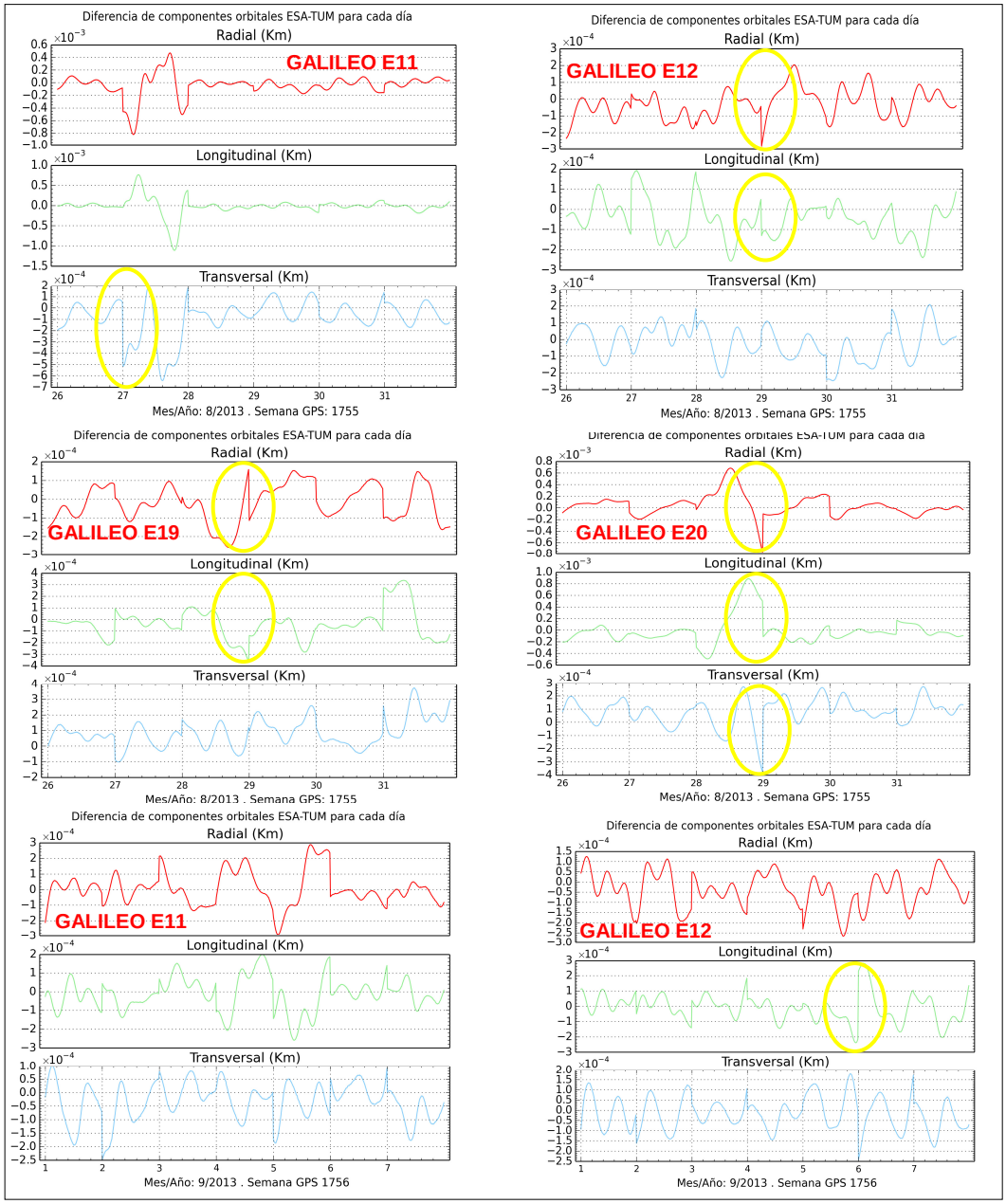
Una de las primeras cuestiones detectadas, en lo referente a las diferentes tácticas seguidas por cada centro de análisis, (CA), es que cada uno de ellos, (CODE, GFZ, ESA ….), utiliza distintas ventanas de datos para la estimación de sus productos, pudiendo variar éstas entre un día y una semana, así como distintas estrategias de procesamiento y fijación de ambigüedades.
Por otro lado, diversos autores como Montenbruck y Hauschild, (2013), establecen que en los procesos de generación de productos multi-constelación, el sesgo o *offset* entre sistemas (ISB[9]), explicado en el

[9] *Inter system bias*

capítulo 2, tiene que ser considerado e incluido en el cálculo, para tener en cuenta diferencias internas en la decodificación y procesamiento de señales Galileo simultáneamente junto con otras señales GPS, GLONASS o de los satélites *Quasi Zenith Satellite System*.

Veamos el caso analizado sobre la estimación de las componentes radial, longitudinal y transversal, que realizan diferentes CA de los satélites GALILEO existentes durante la realización de la investigación, (E11, E12, E19, E20).

Para ello se han empleado datos extraídos de modelos de órbitas experimentales existentes para el periodo comprendido entre las GPSWEEK 1754–1785. Se muestra a continuación las diferencias calculadas entre la determinación de la Universidad de Munich (TUM) con respecto al modelo presentado por la Agencia Espacial Europea (ESA), si bien esta diferencia también se ha calculado para otros modelos procedentes del CNES, del CODE o del GFZ:



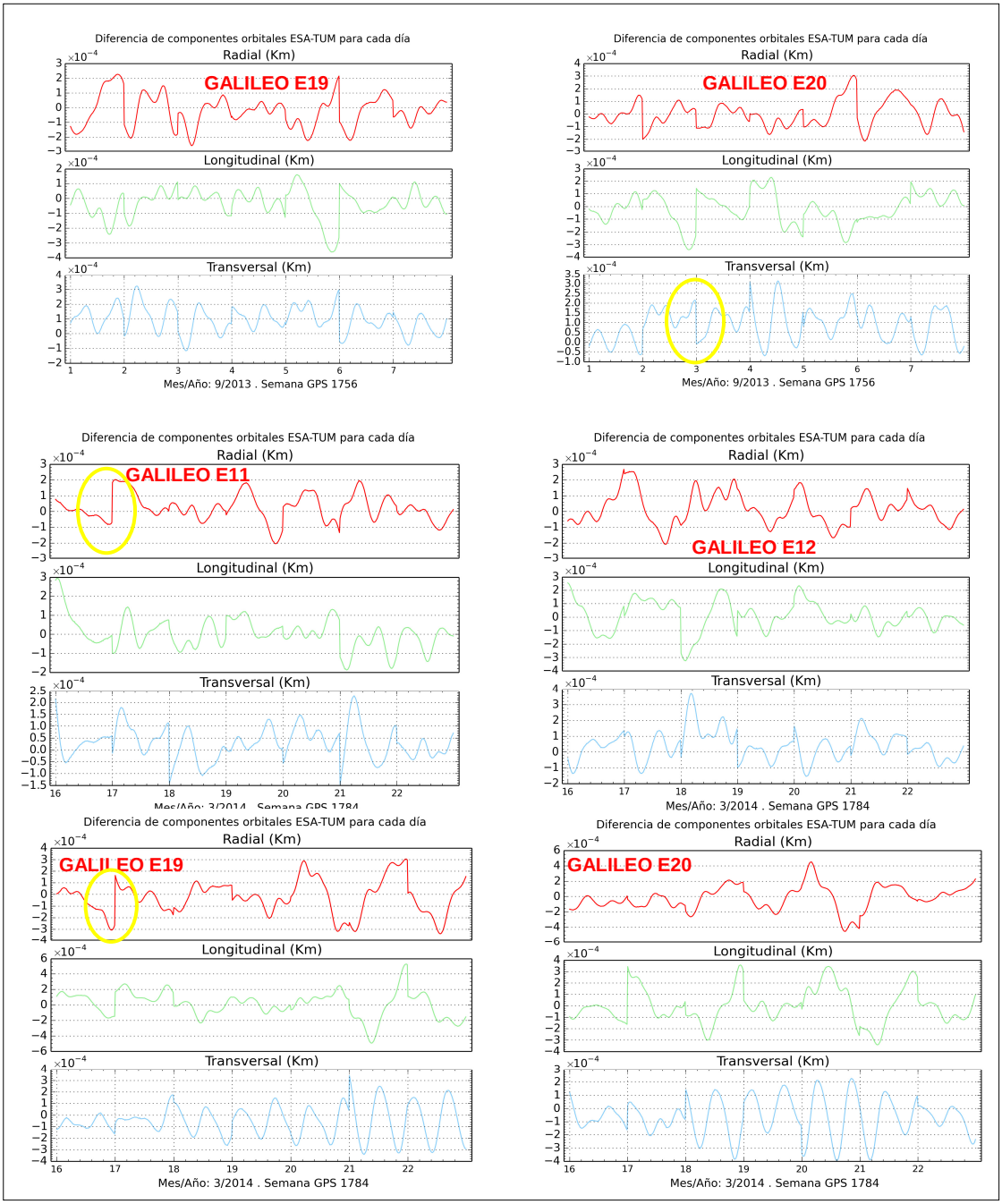


Figura 6.2: Diferencias ESA-TUM en la componente radial, longitudinal y transversal, para satélites GALILEO E11, E12, E19 y E20.

Obsérvese en los gráficos anteriores, algunas de las discontinuidades que se producen en el producto de órbitas destacadas en el círculo amarillo, que se deben a saltos o diferencias dentro de la órbita para las épocas consecutivas a las 00:00 h UTC. Esto es debido a que en el caso concreto del TUM, la estrategia de obtención de órbitas es multi-arco, consistente en utilizar arcos de 5 días, en contraste con el CNES que emplea únicamente intervalos diarios con un solape de 3 horas con el día anterior y posterior. Otros centros de análisis, emplean arcos de tres días (CODE, GFZ).

Otro aspecto que puede llevar a inconsistencias entre los modelos, es la diferente táctica seguida para tratar el *offset* del centro de fase de la antena de los satélites GALILEO, puesto que son valores no publicados oficialmente para la época de realización de estos productos. CNES y TUM utilizan valores estándar propuestos dentro del proyecto MGEX, mientras que el CODE y el GFZ, hacen uso de los suministrados por la ESA, de manera confidencial, ya que únicamente están disponibles dentro del marco del proyecto Galileo Orbit Validation Facility, (OVF), como organismos contratados por la ESA (Steigenberger et al., 2014).

Frente a la solución publicada por la Agencia Espacial Europea para los satélites GALILEO, los *offsets* máximos que se alcanzan en alguna de las componentes orbitales, considerando todas las épocas son:

	TUM (m)	CODE -COM (m)	GFZ -GFM (m)	CNES -GRM (m)
GALILEO E11	0.80	0.35	0.27	0.40
GALILEO E12	0.38	0.30	0.35	0.55
GALILEO E19	0.45	-0.25	0.31	0.38
GALILEO E20	0.95	0.29	0.32	0.49

Tabla 6.3: *Offsets* máximos/mínimos en componentes orbitales por CA respecto a la ESA

Si se evalúan las discrepancias con respecto a un modelo combinado promediado época a época, resultan los *offsets* máximos detectados por satélite representados en la siguiente tabla:

	TUM (m)	CNES – GRM (m)
GALILEO E11	-0.672	
GALILEO E12		0.496
GALILEO E19		0.355
GALILEO E20	0.658	

Tabla 6.4: *Offsets* máximos/mínimos respecto al promedio

A través de los siguientes gráficos calculados, se puede observar como resulta la desviación estándar en 3D determinada en todas las series con las componentes radial, longitudinal y transversal en cada semana GPS (GPS WEEK). Los resultados se muestran por satélite, (E11, E12, E19, E20), con cada uno de los modelos de los distintos centros de análisis:

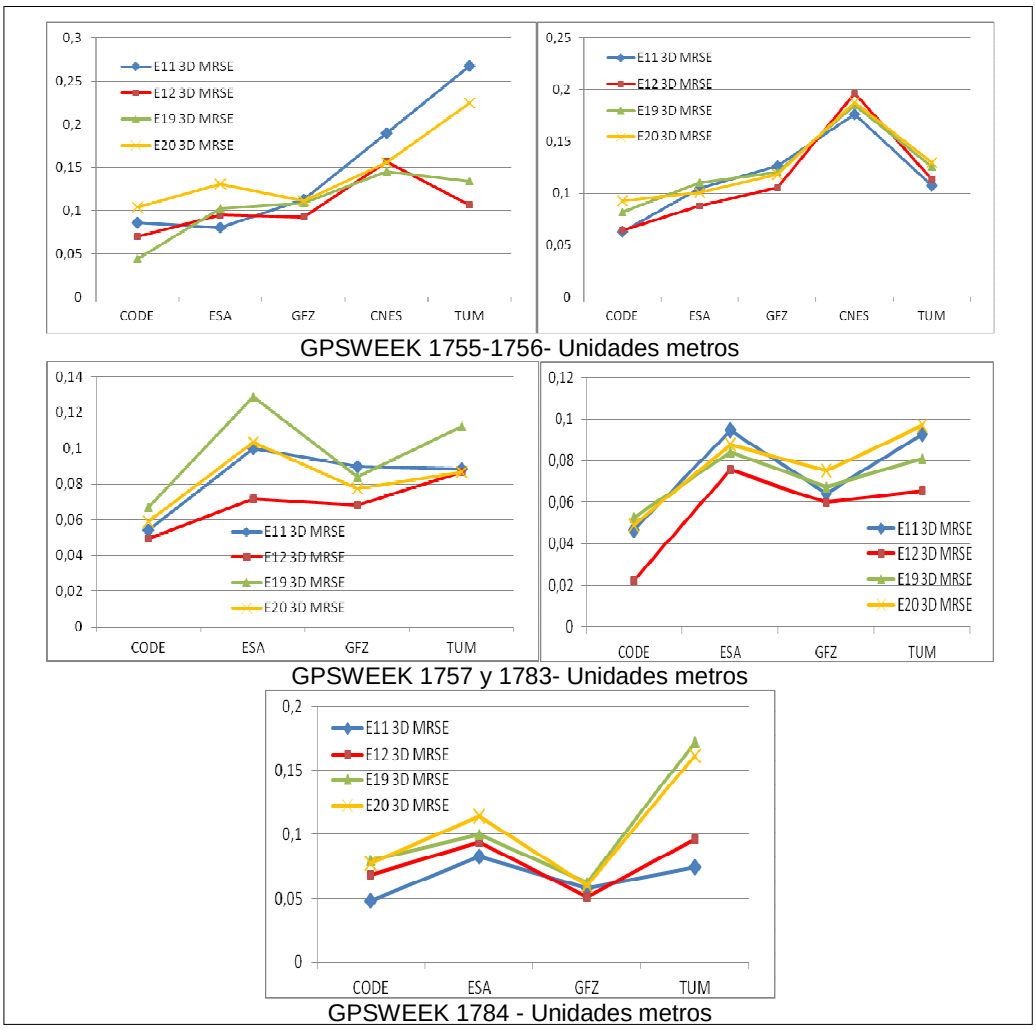


Figura 6.3: σ 3D respecto al promedio época a época para las órbitas GALILEO

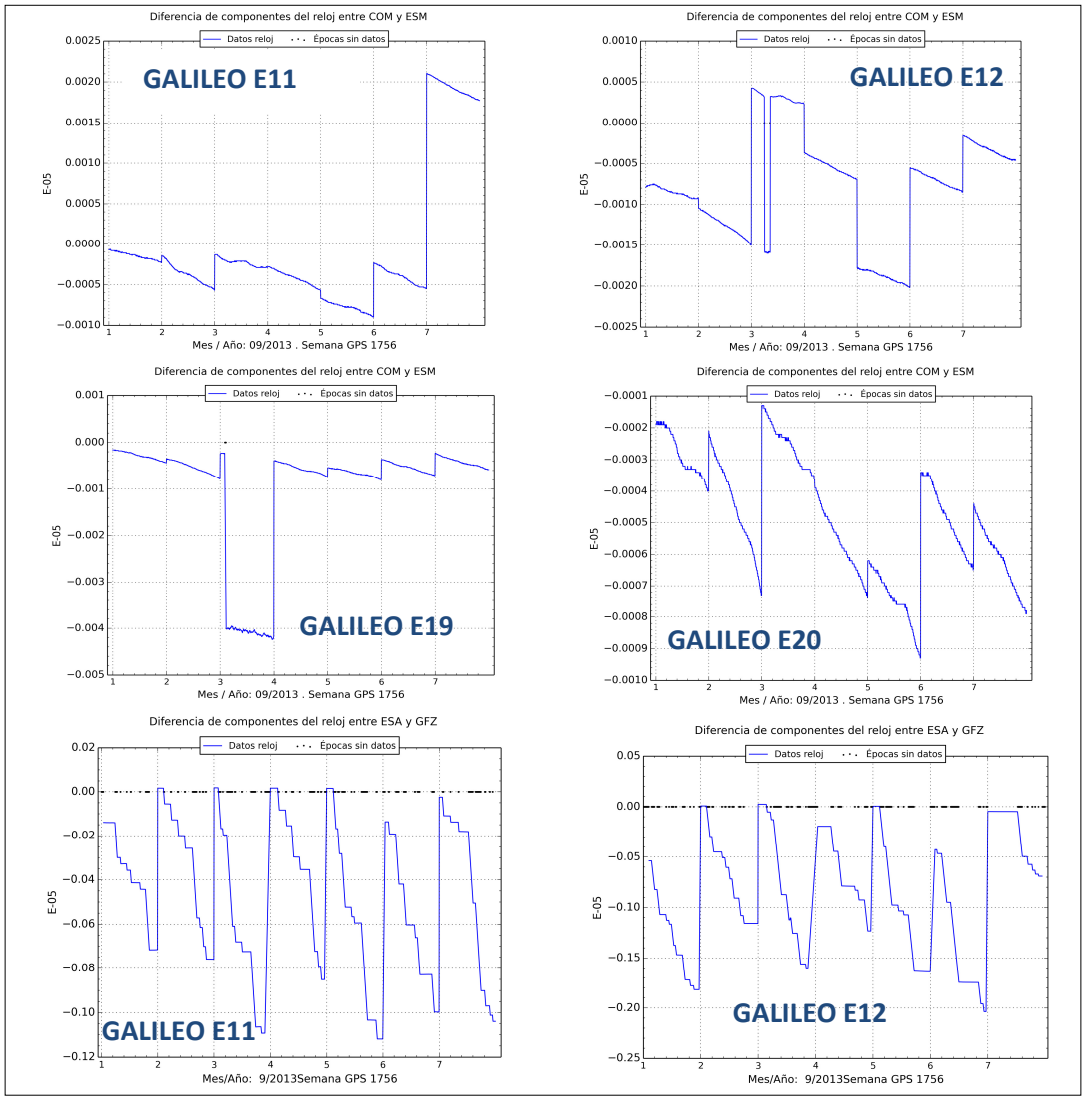
Nótese que el mayor valor semanal en 3D del error medio radial esférico, (MRSE), se cifra en torno a los 26 cm para el TUM, siendo la solución del CODE la que presenta los valores mínimos. A todo lo

dicho, también hay que añadir que la estrategia de obtención de las órbitas parte de una solución de dobles diferencias para el caso del CODE mientras que para el resto de organismos se utilizan cálculos con la combinación libre de ionosfera. La resolución de ambigüedades a enteras no se lleva a cabo en todos los centros de análisis, sino que el TUM, por ejemplo, adopta una solución con ambigüedades flotantes. Evidentemente, todas estas diferentes estrategias o los distintos modelados de las fuentes de error en la señal GALILEO, como pueden ser los retardos de la señal, variaciones del centro de fase de la antena del satélite no calibrados, o la falta de conocimiento con detalle del efecto *wind-up* en los nuevos satélites, (Capítulo 2), dan lugar a discrepancias en los modelos pero ayudan a determinar que opciones de modelado y estimación de parámetros son mejor.

Cabe destacar, por tanto, que la solución de arcos de tres días de dobles diferencias resulta ser la de mayor rendimiento.

En cuanto a los modelos de estado de reloj de los osciladores de los satélites, estos se determinan principalmente en sentido relativo a partir de un oscilador de referencia externo muy estable seleccionado del conjunto de estaciones de referencia. En este caso, cada uno de los centros de análisis utiliza su estrategia para establecer un oscilador de referencia individual. Todas las estimaciones de reloj de los modelos de los distintos centros de análisis están alineadas al tiempo GPS, ya que el sistema de tiempo de Galileo, (*Galileo System Time*), para la época de creación de los productos analizados solo es accesible vía el mensaje de navegación (*Galileo Interface Control Document*, 2010).

Obsérvese una muestra del periodo calculado en el presente capítulo (GPSWEEK 1754–1785), de productos de reloj a intervalos de muestreo de 300 segundos correspondientes al modelo COM (CODE) y GFZ frente al modelo ESM de la Agencia Espacial Europea. Las unidades de los gráficos se muestran en segundos, (nótese que las magnitudes del eje *y* son x 10^{-5}).



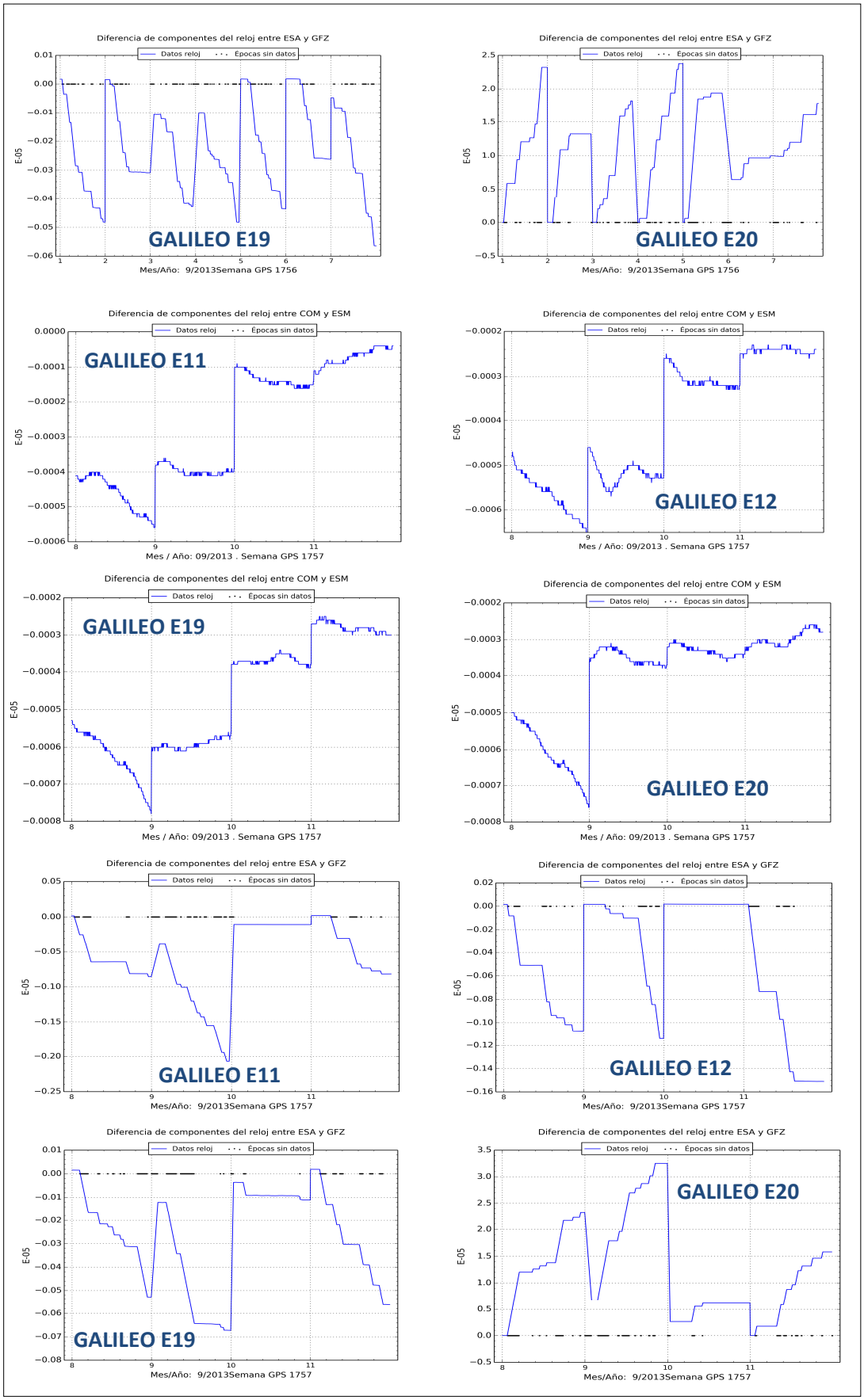


Figura 6.4: Diferencias ESA-COM y ESA-GFZ para productos de reloj GALILEO. Unidades segundos.

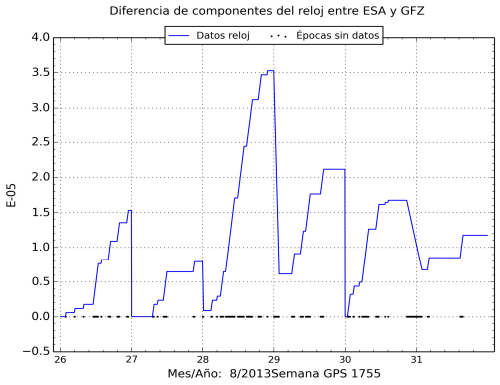


Figura 6.5: Diferencias ESA-GFZ en segundos para el reloj GALILEO E20

Al igual que en el caso anterior existen saltos en la solución de un día a otro.

En los análisis realizados para todos los centros de análisis (GPSWEEK 1754–1785), en su globalidad, existe un nivel de acuerdo para los modelos de la ESA y del GFZ entre los estados de osciladores que no excede de un valor máximo de 2 microsegundos para el satélite E11, 1.5 microsegundos para el satélite E12, 35 microsegundos para el E20, e inferior al microsegundo para el satélite E19.

El grado de acuerdo, sin embargo es mayor entre las soluciones del CODE y la ESA, alcanzando alguna discrepancia máxima de 10 microsegundos en una sola solución diaria, pero estando por lo general con valores al nivel del nanosegundo. Para entender estas discrepancias, es necesario saber que por centros de análisis, en concreto el GFZ, elige el reloj de referencia de una lista de estaciones con máseres de hidrógeno de alta calidad. Otros centros de análisis, como el TUM, siguen otras estrategias, definiendo un reloj de referencia coincidente con el que utiliza el CODE en los productos de latencia rápida de órbitas y relojes. Por último, el CNES selecciona como referencia el oscilador de la estación con el número máximo de observaciones.

Con respecto a la media de todos los relojes calculados, la desviación estándar para cada satélite y semana queda representada en microsegundos en los siguientes gráficos:

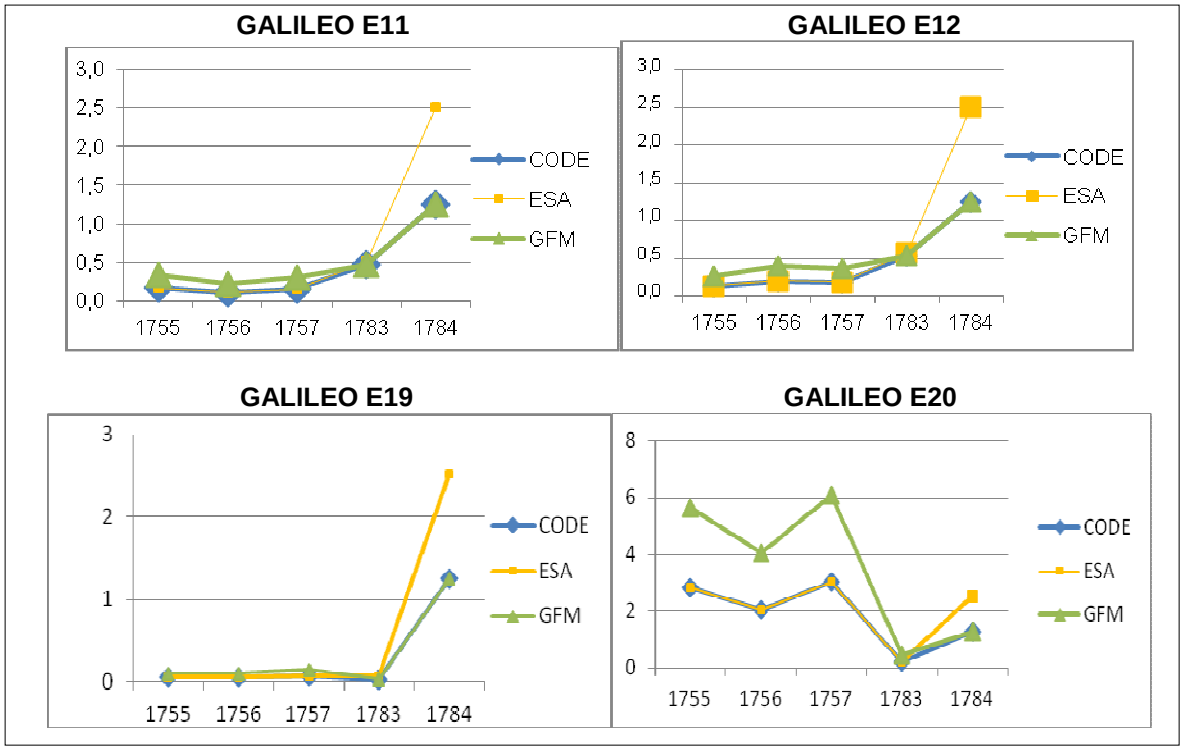


Figura 6.6: σ de cada centro de análisis con respecto a la combinación época a época, para las GPSWEEK 1755-1757, 1783-1784. Unidades en microsegundos de tiempo.

Todos los valores son inferiores al medio microsegundo excepto para la semana 1784 donde se pierde la estabilidad, y para todo el periodo analizado del satélite E20 donde aparecen desviaciones estándar ligeramente superiores, alcanzando los 6 microsegundos para la determinación del GFZ/GFM.

Por último, es necesario resaltar que para la determinación de los estados de reloj se utiliza la combinación de observables *iono-free* o libre de ionosfera. Con el fin de garantizar homogeneidad entre productos es preciso que la combinación esté referida a las mismas señales en todos los CA, de lo contrario se produce la heterogeneidad detectada entre modelos.

6.2. Impacto de la presencia de GALILEO en la solución PPP en tiempo real

En primer lugar, resulta fundamental insistir que en tiempo real los *streams* de correcciones a los estados de reloj, órbitas y *bias* de los satélites no se encuentran disponibles para el caso de GALILEO durante la realización del análisis, por ser una constelación en desarrollo. La única aproximación efectuada corresponde al modelo generado a partir de la red CONGO[10], (Capítulo 1).

El objetivo de este apartado y los que vienen a continuación es plantear el margen de mejora de la técnica aprovechando las ventajas de un entorno multi-constelación. Se trata de evaluar las limitaciones en posicionamiento PPP en tiempo real partiendo de un entorno de una sola constelación (GPS), y comprobar las mejoras considerando la presencia de satélites GLONASS y GALILEO.

En algunos escenarios incluidos se considera la activación de la constelación GALILEO para la solución de navegación y el uso de productos de la red de rastreo CONGO, a la hora de resolver el posicionamiento. Las sesiones de los apartados presentados a continuación, emplean los siguientes modelos y mensajes descritos en el capítulo 3, y las librerías y procesos descritos en el capítulo 5:

	CLK91	**CLKA1**	**CLK10**	**IGS03**
Referido al	APC (Antena Phase Center).	APC (Antena Phase Center).	APC (Antena Phase Center).	APC (Antena Phase Center).
Constelación	**GPS +GLONASS**	**GPS+GLONASS+red CONGO-GALILEO**	**GPS +GLONASS**	**GPS +GLONASS**
Mensajes	1059 (5),1060(5) 1065 (5) ,1066 (5)	1059 (5)-1060(5), 1066 (5)	1057(60),1058 (5), 1059(5)	1057(60),1058(10),1059(10) 1063(60),1064(10),1065(10)
Marco de referencia	**ITRF 2008**	**ITRF 2008**	**ITRF 2008**	**ITRF 2008**
Organismo	**CNES**	**DLR**	**BKG**	**Combinado IGS**

Tabla 6.5: Modelos empleados en el análisis multi-constelación

La solución para PPP en tiempo real obtenida se basa en la combinación de observables *iono-free*, y utiliza observaciones de un receptor L1/L2 midiendo a 1 Hz. Si bien todos los productos emplean modelos obtenidos sobre el marco ITRF08, en todos los casos se ofrecen los resultados y estadísticos de las componentes N,E,h, en el marco regional ETRF2000, tras la realización del cambio de marco.

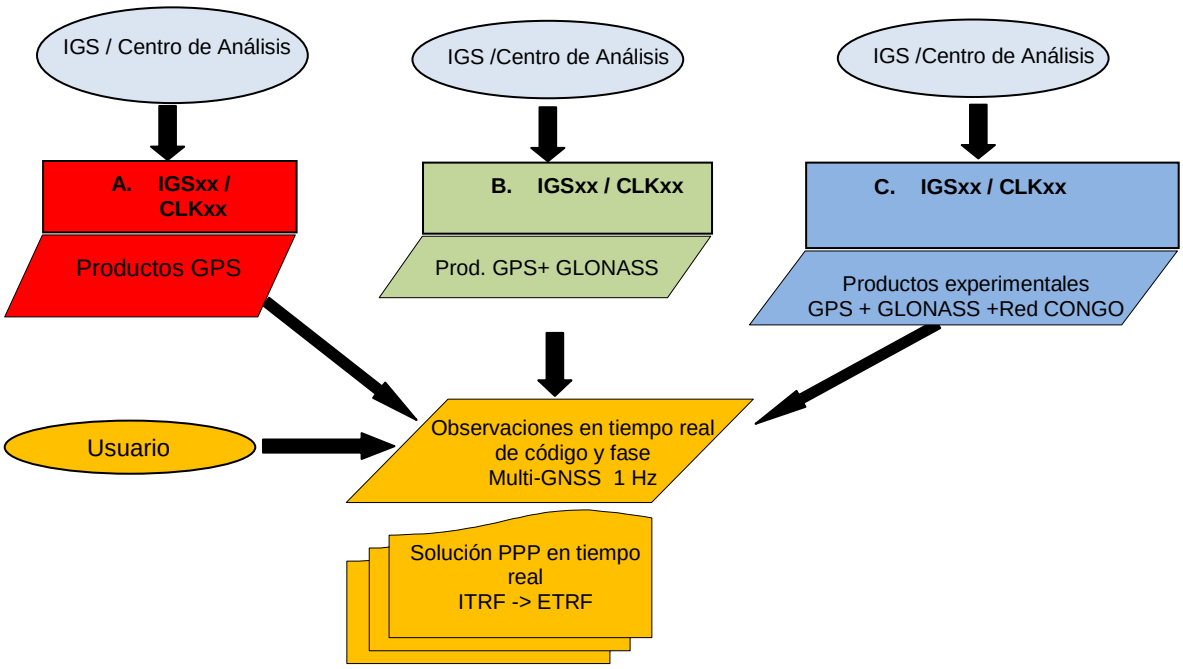


Figura 6.7: Esquema de la unidad de control para tiempo Real.

[10] *Cooperative Network for Giove Observation*

6.2.1. Convergencia en el posicionamiento PPP empleando solución de navegación con GALILEO

Tal y como se muestra a continuación, se representa la influencia de la presencia de satélites GALILEO en la solución de navegación. La simulación efectuada incluye sesiones PPP en tiempo real en dos observaciones efectuadas de manera simultánea, en una se incluyen en la solución de navegación los satélites de GALILEO y en la otra no. Se muestra un ejemplo de los gráficos para la solución acumulativa para 24 horas en las componentes N,E y h, y para la representación cinemática época a época. Los análisis se llevaron a cabo entre los DOY *(Day of year)* 310 y DOY353 del año 2012, sobre datos de la estación de BRUX perteneciente al *Royal Observatory of Belgium* y a la red IGS.

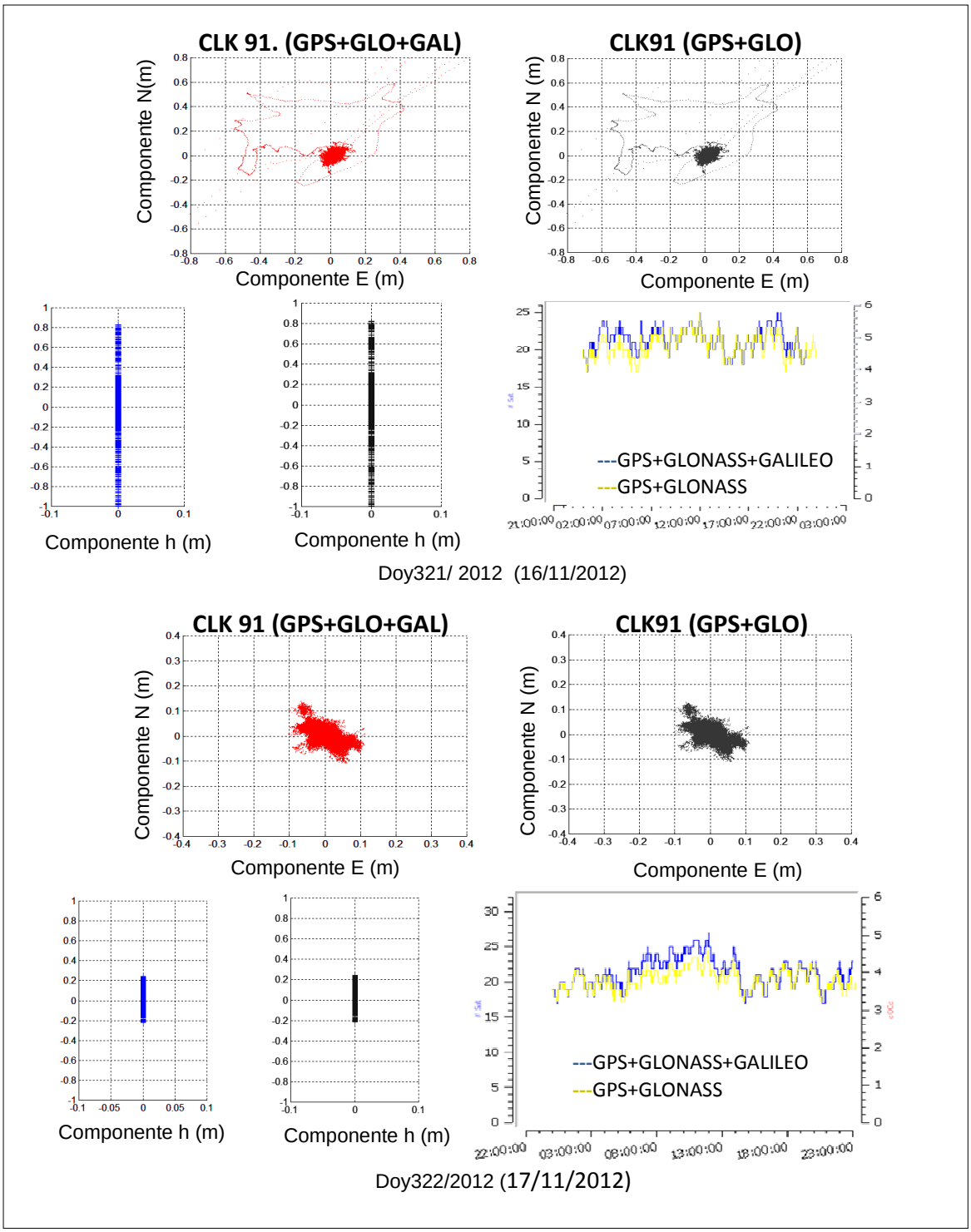


Figura 6.8: Sesgo X,Y, h y constelación rastreada GPS+GLONASS+GALILEO frente GPS+GLONASS

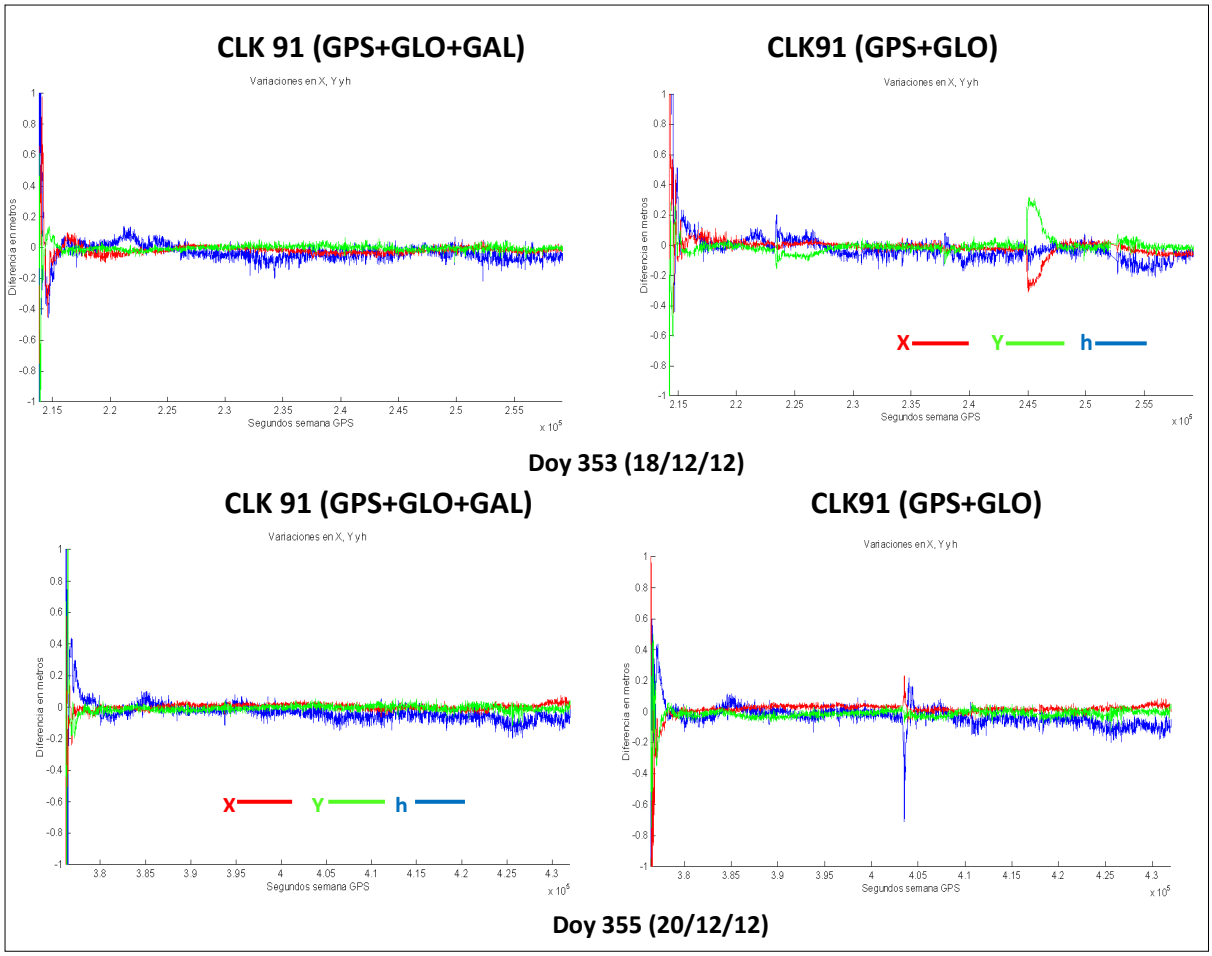


Figura 6.9: Representación época a época GPS+GLONASS+GALILEO frente GPS+GLONASS

Aunque las precisiones son similares dentro del rango centimétrico, los estadísticos arrojados en las dos sesiones reflejan mayor pérdida de convergencia para los casos en que la constelación es más pobre, es decir sin GALILEO.

En un periodo de más de 40 días analizado se observa que los *offset* con respecto al valor de referencia son en torno a 2 cm en dirección N, E y en torno a 5 cm en dirección h para el caso en que la constelación GALILEO participa en la solución de navegación, y en torno a 4 cm en dirección N, E y de los 7 cm en dirección h en el caso en que no. El grado de dispersión es menor también en el caso de emplear la constelación GALILEO (σ = 4 cm para las componentes N,E y σ =9 cm en h frente a σ = 7 cm –N, E y σ de hasta 10 cm en h). En la solución de 24 horas puede suponer una diferencia de hasta 30 minutos diarios de media de épocas por debajo del rango de los 20 cm para una y otra solución.

Es necesario destacar, que el lento cambio en la geometría de los satélites visibles conduce a un periodo más largo de inicialización antes de que se alcance un umbral de precisión aceptable, no obstante queda patente que la optimización del escenario multi-constelación facilita el acortamiento del periodo de inicialización y la recuperación de la misma en el caso de gaps o pérdidas de solución dentro de un determinado rango.

6.2.2. Monitorización de productos de la red de rastreo GALILEO (CONGO)

En este caso se aplica en la solución PPP en tiempo real el *streaming* de correcciones a las órbitas, relojes y *bias*, generado por la red cooperativa CONGO, (producto CLKA1), de rastreo y generación de productos con GALILEO, (Capítulo 1), y el modelo de efemérides también generado para los satélites GALILEO. El acceso al producto experimental CLKA1 así como a las efemérides GALILEO, y modelos de antena de satélite giove.atx, se ha llevado a través del DLR/GSOC (Hauschild, 2012).

Para la sesión en que se ha aplicado este modelo se emplean todos los satélites GALILEO visibles en la época de las sesiones. Los resultados se han transformado al marco ETRF2000 y se muestran a continuación. Simultáneamente, en la misma ventana de tiempo se genera un escenario empleando únicamente un modelo con GPS+GLONASS denominado CLK91.

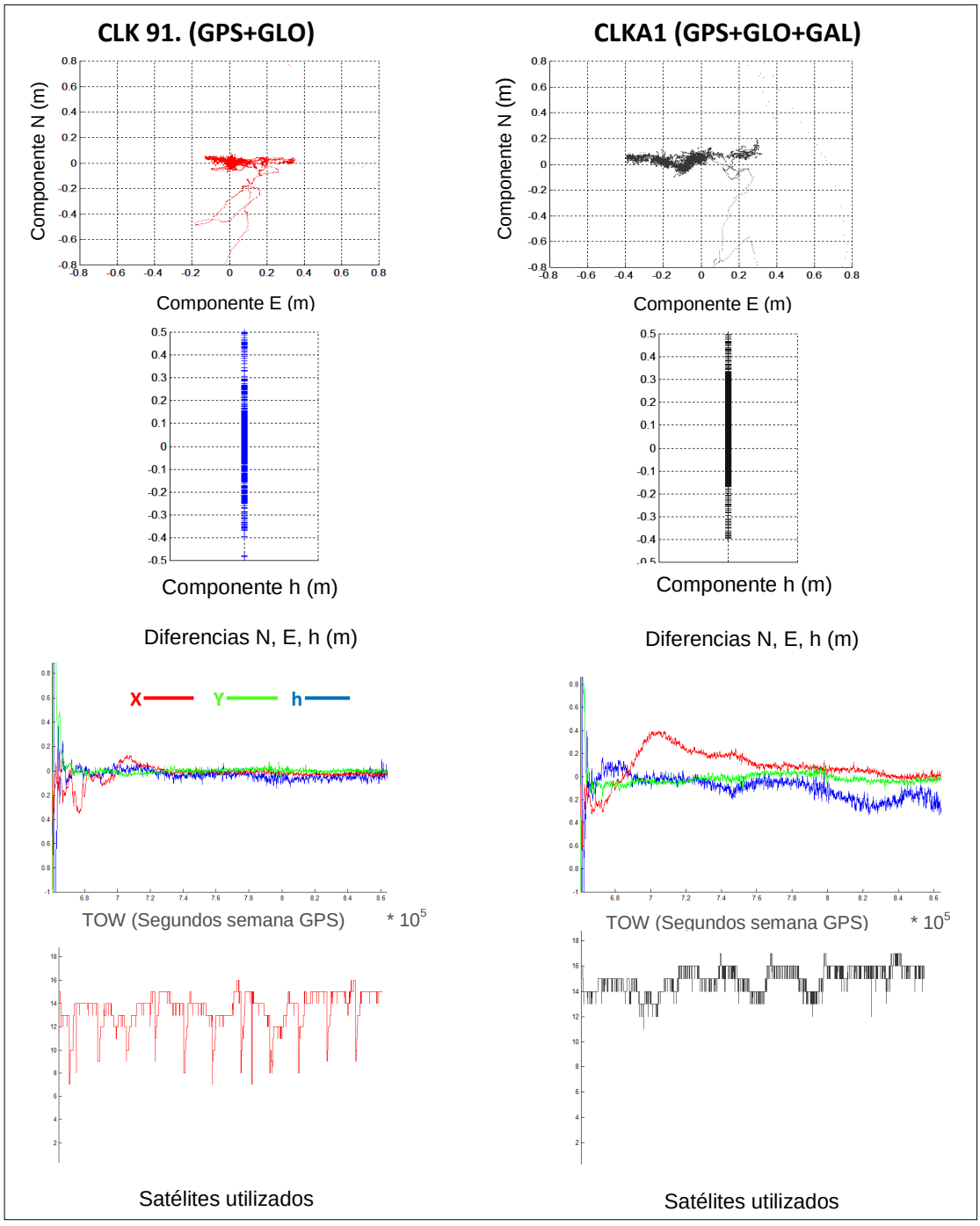


Figura 6.10: Doy358/2012
Sesgo X,Y,h, representación época a época y rastreo CLK91 frente a productos CONGO

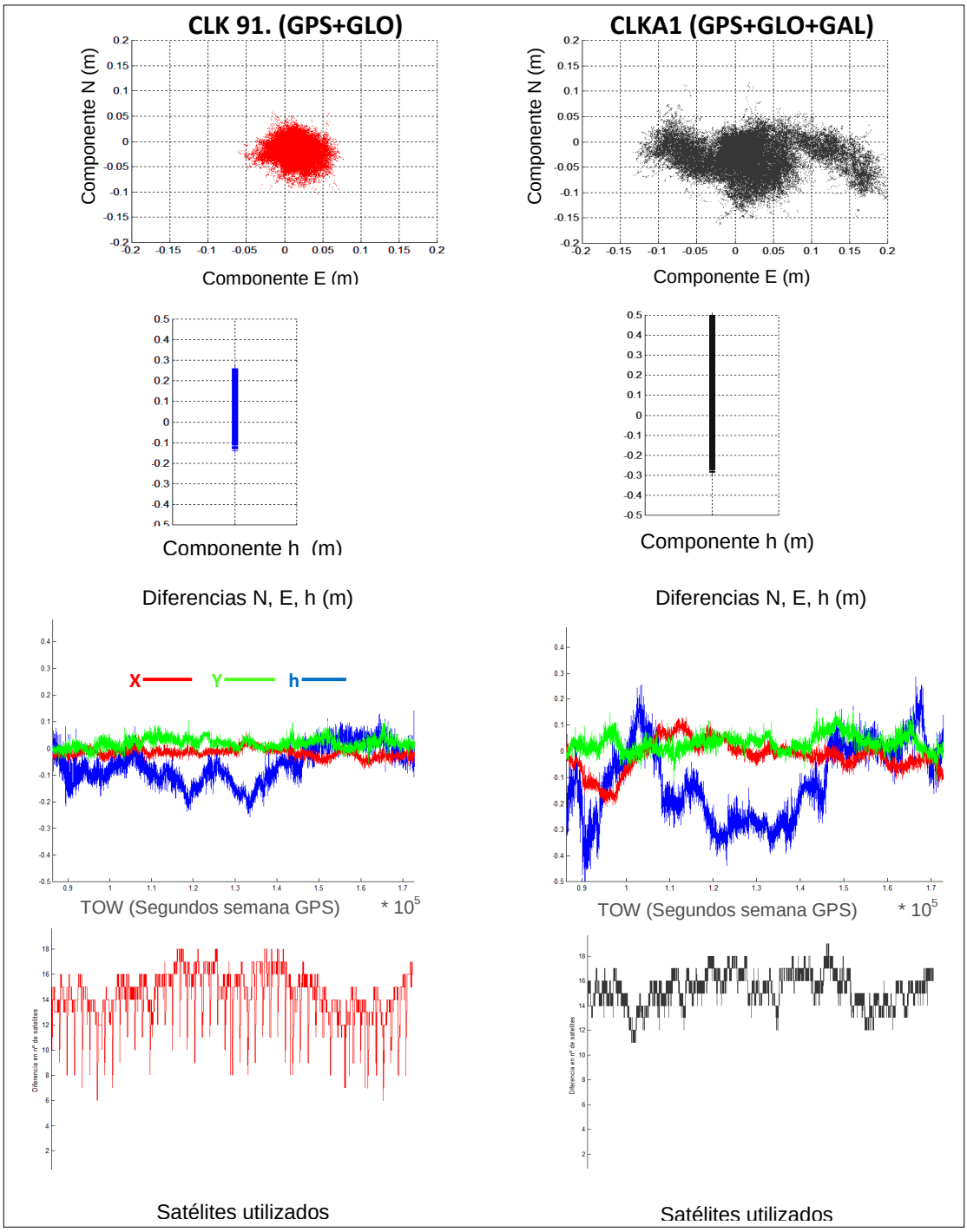


Figura 6.11: Doy359/2012
Sesgo X,Y,h, representación época a época y rastreo CLK91 frente a productos CONGO

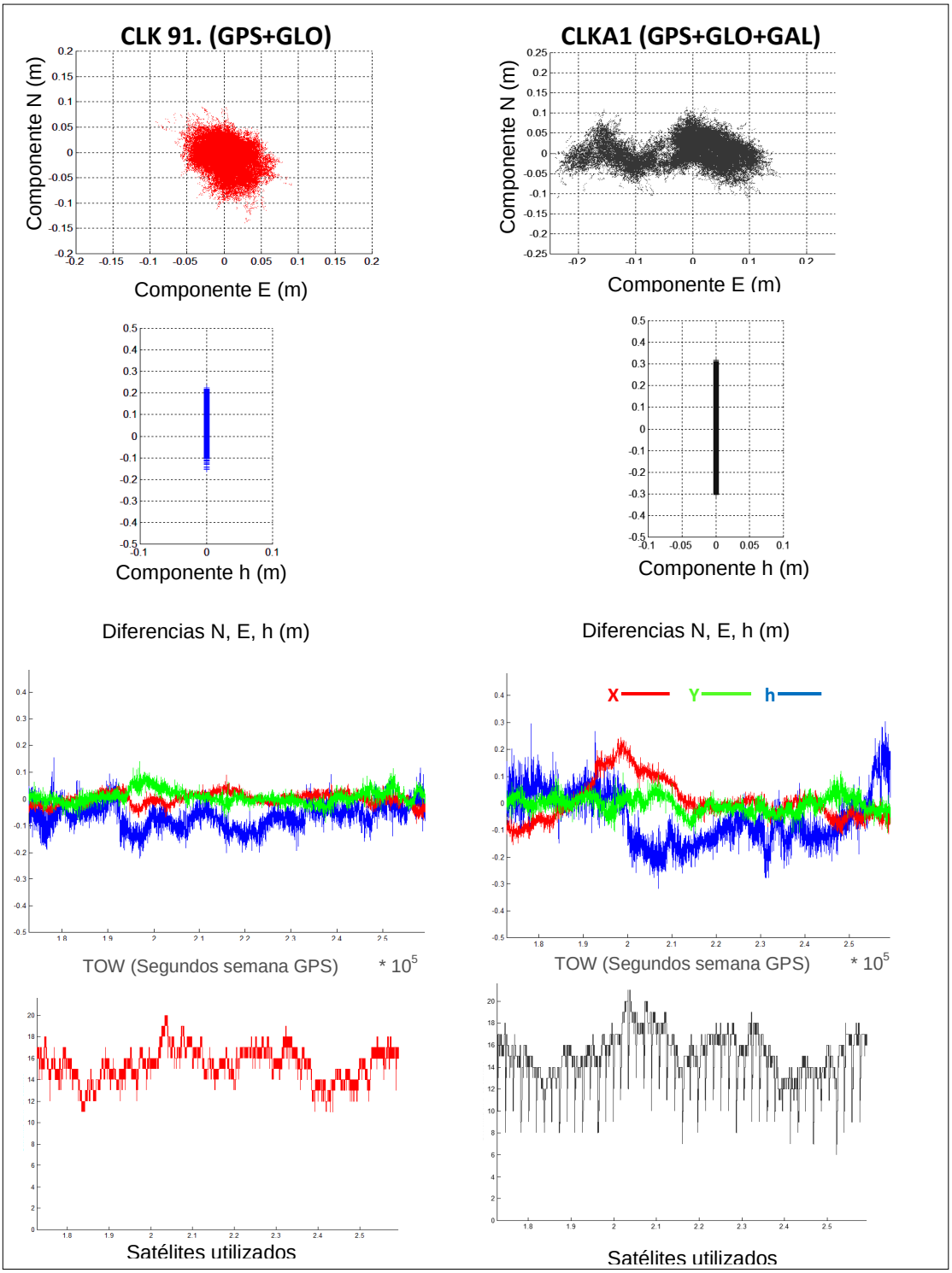


Figura 6.12: Doy360/2012
Sesgo X,Y,h , representación época a época y rastreo CLK91 frente a productos CONGO

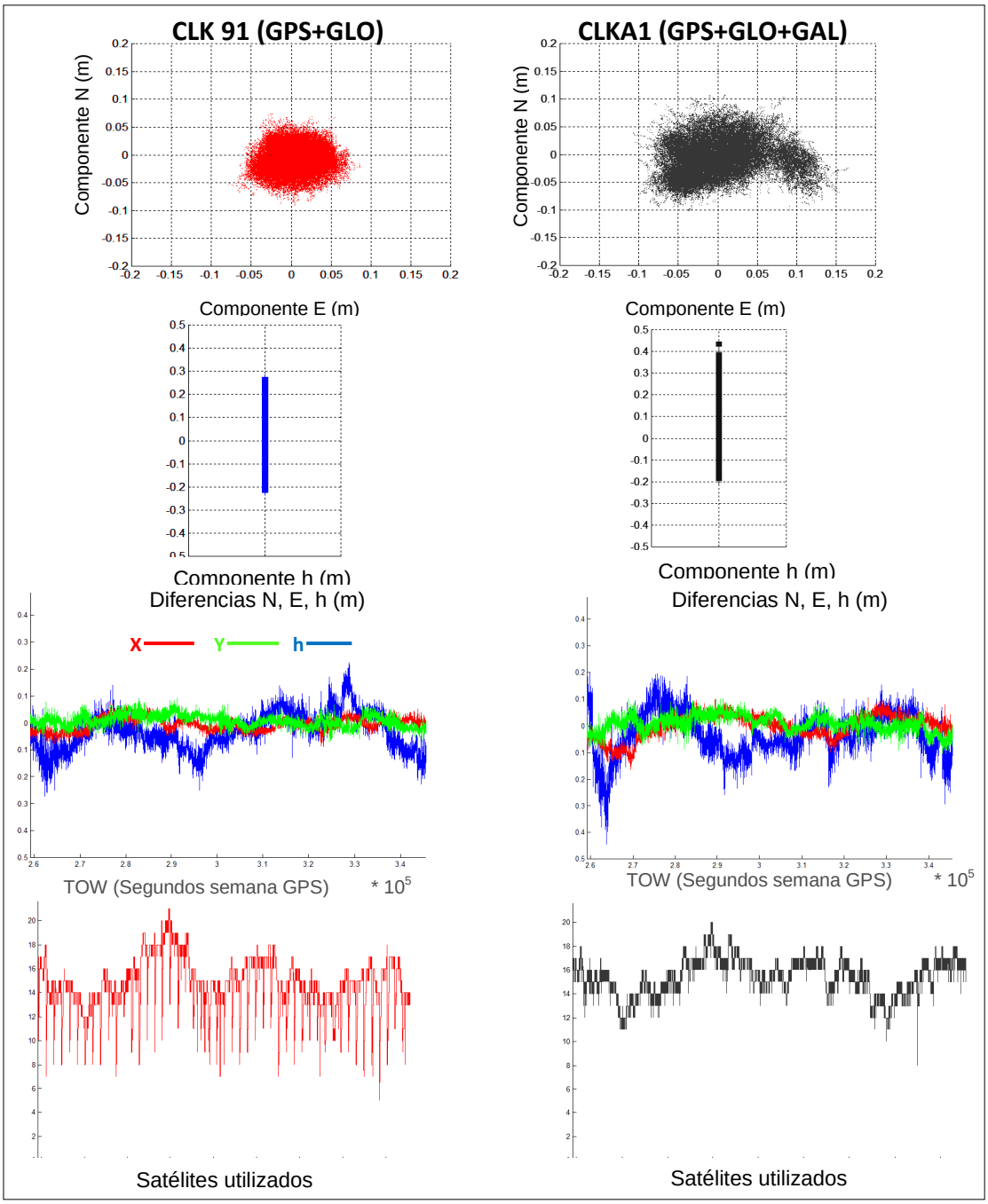


Figura 6.13:Doy361/2012. Sesgo X,Y,h, representación época a época y rastreo CLK91 frente a productos CONGO

A continuación se muestran los estadísticos obtenidos:

CLK91	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,1820	1,8150	3,1790	Mayor que 20 cm	0,3068	0,2184	1,8125
Valor Mínimo (m)	-0,9800	-1,6190	-1,8450	Menor que 20 cm	99,073	99,1614	97,5673
Valor Promedio (m)	0,0252	0,0245	0,0647				
Valor Desviación estándar (m)	0,0307	0,0377	0,0751				
CLKA1	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,3580	2,7510	4,1830	Mayor que 20 cm	3,0875	0,2238	10,2619
Valor Mínimo (m)	-1,3530	-9,8050	-1,6140	Menor que 20 cm	96,867	99,7309	89,6928
Valor Promedio (m)	0,0544	0,0316	0,0933				

Valor Desviación estándar (m)	0,0659	0,0575	0,1090

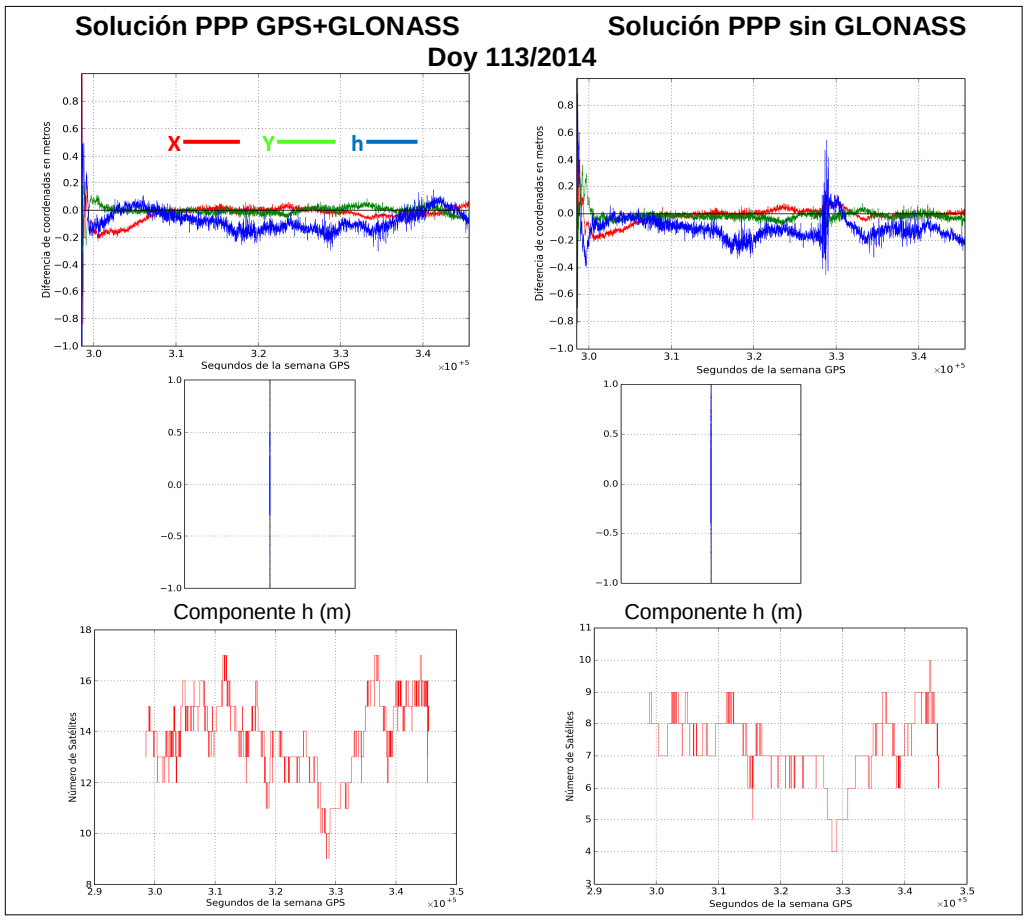
Tabla 6.6.: Estadísticos obtenidos modelo CLK91 frente CLKA1

Para estos escenarios, se observa diferencias entre utilizar un modelo u otro. Utilizando el producto CLK91 se obtienen mejores promedios, desviaciones estándar y tiempos en el rango. Esto puede ser debido a que la constelación GALILEO y sus productos, se encuentran en desarrollo, e incluyen en la franja de tiempo analizada únicamente las observaciones de los dos satélites GALILEO que ya llevaban un tiempo en órbita. En análisis posteriores en el tiempo, se dispone de los satélites lanzados en la siguiente fase de la misión. Por otro lado, como sucede para el caso de los modelos de órbitas y relojes para post-procesar vistos en apartados anteriores, en el caso de generar modelos multi-constelación para tiempo real debe clarificarse y depurarse la estrategia a seguir.

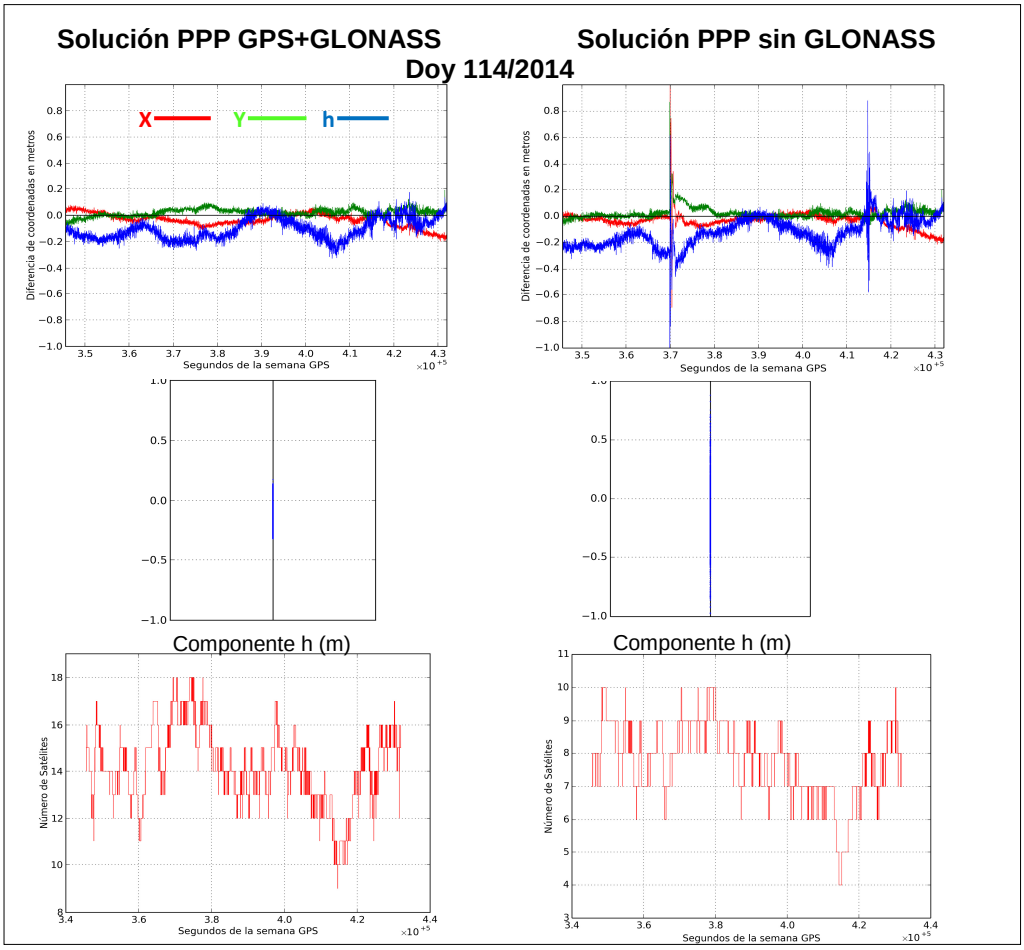
6.3. Influencia de la constelación GLONASS en la solución PPP en tiempo real

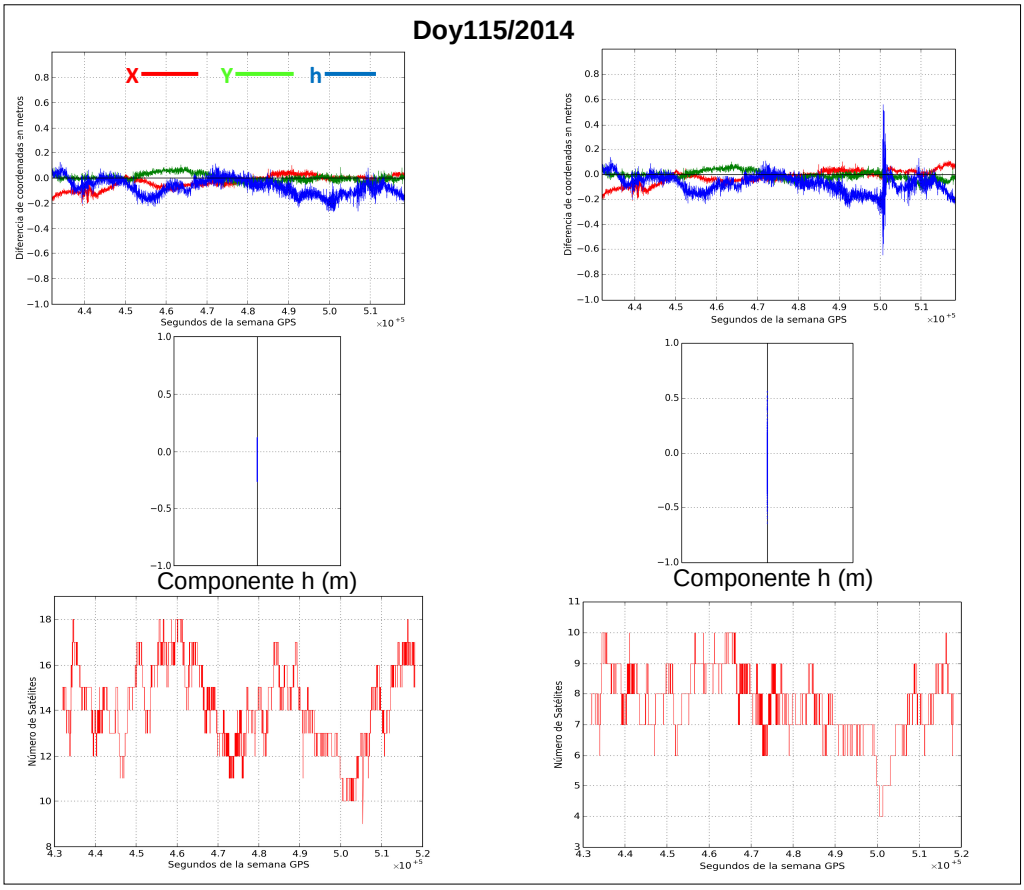
En el siguiente apartado, se evalúa el impacto de la presencia de la constelación GLONASS en las soluciones PPP en tiempo real. En estudios previos de varios autores, (Anquela et al., 2013), se muestran los resultados para el caso cinemático post-procesando trayectorias de móviles, en las que se manifiesta que el hecho de añadir la constelación GLONASS optimiza las precisiones del proceso.

Para este caso de estudio en tiempo real, con el mismo modelo, CLK91, de correcciones de órbitas, relojes y *bias* generado por el CNES[11] se ejecutaron dos sesiones simultáneas, con el fin de evaluar el impacto del uso de satélites GLONASS en la solución PPP en tiempo real, y su aportación en términos de precisión, tiempos de inicialización y pérdidas de convergencia para un determinado umbral. Sirvan de muestra unos gráficos para ilustrar el análisis.



[11] *Centre National* d'Etudes Spatiales- *Francia*


Solución PPP GPS+GLONASS
Solución PPP sin GLONASS
Doy 114/2014
X
Y
h
Diferencia de coordenadas en metros
Segundos de la semana GPS
Componente h (m)
Número de Satélites
Segundos de la semana GPS


Doy115/2014
X
Y
h
Diferencia de coordenadas en metros
Segundos de la semana GPS
Componente h (m)
Número de Satélites
Segundos de la semana GPS

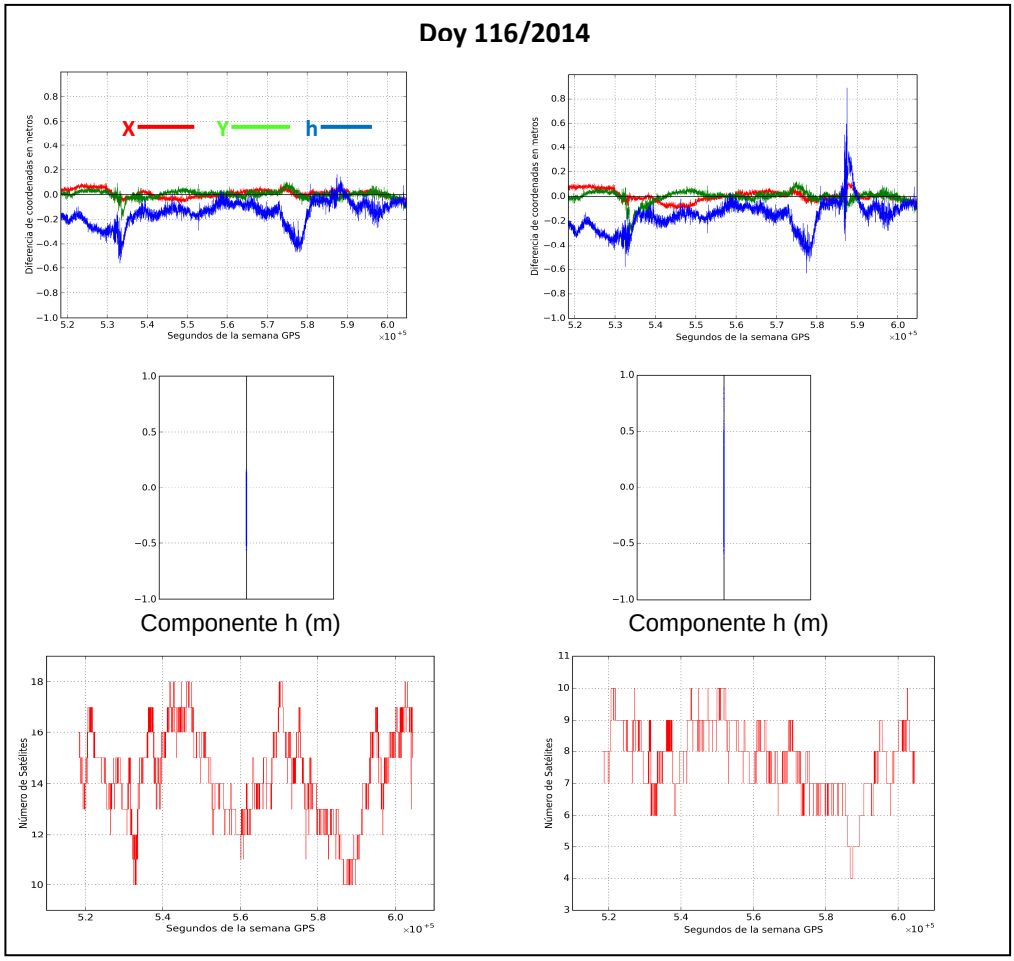


Figura 6.14: Doy 113 -116/2014, Influencia de la presencia de GLONASS en la solución PPP en tiempo real

Si bien se incluye una muestra de gráficos, el seguimiento se realizó durante el periodo de las GPSWEEK 1728- 1729, 1733-1734, 1767 -1768, 1789-1791, plasmándose a continuación el resumen de estadísticos para este periodo.

CLK91 CON GLONASS	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1.1520	0.2650	1.9880	Mayor de 20cm	0.1072	0.0600	9.2482
Valor Mínimo (m)	-0.8410	-0.6400	-2.8120	Entre 20 y 10 cm	4.9220	0.3324	45.2707
Valor Promedio (m)	0.0367	0.0237	0.0731	Menor de 10cm	94.9708	99.6075	45.4811
Valor Desviación estándar (m)	0.0460	0.0300	0.0808				
CLK91 SIN GLONASS	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	2.5720	0.8690	2.2370	Mayor de 20cm	0.4002	0.5241	15.8160
Valor Mínimo (m)	-0.6960	-1.2180	-2.4720	Entre 20 y 10 cm	5.0653	1.5578	44.5521
Valor Promedio (m)	0.0412	0.0297	0.1265	Menor de 10cm	94.5345	97.9181	39.6318
Valor Desviación estándar (m)	0.0730	0.0418	0.0978				

Tabla 6.7: Estadísticos obtenidos de la solución PPP con y sin presencia de GLONASS.

Nótese que las principales diferencias se observan en dirección h, donde se plasman a continuación las pérdidas de convergencia por encima de los 20 cm y el porcentaje de tiempo sobre 24 horas en que la solución PPP en tiempo real se encuentra en un rango inferior a los 10 cm. En cuanto a los tiempos de convergencia de la solución, el uso de las constelaciones GPS+ GLONASS puede suponer una diferencia de 10-15 minutos menos que en el caso de usar solo GPS.

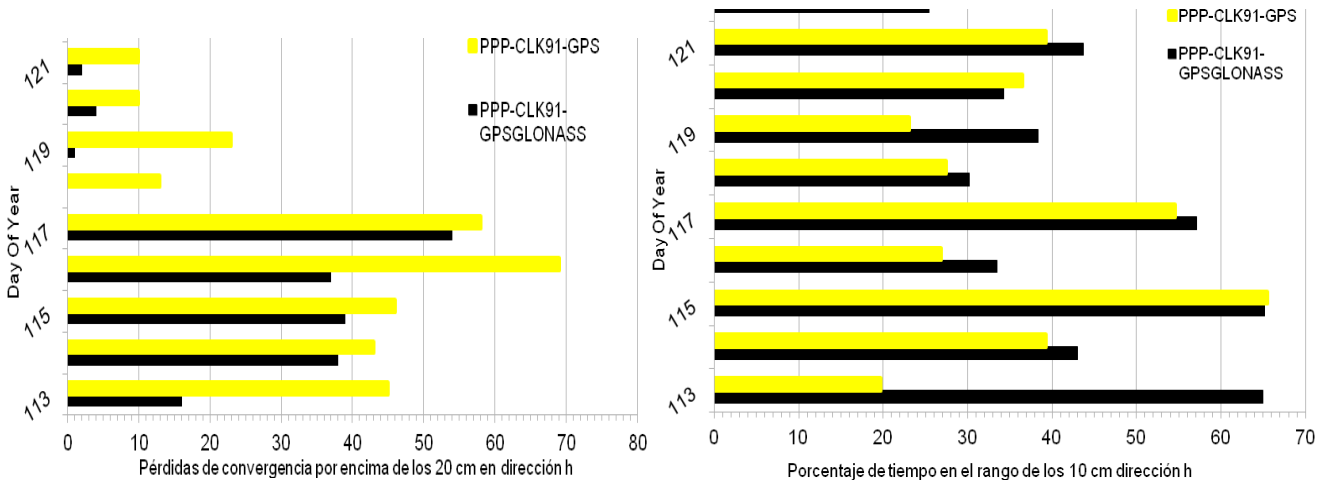


Figura 6.15: Pérdidas de convergencia en 24 horas y porcentaje de tiempo para un determinado rango, GPS y GPS+GLONASS

6.3.1. Discusión de *outliers* en la determinación de modelos SSR de órbitas GLONASS

Si bien en todos los análisis efectuados con la técnica PPP en tiempo real, se ha detectado que el rendimiento es mayor con el uso de doble constelación GPS +GLONASS, es necesario destacar que la continuidad en el funcionamiento de las constelaciones GNSS no está exenta de episodios a estudiar.

Tal es el caso de los dos incidentes de cortes, (*outages*), acaecidos en la constelación GLONASS registrados en abril de 2014 (1/04/2014- 21:15 UTC y 14/04/2014). En el primero de los dos *outages,* todos los satélites GLONASS comenzaron a transmitir órbitas radiodifundidas erróneas con errores en el mensaje de radiodifundido para las componentes radial, longitudinal y transversal de hasta 200 kilómetros (Beutler et al., 2014). El problema desapareció después de una hora para dos satélites GLONASS mientras que para otros satélites, persistió hasta 10 horas. En el segundo *outage*, el 14/04/2014, ocho satélites GLONASS pasaron a modo *unhealthy* durante una media hora, lo que significa que la mayoría de los receptores con capacidad de rastreo GLONASS habrían ignorado esos satélites en el cálculo de la posición.

A nivel de rendimiento de los productos IGS, en los incidentes reseñados, menos del 40 por ciento de los receptores de rastreo GLONASS sufrió el problema de rastreo. El número de observaciones GLONASS utilizadas en el trabajo diario de los centros de análisis IGS, (CA), sin embargo, sólo se redujo en un 10 por ciento el 2 de abril y aún en menor medida, el 1 de abril, ya que sólo las tres últimas horas y las primeras siete horas del 1 y 2 de abril, respectivamente, se vieron afectadas.

Esto es debido a que los CA no utilizan el mensaje de navegación, sino que en su lugar emplean órbitas predichas derivadas de las efemérides precisas de los días anteriores. Por este motivo, el número de observaciones era todavía suficiente para calcular órbitas GLONASS precisas para esos días con el nivel de precisión deseada.

Para el caso de tiempo real, adicionalmente a lo expuesto, y en lo referente a la generación de modelos del IGS y de los CA para *streaming,* es necesario mencionar que también se producen *outliers* en la generación de productos, bien por problemas del modelo ultra-rápido que interviene o bien por otras circunstancias como las reseñadas.

Para evaluar este aspecto se ha implementado un control de anomalías en los modelos de órbitas GLONASS generados por varios centros de análisis, (CLK91, CLK11, o CLKA1), a partir del *streaming* en tiempo real o en productos combinados (IGS03), donde se pueden ver los resultados que presentan valores anómalos en las correcciones orbitales.

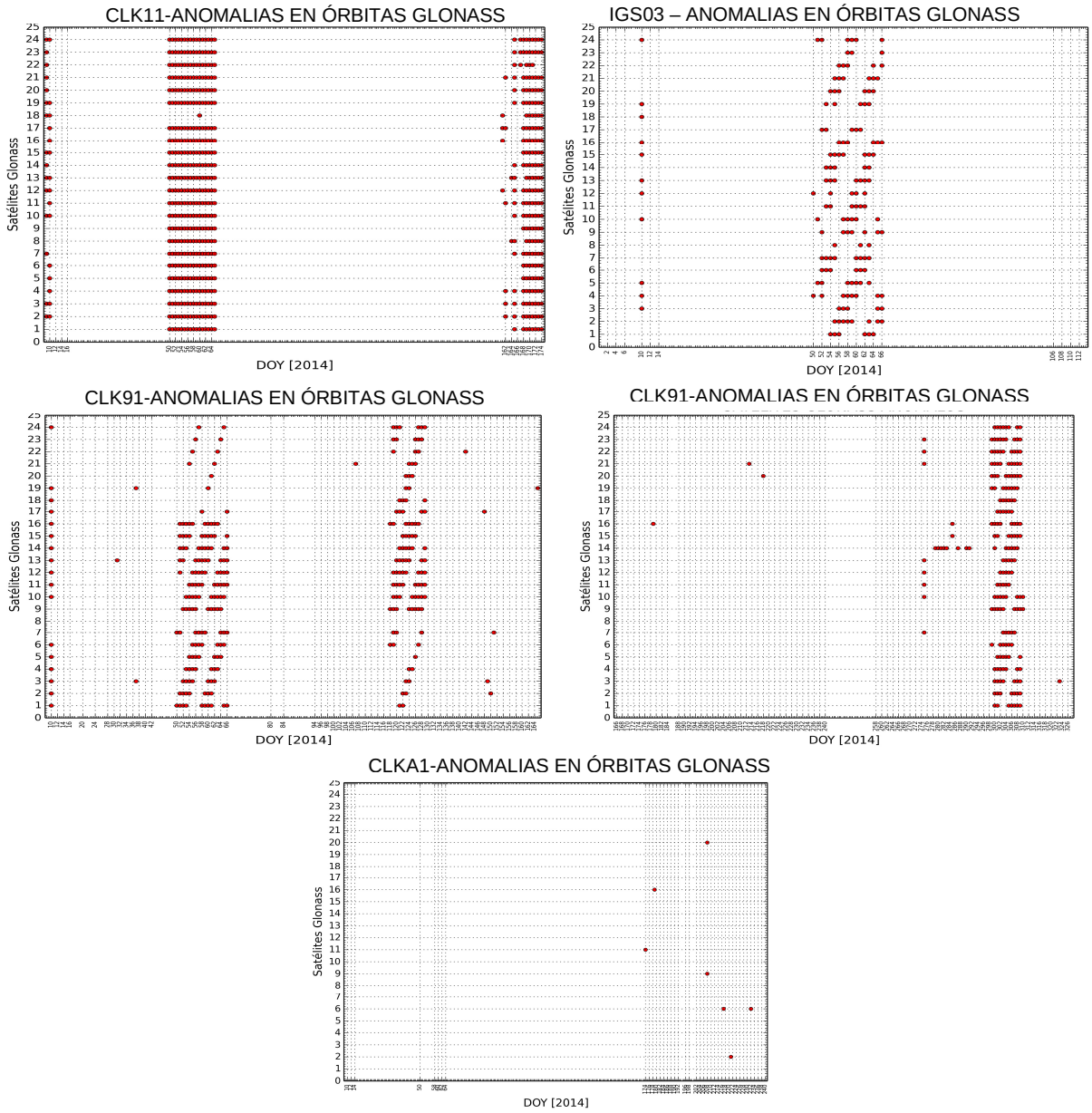
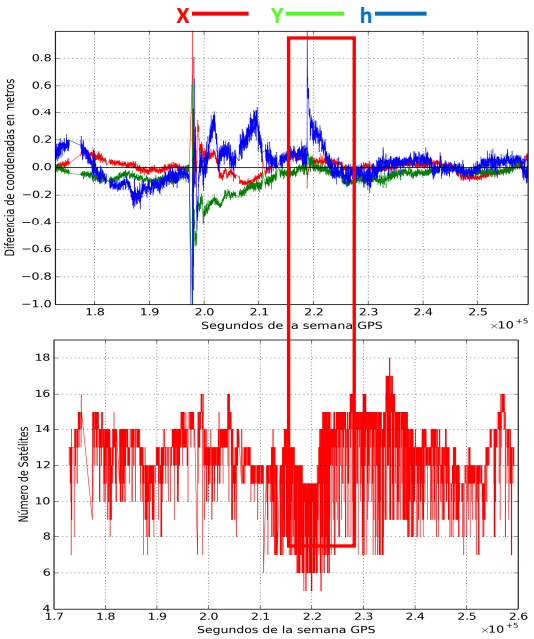


Figura 6.16: Anomalías en productos CLK en órbitas GLONASS



En la figura 6.17 se representa los resultados con PPP en tiempo real obtenidos con el modelo CLK91 para el doy 119/2014, donde se ve la pérdida de satélites útiles en la franja de tiempo donde se produce este problema y la inconsistencia de la solución para esos instantes:

Nótese, que las diferentes estrategias seguidas por unos centros de análisis u otros resulta un aspecto crítico a la hora de generar modelos en tiempo real, y pueden conducir también a resultados dispares debido a la calidad del modelo, o a que parte de este sea inservible. Este aspecto es fundamental y se debe tener en cuenta para poder optimizar a su vez la generación de productos combinados como el producto del IGS, puesto que facilita la selección de un mensaje RTCM-SSR determinado de un producto de un centro de análisis individual en la estrategia de combinación.

Figura 6.17: Influencia de *outlier* en GLONASS. Doy 119/ 2014

6.4. Sesiones multi-constelación simultáneas.

Para finalizar se muestra la ejecución en paralelo de los tres escenarios posibles existentes. En las siguientes sesiones se utilizan los productos CLK10 (GPS), el CLK91 (GPS+GLONASS), y el producto CLKA1 con rastreo GPS+GLONASS+productos de la RED CONGO-GALILEO, (Capítulo 1). Con cada uno de ellos se recibe otro *stream* con las efemérides de la constelación correspondiente (GPS/GLONASS/GALILEO). Los gráficos obtenidos en esta prueba se representan a continuación, en los que los resultados se han transformado al marco ETRF2000. El periodo de las sesiones abarca las GPSWEEK 1728- 1729, 1733-1734, 1767 -1768, mostrándose una selección de gráficos:

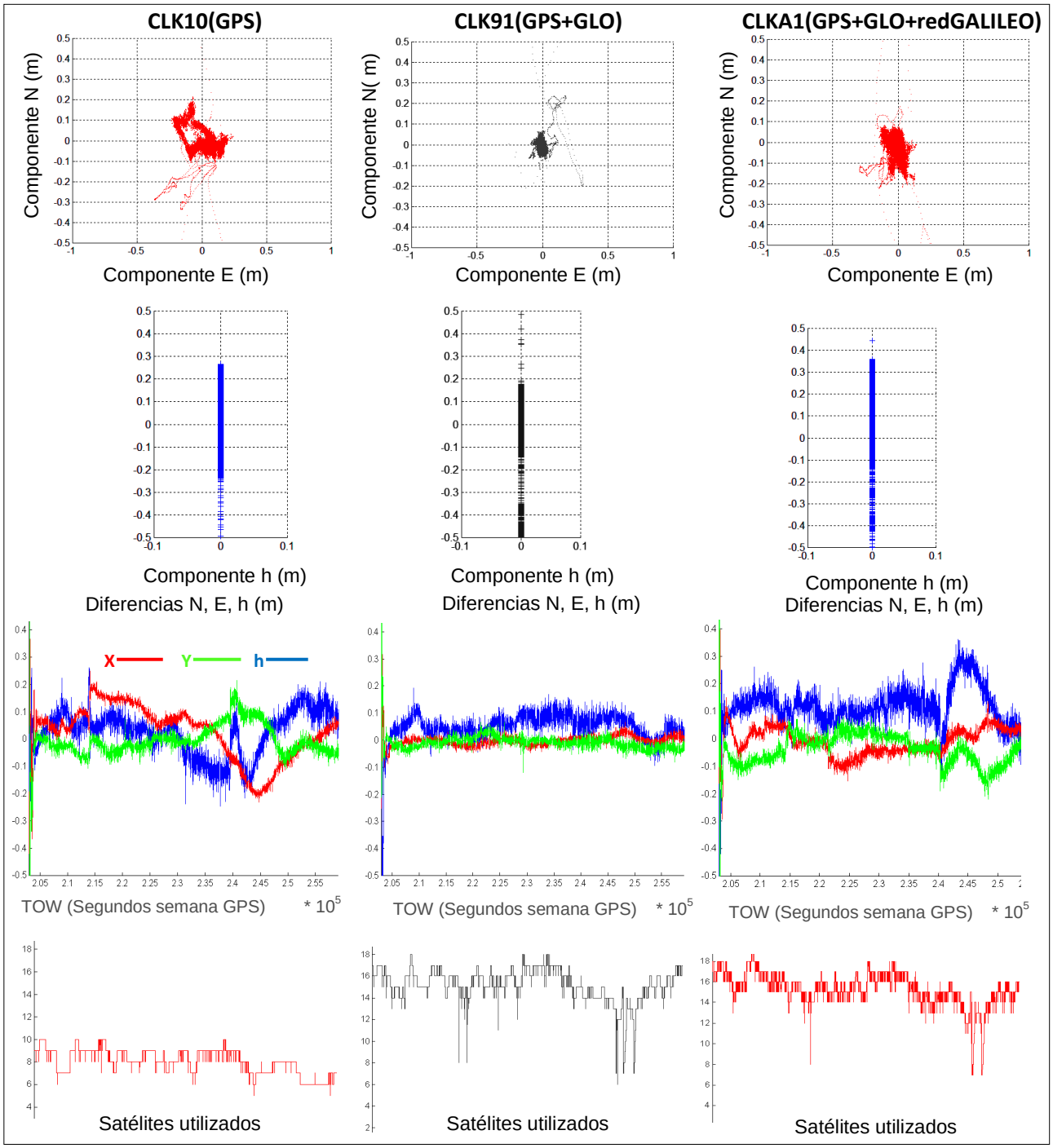


Figura 6.18: Doy 085 - 26/03/2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

Es necesario destacar que en este periodo ya se dispone de la presencia de 4 satélites GALILEO, (E11, E12, E19, E20).

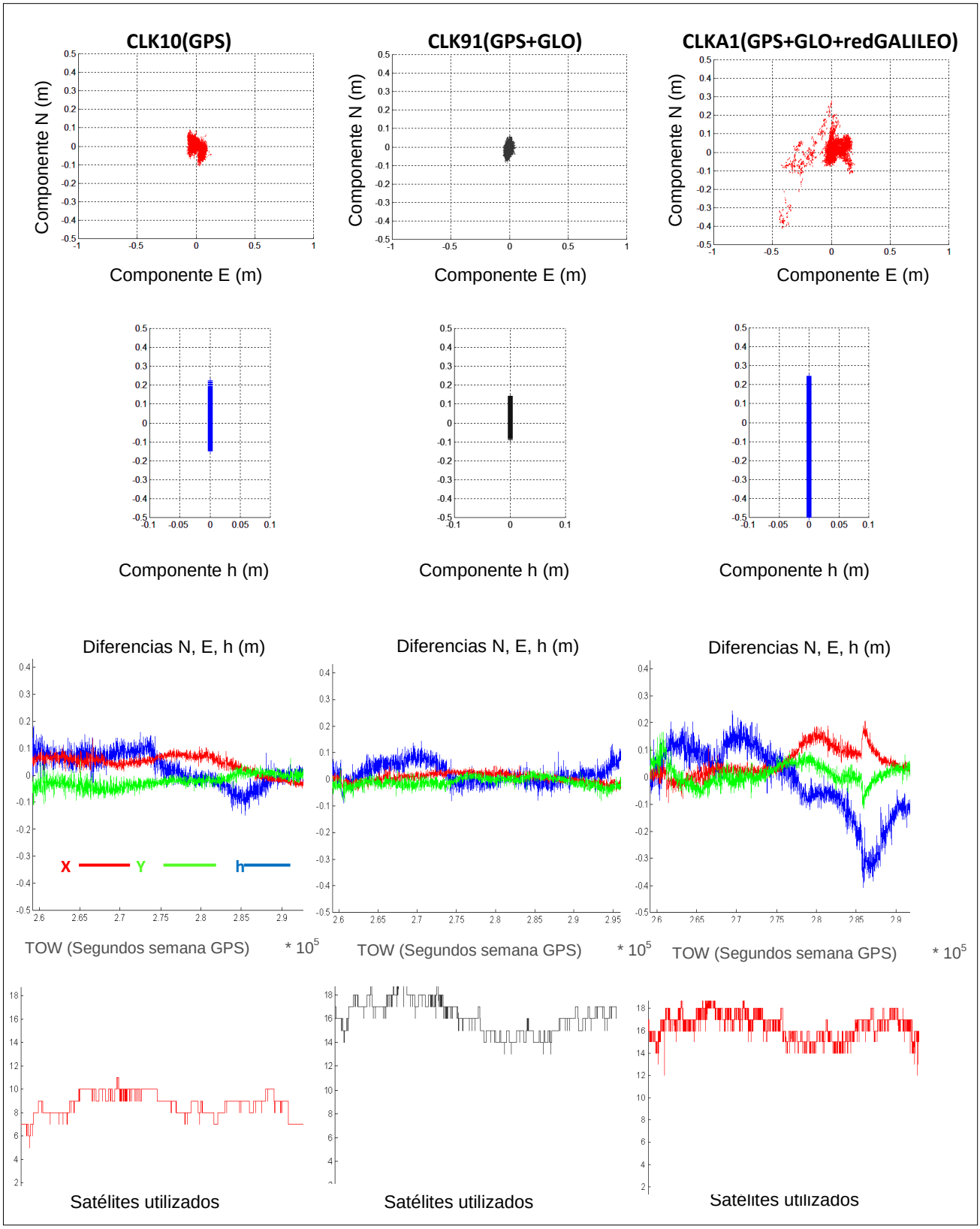


Figura 6.19: Doy 086 - 27/03/2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

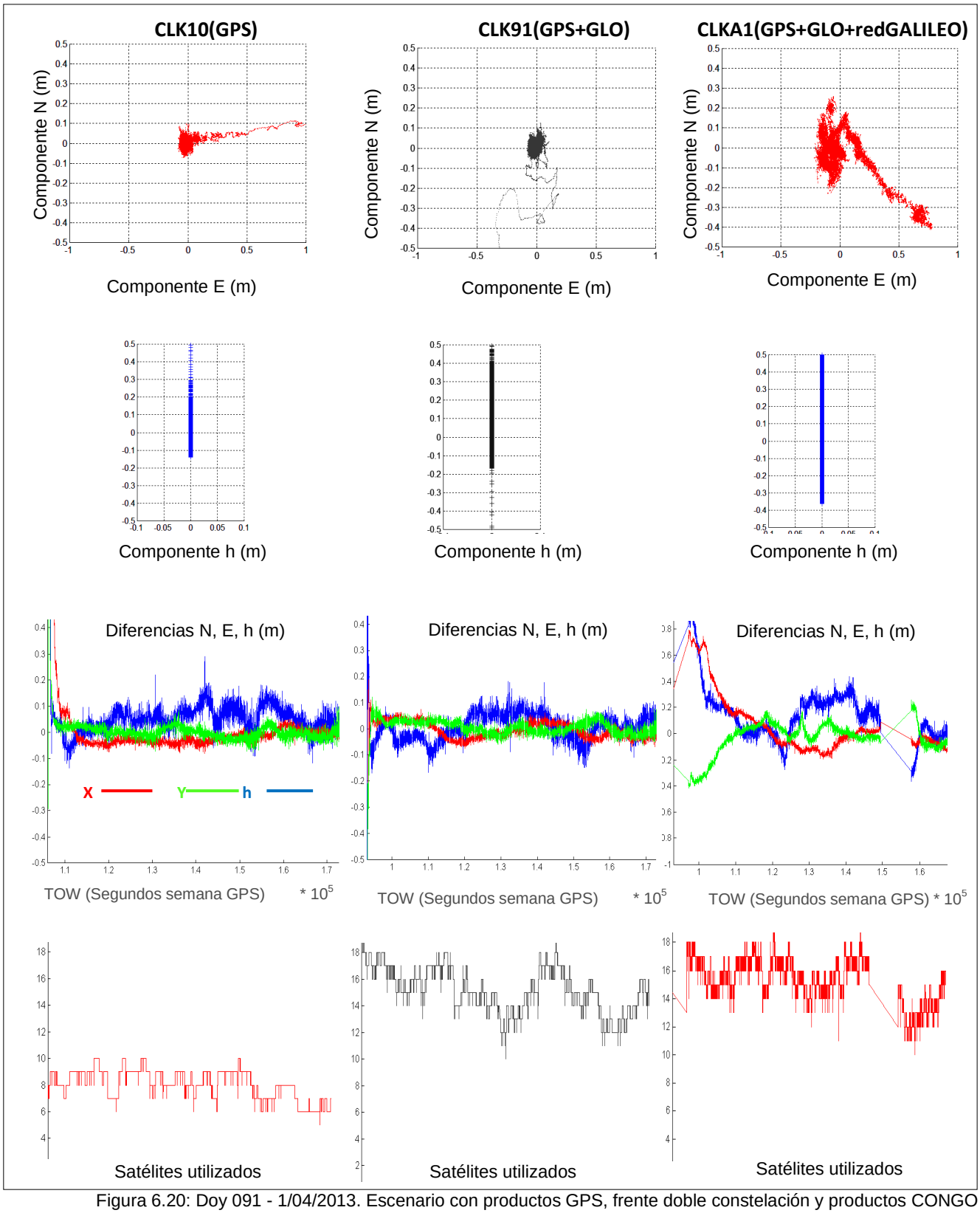


Figura 6.20: Doy 091 - 1/04/2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

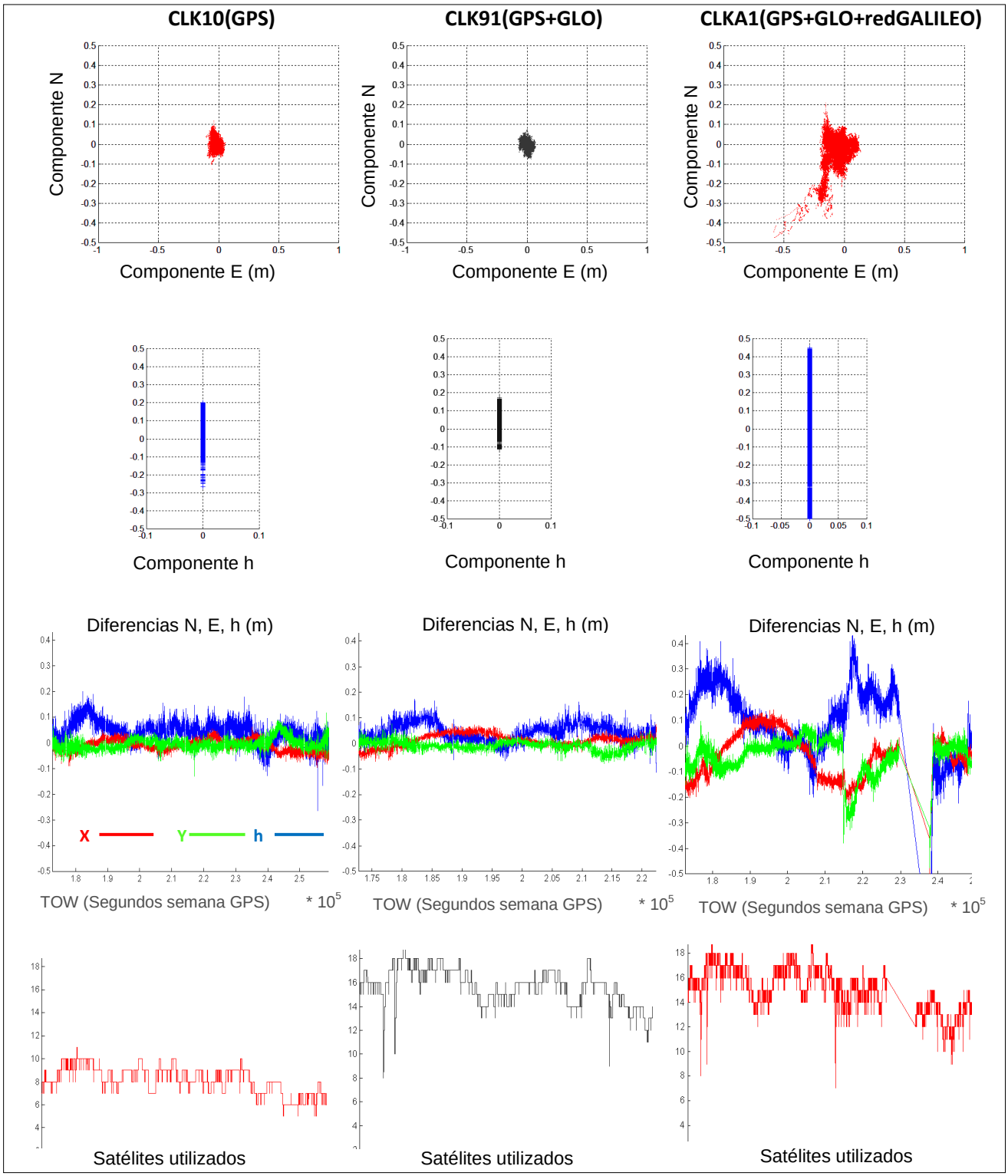


Figura 6.21: Doy 092 - 2/04/2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

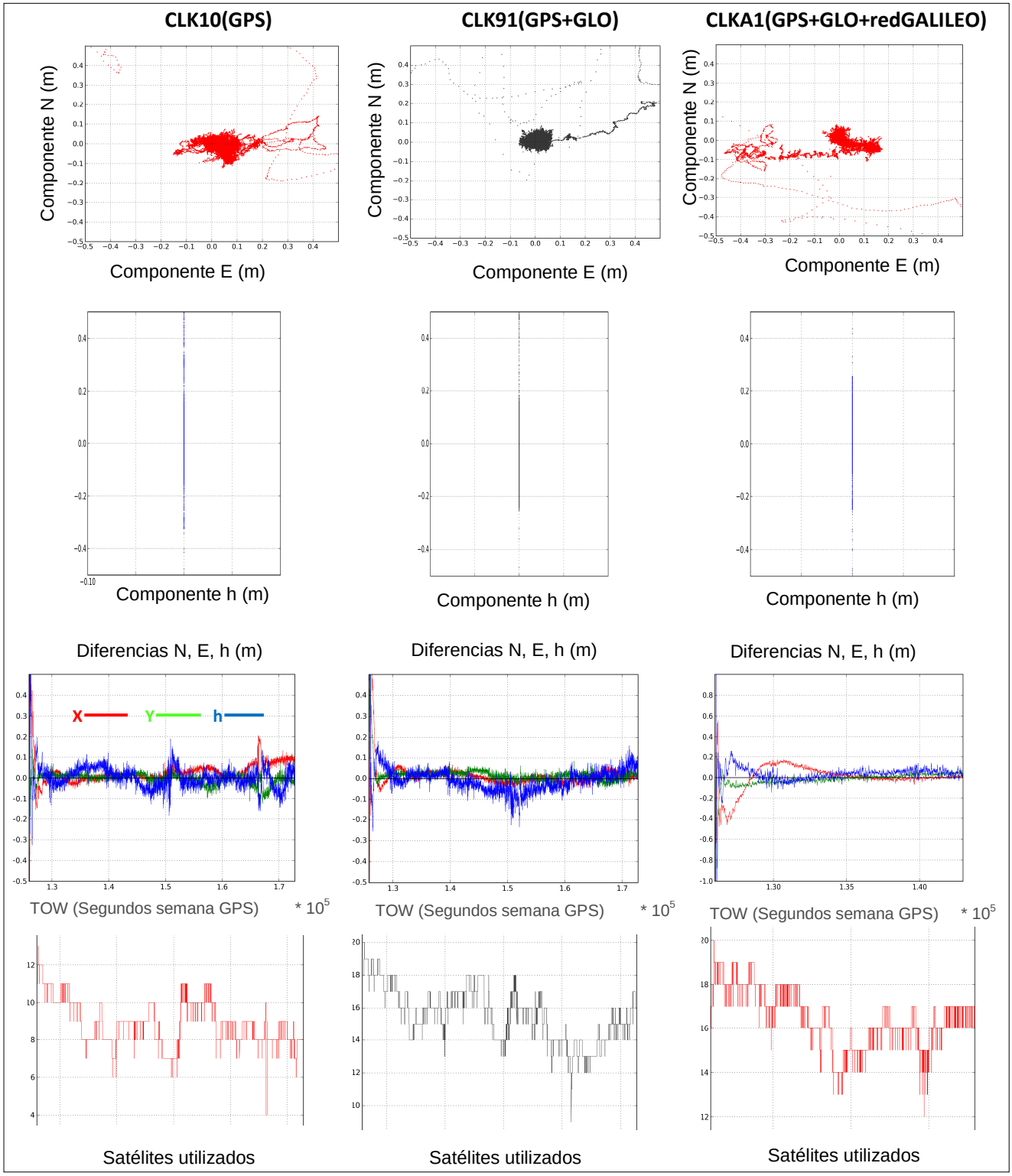


Figura 6.22: Doy 322 /2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

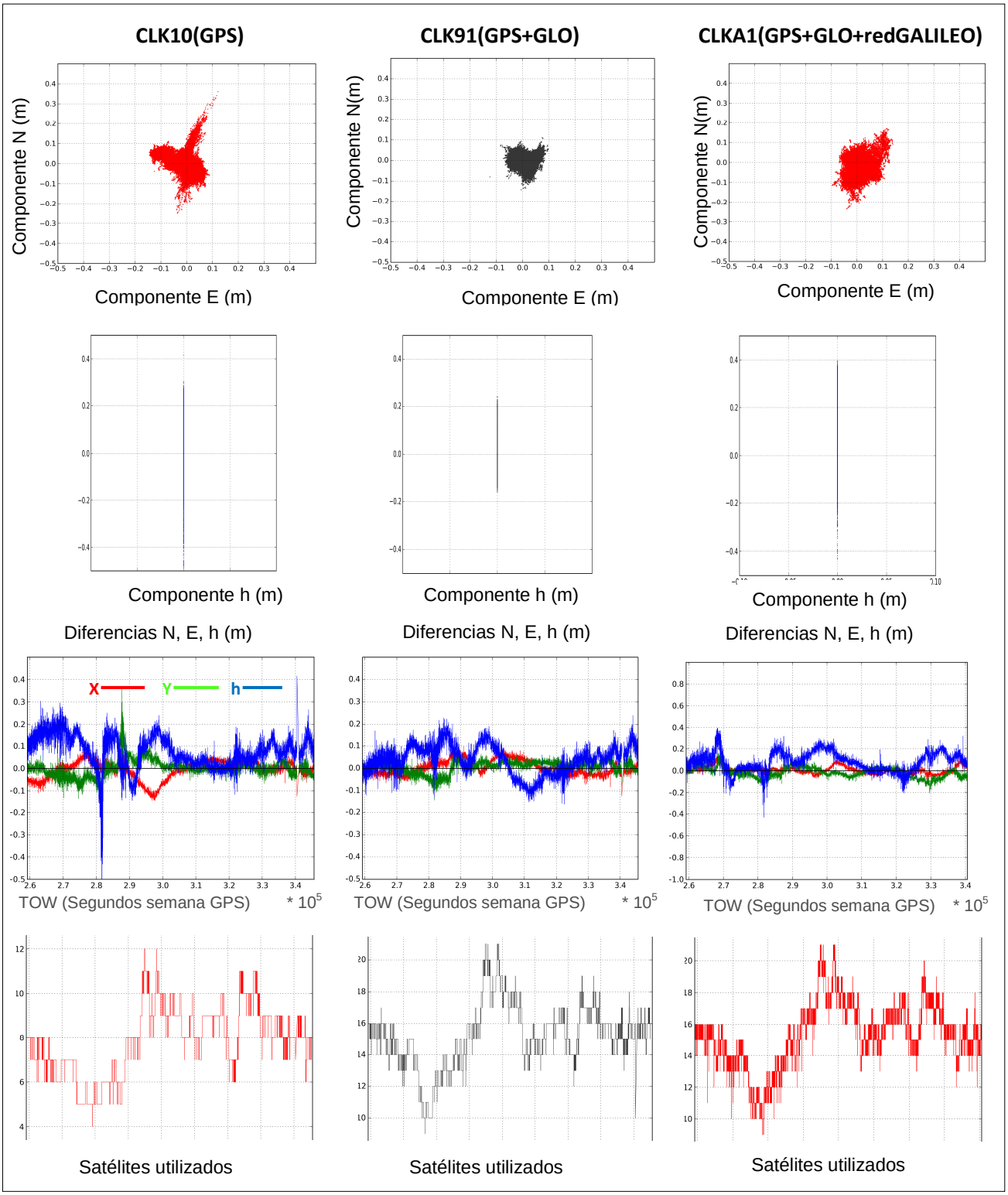


Figura 6.23: Doy 324 /2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

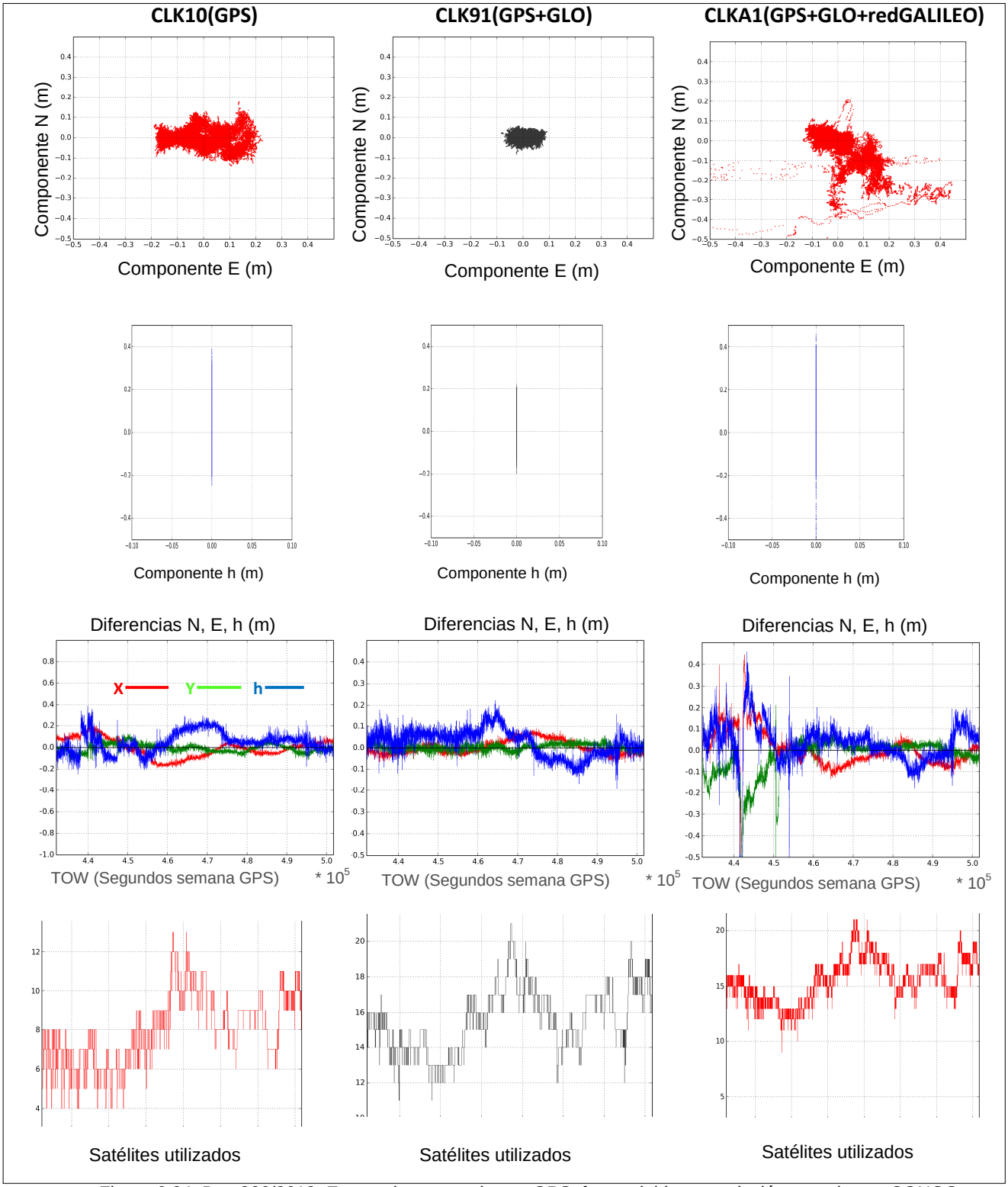


Figura 6.24: Doy 326/2013. Escenario con productos GPS, frente doble constelación y productos CONGO

A continuación se incluyen los estadísticos obtenidos en este escenario para los periodos de las GPSWEEK 1728- 1729, 1733-1734, 1767 -1768.

CLK10 (GPS)	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	7,3070	1,2230	3,8370	Mayor de 20 cm	11,7988	4,9465	12,4005
Valor Mínimo (m)	-2,5340	-2,6200	-4,1640	Menor de 20 cm	88,2012	95,0535	87,5995
Valor Promedio (m)	0,0821	0,0929	0,1014				
Valor Desviación estándar (m)	0,1371	0,1379	0,1653				
CLK91 (GPS+GLONASS)	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,7880	2,0280	4,0480	Mayor de 20 cm	1,2573	0,7353	1,5697
Valor Mínimo (m)	-1,0400	-2,9950	-5,5700	Menor de 20 cm	98,7427	99,2647	98,4303
Valor Promedio (m)	0,0280	0,0237	0,0586				
Valor Desviación estándar (m)	0,0464	0,0501	0,0943				
CLKA1 –GPS +GLONASS+CONGO	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,563	1,874	5,975	Mayor de 20 cm	3,1256	3,7132	15,7931
Valor Mínimo (m)	-1,082	-1,082	-3,82	Menor de 20 cm	96,8744	96,2868	84,2069
Valor Promedio (m)	0,065	0,056	0,1201				
Valor Desviación estándar (m)	0,090	0,084	0,1601				

Tabla 6.8: Estadísticos obtenidos en la solución PPP de GPS frente a doble-triple constelación

Con los resultados obtenidos se observa que el mejor rendimiento es obtenido en las sesiones que utilizan el producto CLK91 con la constelación GPS+GLONASS, tanto en el tiempo de inicialización, valores dentro de un rango determinado, promedios y desviaciones estándar.

Por el contrario, con el producto CLK10, (constelación GPS solo), empeoran los resultados, aunque los valores obtenidos siguen estando en el orden de las magnitudes esperadas. En el caso intermedio se encuentra la observación con el producto CLKA1. En este análisis la inclusión de GALILEO no mejora el resultado, respecto a las sesiones de doble constelación. Se detecta como con respecto a las sesiones presentadas en apartados anteriores, con este modelo la precisión refleja todavía resultados algo inestables. Los tiempos de convergencia también varían de un modelo a otro como se puede observar en función de los satélites que intervienen:

	CLK10-GPS		CLK91-GPS+GLONASS		CLKA1 RED CONGO	
Tiempo en alcanzar el rango	Min	seg	min	seg	min	seg
N,E a 20 cm	9	11	7	1	24	6
h a 20 cm	11	13	8	3	14	25
N,E a 5 cm	22	18	20	30	31	36
h a 5 cm	29	2	19	5	26	31

Tabla 6.9: Tiempo en alcanzar el rango dentro de un determinado umbral

Gráficamente puede observarse que el tiempo en alcanzar una posición que converja, (marcado en línea naranja vertical en el siguiente gráfico), es mejor en el caso del uso de doble constelación, así como el comportamiento en cuanto a estabilidad de la solución y eventuales pérdidas de precisión bajo un determinado umbral. Las líneas en negro verticales indican el periodo en que la solución se encuentra fuera de convergencia para un determinado día:

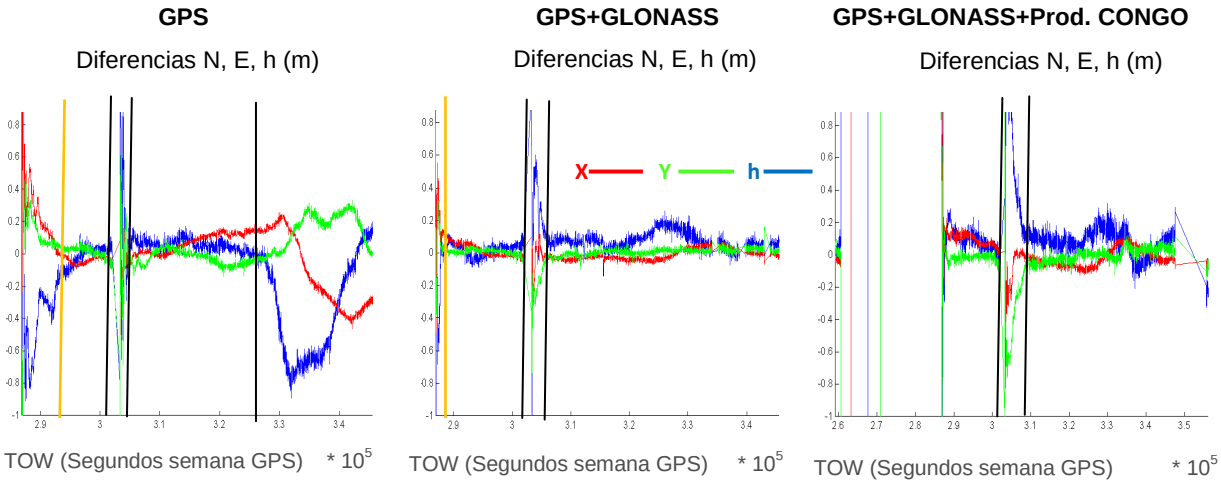


Figura 6.25: Tiempo en alcanzar convergencia y pérdidas.

Para finalizar puede analizarse dentro de que porcentaje de observaciones oscila el sesgo de la solución para cada una de las componentes, con un receptor GNSS L1/L2, en estos últimos escenarios:

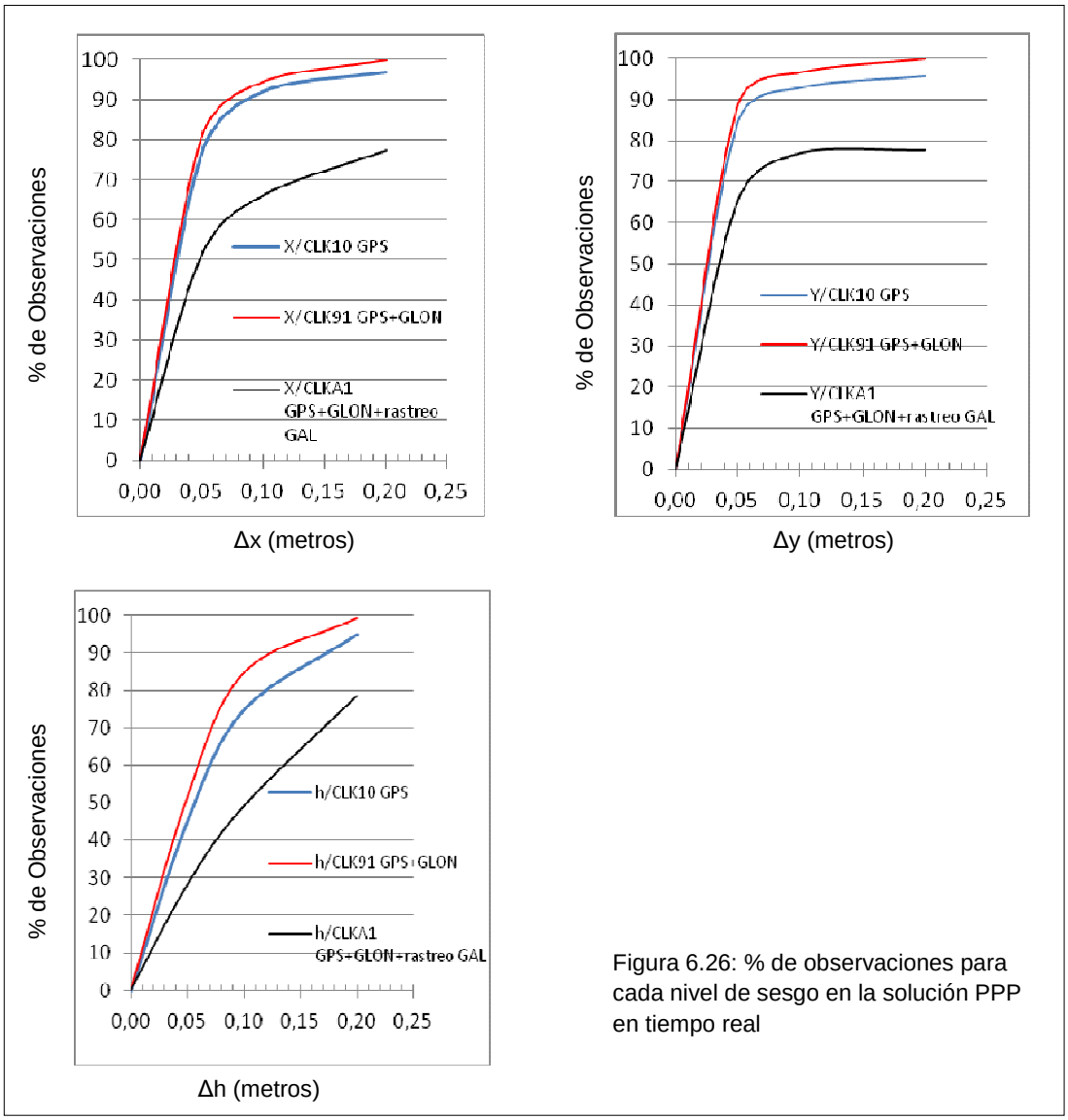


Figura 6.26: % de observaciones para cada nivel de sesgo en la solución PPP en tiempo real

6.5. Aportaciones del escenario y mejoras futuras

-Es necesario resaltar la potencia de los modelos multi-constelación, para mejorar las limitaciones implícitas de la técnica PPP en tiempo real. En lo referente al tiempo promedio en recuperar la convergencia para un determinado umbral una vez que esta se pierde, por ejemplo 20 cm, el uso de doble constelación repercute positivamente en la solución. Como se puede ver en el gráfico, las barras en negro representan el promedio en segundos en que se tarda en recuperar la convergencia para el caso de una solución GPS+GLONASS, y en verde se representan los segundos promedio en que se tarda en recuperar la convergencia en la solución GPS, para un modelo como el CLK91. El ejemplo que se adjunta, se ha obtenido para franjas de 24 horas para la componente h elipsoidal:

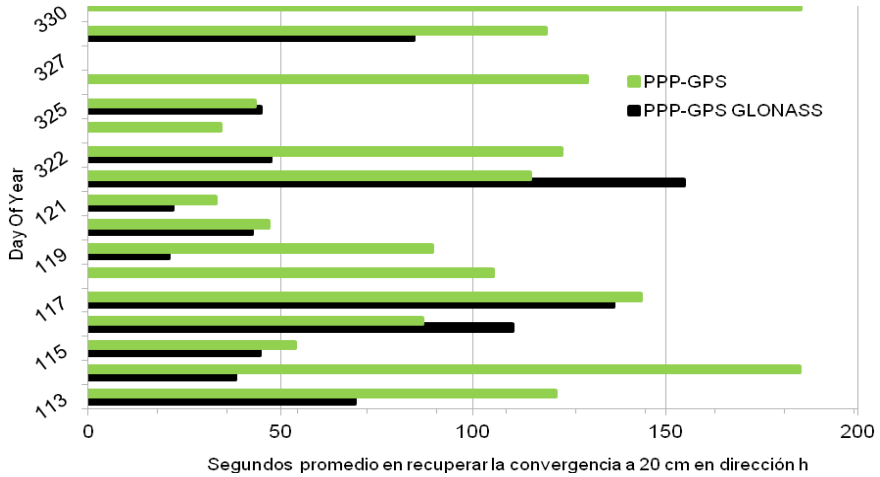


Figura 6.27: Tiempo promedio en recuperar la convergencia en dirección h en PPP tiempo real. GPS vs GPS+GLONASS

Un punto de discusión importante, además de la resolución, precisión o pérdidas de convergencia de los modelos, es la disponibilidad de los mismos. Por ejemplo, en la siguiente tabla se ha representado el porcentaje de valores que no superan 1 metro de error tras la aplicación de los distintos modelos de correcciones para el posicionamiento PPP en tiempo real.

	GPS	GPS+GLONASS	GPS+GLONASS+productos CONGO
% disponibilidad de la muestra	89,1%	95,1%	93,7%
% muestra rechazada	10,9%	4,9%	6,3%

Tabla 6.10: Estadísticos globales. Porcentaje de disponibilidad de la solución durante 1 mes.

Se detecta que con respecto al tamaño de las mediciones, los productos que utilizan conjuntamente las constelaciones GPS y GLONASS ofrecen una disponibilidad de muestra superior a los otros procesos.

Analizando más en detalle, con las muestras aceptadas del conjunto de observaciones, en la figura siguiente se representa el porcentaje de valores promedio dentro y fuera del rango de los 20 cm de variación respecto a las coordenadas de referencia, donde la doble constelación GPS+GLONASS ofrece porcentajes dentro del rango de 20 cm de error en torno al 99% de las observaciones.

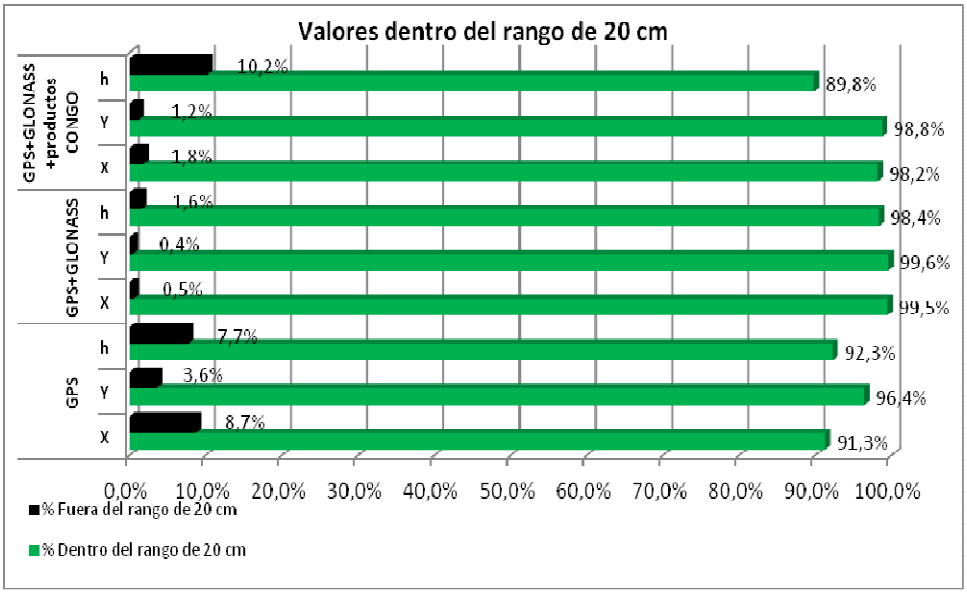


Figura 6.28: Valores en rango de 20 cm para varios escenarios

En lo que respecta a los promedios y desviaciones estándar obtenidos a lo largo de todas las sesiones de estos análisis, puede detectarse que el peor de los escenarios lo encontramos en el caso de utilizar solamente el rastreo de satélites de la constelación GPS para PPP en tiempo real. Este escenario ofrece *offsets* promedio de entre 6 y 10 cm de error. Para el caso de las desviaciones estándar, la conclusión es análoga.

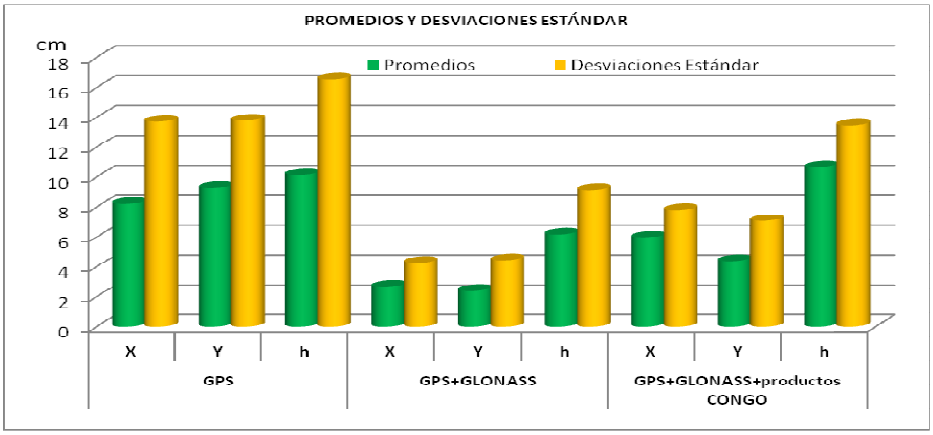


Figura 6.29: Estadísticos globales. Valores Promedio y Desviación Estándar por constelaciones rastreadas

Cabe señalar que al trabajar conjuntamente con las constelaciones GPS+GLONASS, en algunos casos los resultados mejoran en más de 5 cm por componente con respecto a las sesiones en que se utiliza solo GPS. Los productos de la red CONGO arrojan resultados con una precisión intermedia, no obstante son modelos en desarrollo que hay que seguir evaluando en el tiempo con el lanzamiento de nuevos satélites GALILEO.

-Como resumen y análisis detallado, se plasma a continuación en los diagramas de barras los valores promedio $\boldsymbol{\mu}$ y las desviaciones estándar $\boldsymbol{\sigma}$ por días. Para cada día se presentan dos juegos de estadísticos con la técnica PPP en tiempo real, y con la técnica PPP en post-proceso, para las componentes X,Y,h. Se puede observar como oscila cada solución dentro de los distintos rangos de precisión, con la constelación GPS, con la constelación GPS+GLONASS y con los productos experimentales de la red CONGO. Para el post-proceso realizado se han utilizado los mismos modelos de correcciones empleados en la observación en tiempo real.

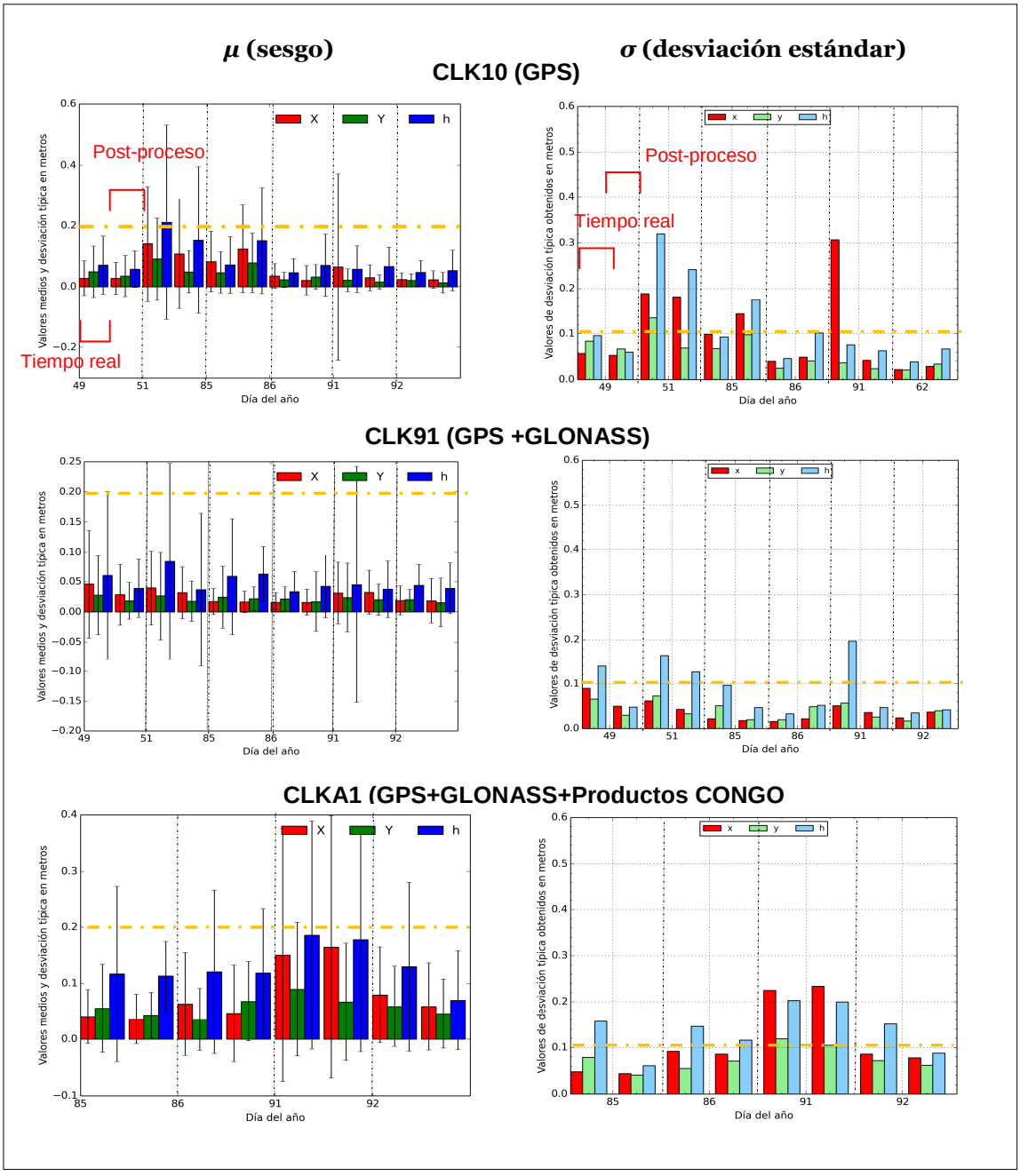


Figura 6.30: Resumen de precisiones diarias PPP en tiempo real frente a PPP en post-proceso para varios escenarios multi-constelación, (Doy 49-92/2013).

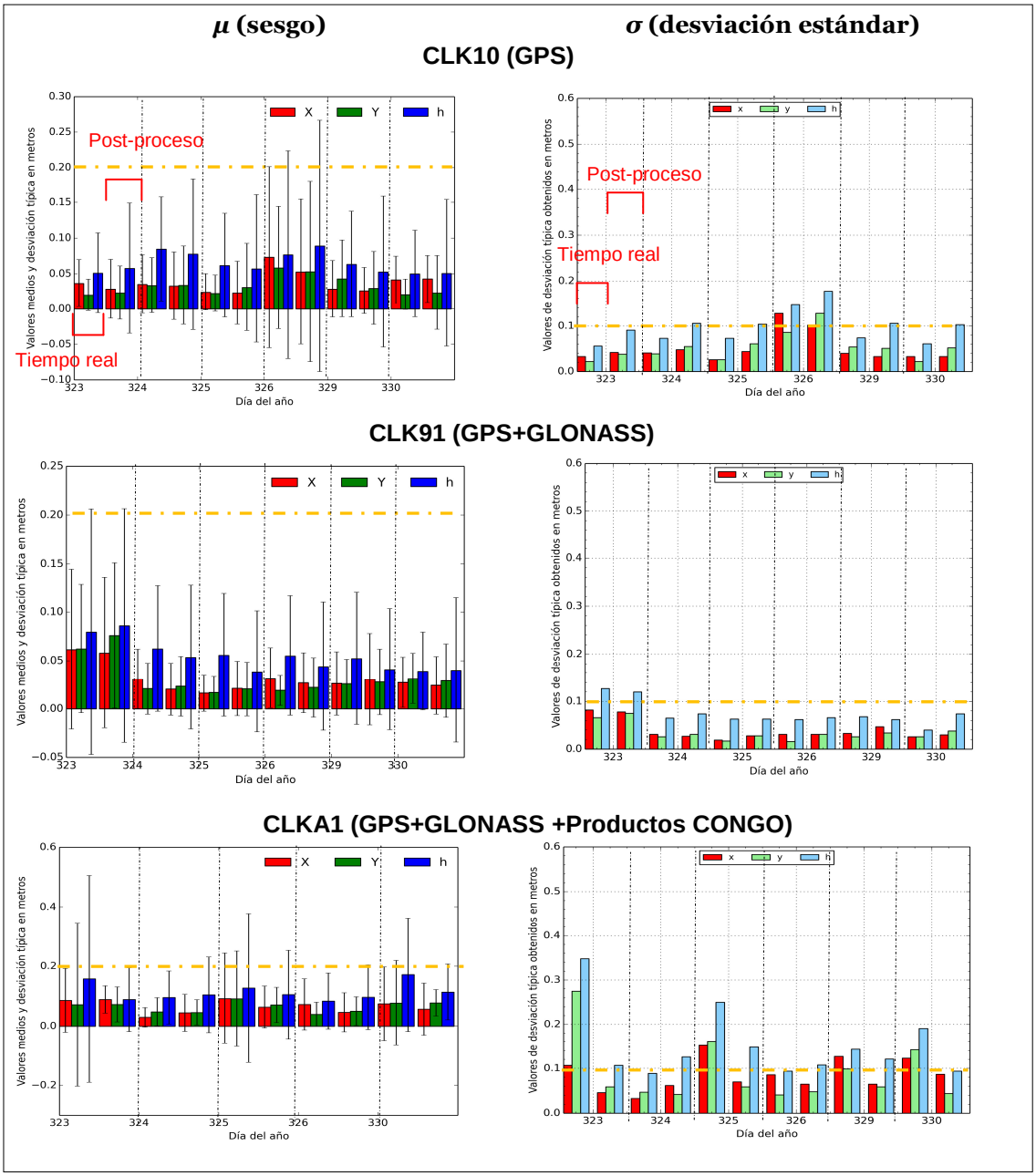


Figura 6.31: Resumen de precisiones diarias PPP en tiempo real frente a PPP en post-proceso para varios escenarios multi-constelación, (Doy 323-330/2013)

Si se representa conjuntamente todos los escenarios posibles analizados para cada modelo, puede observarse el rendimiento superior de los productos GPS+GLONASS, tanto si corresponden a un centro de análisis como si son productos combinados finales. En los dos siguientes gráficos se muestra el valor promedio $\boldsymbol{\mu}$ para cada escenario junto con los máximos y mínimos (línea discontinua verde), y la desviación estándar $\boldsymbol{\sigma}$.

Obsérvese también la diferencia entre los modelos del IGS combinados y el resto. Los modelos de un solo centro de análisis arrojan resultados más óptimos como puede detectarse. Las peculiaridades y posibles mejoras de los productos combinados del IGS serán tratadas en el capítulo 8.

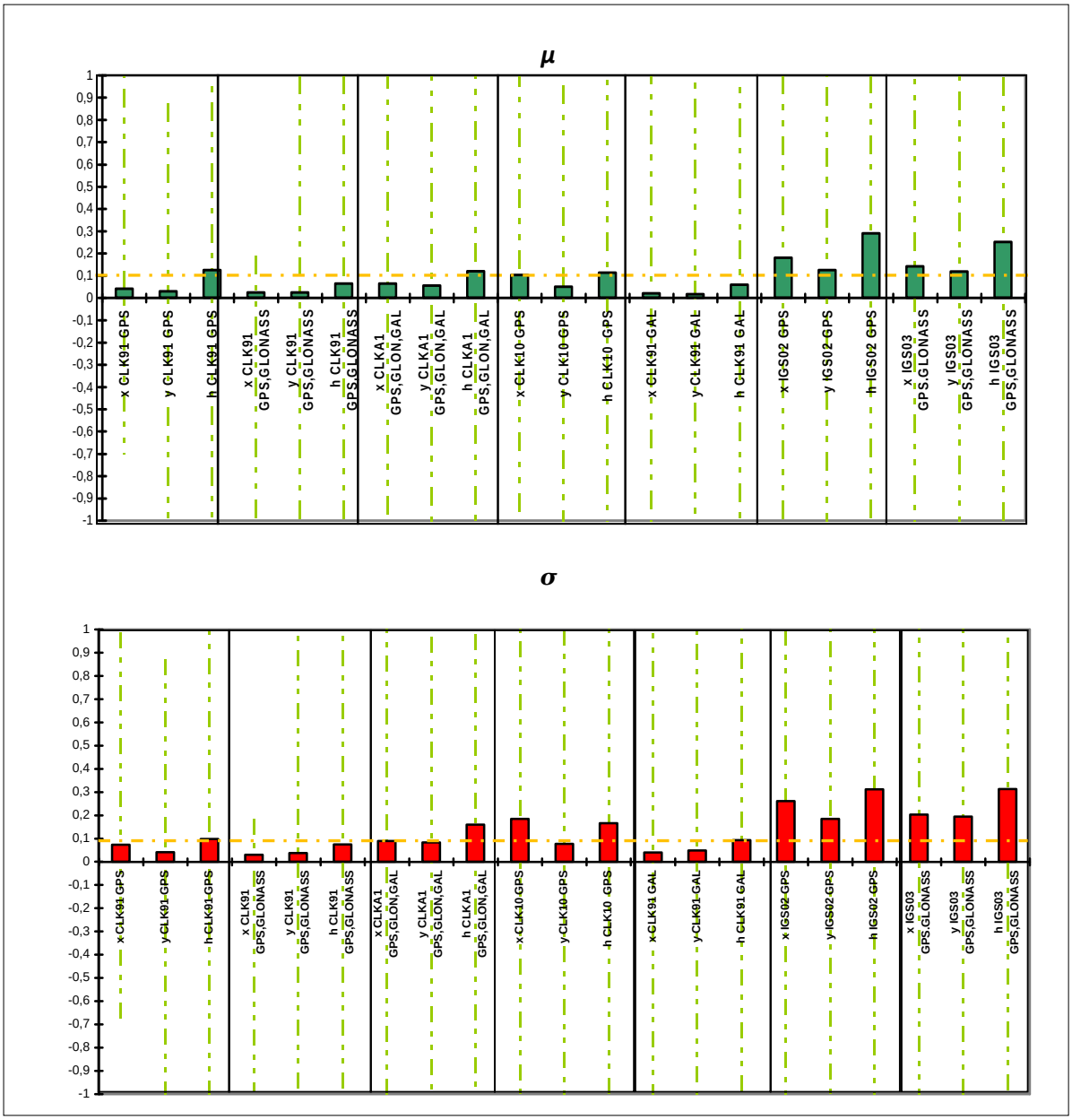


Figura 6.32: Resumen precisiones totales por producto y constelación

-En cuanto al uso de productos experimentales generados con el rastreo de la constelación GALILEO, hay que insistir en que el sistema GALILEO aún se encuentra en su fase de despliegue para alcanzar plena operatividad, mientras se añaden aún más satélites a su constelación, y mientras se desarrollan productos de correcciones de órbitas y reloj a partir de esta constelación bajo estrategias homogéneas. Un aspecto importante a considerar, es que los modelos deben ser productos creados a partir de combinaciones de señales, que deben ser coherentes con la combinación de observables que el usuario sea capaz de realizar en el lado del receptor.

Paulatinamente, las distintas estaciones y versiones de software utilizados en observaciones y análisis GNSS se van adaptando a la inclusión de nuevas constelaciones. El conocimiento para el modelado de las órbitas y relojes de GALILEO, así como el de otros efectos (*phase wind-up,* presión de radiación solar etc..), debe progresivamente irse depurando con el paso del tiempo. Adicionalmente, al igual que el incremento de receptores GLONASS ha resultado determinante en las redes para generar productos más óptimos durante la última década, la presencia creciente de satélites GALILEO, los análisis sobre su funcionamiento y productos derivados, más el aumento de receptores que rastreen esta constelación, favorecerá el rendimiento futuro de los modelos, tanto para post-proceso como para tiempo real.

Capítulo 7:

Impacto de la recuperación del número entero de ambigüedades en tiempo real

Como se ha mostrado en capítulos anteriores la posibilidad de alcanzar la resolución de las ambigüedades enteras de fase ha hecho grandes avances en los últimos años. A través de las combinaciones de observables y empleando distintos métodos (*IRC*[1], *FBC*[2]…) explicados en el capítulo 2, es posible recuperar el carácter entero de la ambigüedad en posicionamiento absoluto PPP con observaciones de más de una frecuencia.

7.1. Desarrollo del método

El posicionamiento PPP en tiempo real sin ambigüedades enteras recibe el nombre de PPP estándar. Implícitamente, al no utilizarse las dobles diferencias, no es posible cancelar las ambigüedades, y el término de la ambigüedad pierde su naturaleza entera, quedando remanente su parte fraccional. Esta parte fraccional constituye los efectos sin modelar, (o retardos de fase no calibrados), del posicionamiento absoluto, definida como un *bias* dependiente del receptor y del satélite. La expresión para la ambigüedad flotante N_i ' se denota como (Lachapelle et al., 2006).

$$N'_i = N_i + b_i(t_0) = N_i + bi,rec(t_0) - bi,sat(t_0)$$

Donde:
N_i sería el valor entero de ambigüedades

$b_i(t_0)$ el *bias* del observable fase

$bi,rec(t_0) - bi,sat(t_0)$ es la descomposición del anterior en la parte correspondiente a receptor y satélite.

De los métodos enumerados para aproximarnos a la parte fraccional de la ambigüedad, en concreto el método *IRC*, consiste en emplear las combinaciones de observables junto con los valores estimados de las correcciones a las componentes orbitales y velocidades, para estimar modelos de estados de reloj de los satélites. Este modelo de reloj tiene una característica especial, (Laurichesse, 2011), y es que

[1] *Integer Recovery Clocks*
[2] *Fractional Cycle Biases*

permite resolver la posición para un solo receptor por la técnica PPP, fijando ambigüedades enteras en el proceso.

La ventaja del método, es que también se puede extender al posicionamiento PPP en tiempo real. La base de la implementación del problema en tiempo real es la aplicación de un filtro recursivo de Kalman capaz de trabajar tanto con las ambigüedades flotantes como con las enteras, determinando el *bias* $b_i\ (t_o)$ del valor real de la ambigüedad, como un parámetro más dentro de los modelos determinados simultáneamente a la generación de productos orbitales y estados de reloj de los satélites durante la aplicación del filtro.

Estos productos sometidos a la estandarización *SSR (State Space Representation),* pueden ser emitidos y empleados por los algoritmos que utiliza la técnica PPP en tiempo real.

Por tanto, es posible de manera análoga a la estandarización existente, definir y aplicar el contenido del mensaje SSR para la emisión del valor del *bias* de fase para la recuperación de ambigüedades enteras. Atendiendo a la estandarización *SSR* ya definida para los *bias* del observable de pseudodistancia, en la siguiente tabla se muestra el contenido del mensaje 1059 emitido con los modelos de reloj y órbitas de satélites *CLKxx*:

Mountpoint	*Bias tipo*	*Rastreo*	*Código numérico*	*Unidades*
CLKxx, CLKyy	b_{CA}	GPS	0	m
	b_{P1}	GPS (receptores con Z-tracking)	2	m
	b_{P2}	GPS (receptores con Z-tracking)	11	m
	b_{C2}	GPS con L2C	9	m
	b_{CA}	GLONASS	0	m
	b_{P1}	GLONASS	1	m
	$b_{CA\ L2}$	GLONASS-M	2	m
	b_{P2}	GLONASS	3	m
	...			

Tabla 7.1: Aproximación estándar para la emisión del *bias* del observable código
(SSR Standard definition, RTCM Paper-2010, Special Comitte-104_v04)

En definitiva, los sesgos b_{CA}, b_{C2}, b_{P1}, b_{P2} están contenidos ya en el estándar RTCM –SSR actual, son emitidos por varios productos existentes y utilizados para aplicar los *bias* a los distintos observables de pseudodistancia para cada código *CA, C2, P1, P2* etc...

La extrapolación de la estandarización al caso del *bias* de fase, se ha realizado en la práctica en el contexto del proyecto PPP –Wizard[3] (Laurichesse et al., 2012), llevado a cabo por parte de investigadores del CNES[4] , dando lugar a la siguiente aproximación:

Mountpoint	*Bias tipo*	*Código numérico*	*Unidades*
CLK9A, CLK9B	b_{CA}	0	m
	b_{P1}	2	m
	b_{P2}	11	m
	....	....	....
	b_{L1}	21	Ciclos de portadora
	b_{L2}	22	Ciclos de portadora

Tabla 7.2: Aproximación experimental para la emisión del *bias* de fase
(PPP-Wizard Interface Control Document, 2012)

El modelo del CNES ha sido uno de los pioneros en emitir el *bias* de fase de forma experimental a través de mensajes auxiliares. Posteriormente, los sesgos o *bias* para las portadoras (b_{L1}, $b_{L2, ...}$), se han definido de manera oficial dentro del estándar RTCM-SSR actual (Wübbena, 2014). Según el nuevo estándar, el mensaje que contiene el *bias* de fase debe utilizar un indicador del tipo de señal y

[3] *Precise Point Positioning With Integer And Zero difference Ambiguity Resolution Demonstrator*
[4] *Centre National d'Etudes Spatiales –France.*

modo de rastreo para describir las propiedades de la señal real. Los sesgos de fase reportados en el mensaje SSR deben ser añadidos a las mediciones de fase correspondientes a las señales GPS L1, L2, L5, del mismo modo para otras constelaciones como GLONASS, y también está contemplado para constelaciones en desarrollo como GALILEO, y devolver así a las ambigüedades el carácter entero en cualquier observable de fase.

Añadiendo los *bias* a las mediciones, los observables de pseudodistancia y fase resultan:

$$CA' = CA + b_{CA} \ldots \quad C_2' = C_2 + b_{C2}$$
$$P_1' = P_1 + b_{P1} \ldots\ldots \quad P_2' = P_2 + b_{P2}$$
$$L_1' = L_1 + b_{L1} \ldots\ldots \quad L_2' = L_2 + b_{L2} \ldots.$$

Por lo tanto, un centro de análisis proveedor de modelos de osciladores y órbitas emitidos en formato RTCM-SSR debe soportar tantas señales como sea posible, existentes en el contexto multi-constelación.

En primera instancia, si se asume que los *bias* del observable código están definidos y son conocidos, es posible extender la definición éstos para el caso del observable de fase, (Laurichesse, 2012), partiendo de la expresión:

$$P_1' = P_1 + b_{P1} \approx \rho + Tr + \Delta h + \ldots + I + bi \ldots$$

Denotando como ρ a la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, y como Δh *a* la diferencia entre los relojes del receptor y emisor obtenidos de la combinación libre de ionosfera, para simplificar.

La aproximación para la fase en el caso de dos frecuencias se puede asemejar para b_{L1}, b_{L2} :

$$L_1' = L_1 + b_{L1} \approx N_1 + \frac{\rho + \Delta h}{\lambda_1} \quad \ldots\ldots$$

Con $\lambda_1 = \frac{c}{f_{L1}}, \lambda_2 = \frac{c}{f_{L2}}$ y *N1* el valor entero de ambigüedad en L1.

Para las dos frecuencias, los sesgos de fase pueden ser fácilmente calculados, llegando a la expresión derivada de la formulación expuesta en el capítulo 2 y presentada en Laurichesse, (2012):

$$\begin{pmatrix} b_{L1} \\ b_{L2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\gamma_2 \lambda_1 - \lambda_2} \begin{pmatrix} -\lambda_2 & 1 \\ -\gamma_2 \lambda_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_W - \alpha_1 b_{P1} & -\alpha_2 b_{P2} \\ \gamma_2 - 1 & H_P - H_L \end{pmatrix}$$

Siendo: $\gamma_2 = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2, \alpha_1 = \frac{1}{\gamma_2 - 1}, \alpha_2 = \gamma_2 \alpha_1$

Hw y H_P *son los bias* obtenidos de las distintas combinaciones de observables y H_L es el estado del reloj proporcionado por el IGS.

7.2. Modelos utilizados para la resolución de ambigüedades enteras en tiempo real

7.2.1. Análisis del prototipo basado en la combinación de observables

El prototipo de modelo de correcciones de oscilador y de órbitas, analizado en este apartado, que contiene el *bias* para la recuperación de ambigüedades enteras, se emite de manera experimental con el mountpoint denominado CLK9A, referido al centro de masas del satélite (COM) y con el mountpoint CLK9B, referido al centro de fase de la antena del satélite (APC) y es generado por el

CNES[5].
Para la evaluación del impacto de la resolución fija de la ambigüedad en PPP en tiempo real, se han simultaneado sesiones aplicando los modelos CLK91, y el modelo experimental para la emisión del *bias* de fase, sobre observaciones GPS+GLONASS con dos frecuencias a 1 Hz del mismo receptor. La siguiente tabla muestra los *mountpoint* de las correcciones orbitales y de reloj disponibles en el servidor del CNES que emiten, no solo las correcciones estándar, sino también el *bias* con la parte fraccional de las ambigüedades.

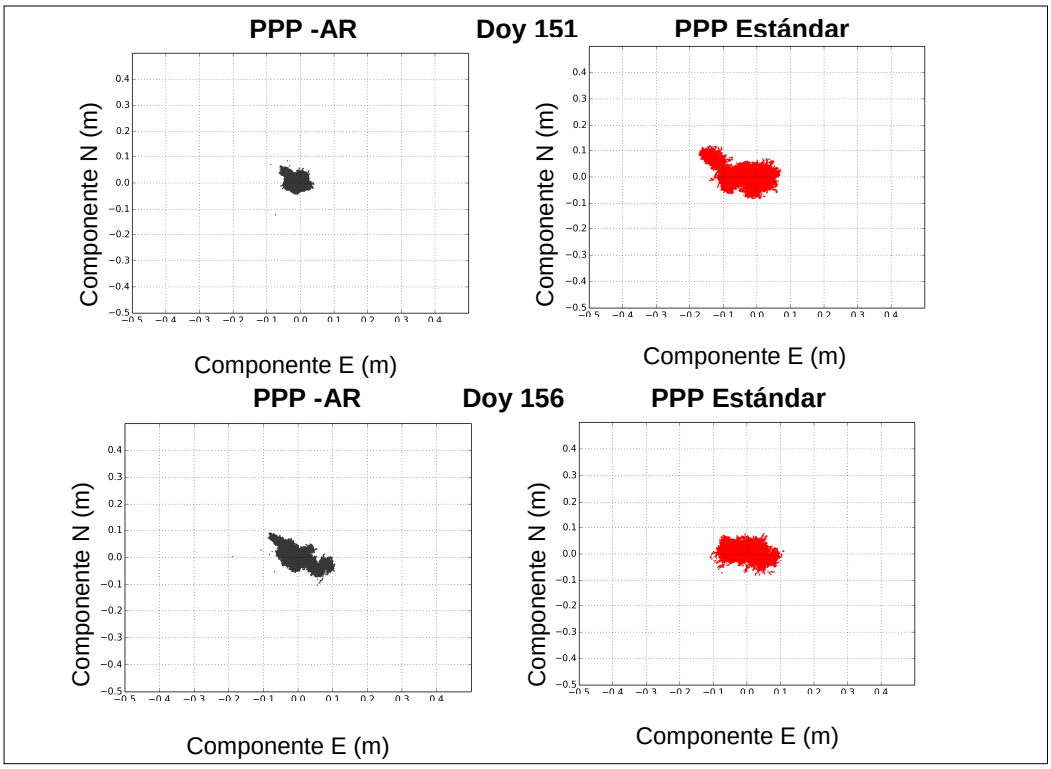
Mountpoint	Referido a	Constelación	Tipo de órbitas	Contenido
CLK9A	COM	GPS+GLONASS	IGU	RTCM-SSR+ bias para resolución de ambigüedad entera
CLK9B	APC	GPS+GLONASS	IGU	RTCM-SSR+ bias para resolución de ambigüedad entera

Tabla 7.3: Contenido de los modelos con *bias* de fase. (www.ppp-wizard.net, Visitado: Junio 2014)

Para su emisión se almacena el *bias* en el mensaje 1059. De este modo, se proporciona una solución PPP con resolución de ambigüedades, también denominada PPP-AR (ambigüedades resueltas) o PPP-RTK. Este prototipo se caracteriza porque se obtiene de una combinación libre de ionosfera entre señales en el lado del servidor, y para su uso se requiere utilizar una combinación con las mismas señales del lado del usuario. Para su aplicación se ha empleado una particularización de las librerías C++ del BNC, (BKG NTRIP Caster), elaborada por el CNES y recompilada para poder ser utilizada.

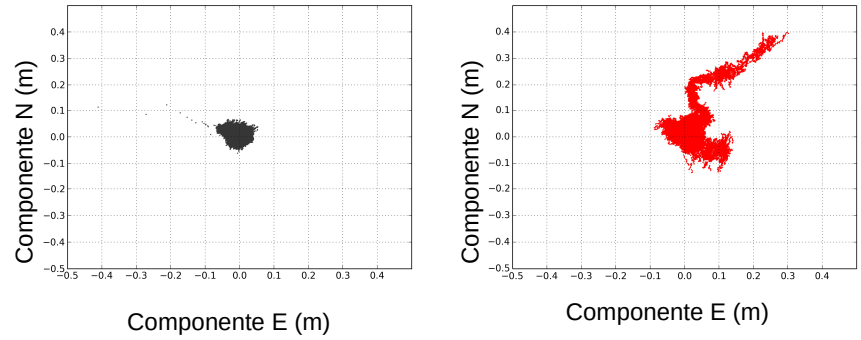
Resultados del análisis

Los resultados que se muestran a continuación consisten en los sesgos XY y las diferencias en las posiciones cinemáticas época a época en las componentes X,Y,h, de las aproximaciones PPP-AR (Ambigüedades Resueltas) y PPP estándar de las sesiones en tiempo real efectuadas en las GPSWEEK 1794-1798. En la solución PPP-AR se emplea el prototipo experimental explicado y en la solución PPP Estándar, se utiliza el modelo CLK91 generado por el mismo centro de análisis.

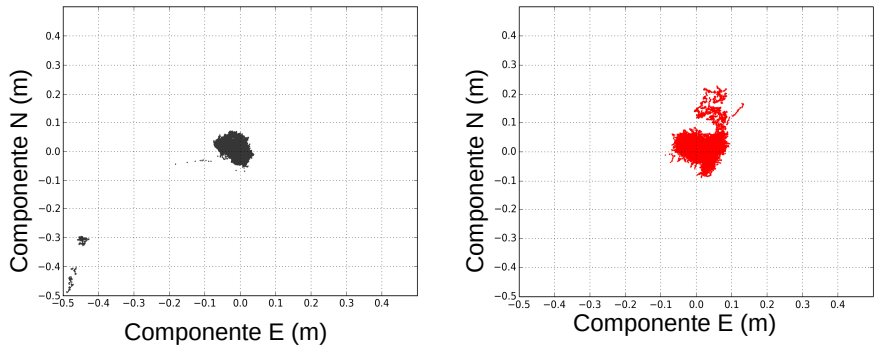


[5] *Centre National d'Etudes Spatiales –France.*

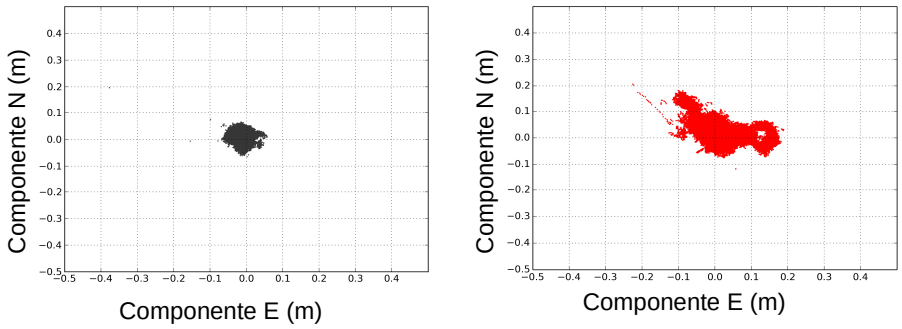
PPP -AR **Doy 161** **PPP Estándar**



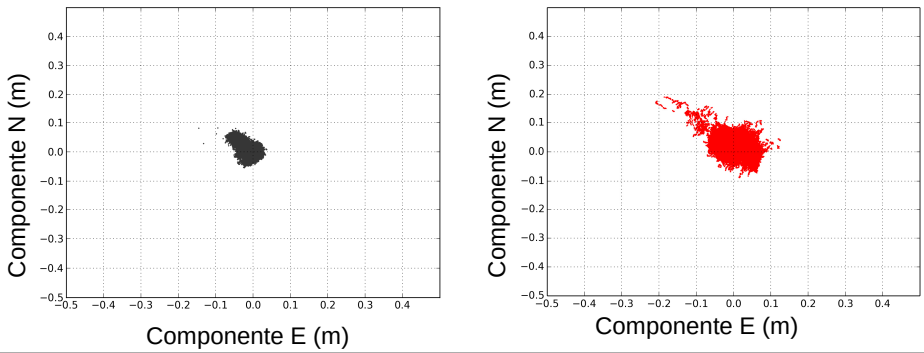
PPP -AR **Doy 163** **PPP Estándar**



PPP -AR **Doy 168** **PPP Estándar**



PPP -AR **Doy 171** **PPP Estándar**



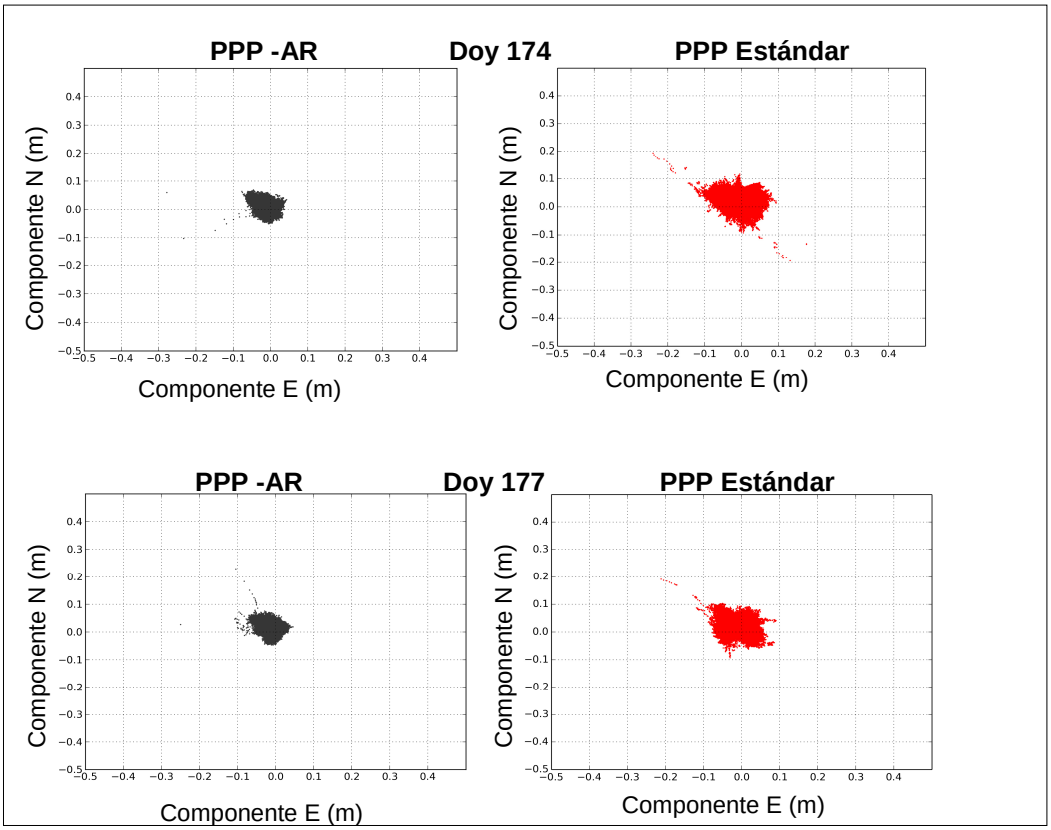


Figura 7.1: Sesgo N,E para las soluciones PPP-AR y PPP-estándar. Doy 151,156,161,163,168,171,174,177/ 2014.

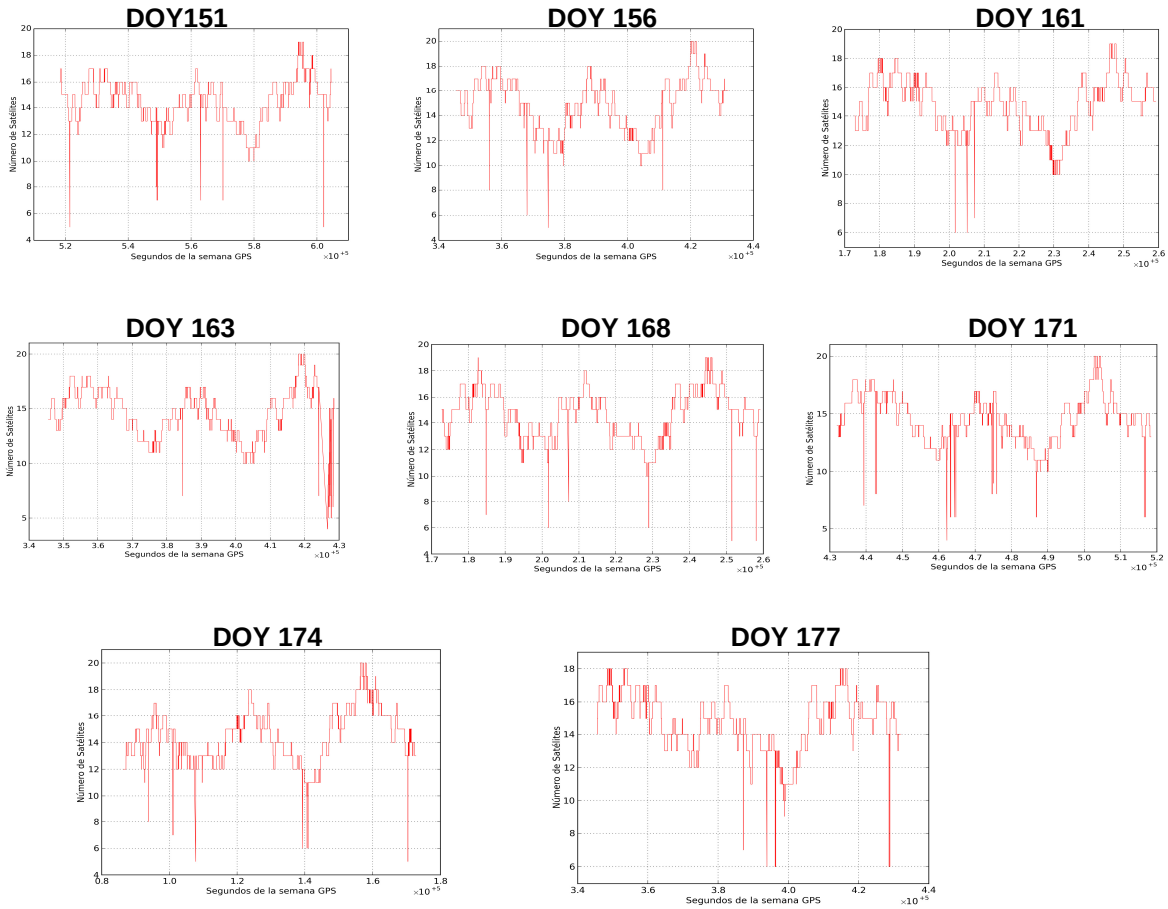
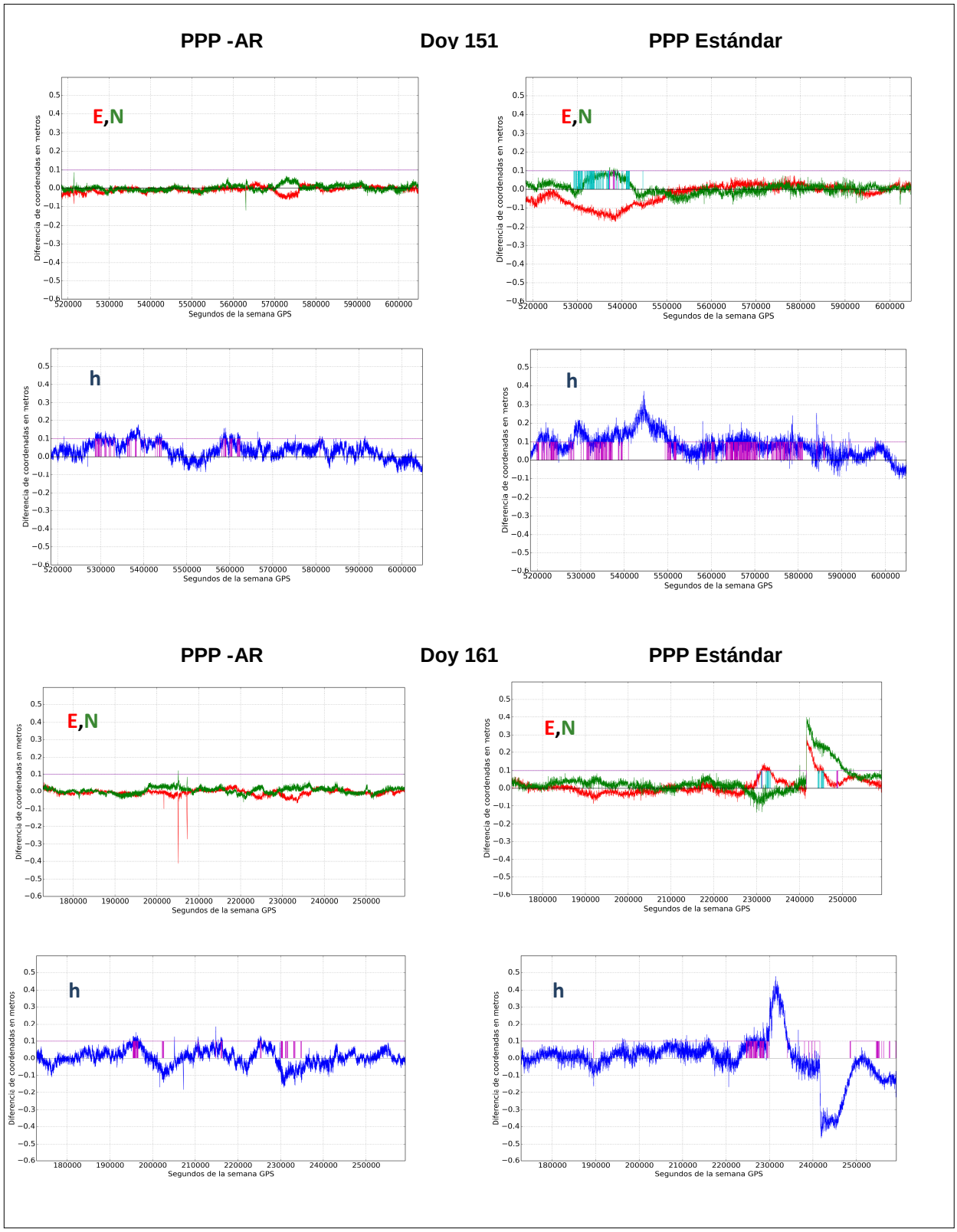
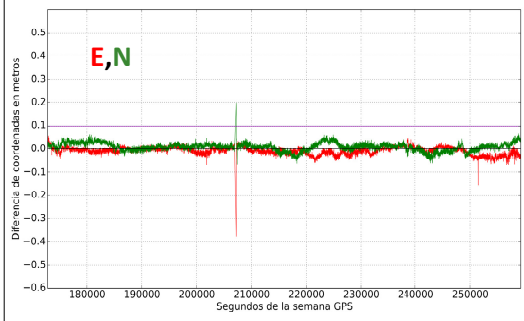


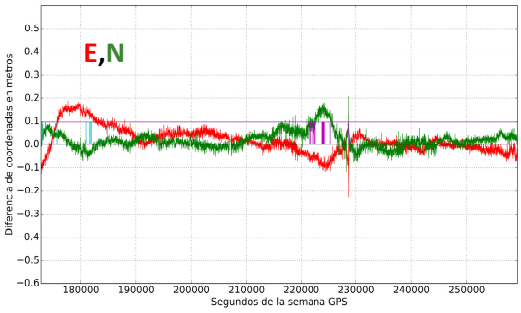
Figura 7.2: Constelación rastreada para las soluciones PPP-AR y PPP-estándar

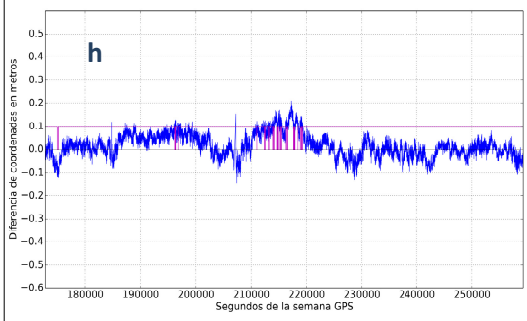
Evaluando con más detalle la observación época a época para las componentes N,E y h, se ha implementado una librería en *Python* para analizar las pérdidas de convergencia (señaladas con una barra vertical en los gráficos), respecto a un determinado umbral de tolerancia, (10 cm), representado mediante una barra horizontal, en la solución PPP Estándar frente a la solución PPP -AR.

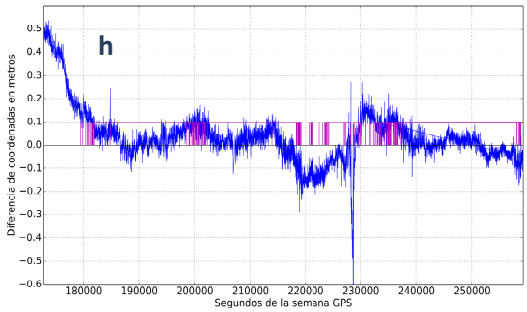


PPP -AR **Doy 168** **PPP Estándar**

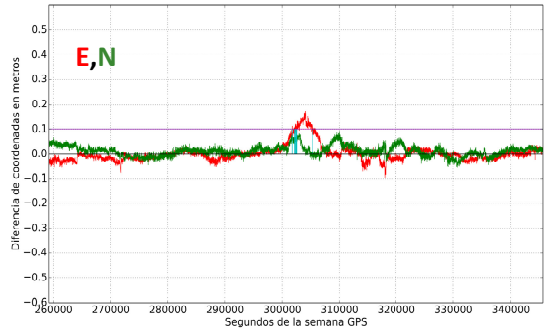


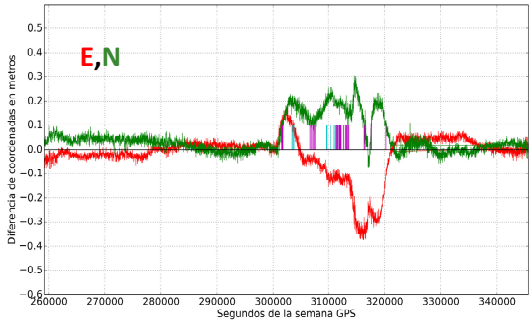


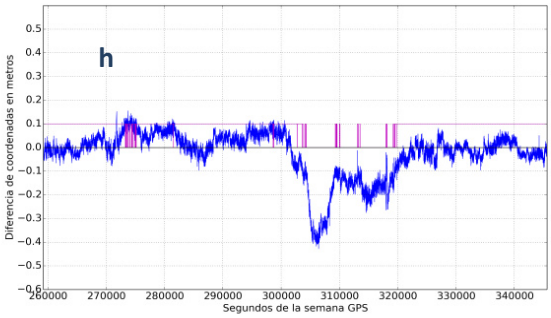


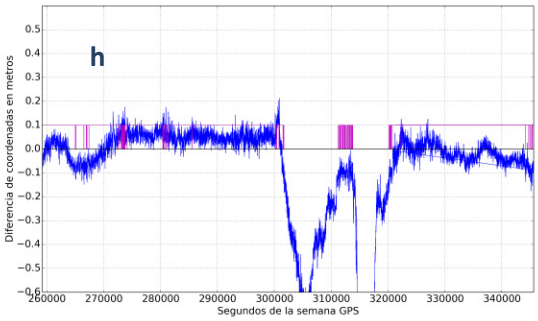


PPP -AR **Doy 169** **PPP Estándar**

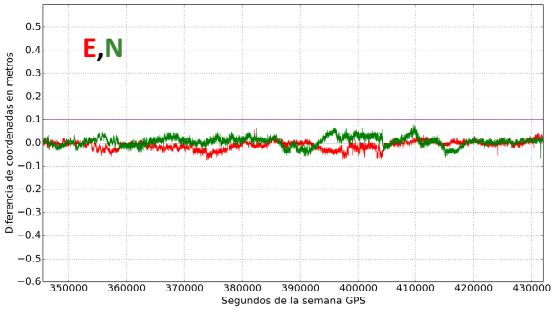


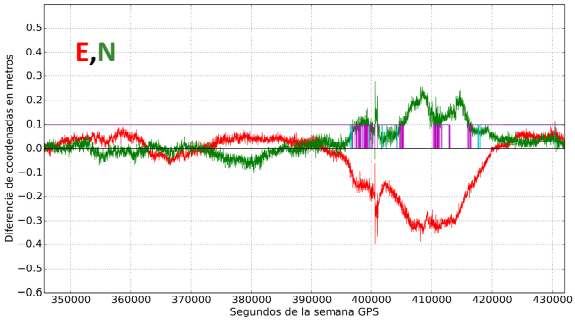


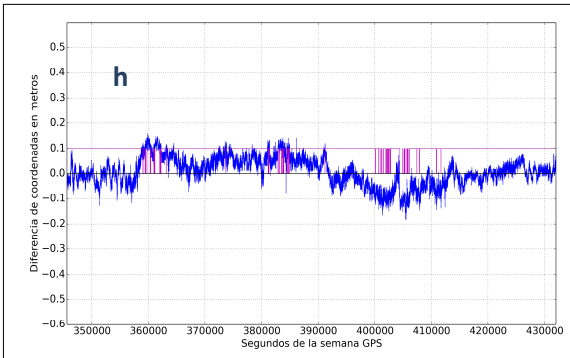


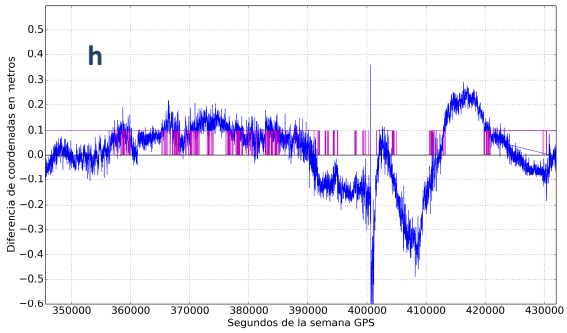


PPP -AR **Doy 170** **PPP Estándar**

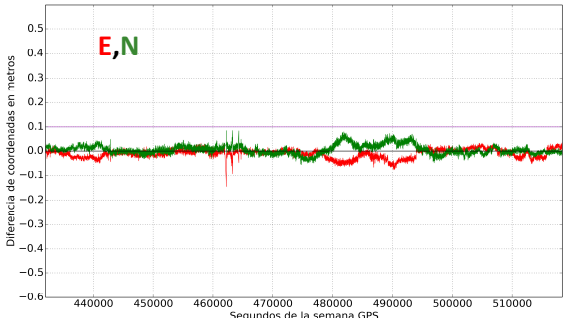


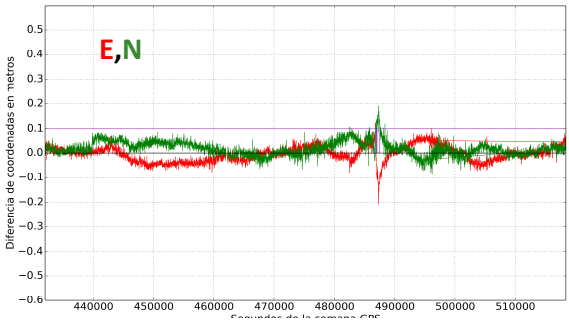


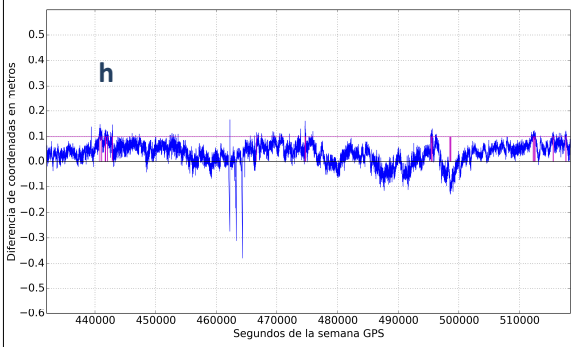


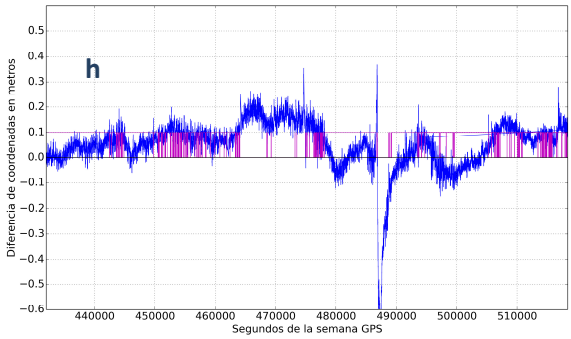


PPP -AR **Doy 171** **PPP Estándar**

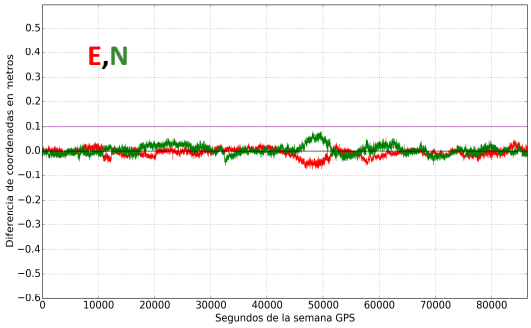


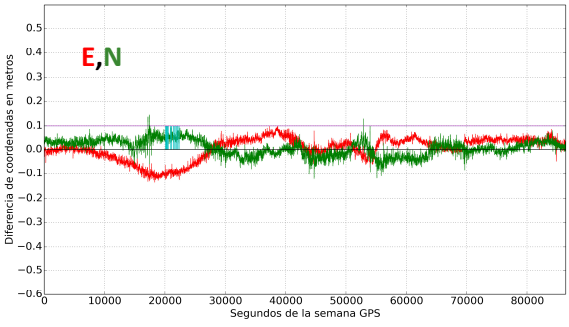


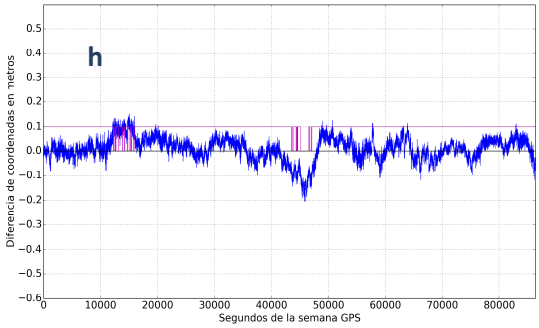


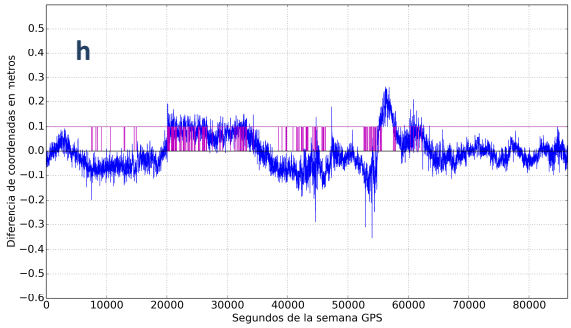


PPP –AR **Doy 173** **PPP Estándar**









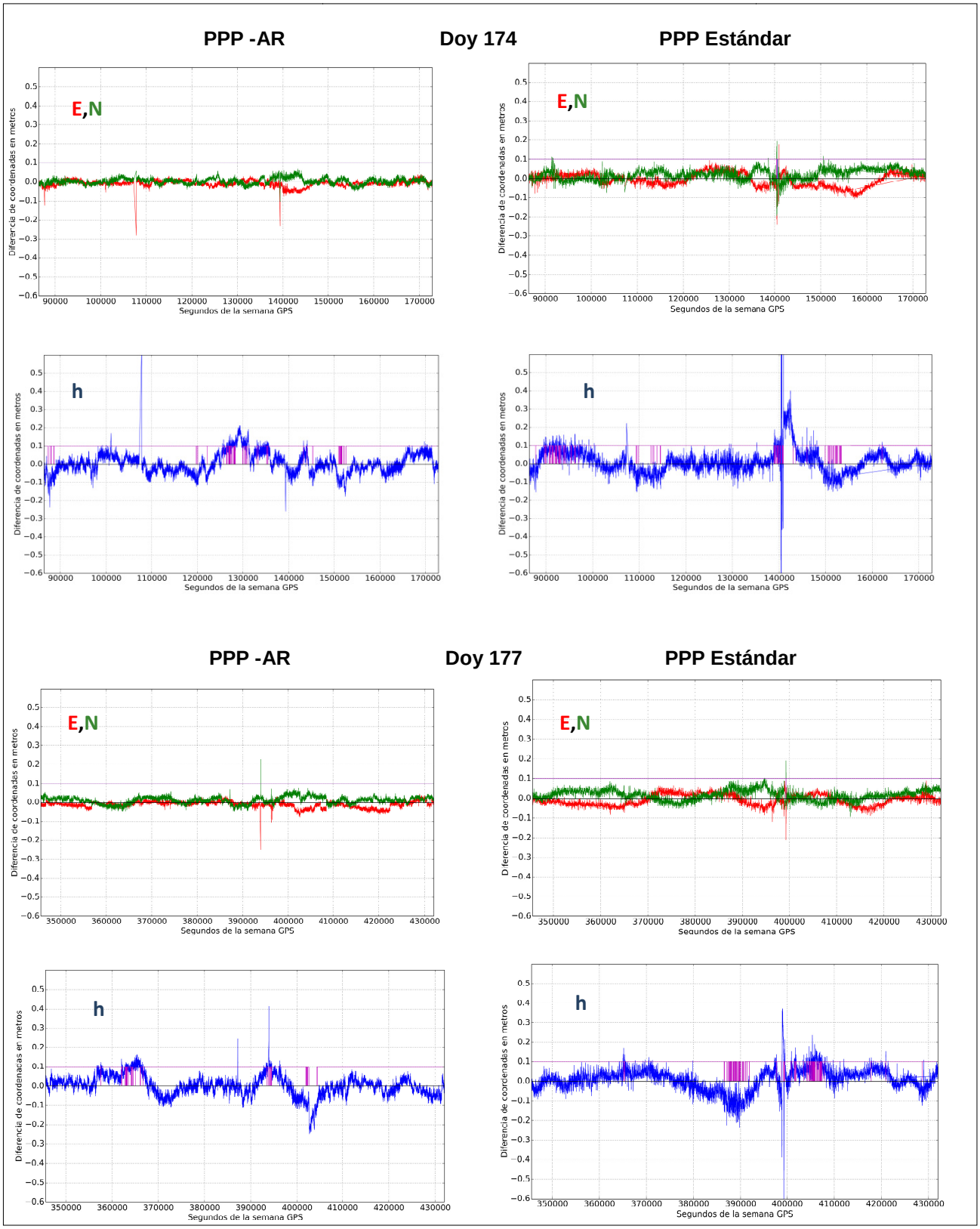


Figura 7.3: Representación cinemática de PPP con resolución de ambigüedades y PPP estándar

Como puede observarse, en la solución PPP-estándar, el número de pérdidas de convergencia sobre un umbral determinado, (en este caso se ha calculado para los 10 cm), es mayor que con la aplicación del *bias* de fase. En los gráficos se ha plasmado para el caso del umbral de 10 cm, aquellos instantes en que la solución lo sobrepasa con las líneas verticales. Para los 5 cm también se han obtenido los valores que sobrepasan este margen en ambos casos.

Seguidamente se cifran las pérdidas de convergencia por encima de los 10 cm y 5 cm con PPP estándar (flotante) y PPP-AR (PPP-RTK) en 24 horas de observación continuada en tiempo real para cada día:

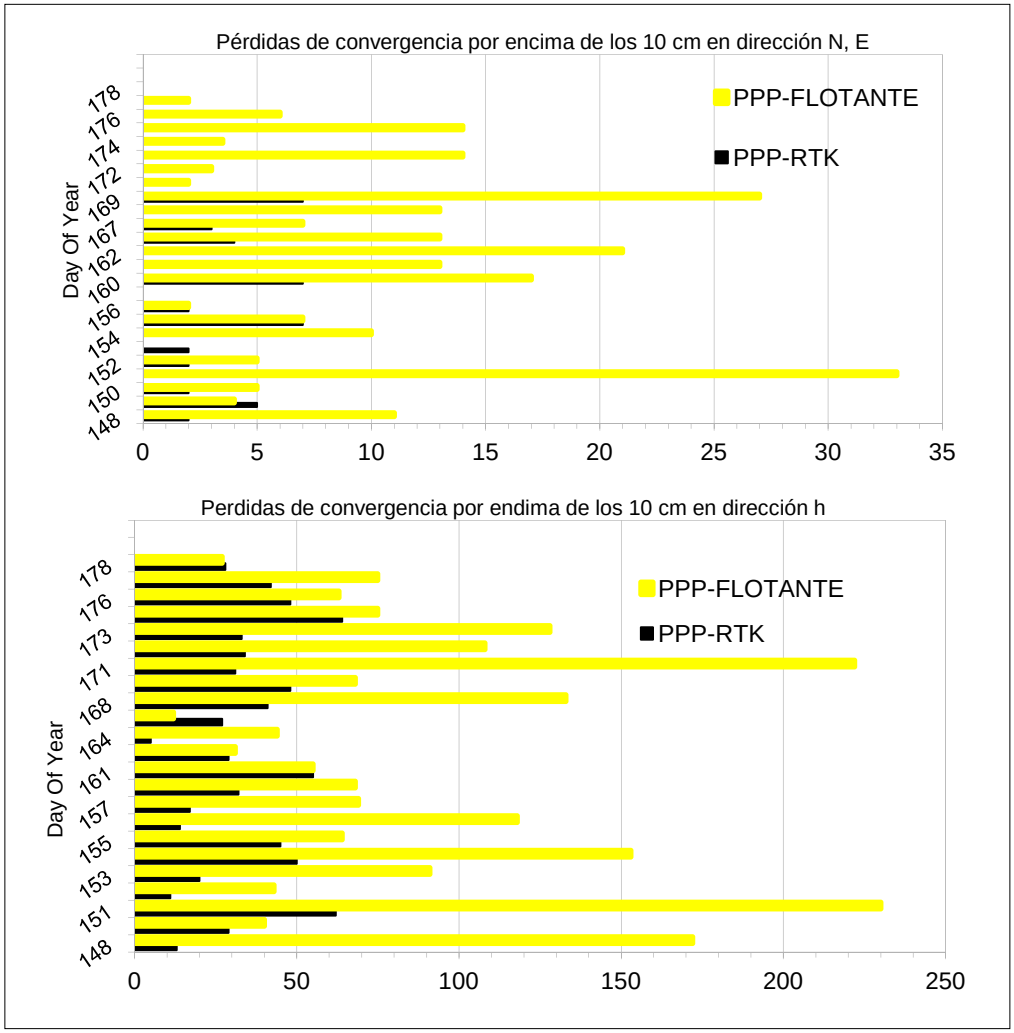
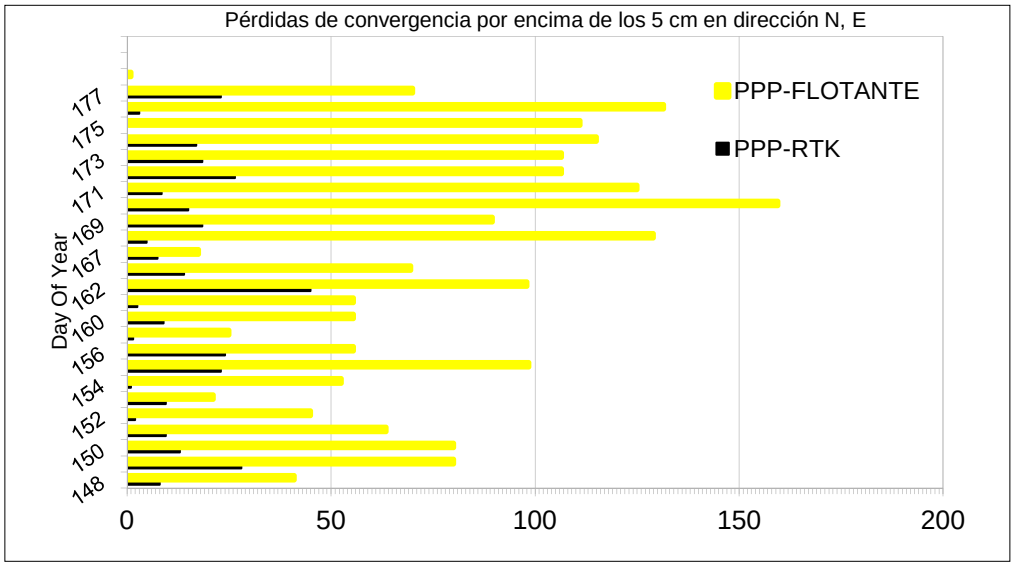


Figura 7.4: Impacto de la solución en tiempo real con ambigüedades enteras para PPP en la cantidad de pérdidas de convergencia > 10 cm, dirección N, E, h



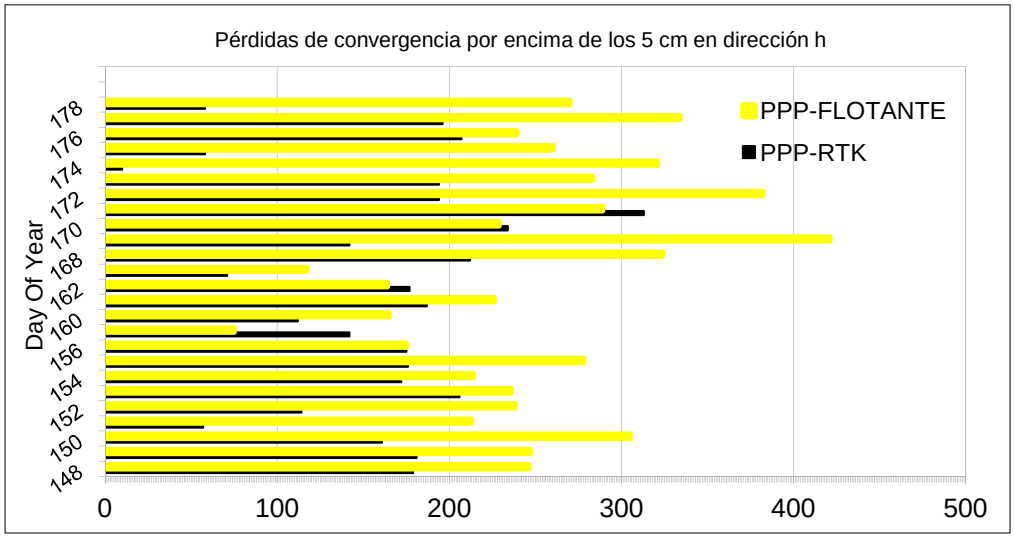


Figura 7.5: Impacto de la solución en tiempo real con ambigüedades enteras para PPP en la cantidad de pérdidas de convergencia > 5 cm, dirección N, E, h

7.2.2. Aplicación del modelo estandarizado

El modelo estandarizado por el RTCM-Working Group, tiene la ventaja de que se puede extender al caso de triple frecuencia muy fácilmente, (Laurichesse, 2014), sin utilizar combinaciones de dos frecuencias solo, a diferencia del modelo utilizado en el apartado anterior. Las ecuaciones de observación, con la notación análoga a la expuesta anteriormente en el capítulo 2, resultan para las pseudodistancias sobre L1, L2 y L5:

$$P'_1 = P_1 + \Delta b_{P1} = \rho + Tr + I + \Delta h_P$$

$$P'_2 = P_2 + \Delta b_{P2} = \rho + Tr + \gamma_2 I + \Delta h_P$$

$$C'_5 = C_5 + \Delta b_{C5} = \rho + Tr + \gamma_5 I + \Delta h_P$$

La diferencia entre los relojes del receptor y satélite obtenidos de la combinación libre de ionosfera se representa como Δh_P. Así mismo para las ecuaciones de fase sobre las tres frecuencias resulta:

$$\lambda_1 L'_1 = \lambda_1 (L_1 + \Delta b_{L1}) = \rho + Tr - I + \Delta h - \lambda_1 N_1$$

$$\lambda_2 L'_2 = \lambda_2 (L_2 + \Delta b_{L2}) = \rho + Tr - \gamma_2 I + \Delta h - \lambda_2 N_2$$

$$\lambda_5 L'_5 = \lambda_5 (L_5 + \Delta b_{L5}) = \rho + Tr - \gamma_5 I + \Delta h - \lambda_5 N_5$$

Siendo: $\lambda_5 = \frac{c}{f_{L5}}$ y Δh la diferencia de relojes anterior para la ecuación de fase.

La fuerza del método reside en que se independiza la aplicación del *bias* de fase de la combinación de frecuencias utilizadas en el lado del servidor, y se emite un *bias* por frecuencia (Δb_{Pi}, Δb_{C5} e Δb_{Li}).

De esta manera, se simplifica el concepto de sesgos de fase para la resolución de la ambigüedad y permite total interoperabilidad si el servidor de modelos SSR y el usuario final implementan diferentes modelos, combinaciones de observables o métodos de resolución de ambigüedad. Este último desarrollo ha sido el utilizado para implementar los modelos de correcciones que incluyan el *bias* de fase conforme a la definición del RTCM Working Group (RTCM SC-104, 2013). Para la resolución

práctica aplicando este modelo, a su vez se ha empleado el prototipo de la nueva aplicación que utiliza la función PPP-AR (PPP-Ambiguity resolution), desarrollada por el CNES[6], que es una extensión de las librerías C++ del BNC 2.9, (BKG NTRIP client), reprogramada y recompilada para hacer uso de los mensajes de sesgos de fase. Los gráficos siguientes arrojan los resultados de las sesiones simultáneas llevadas a cabo para analizar la resolución de ambigüedad entera en PPP en tiempo real, (PPP-AR), frente a la solución PPP estándar. Las sesiones se llevaron a cabo en el periodo comprendido entre las GPSWEEK 1818 -1821, de las cuales se muestra un resumen:

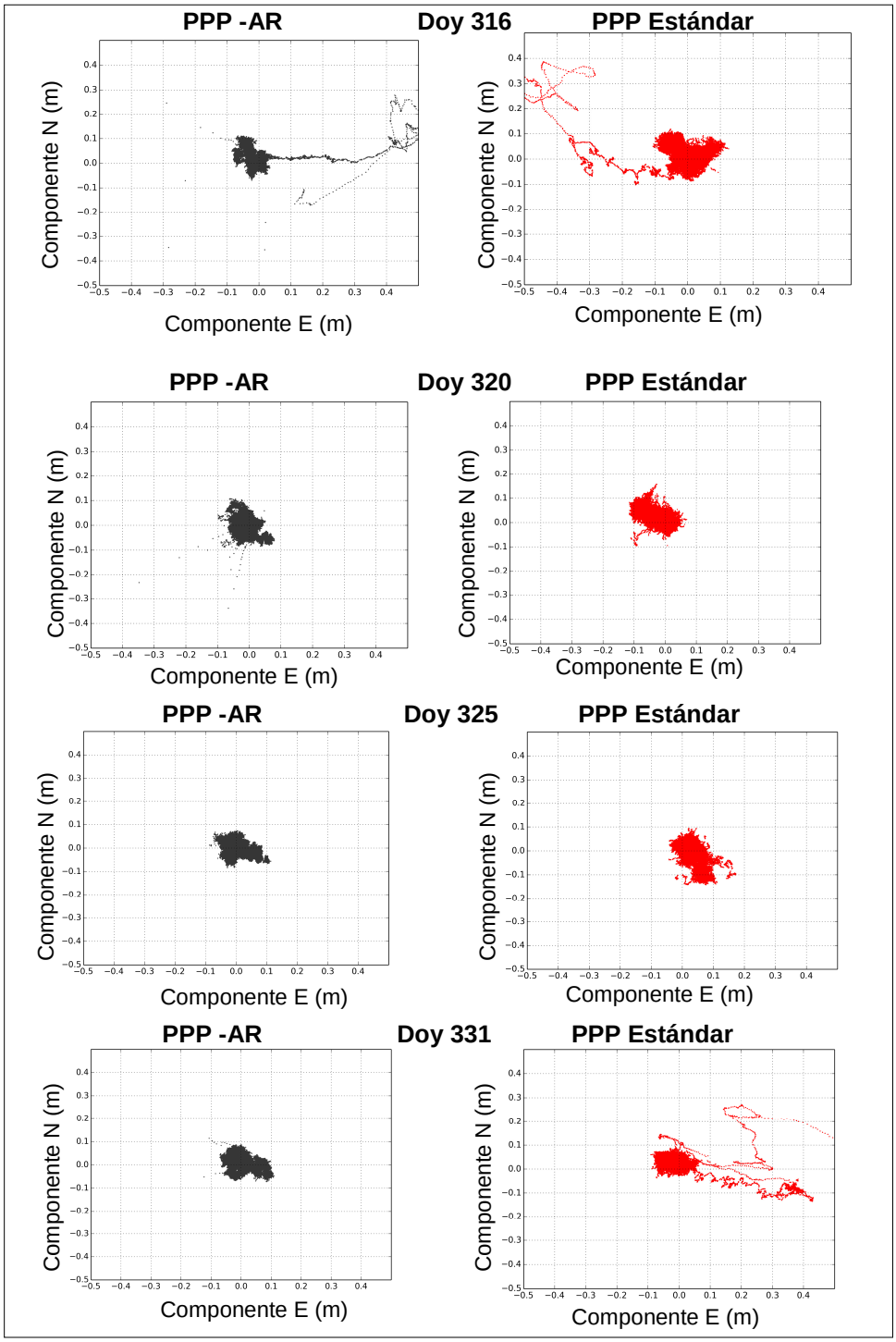
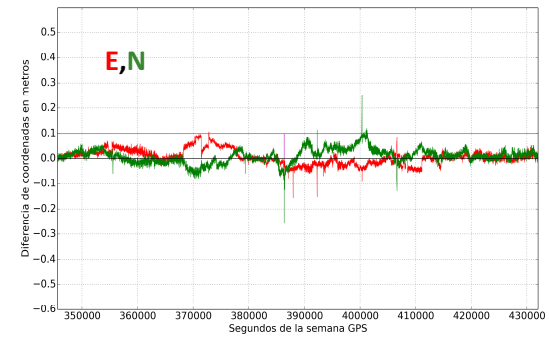
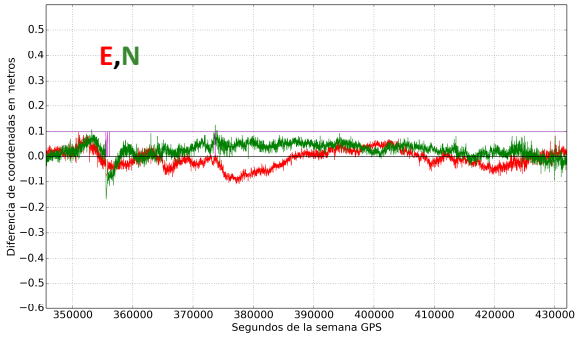


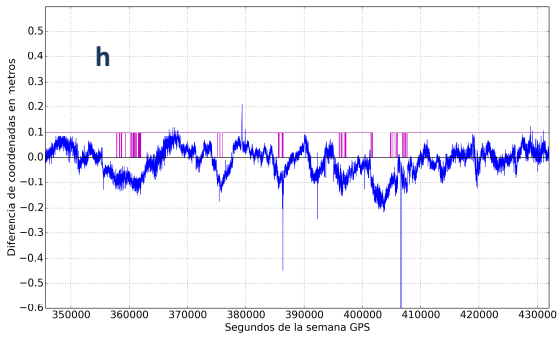
Figura 7.6: Sesgo N,E de la solución PPP-AR frente a la solución flotante con la aproximación estandarizada. Doy 316, 320, 325, 331/2014 .

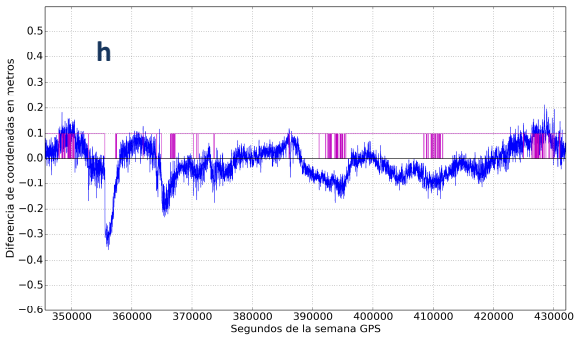
[6] *Centre National d'Etudes Spatiales –France*

PPP -AR **Doy 317** **PPP Estándar**

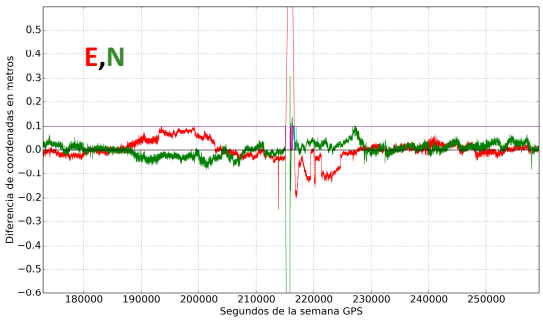


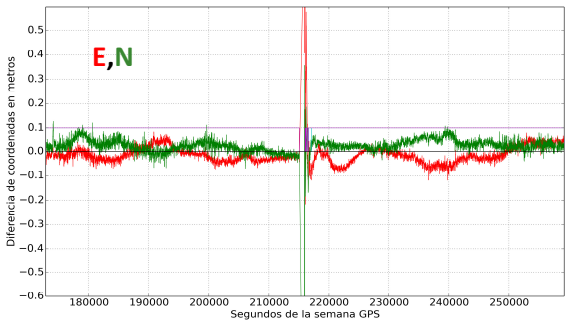


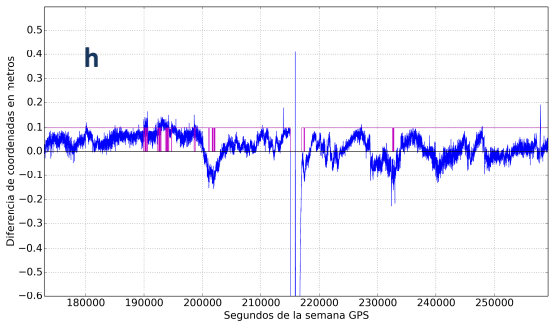


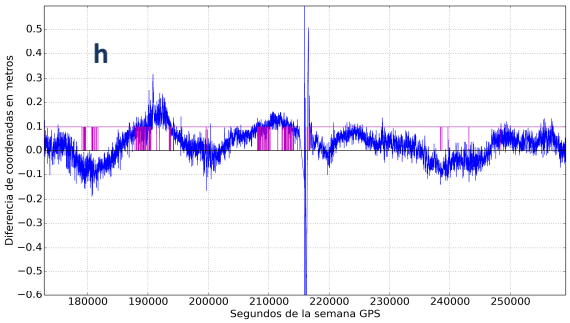


PPP -AR **Doy 322** **PPP Estándar**









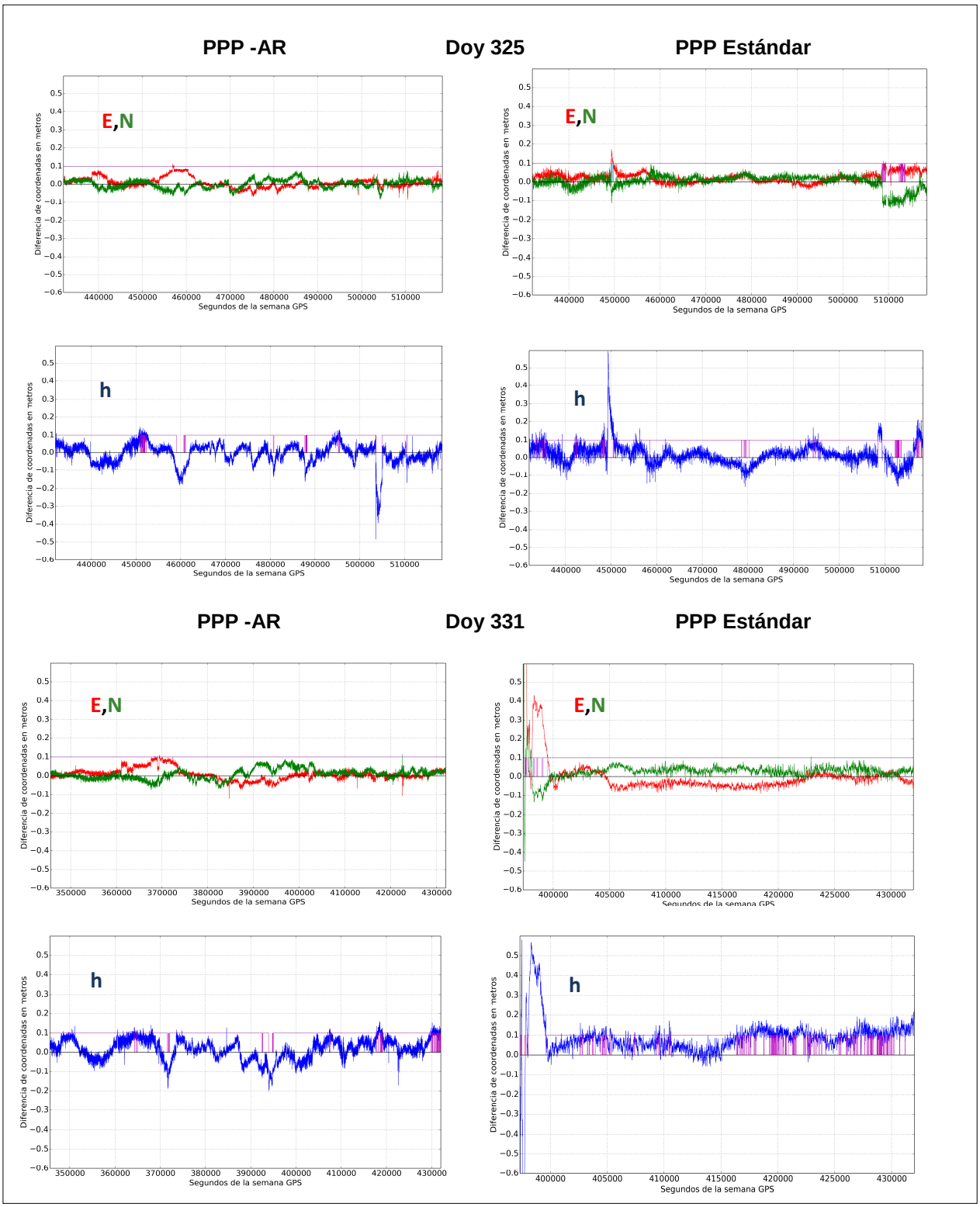


Figura 7.7: Resultados en cinemático N,E,h de la solución PPP-AR frente a la solución flotante con la aproximación estandarizada

Si se analizan las pérdidas de convergencia por encima de un determinado umbral en las direcciones N,E y h, observamos como en el caso anterior, que son mayores para la solución PPP-estándar (flotante), que para la solución PPP-AR (PPP-RTK en el gráfico):

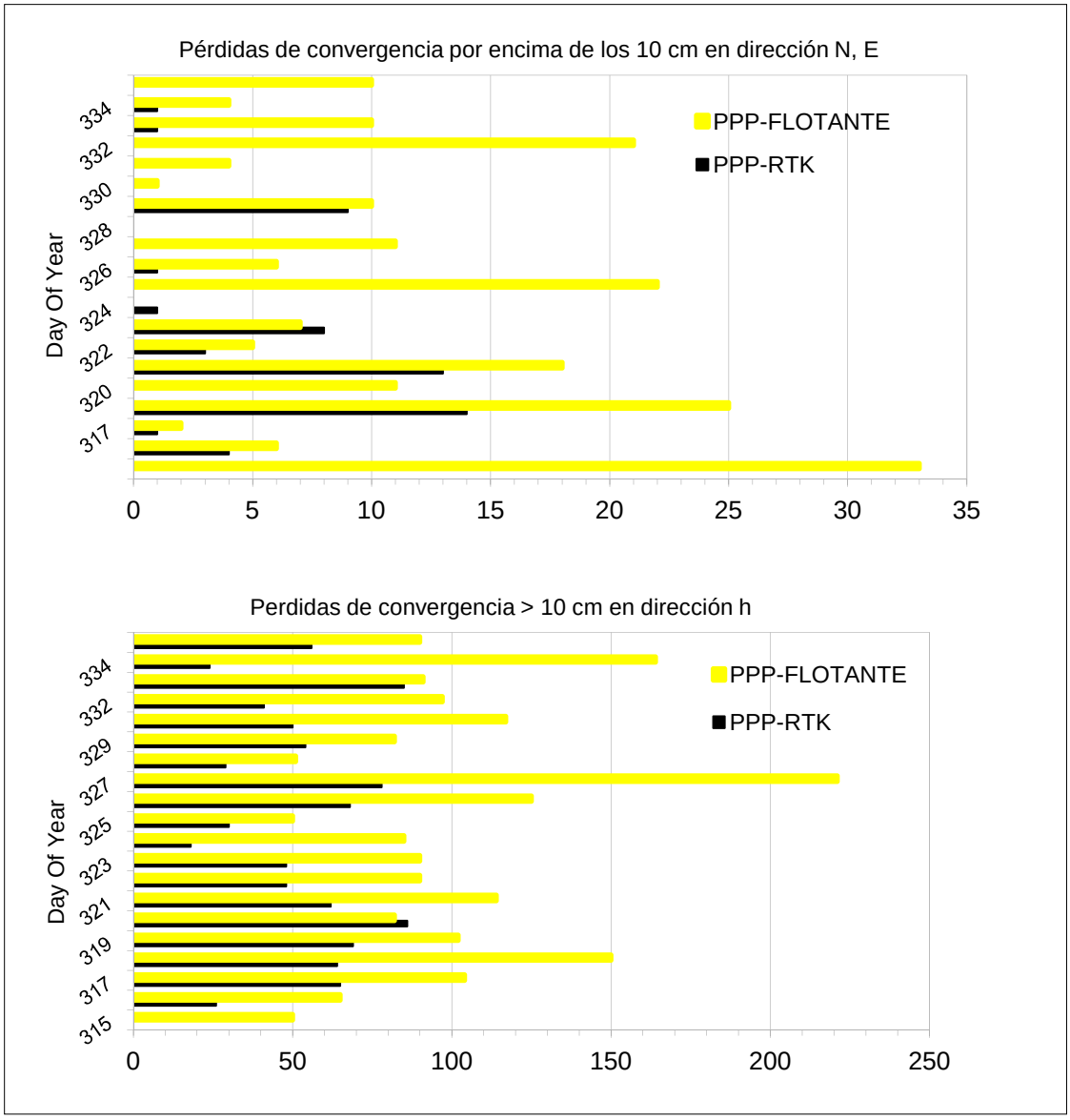
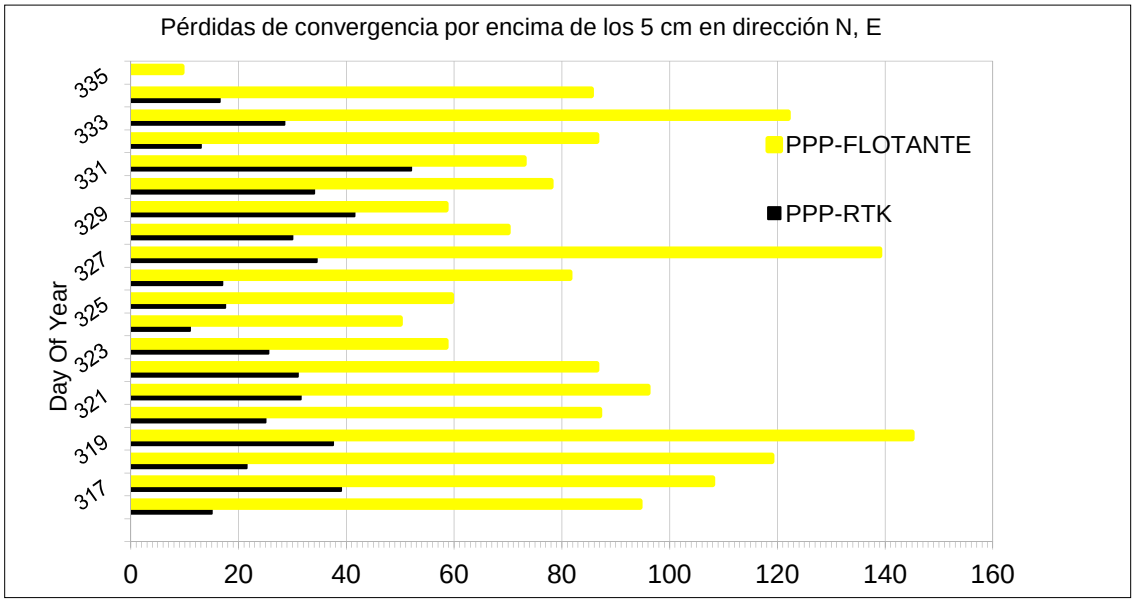


Figura 7.8: Pérdidas de convergencia por encima de los 10 cm de la solución PPP-AR frente a la solución PPP estándar con los mensajes estandarizados



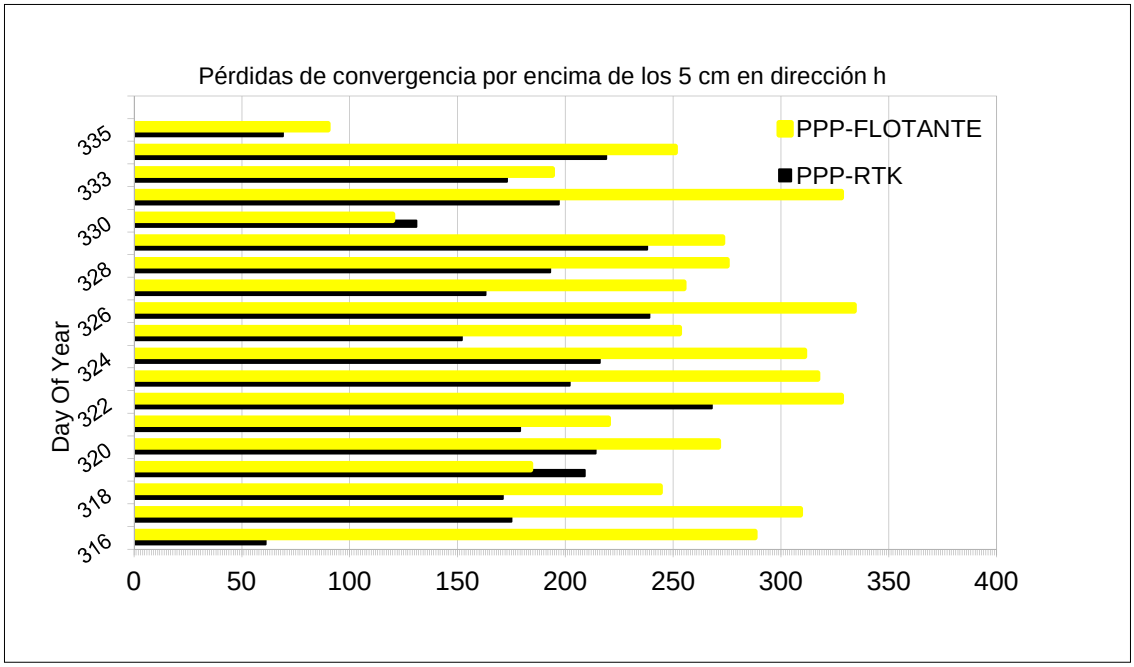


Figura 7.9: Pérdidas de convergencia por encima de los 5 cm de la solución PPP-AR frente a la solución PPP estándar con los mensajes estandarizados

7.3. Conclusiones y discusión.

Como se puede observar la resolución de la ambigüedad puede mejorar la precisión en la posición PPP en tiempo real, y las pérdidas de convergencia. No obstante, el periodo de convergencia de las soluciones fijas de ambigüedad es todavía de varios minutos en el receptor móvil. Las razones de este largo periodo de inicialización se deben, entre otras, a que el suavizado del ruido de las observaciones de pseudodistancia para resoluciones de ambigüedad de banda-ancha, requiere unos minutos y al lento cambio que se produce a veces en la geometría de los satélites. Como veremos después, a corto plazo podrán aplicarse también modelos SSR con correcciones ionosféricas, que a su vez acelerarán la convergencia.

Como resumen de precisiones en todos los periodos se muestran los siguientes gráficos. Nótese que la optimización que supone aplicar el método de recuperación de ambiguedades enteras, arroja offsets en la solución a nivel centimétrico sobre todo en dirección h, y en precisión supone mejoras que pueden llegar al nivel de los 3 -4 cm, además de disminuir las pérdidas de convergencia mostradas antes:

	E PPP-AR	N PPP-AR	h PPP-AR	E PPP-Estándar	N PPP-Estándar	h PPP-Estándar
μ	0,0176	0,0159	0,0446	0,0318	0,0227	0,0625
σ	0,0294	0,0224	0,0599	0,0407	0,0232	0,0637

Tabla 7.4: Estadísticos de PPP –AR y PPP estándar con el prototipo experimental de mensajes con *bias* de fase

	E PPP-AR	N PPP-AR	h PPP-AR	E PPP-Estándar	N PPP-Estándar	h PPP-Estándar
μ	0,0218	0,0210	0,0478	0,0334	0,0276	0,0673
σ	0,0394	0,0320	0,0542	0,0568	0,0450	0,0858

Tabla 7.5: Estadísticos de PPP –AR y PPP estándar con los mensajes estandarizados de *bias* de fase

En los siguientes gráficos puede observarse los *offsets* y desviaciones estándar, para ambos casos PPP-AR y PPP-estándar simultáneados, para los periodos evaluados al completo:

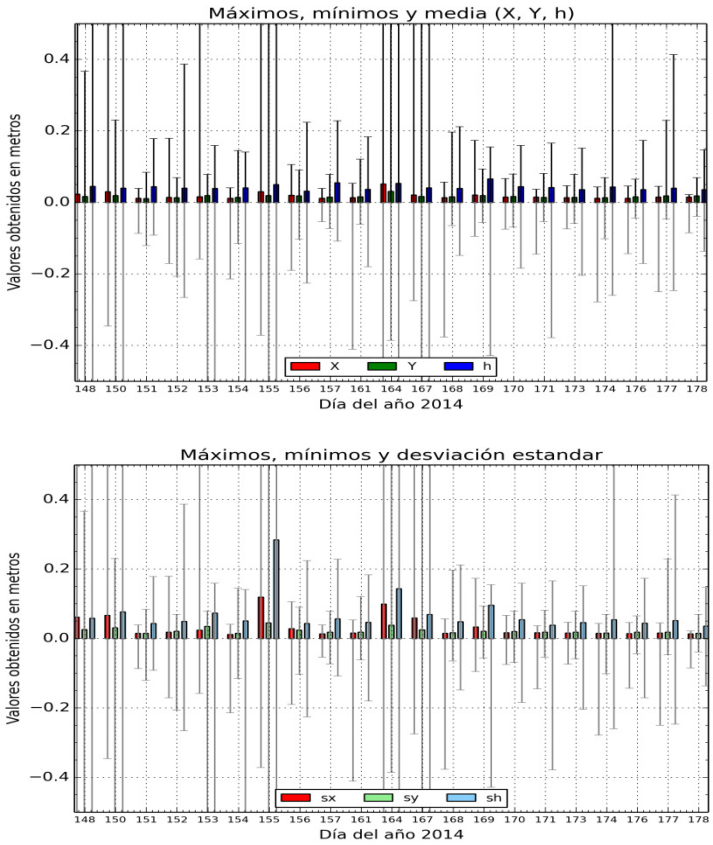


Figura 7.10: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades enteras (prototipo experimental)

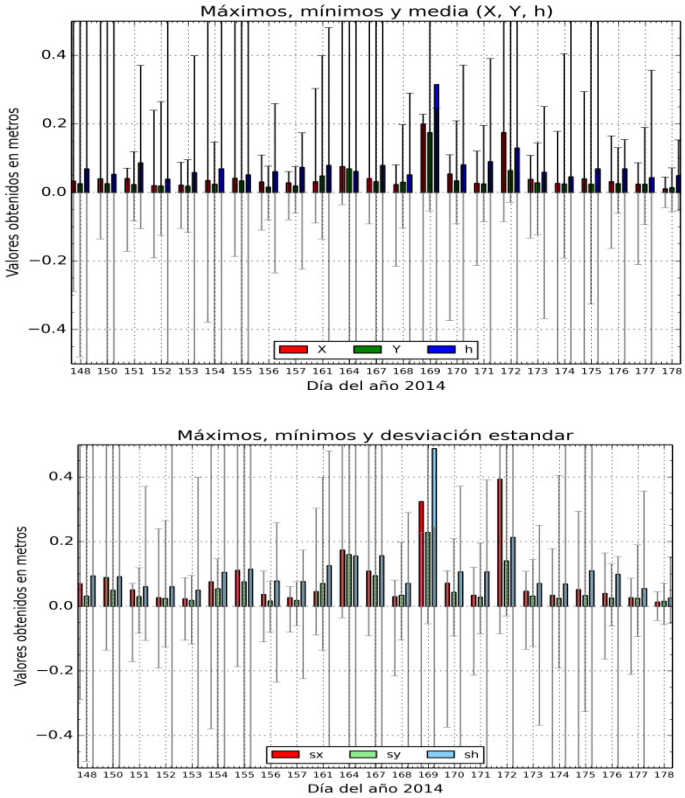


Figura 7.11: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades flotantes

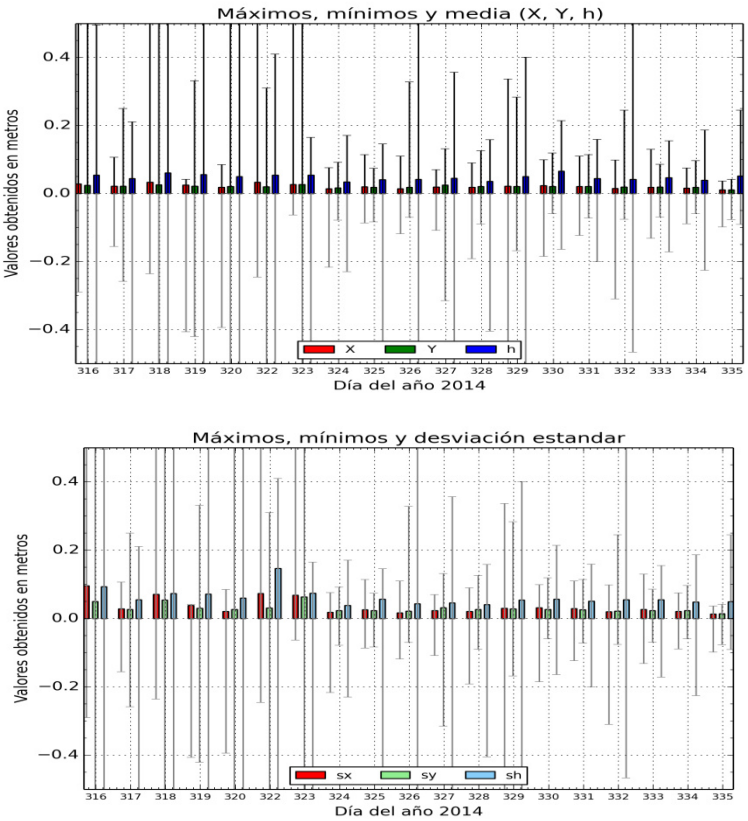


Figura 7.12: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades enteras (modelo estandarizado)

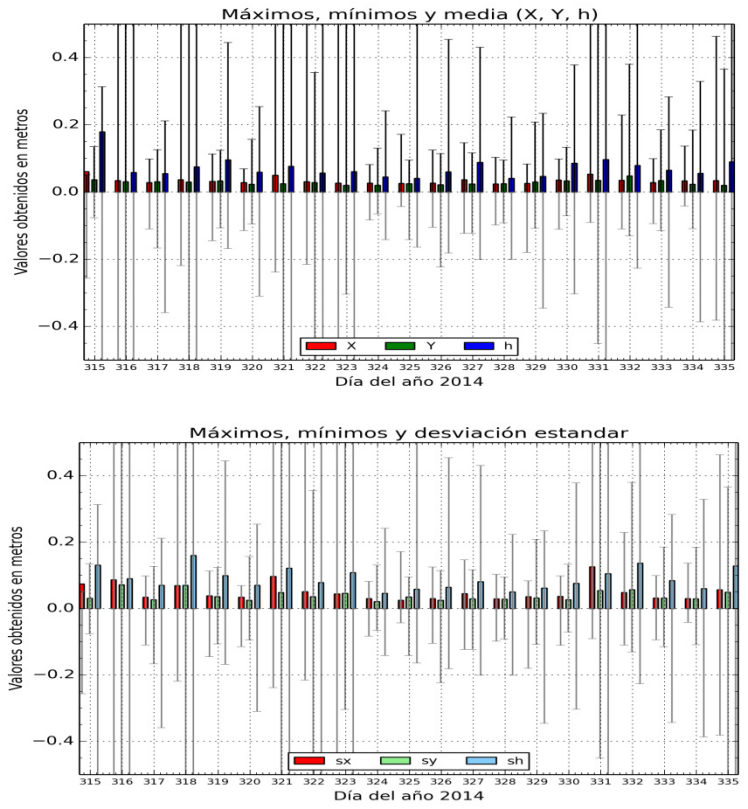


Figura 7.13: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con ambiguedades flotantes

La potencia del método reside en que el *bias* de fase es un valor muy constante en el tiempo, y que la parte dependiente de un satélite específico es común para todos los receptores que lo rastrean, mientras que la parte dependiente de un solo receptor también es común a todas las observaciones a varios satélites.

Adicionalmente, la aplicación del *bias* para recuperar el carácter entero de las ambigüedades podrá complementarse a corto plazo con otras estrategias o técnicas para acelerar la convergencia de la solución. Cabe destacar la eficacia de otros modelos piloto adicionales, demostrados en Juan et al., (2012), que contienen correcciones ionosféricas precisas calculadas por una amplia red global, procesadas con dobles diferencias. Con el conocimiento de este modelo, se pueden lograr precisiones mejores de 10 cm en pocos minutos (menos de 5 minutos) con señales de dos frecuencias, en contraste con el tiempo que necesitan otros modelos (como el IGS03 etc…). Por otra parte, con sistemas de triple frecuencia, utilizando dos señales de frecuencia cercanas, es posible generar una señal extra *wide-lane* para permitir ambigüedades fijas con esta combinación de observables.
Una simple explicación de cómo las correcciones ionosféricas precisas (junto con los sesgos de las observaciones de código), ayudan a la convergencia de la solución podemos verlo a partir de la siguiente aproximación mostrada en Sanz et al., (2013):

$$\phi_I - I - K_{21} = \frac{1}{\tilde{\alpha}_W}(B_W - B_C)$$

Esta ecuación define la relación entre las soluciones libres de geometría ($B_I = \phi_I$ - I - K_{21}), las soluciones libres de ionosfera B_C, y las soluciones *wide-lane* B_W, y se pueden utilizar como un constreñimiento más en el filtro de convergencia.

Como se ha mencionado, las soluciones *wide-lane* B_W pueden ser estimadas rápidamente (en pocos minutos con dos frecuencias o en una sola época con señales de tres frecuencias). De este modo, los términos que intervienen en la ecuación anterior, es decir las correcciones ionosféricas una vez conocidas (I), junto con los *bias* entre los códigos (K_{21}), pueden transferir esta precisión alcanzada en la estimación de la *wide-lane* (B_W) a la ambigüedad de la solución libre de ionosfera (B_C). El tiempo de convergencia para lograr, por ejemplo, 10cm de error es reducido de casi 50 min- 1 h (lo que tardaría un modelo tipo del IGS combinado) o 15-20 minutos (para el CLK91), hasta unos pocos minutos.

Este nuevo enfoque es llamado *Fast Precise Point Positioning* (F-PPP), se encuentra patentado y protegido en HJS et al., (2011), y fue desarrollado por el grupo de investigación de Astronomía y Geomática (gAGE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) para proporcionar un servicio de posicionamiento fiable de elevada precisión (High-Precisión Positioning Service (HPPS)). En esta aproximación, solo se necesita un 10% del ancho de banda adicional que en el método PPP estándar, porque los datos adicionales que se emiten (por ejemplo, correcciones ionosféricas y retardos instrumentales) son parámetros que varían lentamente y que se pueden transmitir a un ratio bajo de emisión.

Capítulo 8:

Alternativas y mejoras a los modelos combinados finales del IGS.

El objetivo de este apartado es estudiar los procedimientos para generar un producto combinado para posicionamiento absoluto, evaluando la optimización que puede suponer la combinación propia de varios productos individuales frente a la utilización de productos combinados del IGS *(International GNSS Service)*. En estos últimos modelos, la combinación se efectúa del lado del servidor, pudiendo tener latencias de hasta 25 segundos, (IGS, 2013).

En el siguiente esquema se puede observar las distintas alternativas para la obtención de un modelo combinado. La abreviatura CLKxx corresponde a la denominación de los modelos individuales de distintos centros de análisis, que pueden utilizarse para generar un producto propio, y los modelos que se emiten ya combinados son los denominados IGSxx, (Capítulos 3 y 4). Ambos son obtenidos a través de *streaming*.

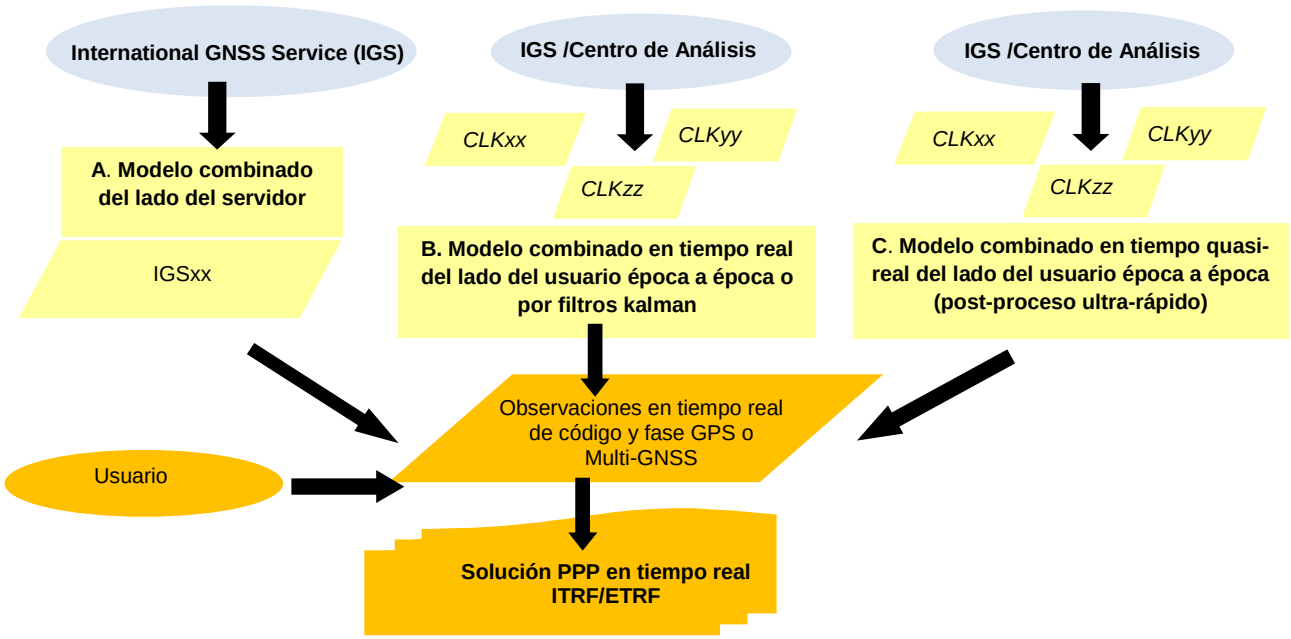


Figura 8.1: Opciones para la generación de modelos combinados

Como punto de arranque del análisis, se muestra un extracto del resultado de las sesiones efectuadas durante varias semanas de observación continuada, con la técnica PPP en tiempo real utilizando un modelo combinado de lado del servidor producido por el IGS, frente a un modelo individual de un único Centro de análisis. En el primer caso se simultanea la observación aplicando el modelo IGS02 y el CLK10 (productos con solo GPS), (Figura 8.2), y en el segundo caso el IGS03 con el CLK91 (productos GPS+GLONASS), (Figura 8.3). Las sesiones se ejecutan sobre observaciones de una misma estación permanente (BRUX –Real Observatorium Belgium).

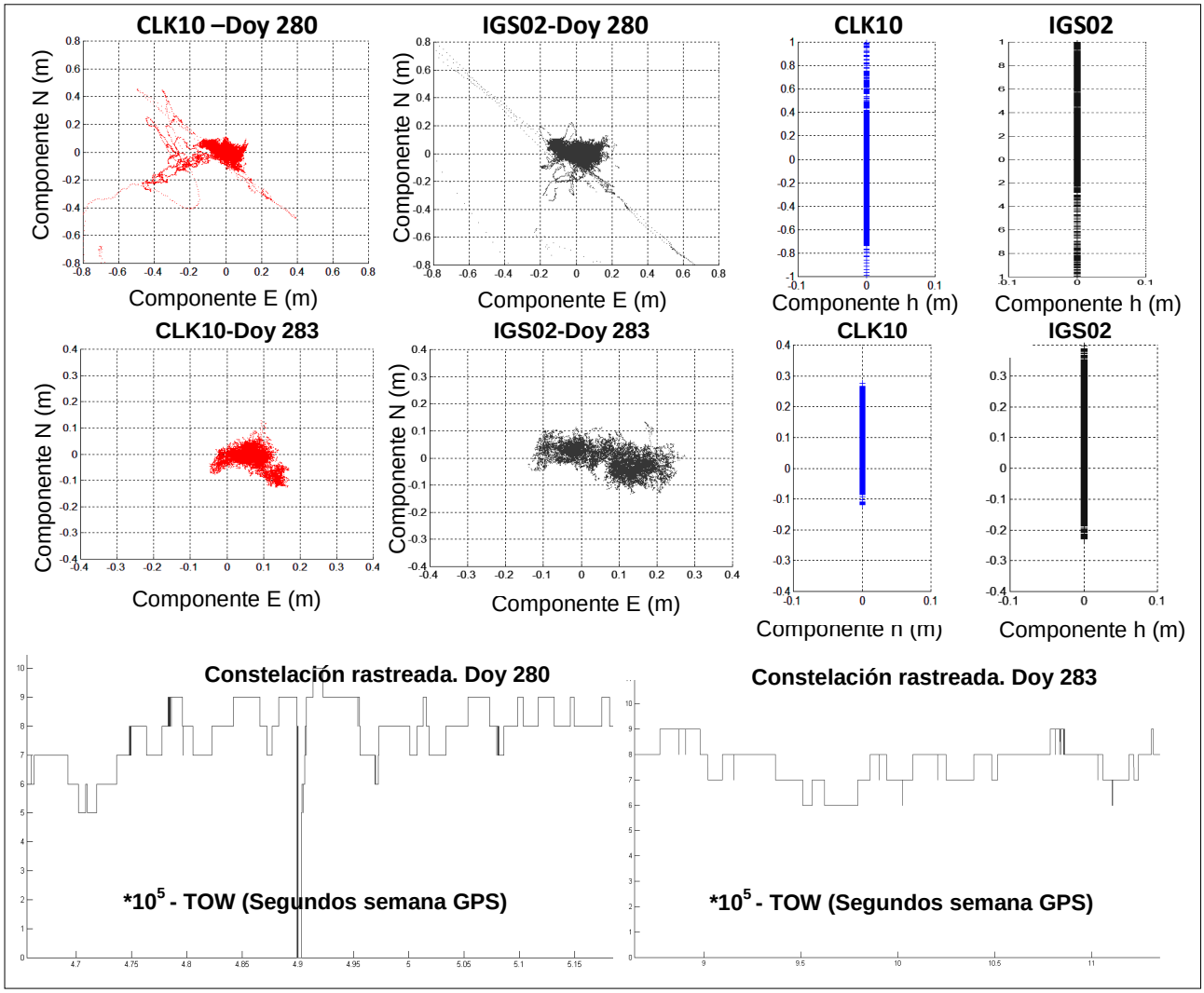


Figura 8.2: Modelo combinado IGS02 frente a modelo individual. Constelación GPS. Doy 280,283/2012

CLK10	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,0190	1,2420	4,2490	Mayor de 20 cm	7,1208	2,0414	14,1880
Valor Mínimo (m)	-0,4240	-0,4480	-1,0520	Menor de 20 cm	92,0780	97,1574	85,0108
Valor Promedio (m)	0,0706	0,0510	0,1280				
Valor Desviación estándar (m)	0,1016	0,0736	0,1236				
IGS02	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,9610	1,335	2,561	Mayor de 20 cm	8,4755	2,9668	38,1717
Valor Mínimo (m)	-1,3050	-2,526	-3,485	Menor de 20 cm	91,5193	98,0544	67,2925
Valor Promedio (m)	0,0756	0,053	0,190				
Valor Desviación estándar (m)	0,0966	0,092	0,189				

Tabla 8.1: Estadísticos obtenidos para las GPSWEEK 1656-1657.

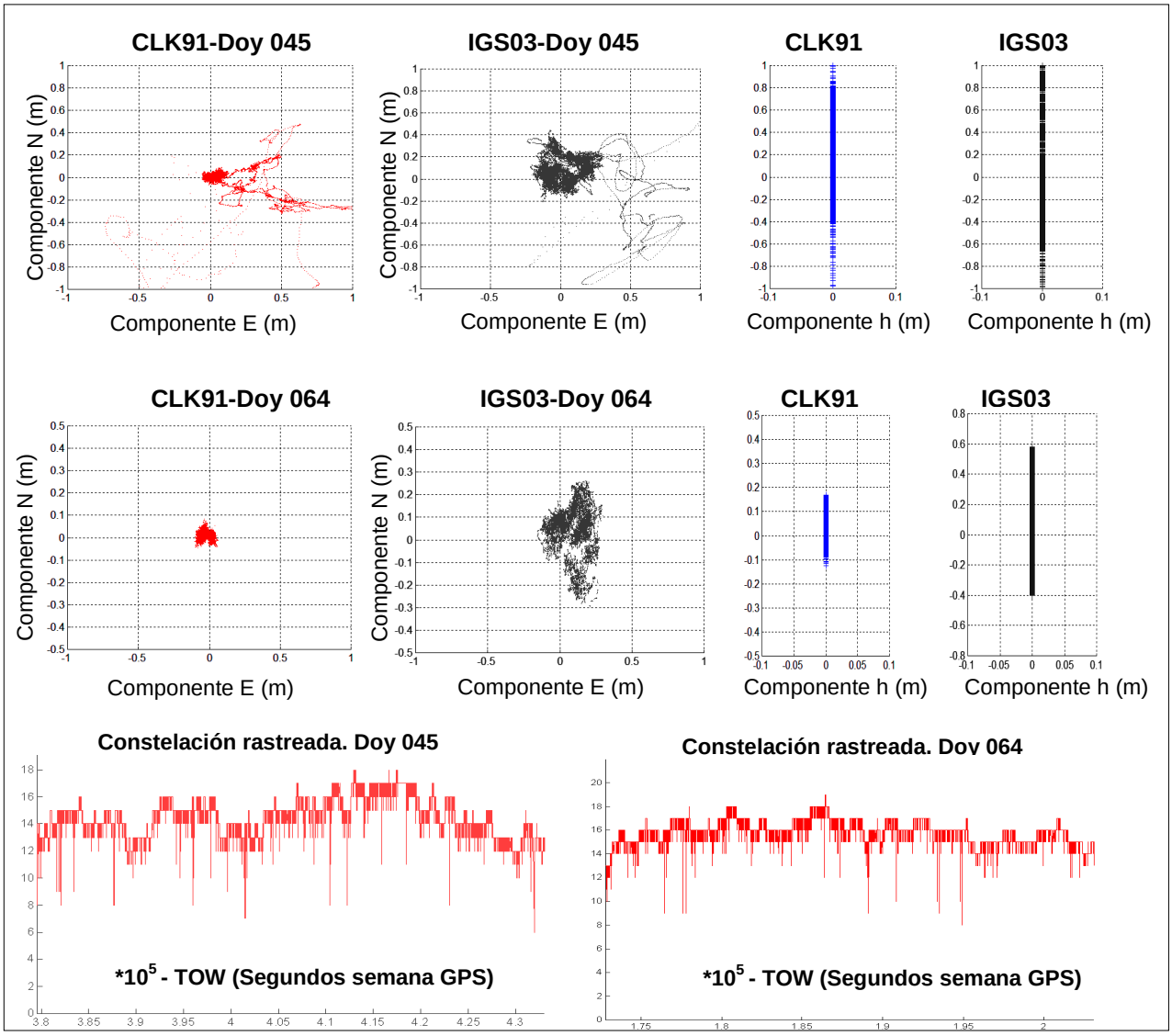


Figura 8.3: Modelo combinado IGS03 frente a modelo individual. Constelación GPS y GLONASS. Doy 045,064/2012

CLK91	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,1240	1,4790	1,4640	Mayor de 20 cm	7,7260	3,4829	10,0064
Valor Mínimo (m)	-1,3230	-0,4980	-1,6530	Menor de 20 cm	92,0233	96,2664	89,7428
Valor Promedio (m)	0,0645	0,0325	0,0945				
Valor Desviación estándar (m)	0,1205	0,0760	0,1140				
IGS03	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	0,3040	0,9650	1,2960	Mayor de 20 cm	10,9165	10,3497	47,8258
Valor Mínimo (m)	-1,8020	-1,9350	-5,5180	Menor de 20 cm	88,3283	88,8951	51,4191
Valor Promedio (m)	0,1085	0,0985	0,2250				
Valor Desviación estándar (m)	0,1230	0,1210	0,2565				

Tabla 8.2: Estadísticos obtenidos para las GPSWEEK 1727 -1730

En ambos casos se observa que ofrece *a priori* mayor rendimiento el producto individual frente al producto combinado del IGS. No obstante, un solo producto no proporciona suficiente redundancia en caso de *outliers* o problemas en su determinación y en su emisión, por lo que se hace necesario estudiar alternativas para crear productos combinados que optimicen la solución actual que ofrece el IGS.

8.1. Implementación de la combinación de productos para post-procesamiento en tiempo quasi-real

La combinación puede llevarse a cabo por diversos métodos. En el caso del IGS, los modelos IGSxx son emitidos en tiempo real, tras un proceso que consiste en realizar la implementación del lado del servidor, bien época a época o bien a través de filtros Kalman. Sin embargo a través de distintas librerías de código abierto del BKG o las elaboradas en *Python,* (Capítulo 5), es posible elaborar un modelo combinado del lado del usuario empleando *streamings* recibidos en tiempo real a partir de una selección de modelos individuales, que puede ser aplicado posteriormente en tiempo real o con frecuencia horaria o sub-horaria sobre las observaciones de código y fase para PPP.

En primer lugar, atendiendo al potencial que tienen estos modelos en su uso en procesamiento ultra-rápido, es necesario analizar la combinación para el caso del procesamiento en tiempo *quasi-real*. Para ello, se ha llevado a cabo la combinación época a época del lado del usuario de los modelos individuales mediante programación propia, para ser aplicada como productos ultra-rápidos sobre las observaciones almacenadas a alto ratio. De este modo, sería posible un posicionamiento PPP en tiempo quasi-real de frecuencia sub-horaria u horaria aplicando un modelo de correcciones de reloj u órbitas más robusto que el producto final. En los siguientes análisis se evalúa si el resultado de la combinación implementada es comparable con el producto individual y si mejora al producto final del IGS.

La combinación de productos se ha programado mediante rutinas *Python* para ser llevada a cabo de manera automática, sobre los productos recibidos en *streaming*.

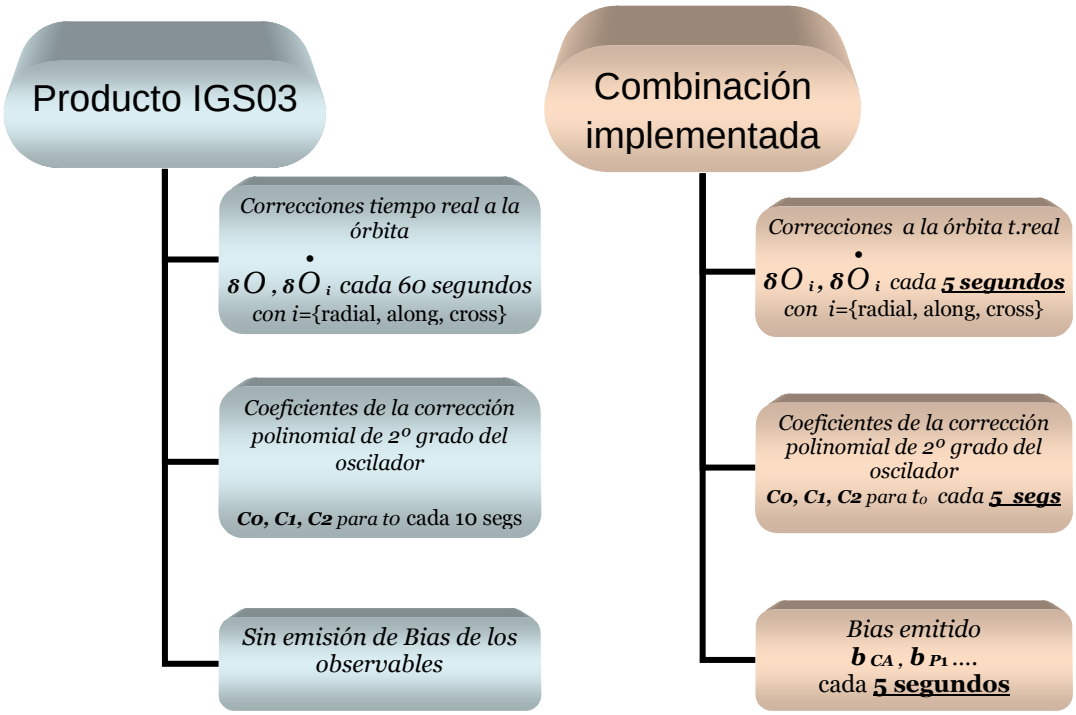


Figura 8.4: Contenido del modelo IGS frente a alternativa implementada de modelo combinado

Obviamente, las ventajas de este tipo de combinación propia se evidencian:

-Se dispone de un producto de muestreo mayor y mejor latencia, frente al producto combinado del lado del servidor, (el del IGS), en el que la carga del proceso en tiempo real es superior y la edad de las correcciones en el instante en que llegan al usuario es mayor.
-Se aprovecha la disponibilidad de productos redundantes para el caso en que falle el modelo del IGS.
-En la combinación implementada en esta investigación, se dispone del valor del *bias* de varios observables. Sin embargo, el *bias* en el producto combinado del IGS adopta un valor nulo y no se

dispone de él, ya que el IGS asume que los productos procedentes de distintos centros de análisis proceden de observaciones con distinto observable rastreado *(CA o P1, P2 o C2…)*.

CLK91	GPS	b_{CA}	b_{P1}	b_{P2}	b_{C2}
CLK91	GLONASS	b_{CA}	$b_{CA\text{-}L2}$	b_{P1}	b_{P2} .....
CLKA1	GPS	b_{CA}	b_{P1}	b_{P2}	…

Tabla 8.3: *Biases* entre observables de código emitidos por distintos centros de análisis

Asumiendo que el *bias* presenta una variabilidad temporal representada suficientemente en el modelo emitido por cada centro de análisis individual, es posible encontrar diversos centros de análisis que proporcionen suficiente redundancia de datos estimados del valor del *bias* para los distintos observables y señales empleados en la generación de productos.

Se muestran a continuación los resultados de aplicar para el posicionamiento PPP post-procesado los productos combinados época a época a través de programación propia. Estos resultados sirven para evaluar su rendimiento frente al producto individual y el combinado del IGS. El post-procesado se ha realizado a épocas de 5 segundos en modo cinemático sobre la estación de BRUX.

8.1.1. Combinación época a época CLK91+CLK11 para post-procesamiento PPP

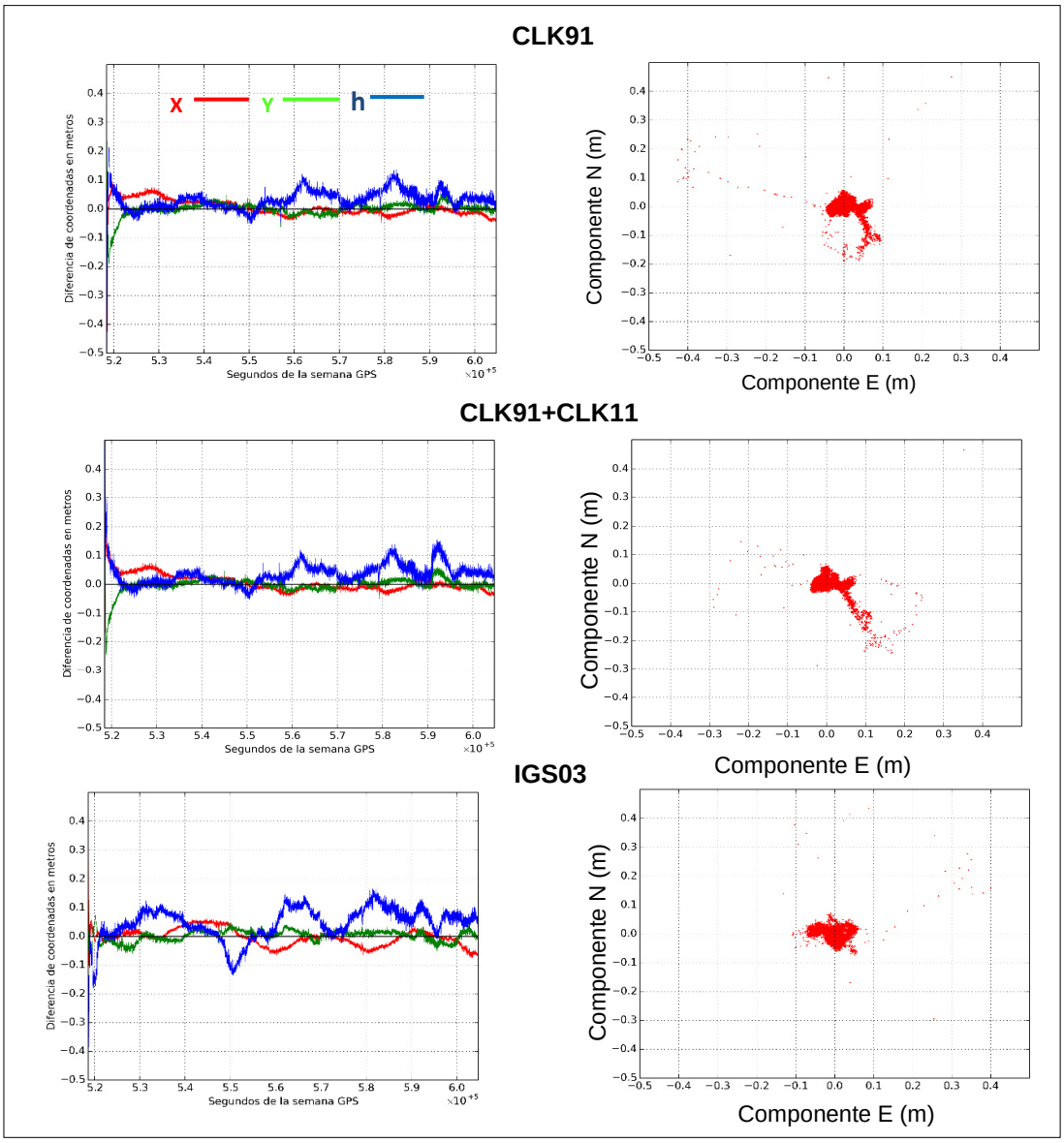


Figura 8.5: Combinación propia época a época frente a modelo individual y modelo IGS. Doy 061/2013

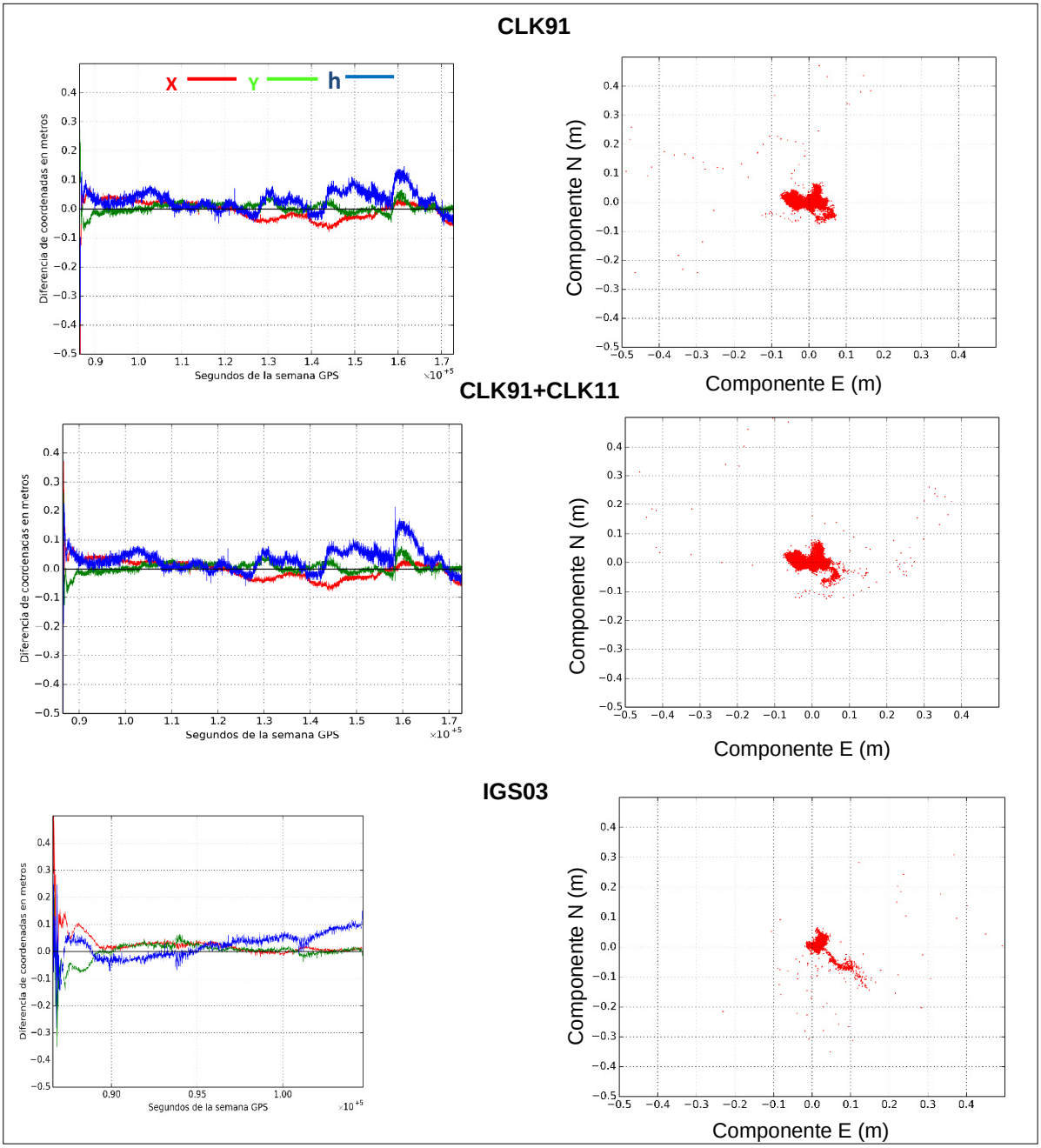
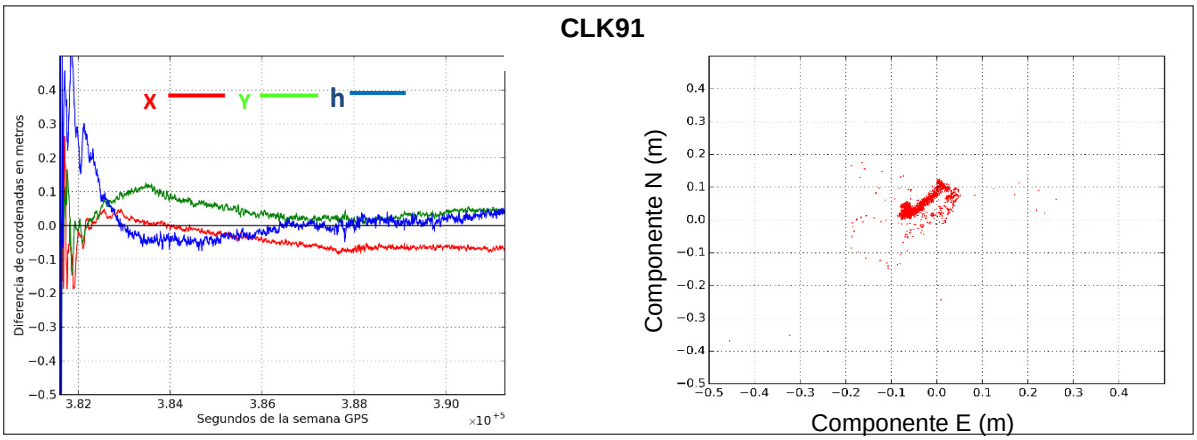


Figura 8.6: Combinación propia época a época frente a modelo individual y modelo IGS. Doy 063/2013



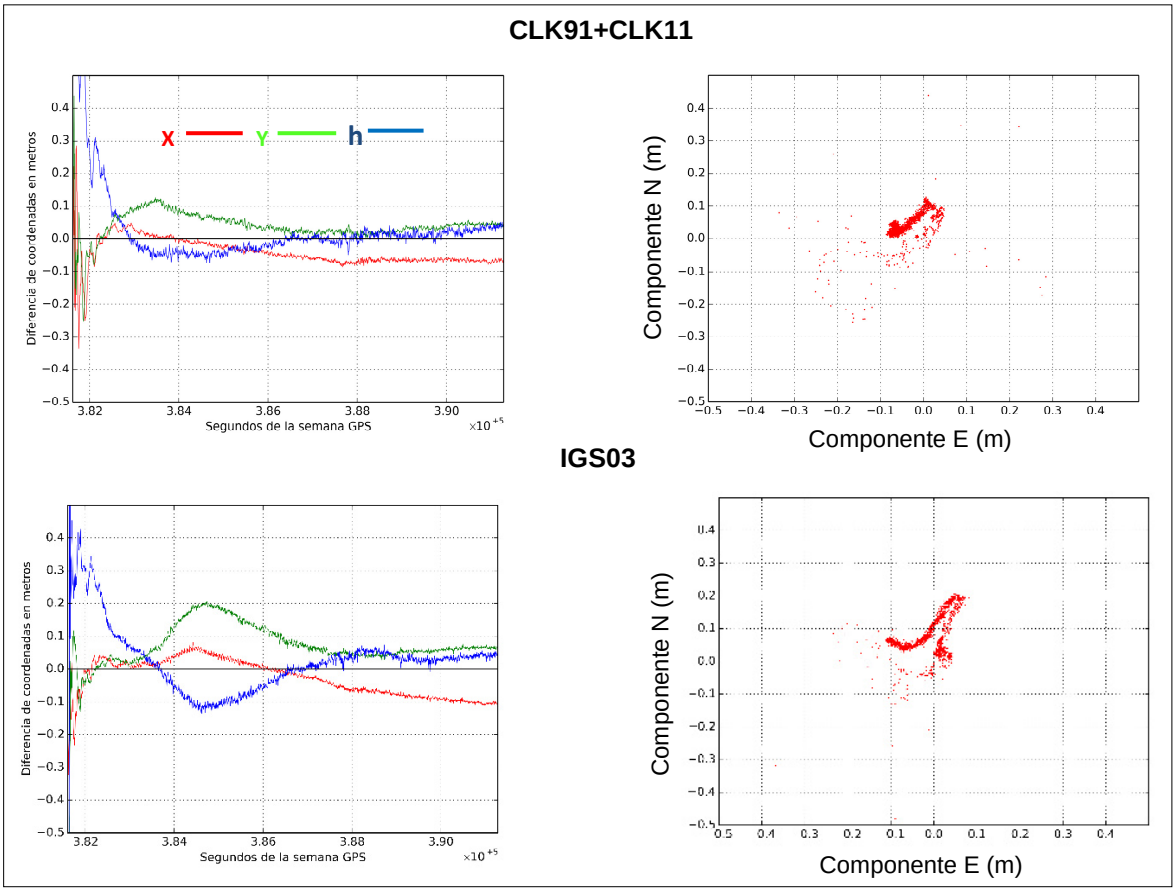


Figura 8.7: Combinación propia época a época frente a modelo individual y modelo IGS. Doy 101 /2013

En todos los casos se comprueba que el producto combinado creado para post-proceso mantiene la precisión del producto individual y mejora la del IGS03, adicionalmente es una buena alternativa al caso en el que el producto final IGS03 no se encuentre disponible, (caso del DOY 063/2013), durante toda la ventana de tiempo.

8.1.2 Post-procesamiento PPP con la implementación de la triple combinación época a época CLK91+CLK11+CLKA1

A continuación, se muestran sesiones simultáneas donde, además de la combinación anterior se ha realizado la composición de los productos CLK91 y CLKA1 en un producto propio para post-procesar, y se ha creado la triple combinación de productos CLK91+CLKA1+CLK11 época a época aprovechando todos los mensajes de correcciones. Se incluye la muestra de combinaciones efectuadas de sesiones llevadas a cabo en el periodo que abarca las GPSWEEK 1735-1736, 1775- 1782, mediante observaciones continuas durante 24 horas cada día.

En la primera de las sesiones mostradas, obsérvese como la solución en tiempo *quasi-real* puede suplir la falta de resultados si se produce un fallo en la determinación en tiempo real de los resultados con PPP:

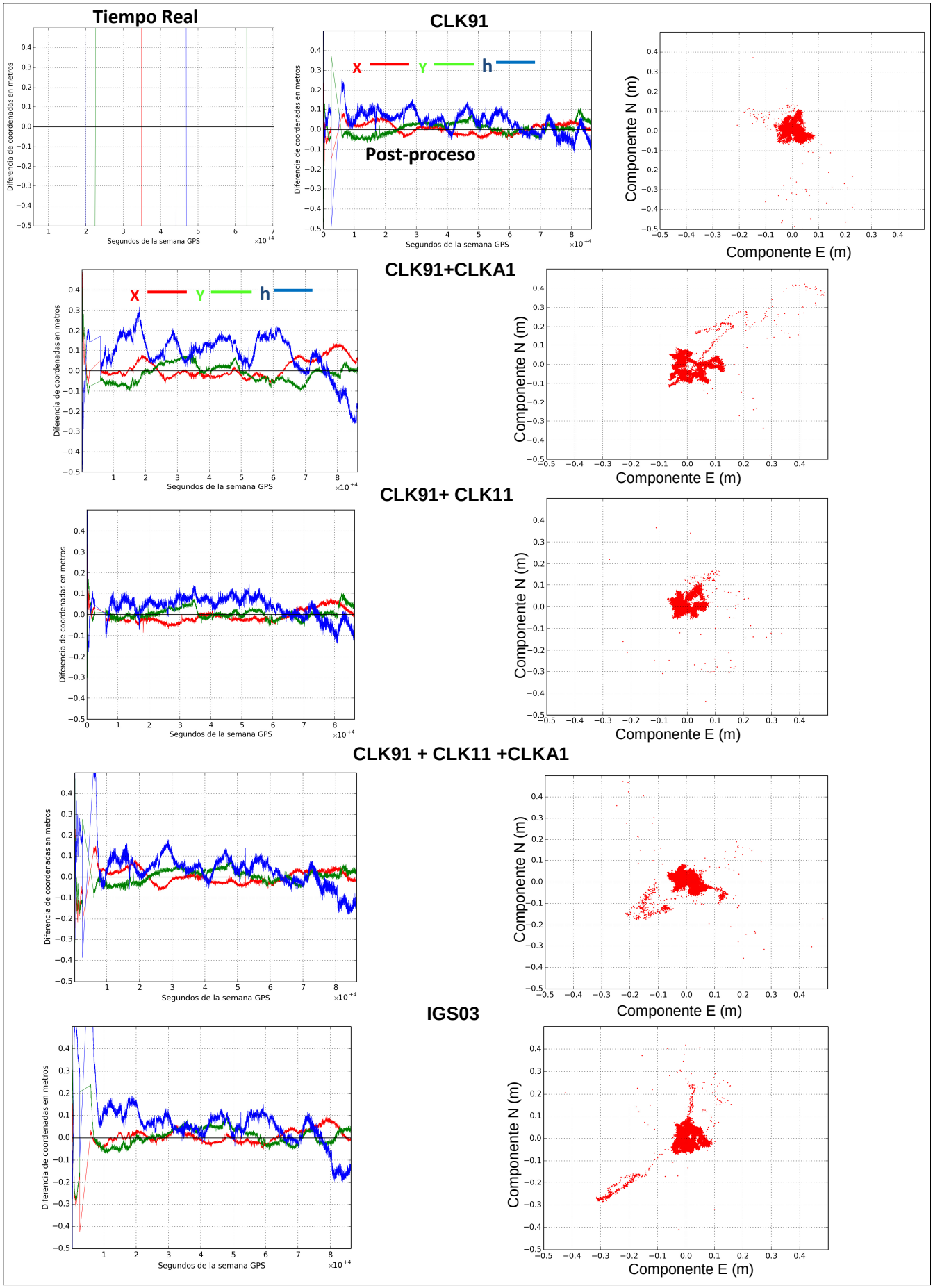


Figura 8.8: Triple combinación propia época a época frente a modelo individual, doble combinación y modelo IGS. Doy 012/2014

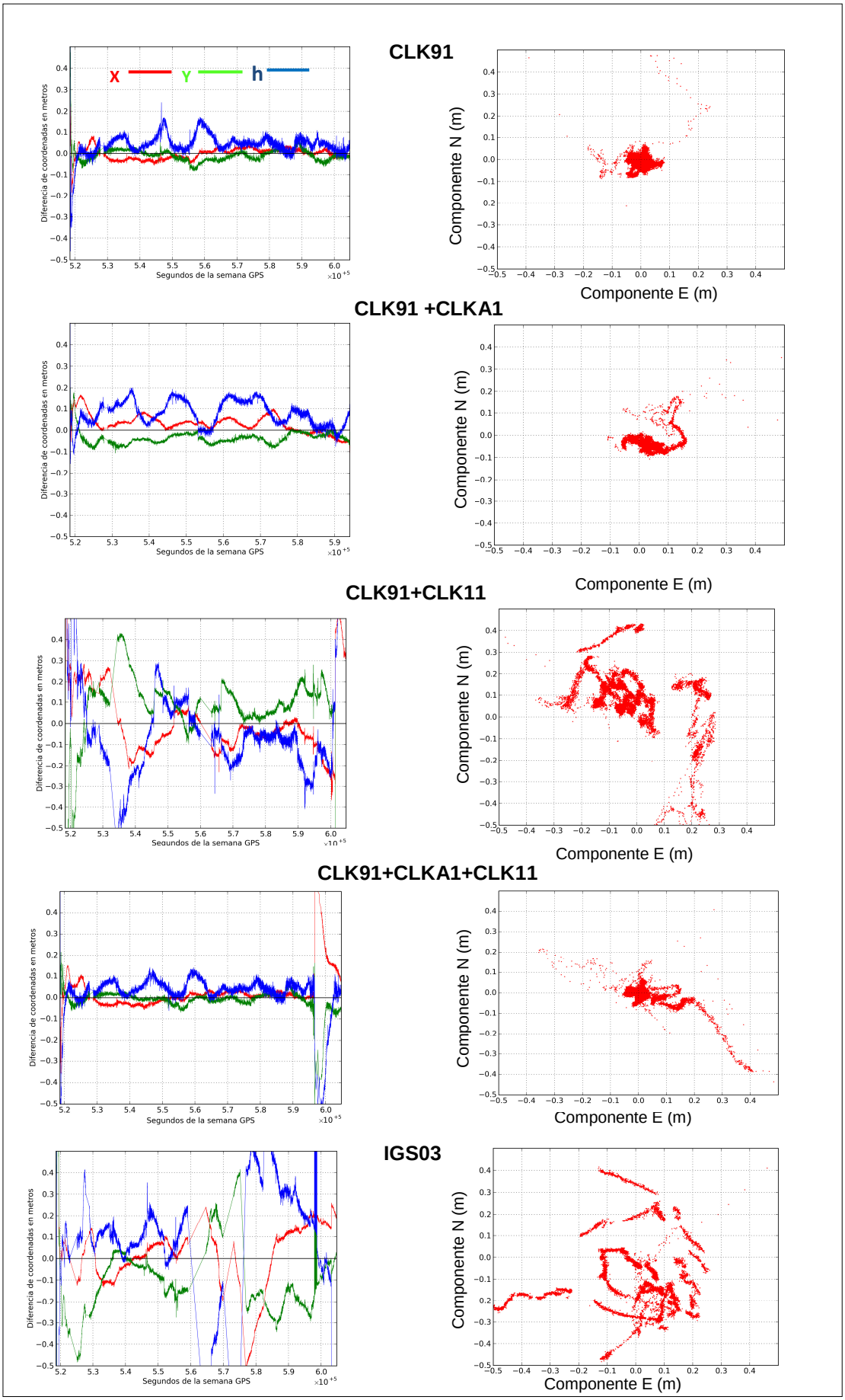


Figura 8.9: Triple combinación propia época a época frente a modelo individual, doble combinación y modelo IGS. Doy 060/2014

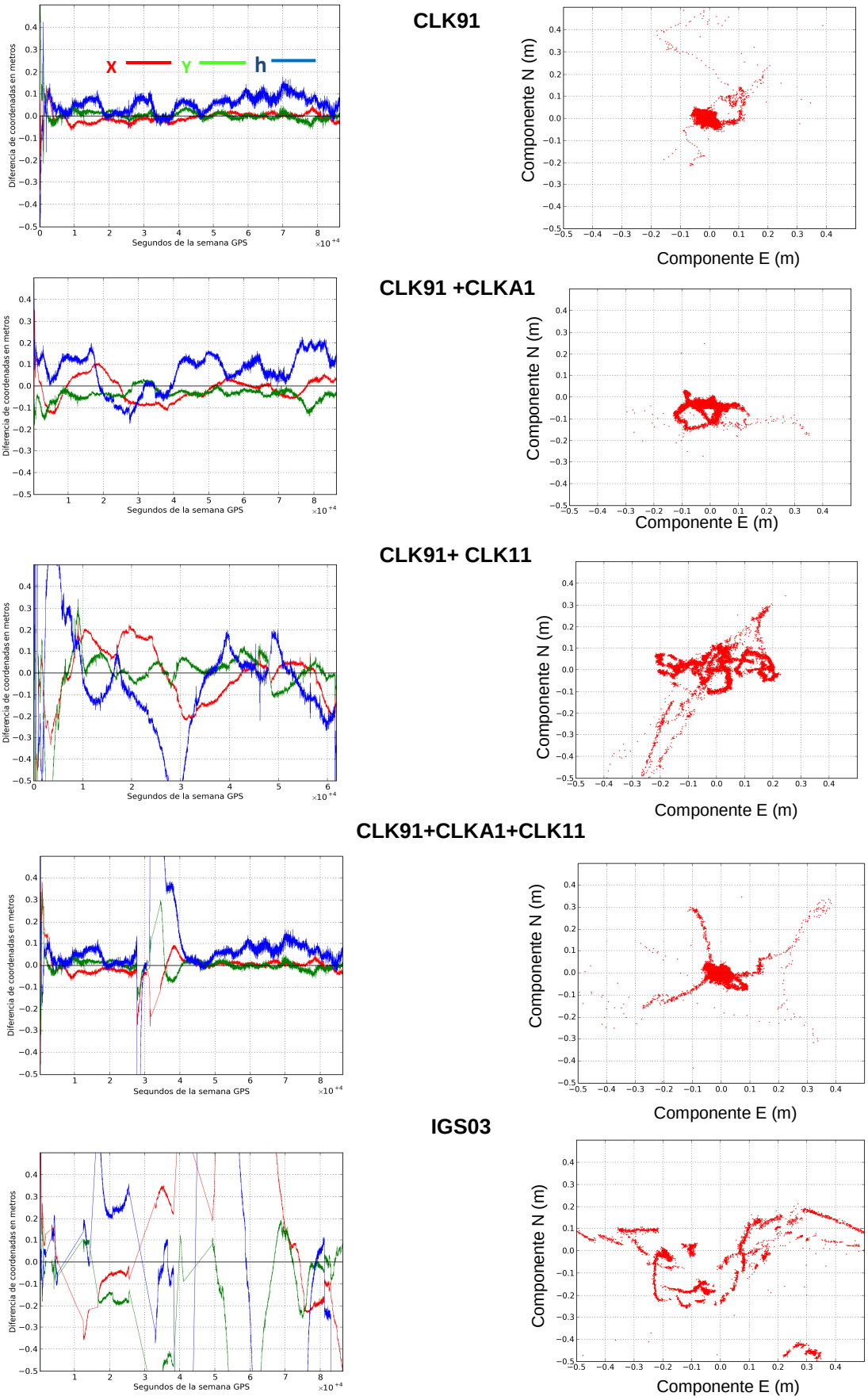


Figura 8.10: Triple combinación propia época a época frente a modelo individual, doble combinación y modelo IGS. Doy 061/2014

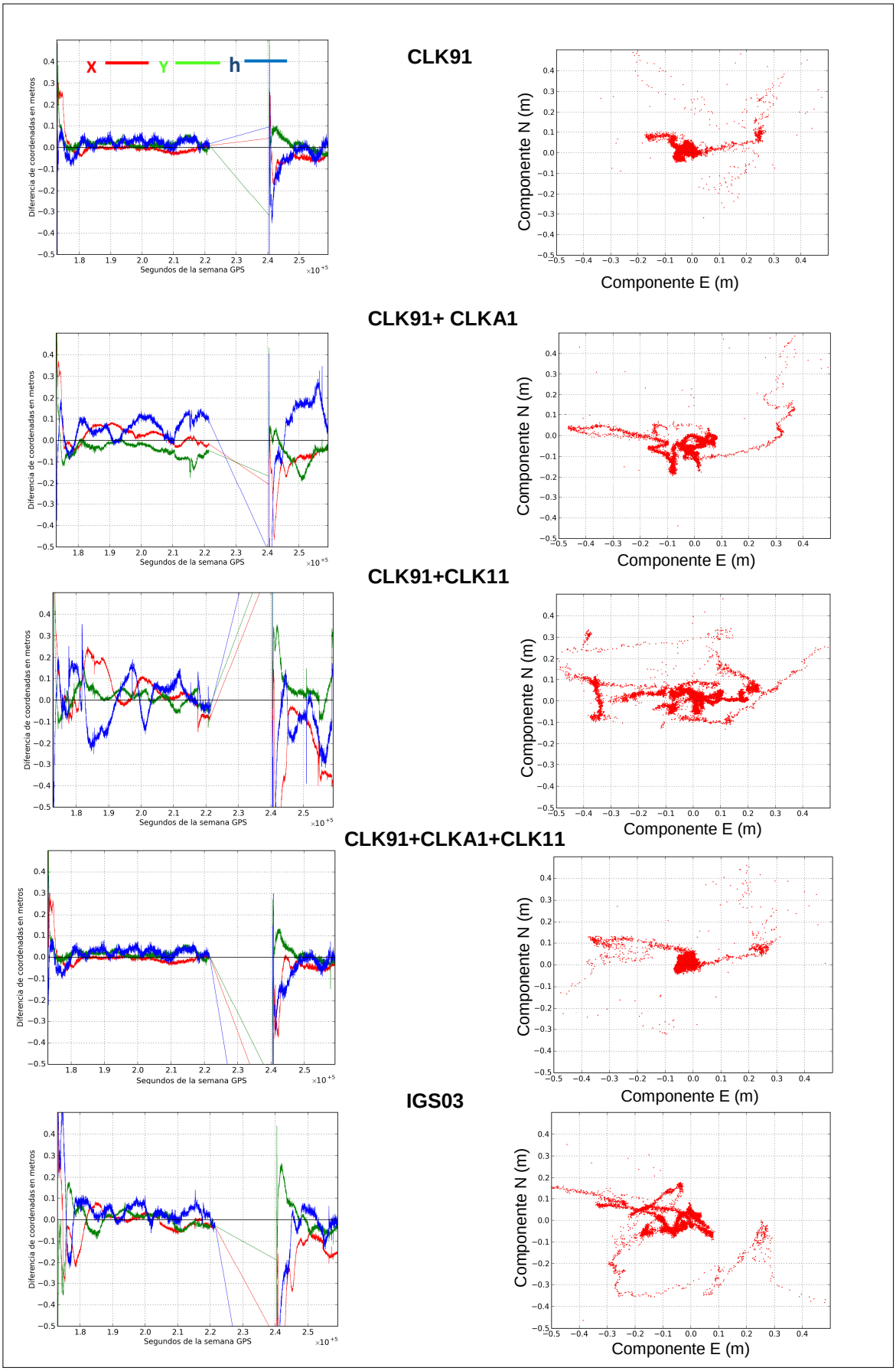


Figura 8.11: Triple combinación propia época a época frente a modelo individual, doble combinación y modelo IGS. Doy 063/2014

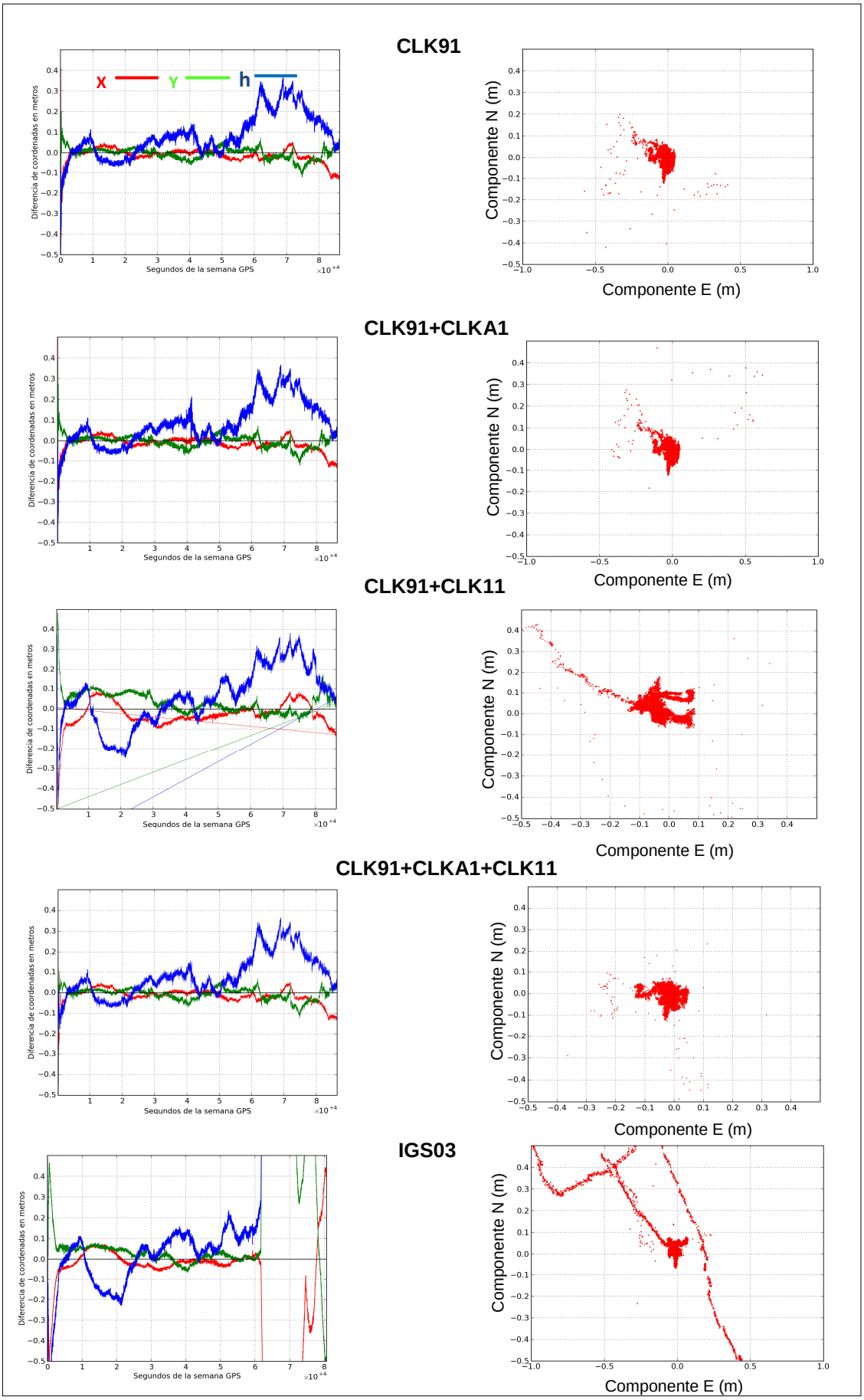


Figura 8.12: Triple combinación propia época a época frente a modelo individual, doble combinación y modelo IGS. Doy 104/2013

Estadísticos para la combinación triple en la solución en post-proceso

Valores Máximos (m), E,N,h	0,8570	0,5910	3,2600
Valores Mínimos (m), E,N,h	-1,0930	-1,1300	-2,9360
Media (m), E,N,h	0,0368	0,0250	0,0743
Desviación Típica (m), E,N,h	0,0570	0,0402	0,1063

% Mayor de 20cm, E,N,h	2,7880	0,6457	7,1613
% Entre 20 y 10 cm, E,N,h	4,8088	1,7563	12,1832
% Menor de 10cm, E,N,h	92,4033	97,5980	80,6552

Tabla 8.4: Estadísticos con el modelo implementado combinación época a época CLK91+CLKA1+CLK11

Valores Máximos (m), E,N,h	0,5250	1,0100	2,8790
Valores Mínimos(m), E,N,h	-0,5740	-0,5930	-2,1150
Media (m), E,N,h	-0,0145	0,0013	0,0463
Desviación Típica (m), E,N,h	0,0418	0,0383	0,0803

% Mayor de 20cm, E,N,h	1,6592	0,4130	5,6325
% Entre 20 y 10 cm, E,N,h	3,3415	0,9808	11,5635
% Menor de 10cm, E,N,h	94,9993	98,6060	82,8042

Tabla 8.5: Estadísticos para la solución de un centro de análisis individual: Modelo CLK91

Valores Máximos (m), E,N,h	10,877	0,972	7,974
Valores Mínimos(m), E,N,h	-1,481	-11,382	-6,361
Media (m), E,N,h	0,0224	0,0118	0,103
Desviación Típica (m), E,N,h	0,1318	0,1002	0,1612

% Mayor de 20cm, E,N,h	9,8923	11,16	24,5698
% Entre 20 y 10 cm, E,N,h	16,6235	11,122	27,0195
% Menor de 10cm, E,N,h	73,4841	77,718	48,4105

Tabla 8.6: Estadísticos para la solución combinada del lado del servidor del IGS:Modelo IGS03

Como se puede observar el modelo propio, correspondiente a la combinación implementada época a época, prácticamente alcanza la precisión del producto del centro de análisis individual y mejora en todos los casos la del producto combinado del IGS generada del lado del servidor, con lo cual resulta una alternativa adecuada para un post-procesamiento horario o subhorario. Nótese también que la disponibilidad del modelo IGS03 es menor, tal es el caso de los Doy 060/2014 y Doy 061/2014 en los que la combinación programada alternativa suple al producto combinado del IGS.

8.1.3. Implementación del producto combinado mediante la media ponderada época a época.

Sea el satélite *s* del cual se conocen todos los valores posibles del *bias* de los distintos observables $b_{CA,}\, b_{P1,}\, b_{P2,}\, b_{C2}$ ..... estimados a través de los centros de análisis por medio de los modelos *CLK1 , CLK2.... CLKn*. Dado que el grado de dispersión que presentan estas magnitudes para un mismo producto y entre distintos productos no es muy elevado, y su variabilidad temporal es muy lenta, es fácilmente calculable para cada satélite *s* y para cada observable un *bias* obtenido a través de la media ponderada.

$$\overline{b_{CA}}^{s}_{clk} = \frac{b^{s}_{CAclk1} w_1 + b^{s}_{CAclk2} w_2 + b^{s}_{CAclk3} w_3 + ... + b^{s}_{CAclkn} w_n}{w_1 + w_2 + w_3 + ... + w_n}$$

$$\overline{b_{P1}}^{s}{}_{clk} = \frac{b^{s}_{P1clk1}w_1 + b^{s}_{P1clk2}w_2 + b^{s}_{P1clk3}w_3 + ... + b^{s}_{P1clkn}w_n}{w_1 + w_2 + w_3 + ... + w_n} ....$$

Del mismo modo se plantea la solución para los valores b_{P2}, b_{C2} ... y para los *bias* de la constelación GLONASS. Obsérvese en el gráfico la representación elaborada de la estabilidad en el tiempo para el satélite G10 del *bias* en P1, entre las GPSWEEK 1760-1809, equivalente a 1 año de datos de medición de este valor, y la ampliación en los gráficos para el satélite G20 para el producto CLK91 y el CLKA1.

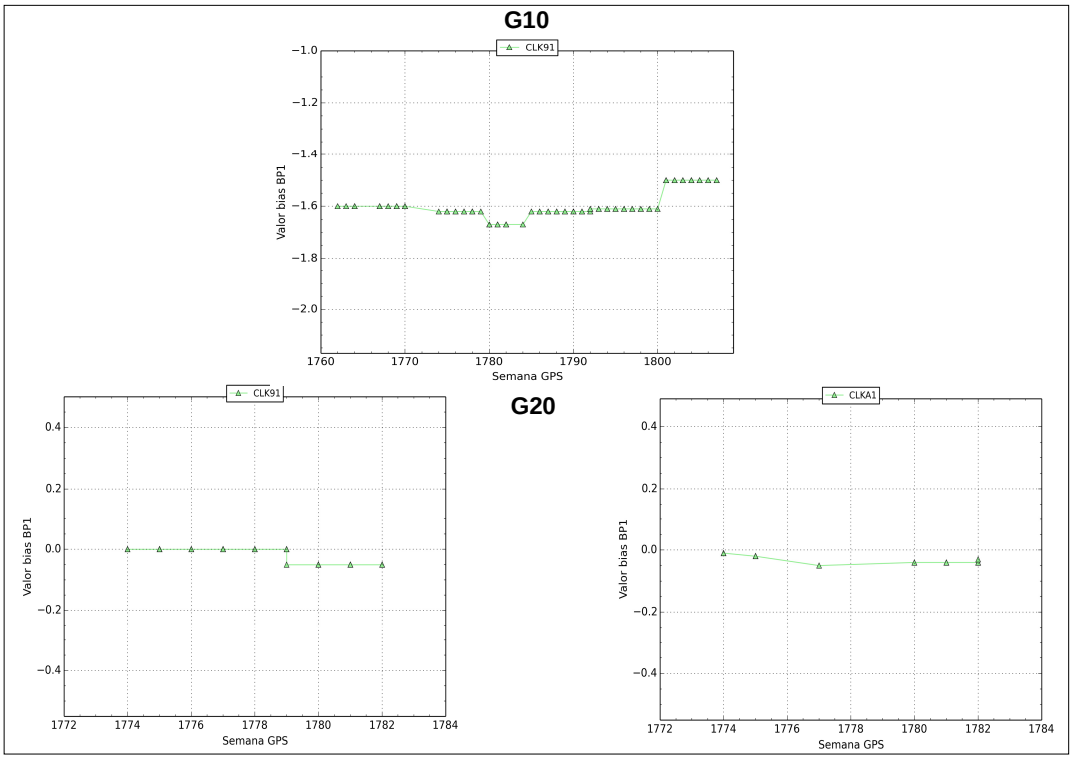


Figura 8.13: Representación de la estabilidad del bias PRN 10 y PRN 20

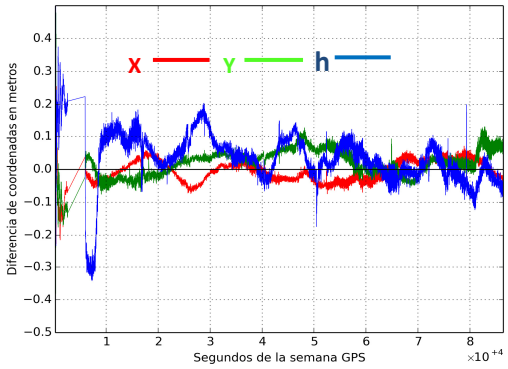
De igual manera se puede proceder para las correcciones a las componentes orbitales, realizando una media ponderada, (recordemos que el producto combinado del IGS, denominado IGS01, se genera de este modo pero obviando los valores de *bias*). En este caso para cada satélite *s* y época t_i, es necesario efectuar la media ponderada de los valores que ofrece cada modelo *CLK1 , CLK2.... CLKn* para cada componente orbital.

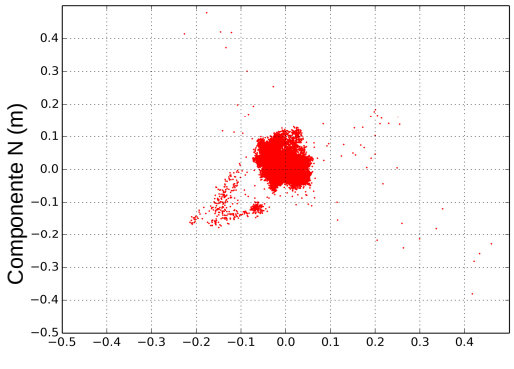
$$[\overline{\delta O}^{S}_{CLK,radial,t_i}\ ,\ \overline{\delta O}^{S}_{CLK,along,t_i}\ ,\ \overline{\delta O}^{S}_{CLK,cross,t_i}]$$

Análogamente, con las velocidades $\delta\dot{O}_{radial}$, $\delta\dot{O}_{along}$, $\delta\dot{O}_{cross}$ se puede llevar a cabo la misma combinación para los valores emitidos de igual IOD. Para la corrección polinomial de segundo grado del reloj del satélite, hay que tener en cuenta que los modelos de reloj son tratados de manera diferente por los distintos centros de análisis en la emisión del producto. En unos casos se transmite solo el valor C_o, (*offset* del reloj), y en otros los coeficientes del polinomio completo $C_o, C_1 ...$ (*offset, deriva ...*).

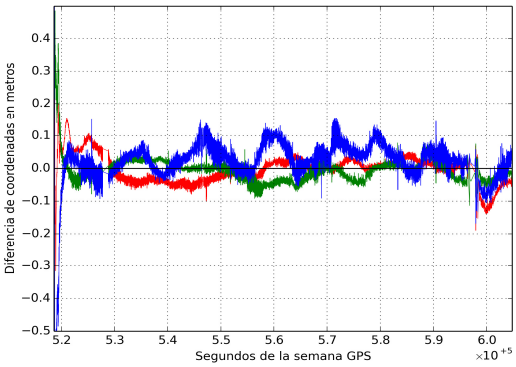
En lo referente al algoritmo de combinación, se ha programado en lenguaje *Python* la carga de modelos, la lectura época a época y el cálculo de la media ponderada, asignando a cada parámetro que interviene en la combinación las varianzas nominales proporcionadas por el centro de análisis que las genera. Se presenta una muestra de los resultados del procesamiento con el producto combinado implementado partiendo de los modelos CLK91+CLKA1+CLK11:

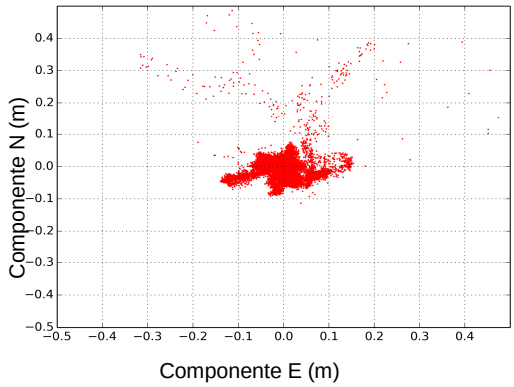
CLK91+CLKA1+CLK11



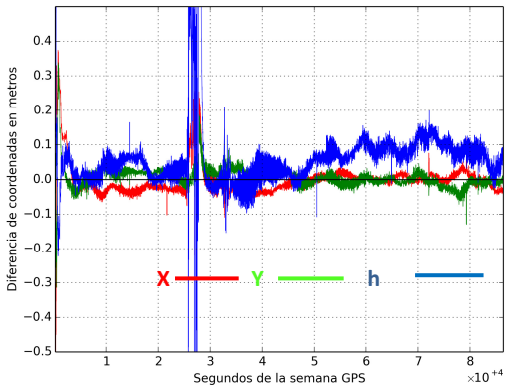


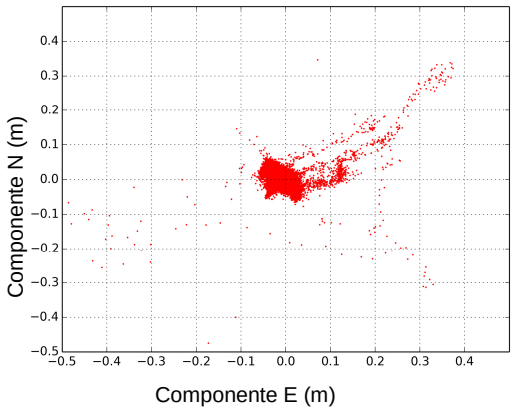
Doy 012/2014



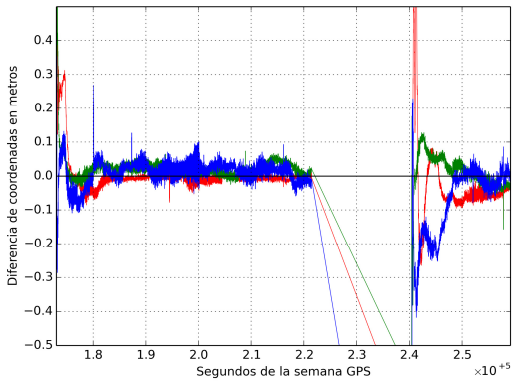


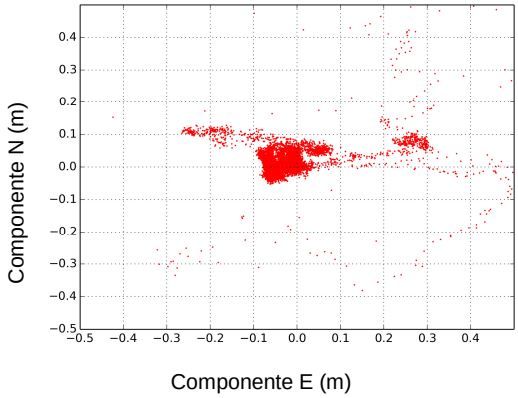
Doy 060/2014





Dov 061/2014





Doy 063/2014

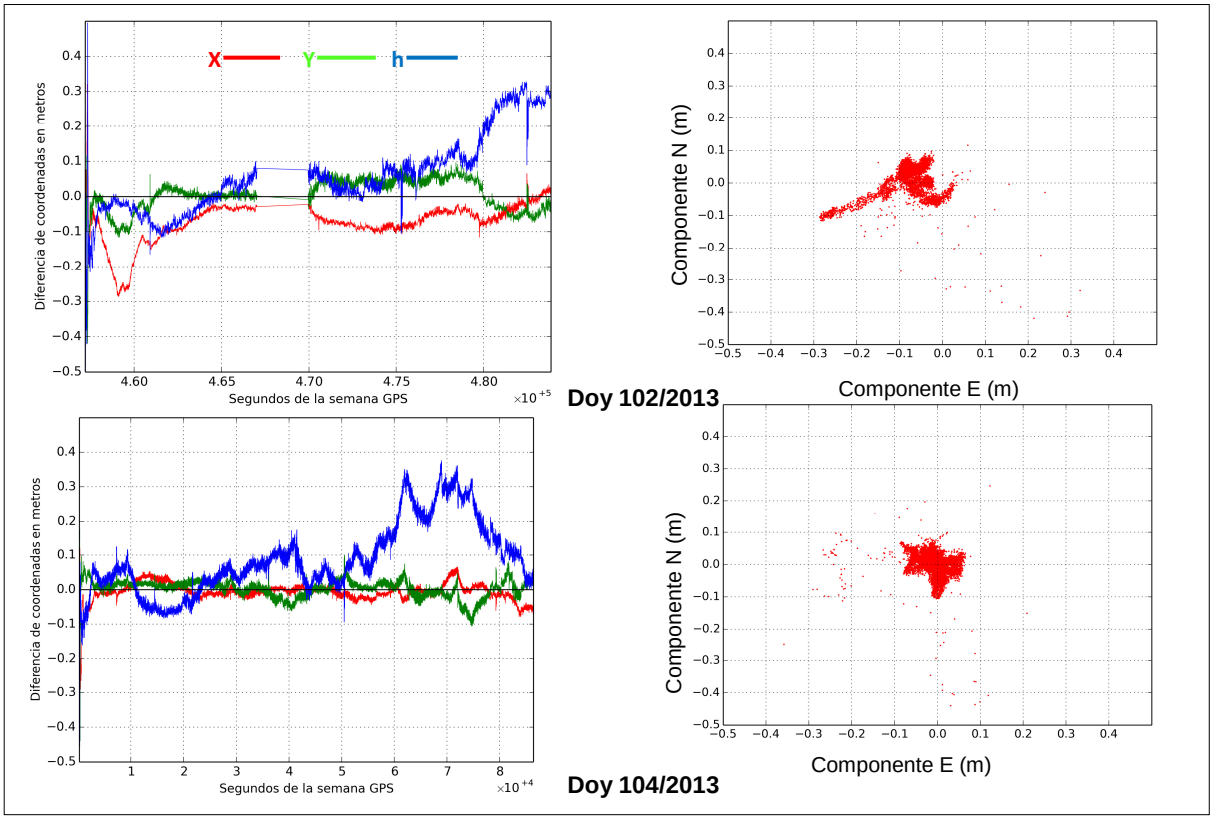


Figura 8.14: Media ponderada época a época de los modelos con triple combinación Doy 012,060,061,063/2014 y Doy 102,104/2013

Valores Máximos (m), E,N,h	0,72600	1,17800	3,68800
Valores Mínimos(m), E,N,h	-1,07200	-0,88200	-3,36500
Media (m), E,N,h	0,03171	0,02443	0,06071
Desviación Típica (m), E,N,h	0,04329	0,03471	0,08829

Tabla 8.7: Tablas de estadísticos del producto combinado promediado

Como se puede observar el producto combinado creado a través de la media ponderada de las correcciones a las componentes orbitales del satelite, velocidades, *bias,* utilizando época a época los coeficientes del polinomio de segundo grado de reloj, presenta menor grado de dispersión en la solución que la anterior combinación, siendo esta propuesta mejor al nivel del centímetro. En precisión el modelo creado por combinación propia se puede equiparar al más óptimo de los productos individuales, (CLK91 o CLK11), a nivel del milímetro si comparamos las tablas de resultados.

Es posible, por tanto, la generación de un modelo para procesamiento horario que mejore el producto combinado que ofrece el IGS, ya que el nuevo modelo implementado creado mejora los resultados en el cálculo tal y como se observa en las tablas.

8.1.4. Productos combinados con detección de *outliers*

Es necesario, sin embargo establecer umbrales de tolerancia para que la combinación pueda ser llevada a cabo de manera efectiva. Esto es lo mismo que decir que se debe reforzar el mecanismo de detección de *outliers* en los modelos generados previamente a su composición.

Teóricamente, la precisión estimada para las componentes radial, orbital y transversal se cifra en 5 cm para los productos del IGS y de los centros de análisis (IGS, 2013), (Laurichesse et al., 2013). Asimismo los modelos polinomiales de corrección de reloj de los satélites se encuentran determinados con una desviación estandar mejor que 120 picosegundos ($1.2E^{-10}$ segundos).

Las discrepancias detectadas entre productos para tiempo real en los análisis realizados, pueden oscilar para las correcciones a la órbita entre unos pocos milímetros y hasta 10 centímetros en circunstancias normales para satélites GPS, y para satélites GLONASS hasta 50 cm. Obsérvese en la muestra el gráfico de la superposición entre las correcciones a las componentes orbitales longitudinal, radial y transversal para el Doy 104/2013 con el PRN 18.

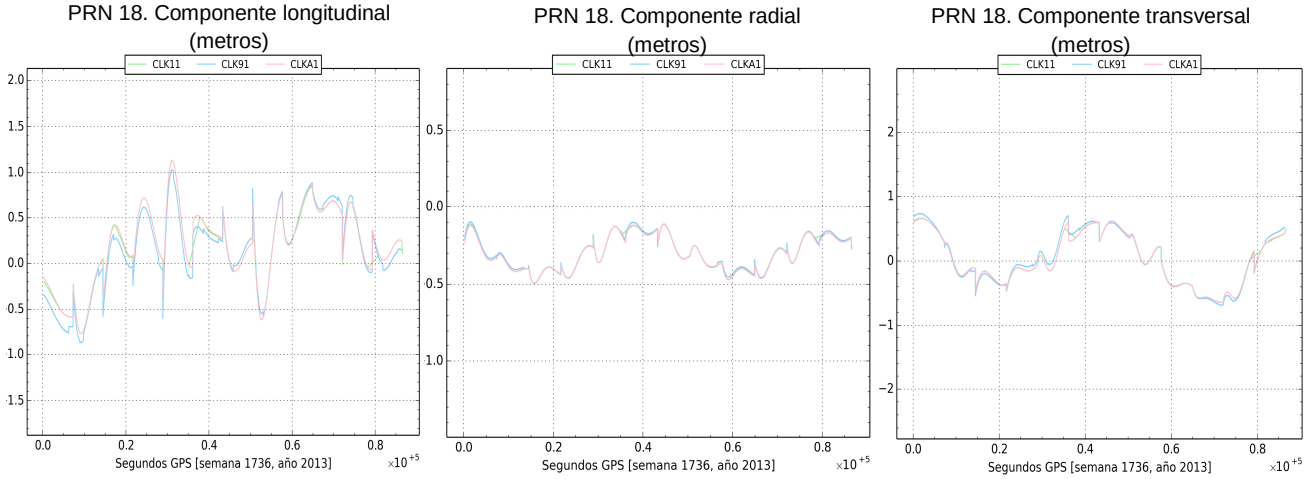


Figura 8.15:Diferencias época a época entre las correcciones a las componentes orbitales radial, longitudinal y transversal época a época en varios modelos. PRN 18.

No obstante, se ha detectado problemas en el caso de falta de disponibilidad del modelo o simplemente debido a problemas en su determinación en tiempo real, por la falta de criterio homogéneo entre los centros de análisis. El hecho de extrapolar la parte predicha de las efemérides ultra-rápidas del IGS o adoptar unas propias para la determinación de las correcciones a las órbitas, puede llevar a discrepancias en la determinación de las correcciones a las órbitas a emitir en el modelo. También se ha detectado asignaciones variables del identificador IOD al grupo de datos emitidos entre los distintos centros de análisis, como puede observarse en el gráfico que se adjunta de la semana GPS 1781 para la componente longitudinal del satélite GLONASS R03, donde se representan las magnitudes de las correcciones en las mismas épocas para varios modelos (CLK11, CLK91, CLKA1).

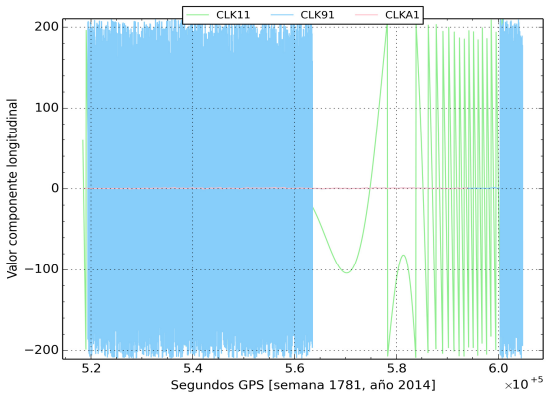
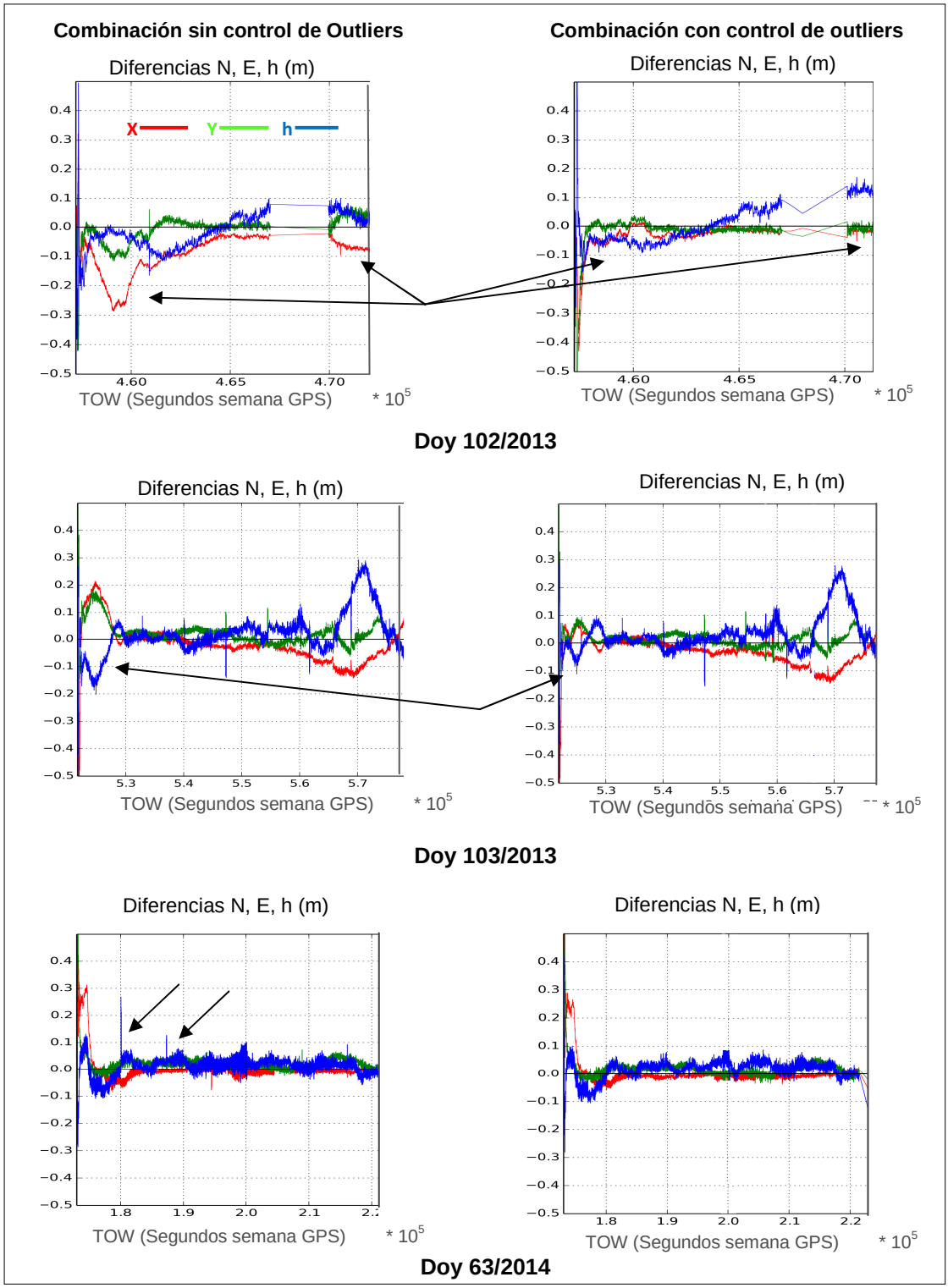


Figura 8.16: Outlier en las correcciones a las componentes orbitales GLONASS R03. Diferencias en metros.

Los bias en los observables b_{CA}, b_{P1}, b_{P2} ..., aunque son muy estables en el tiempo, también están sujetos a *outliers*, o diferencias de criterios en su emisión. Determinados modelos, (el CLK11 por ejemplo), emiten este valor como nulo, asumiendo que la solución PPP en tiempo real solo va a utilizar observaciones de fase. Si se combina este modelo con otro, donde se quieran aprovechar las magnitudes de los *biases* de todas las señales posibles, este aspecto debe tenerse en cuenta.

Por todo ello, resulta necesario establecer controles sobre los modelos previamente a realizar combinaciones. Las diferencias entre modelos pueden determinarse en tiempo real en la práctica, y establecer a partir de ellas una serie de filtros o criterios de aceptación para determinar si determinados valores deben formar parte del modelo combinado. A continuación se muestran los

resultados prácticos de aplicar este filtro, ampliando la parte de los gráficos donde se producen mejoras más significativas. El criterio aplicado ha consistido en utilizar el RMS o error medio cuadrático conocido para establecer cuando un valor de corrección orbital o de *bias* se separa en exceso del valor promediado entre distintos centros, y del valor estimado por otro centro de análisis:



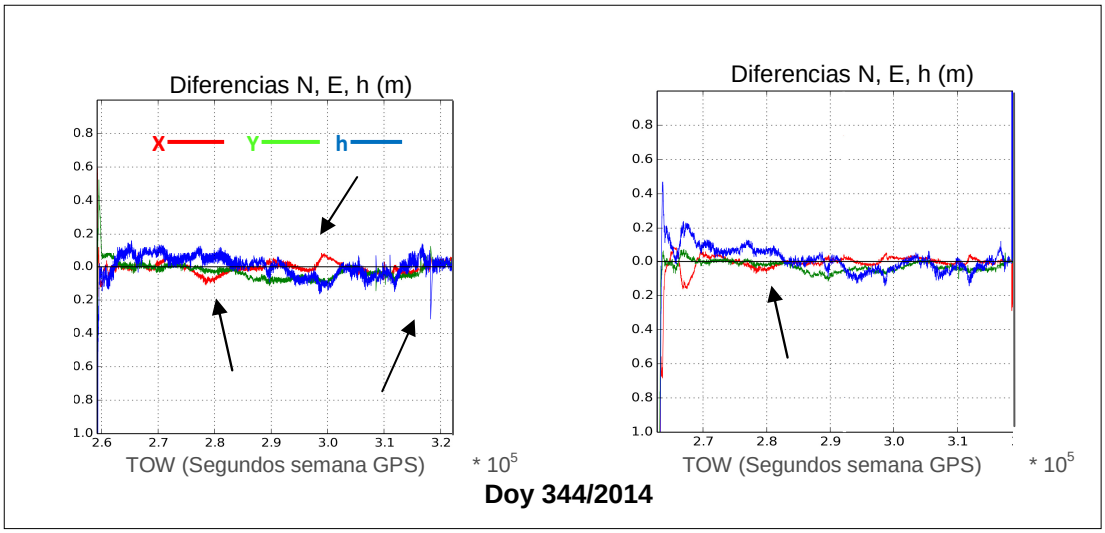


Figura 8.17: Control de outliers época a época para generación de un producto combinado. Doy 102,103/2013, Doy 063,344/2014

Puede observarse como disminuyen en general los *offsets* con respecto al valor de referencia. Los resultados eliminando de la combinación aquellos valores fuera de tolerancia consiguen mantener un *offset* promedio aceptable en la posición obtenida por PPP. Se ha obtenido alrededor de 3 cm para las componentes N,E, y 6 cm de sesgo para la componente h para el modelo combinado creado, equiparable totalmente al producto de un solo centro de análisis y, por otro lado, este nuevo producto es más robusto frente a la falta de recepción de un solo modelo.

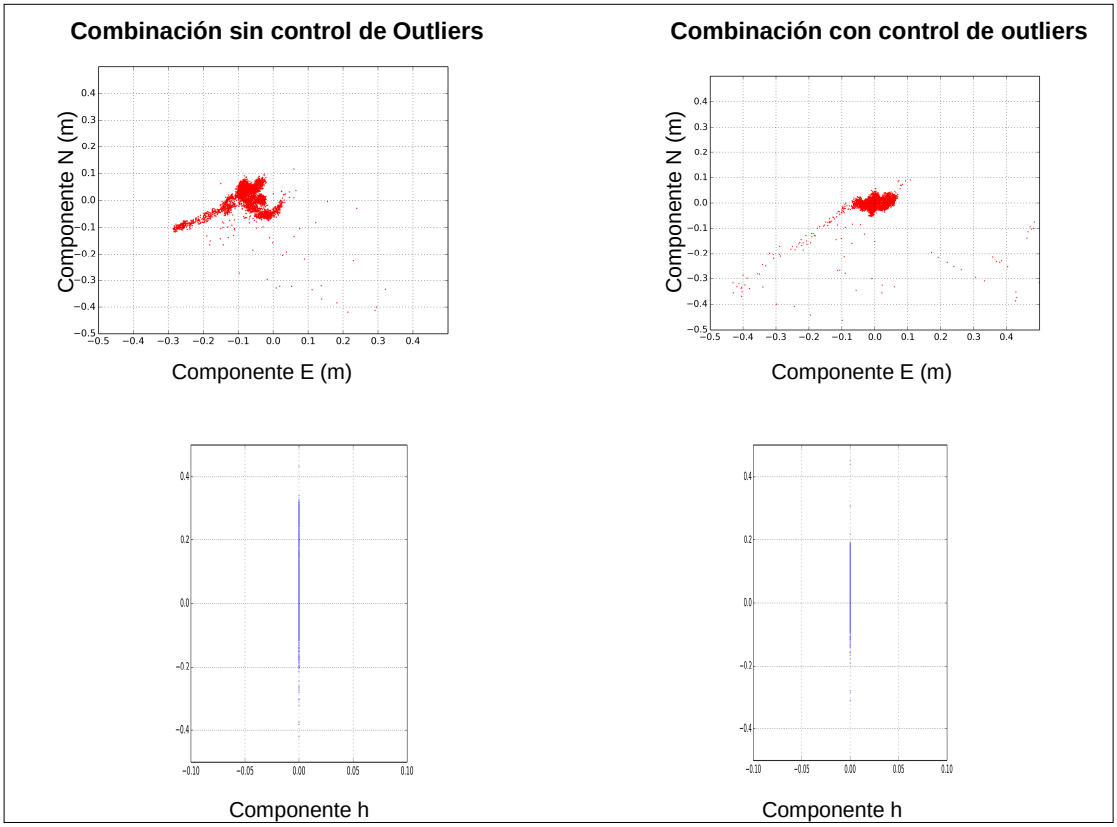


Figura 8.18: Sesgo X,Y,h de la combinación con control de outliers. Doy 102/2013

8.2. Estrategias de combinación de productos en tiempo real

Al inicio del capítulo de combinación de productos veíamos un análisis del posicionamiento PPP en tiempo real consistente en emplear un producto combinado final proporcionado por el *International GNSS Service* (IGS), frente a un producto generado por un centro de análisis individual, comprobando el mejor rendimiento en el segundo caso que en el primero. A continuación mostrábamos diversas estrategias de combinación para procesamiento continuo a través de productos combinados ultra-rápidos generados del lado del usuario, viendo la mejora que suponían las implementaciones llevadas a cabo en la presente investigación.

En este apartado se va a estudiar la estrategia de combinación más adecuada para el caso de tiempo real. La obtención de un producto óptimo en tiempo real como composición de distintos centros de análisis es un reto todavía pendiente para el posicionamiento PPP.

Esta combinación puede llevarse a cabo a su vez a través de dos técnicas claramente diferenciadas: la combinación época a época o la combinación a través del algoritmo recursivo basado en filtros Kalman (Capítulo 4). Tal y como se ha visto en capítulos anteriores, dado que existen varios centros de análisis generando productos, (capítulo 3), las combinaciones que se pueden dar son múltiples, por lo que, previamente ha sido necesario seleccionar aquellos productos que muestran un grado de acuerdo mayor, distribuían correcciones a las constelaciones GPS+GLONASS, estaban referidos al centro de fase de la antena y presentaban mejor latencia, mayor sincronización, disponibilidad y estabilidad para el caso de tiempo real.

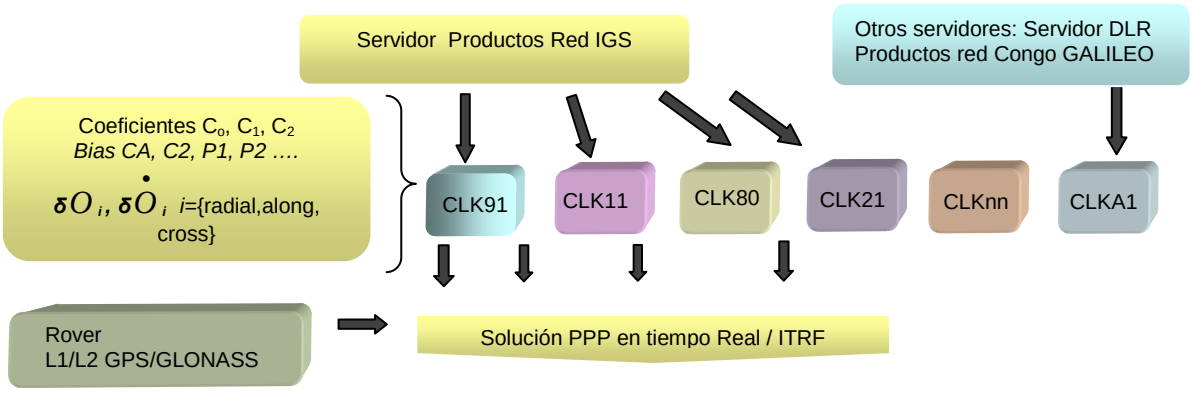


Figura 8.19: *Streams* de modelos de osciladores y órbitas para participar en la combinación

8.2.1. Combinación época a época frente a combinación por filtros Kalman.

Así como para el producto ultra-rápido con fines de post-procesamiento la combinación época a época ofrecía resultados muy óptimos, en tiempo real los resultados de mayor rendimiento se obtuvieron mediante la combinación de filtros Kalman.

El filtro Kalman, como se detalla en el capítulo 4, sirve para poder identificar o predecir variables o parámetros no medibles de un sistema dinámico lineal, conocidas las varianzas que afectan a determinadas variables. Tiene la propiedad de poder aplicarse al caso de tiempo continuo y su aplicación sigue dos fases fundamentales: predicción y corrección. En la primera fase de predicción de valores, se realiza una estimación *a priori* y se conoce la covarianza del error asociada a la estimación. En la segunda fase de corrección, se actualizan los valores de la medición de entrada (con el *stream* procedente de las observaciones u otros modelos), se determina la ganancia de Kalman y se procede a la actualización de los valores estimados anteriormente.

Los gráficos siguientes ilustran las diferencias que conlleva trabajar mediante una u otra aproximación a través de una muestra de sesiones llevadas a cabo durante 30 días. En primer lugar se procedió a realizar distintas sesiones en paralelo en tiempo real con la combinación época a época (gráficos representados en la columna de la izquierda), frente a la combinación por filtros Kalman (columna derecha), con los modelos CLK91+CLK11, y en una segunda fase se procedió a analizar ambas técnicas

con la combinación CLK91+CLKA1. Las épocas de medida corresponden al valor de 1 Hz en todos los casos.

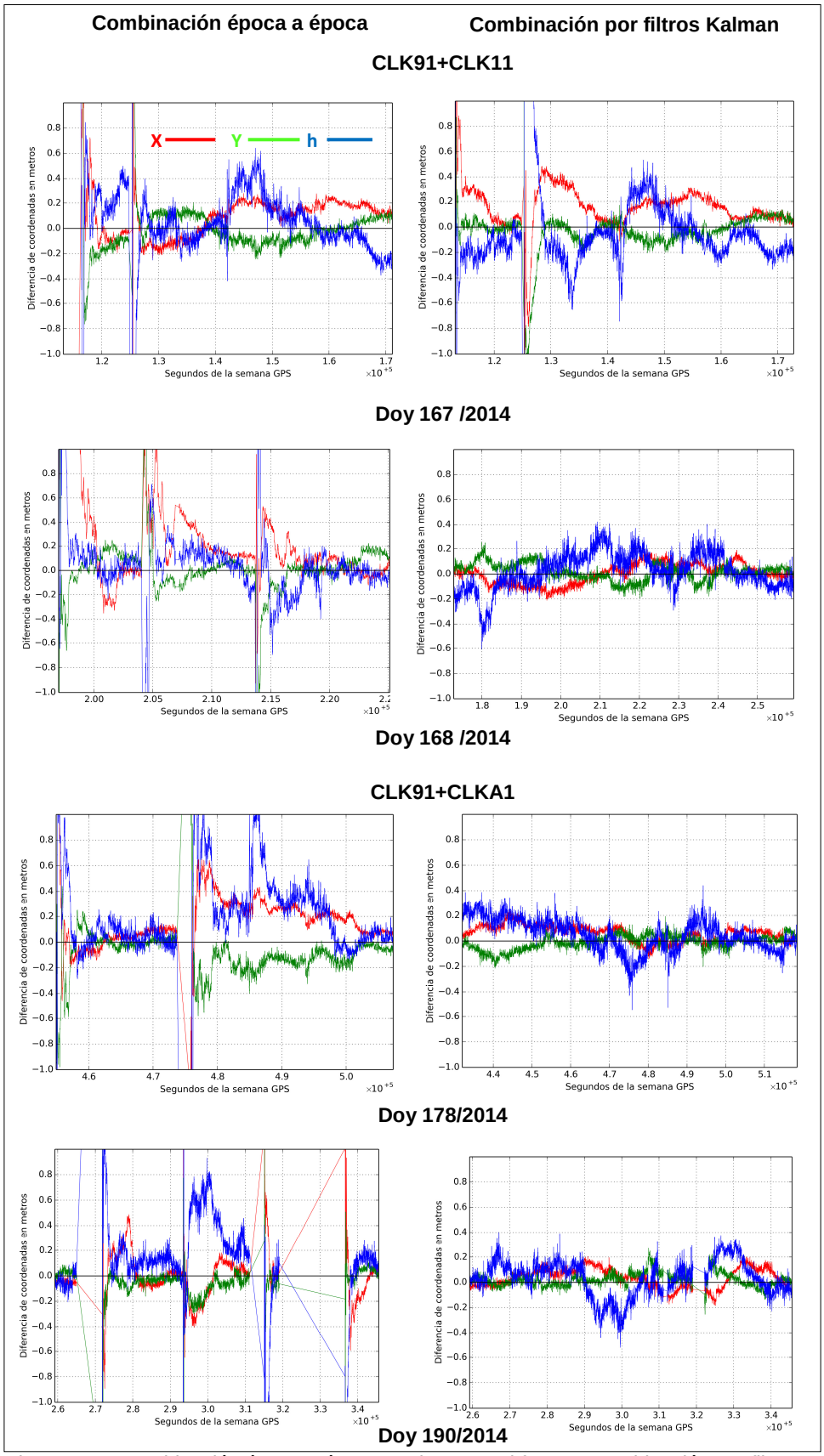


Figura 8.20: Combinación época a época en tiempo real frente a combinación por filtros Kalman.

Para la obtención de las soluciones de PPP en tiempo real se han utilizado las librerías C++ del BNC que permiten asignar varianzas conocidas a cada modelo a la hora de hacer la combinación, tal y como se explicaba en el apartado del desarrollo del filtro Kalman, (Capítulo 4), junto a la llamada a las librerías *Python* para cálculo y análisis.

De los 30 días de observaciones en tiempo real, durante apenas el 37% del tiempo la combinación época a época arrojó resultados continuos mientras que la combinación por filtros Kalman presentaba resultados más estables. Ello es debido a que la latencia en la generación de cada uno de los modelos y la correcta sincronización en el *streaming* de los modelos de correcciones de reloj, órbitas y *bias*, son un aspecto crítico en el instante de la combinación con otro producto. En el caso en que uno de los modelos de un centro de análisis individual sea emitido con peor latencia y por tanto no sincronizado con respecto a otros modelos, la combinación época a época ya no es posible, por lo tanto resulta aconsejable emplear el algoritmo predictivo y recursivo basado en los filtros Kalman para el caso de tiempo real.

En el siguiente gráfico se muestra el rendimiento de una y otra técnica a lo largo de varios días, reflejando las horas diarias útiles en que el posicionamiento por PPP en tiempo real llega al menos a ofrecer resultados por debajo de un umbral de los 20 cm.

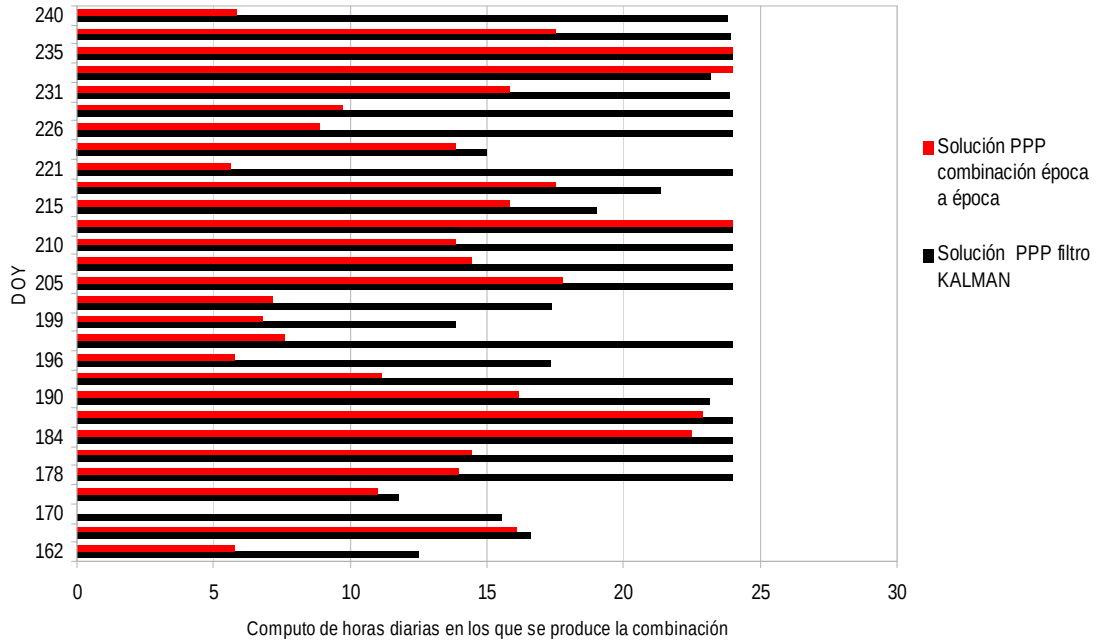


Figura 8.21: Cómputo de horas/día con convergencia en la combinación en tiempo real

8.2.2. Creación de nuevos productos en tiempo real mediante la combinación por Filtros Kalman.

Por todo lo dicho, los escenarios implementados en tiempo real que se muestran en este capítulo utilizan la técnica de combinación basada en filtros Kalman.

En primer lugar, es necesario recalcar, que el uso de un solo producto responde mejor que la combinación de varios de ellos en tiempo real ya sea en cuanto a tiempos de convergencia, tiempos dentro de un umbral de precisión determinado o valores estadísticos.

Tal es el caso del producto CLK91, que ofrece muy buenos resultados llegando a alcanzar precisiones de 3 cm. No obstante, tiene la desventaja de depender únicamente de la operatividad del proceso de generación de modelos y del *streaming* de un único centro de análisis individual. Con el fin de solucionar este problema el IGS elabora productos combinados, ganando en redundancia pero empeorando en rendimiento y precisión, al estar el proceso de combinación de productos en fase experimental de desarrollo. El objetivo sería, por tanto, intentar mejorar la combinación del IGS, y hallar el mecanismo para igualar el rendimiento y precisión del caso más favorable, (el uso de un solo

producto).Veamos varios casos de combinación de modelos para ver su rendimiento. Obsérvese que el filtro Kalman no responde con todas las combinaciones con la misma robustez:

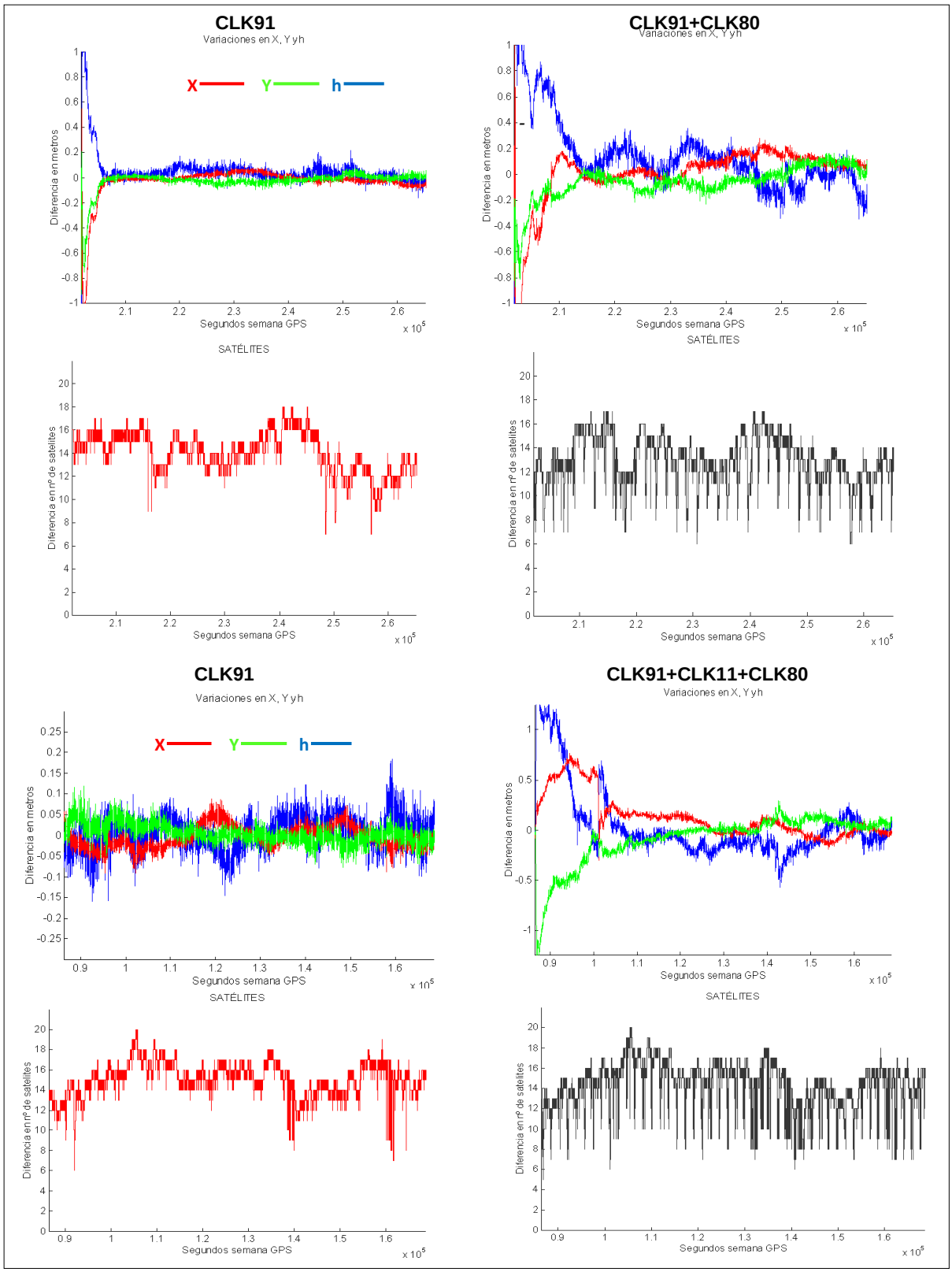


Figura 8.22: Solución PPP tiempo real época a época. Modelo CLK91 frente a la combinación CLK91+CLK80, CLK91+CLK80+CLK11 -Doy 043,042 /2013

Se muestran los estadísticos calculados, donde se observan con más claridad los resultados obtenidos:

CLK91	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,088	0,118	0,184	Mayor de 20 cm	4,4274	3,6099	4,4954
Valor Mínimo (m)	-0,091	-0,078	-0,159	Menor de 20 cm	95,5726	96,3901	95,5046
Valor Promedio (m)	0,021	0,017	0,030				
Valor Desviación estándar (m)	0,025	0,022	0,037				
CLK91/80	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,490	0,165	3,446	Mayor de 20 cm	11,5958	6,5954	26,3166
Valor Mínimo (m)	-1,363	-0,874	-4,765	Menor de 20 cm	88,4042	93,4046	73,6834
Valor Promedio (m)	0,138	0,098	0,209				
Valor Desviación estándar (m)	0,238	0,125	0,315				
CLK91/80/11	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,766	0,292	1,630	Mayor de 20 cm	16,6799	18,2030	34,0218
Valor Mínimo (m)	-0,305	-1,291	-0,577	Menor de 20 cm	83,3201	81,7970	65,9782
Valor Promedio (m)	0,114	0,116	0,19				
Valor Desviación estándar (m)	0,213	0,214	0,248				

Tabla 8.8: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLK80, CLK91+CLK80+CLK11 -GPS WEEK 1726-1728

En el segundo caso, como se puede observar, se añade el modelo CLK11 en la combinación de productos. Se detecta en primera instancia, que existe más homogeneidad en precisión con la triple combinación, pero el tiempo de convergencia ha sido peor. Ello podemos verlo en el tiempo en que la solución se encuentra por debajo de un determinado umbral, por ejemplo, para el caso de los 20 cm el tiempo en el rango es mejor en el caso de combinar solo los modelos CLK91/CLK80. El cambio más rápido en la geometría de los satélites y el mayor número de satélites rastreado puede llevar, en el caso de la franja de tiempo empleada en la doble combinación, a arrojar mejores tiempos de convergencia que en la combinación triple, donde el escenario multi-constelación era menos robusto.

A continuación se presentan varios modelos donde se analiza la convergencia de la solución en el filtro Kalman, pero en sesiones simultáneas y sobre la misma estación permanente, (BRUX), con el fin de disponer de la misma constelación rastreada.

8.2.2.1 Rendimiento de la combinación de soluciones CLK11+CLKA1

En este caso se analizan tres escenarios con la técnica PPP en tiempo real, en los cuales se ha llevado a cabo observaciones simultáneas.

En primer lugar, se va a intentar evaluar cómo influye la reducción de latencia en el modelo combinado debido a la carga de proceso del servidor que lo genera. Como se ha explicado anteriormente, el modelo IGS03 es un modelo generado a través de la combinación de productos de varios centros de análisis, el proceso de combinación puede verse afectado por *outliers,* por inconsistencias entre modelos o por la propia latencia de llegada de los modelos individuales más la latencia de llegada al usuario del modelo IGS03.

En uno de los escenarios se incluye la combinación de los productos CLK11 y CLKA1 a través de filtros Kalman. El modelo CLKA1 procede de la red de rastreo CONGO[1] , con las efemérides de la constelación GALILEO transmitidas en el *streaming* que genera dicha red, en la otra sesión solo se utiliza el modelo CLK11. En la tercera sesión simultánea se emplea el producto combinado IGS03.

[1] *Cooperative Network for Giove Observation*

Es necesario resaltar que la solución IGS03, llevada a cabo por el coordinador de centros de análisis del proyecto Real-Time del IGS, se realiza por el mismo método que se va aplicar en la combinación propia, es decir mediante Filtros Kalman.

Esta solución se testeó en tiempo real durante algo más de 4 semanas, y prácticamente las sesiones para cada día abarcaban un mínimo de 12 horas y un máximo de 24 horas de seguimiento continuo. En cada una de las combinaciones se puede aplicar una varianza asignada a cada uno de los modelos que intervienen dentro del filtro Kalman, en cada caso se ha adoptado la varianza nominal que de manera general informa cada centro de análisis:

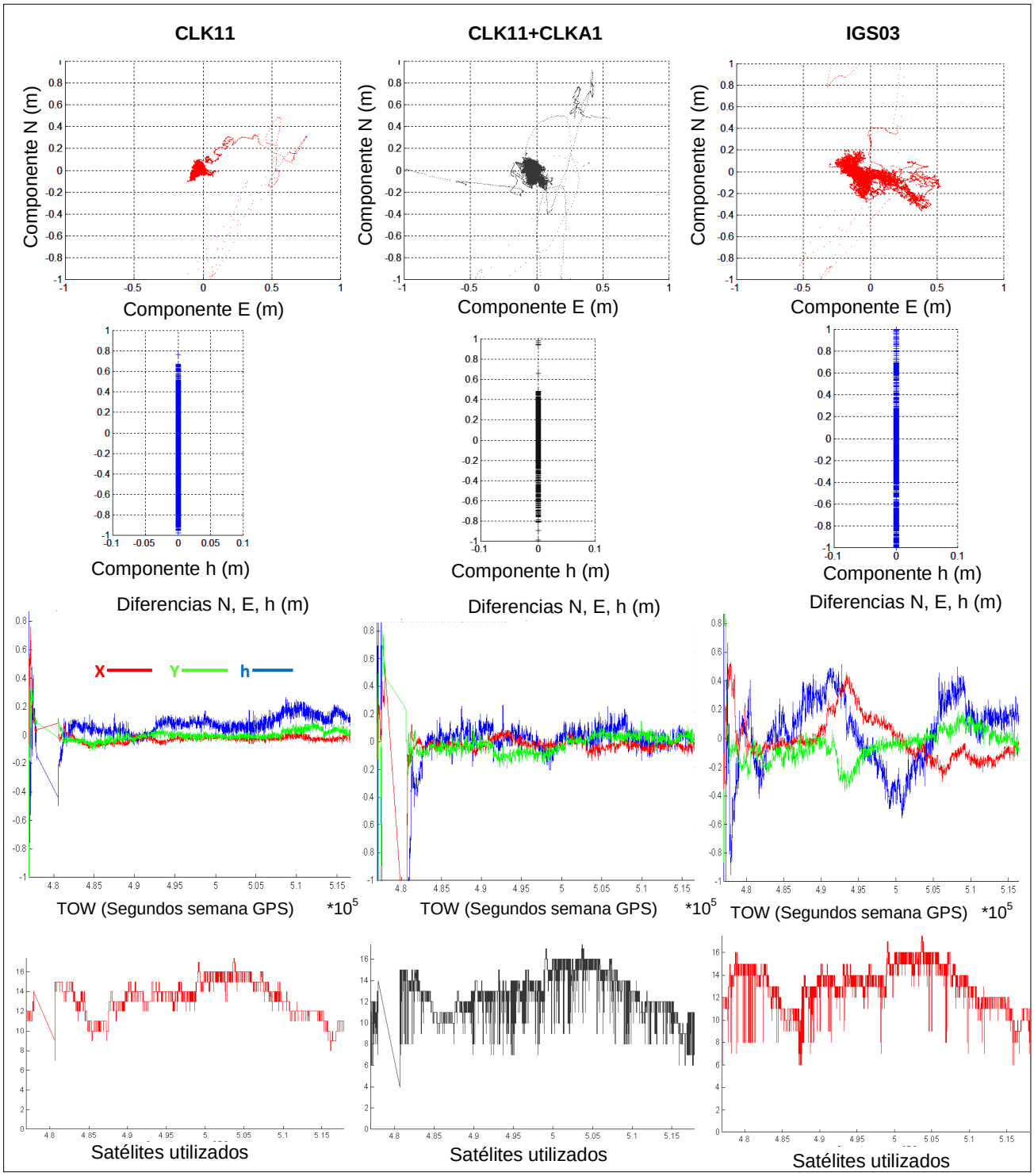


Figura 8.23: Combinación CLK11+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 046 /2013

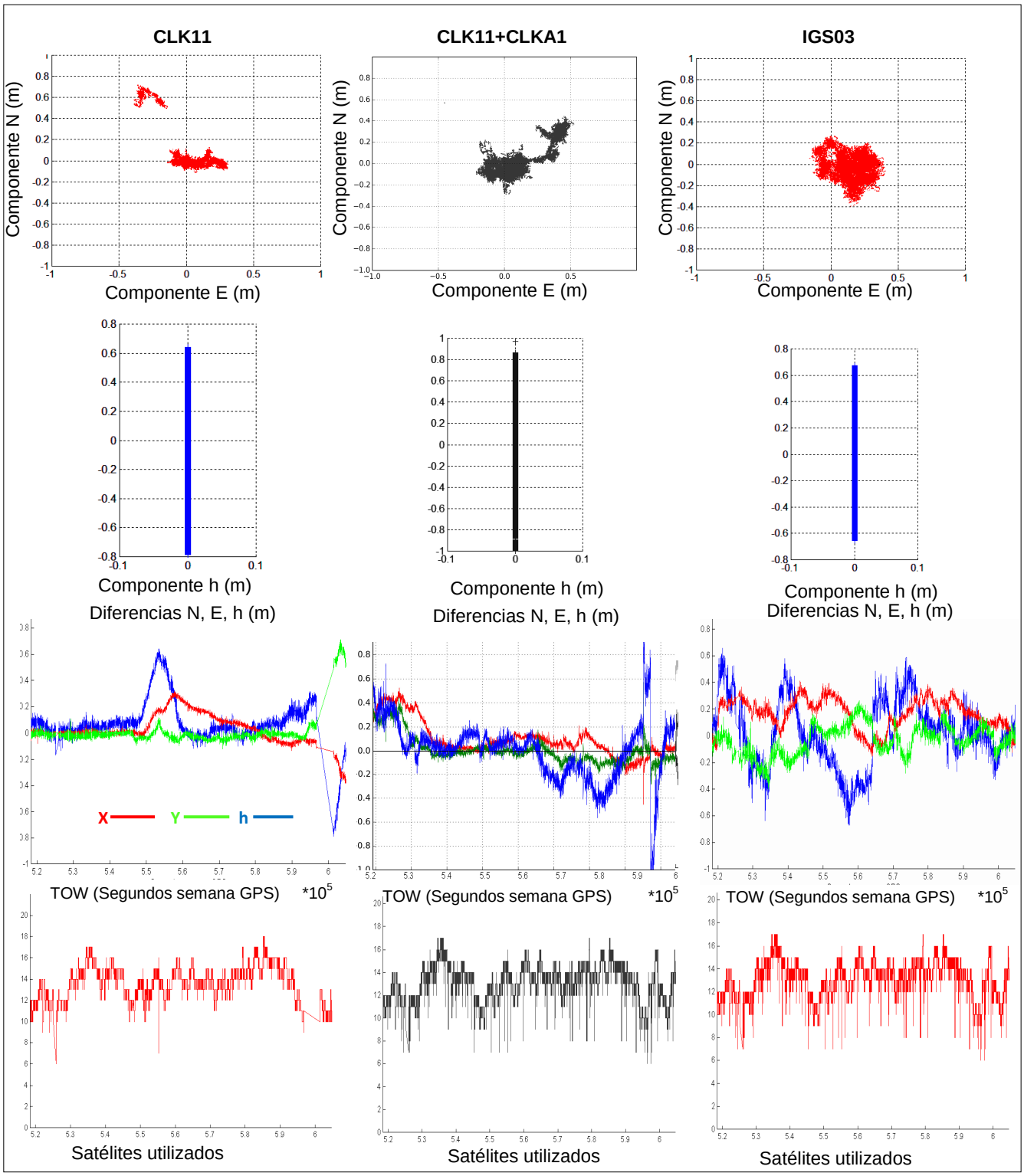


Figura 8.24: Combinación CLK11+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 047/2013

.

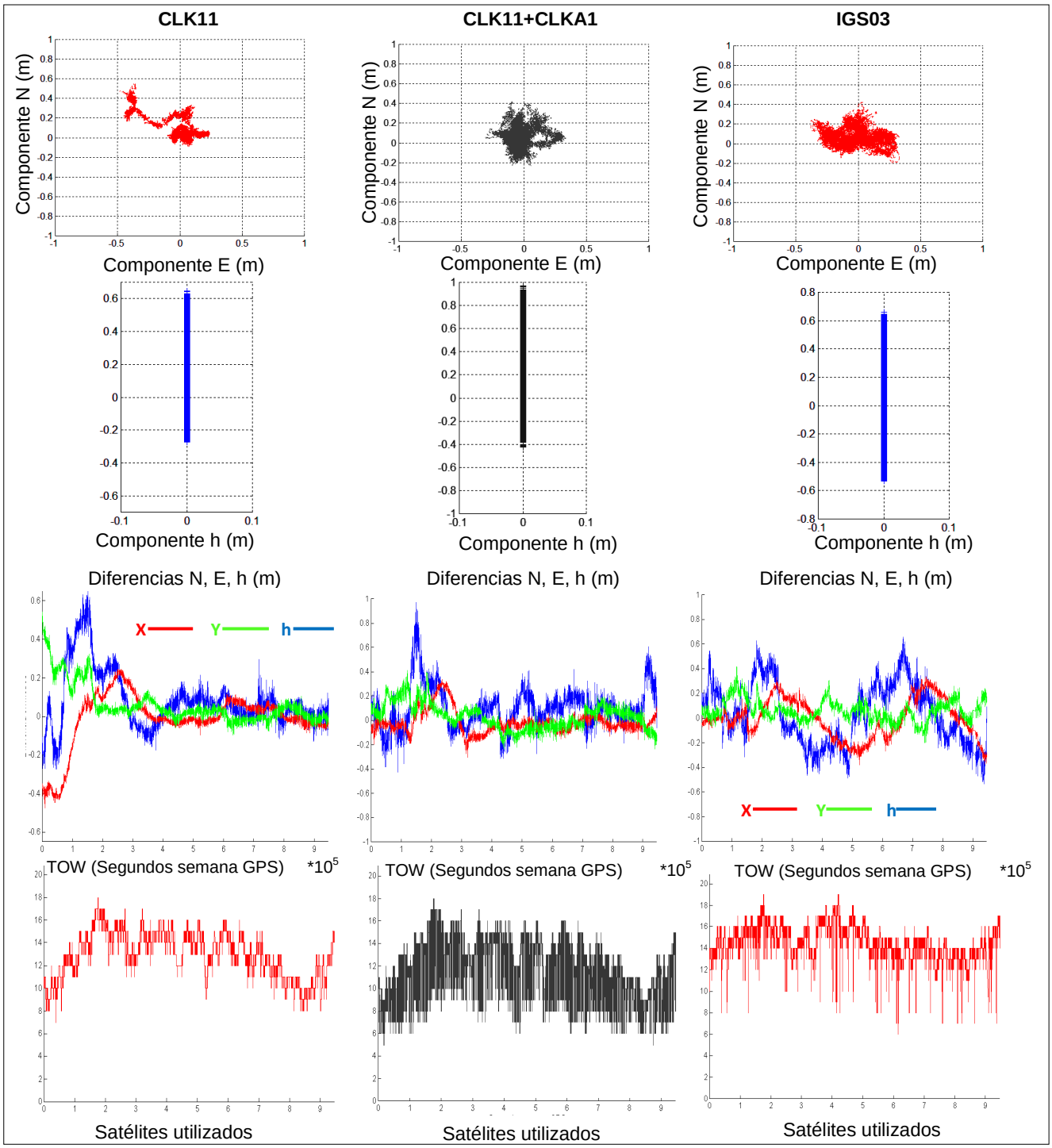


Figura 8.25: Combinación CLK11+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 048/2013

Veamos un resumen de estadísticos de estos escenarios simultáneos para los días comprendidos en los periodos entre las GPSWEEK 1726-1728 y 1822-1824:

CLK11	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,758	0,712	2,394	**Mayor de 20 cm**	8,3024	6,2045	13,2113
Valor Mínimo (m)	-0,476	-1,248	-1,581	**Menor de 20 cm**	91,6976	93,7955	86,7887
Valor Promedio (m)	0,06075	0,0415	0,0882				
Valor Desviación estándar (m)	0,0591	0,0491	0,0664				

CLK11+CLKA1	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,6510	2,3960	4,9080	Mayor de 20 cm	11,2021	9,5841	21,7531
Valor Mínimo (m)	-5,9250	-1,6950	-4,4830	Menor de 20 cm	88,7979	90,4159	78,2469
Valor Promedio (m)	0,0555	0,0755	0,1320				
Valor Desviación estándar (m)	0,0845	0,1197	0,2055				
IGS03	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	0,531	2,042	0,768	Mayor de 20 cm	29,4469	8,0929	45,7697
Valor Mínimo (m)	-0,524	-1,007	-3,914	Menor de 20 cm	70,5530	91,9070	54,2302
Valor Promedio (m)	0,1457	0,085	0,2227				
Valor Desviación estándar (m)	0,0263	0,0236	0,0907				

Tabla 8.9: Estadísticos obtenidos. CLK11 frente a la combinación de los productos CLK11+CLKA1 e IGS03.

Observando los tiempos de convergencia, se detecta que en este caso la combinación de los productos CLK11+CLKA1, llevada a cabo del lado del usuario, ofrece mejores resultados con tiempos de convergencia en torno a los 25 minutos para alcanzar los 5 cm en la componente planimétrica, y algo superior para la altimétrica, mientras que el producto combinado del IGS03 necesita tiempos superiores a los 30 minutos en todos los casos.

En cuanto a los estadísticos obtenidos, la composición del modelo CLK11 con el CLKA1 ofrece *offsets* en valor absoluto que, si bien mejoran el producto combinado del IGS, se alejan de las precisiones alcanzables por el producto individual. Así se puede ver en el grado de dispersión visualizable en los gráficos y en la desviación estándar del resumen de estadísticos para el periodo de las sesiones.

A continuación se efectuó un análisis similar pero variando la combinación propia, en este nuevo escenario se emplearon los modelos CLK11 y CLK91, con el fin de confirmar la optimización del modelo IGS03 al prescindir del proceso de combinación del lado del servidor y mejorar así el retardo y latencia de las correcciones.

8.2.2.2. Rendimiento de la combinación de soluciones CLK11+CLK91

En primer lugar, puede observarse la diferencia en los tiempos de inicialización tanto en las tablas, como en los gráficos en que se representa la solución para cada época.

Umbral de 20 cm	Promedio 2D Minutos	h tiempo en minutos
CLK11+CLK91	22,0583	26,2500
IGS03	31,3917	30,0167

Umbral de 5 cm	Promedio 2D Minutos	h minutos
CLK11+CLK91	25,2583	37,9167
IGS03	54,9750	76,6833

Tabla 8.10: Tiempos de convergencia para umbrales de 20 y 5 cm.

Como se representa en la tabla, los tiempos de convergencia para el producto IGS03 resultaron ser muy superiores.

No obstante, si contrastamos la convergencia del modelo propio combinado con la del modelo individual, nótese que para un umbral de 20 cm el tiempo promedio de inicialización de la solución se encuentra en torno a los 10-15 minutos para el modelo CLK91, y en torno a los 20 minutos para el umbral de los 5 cm.

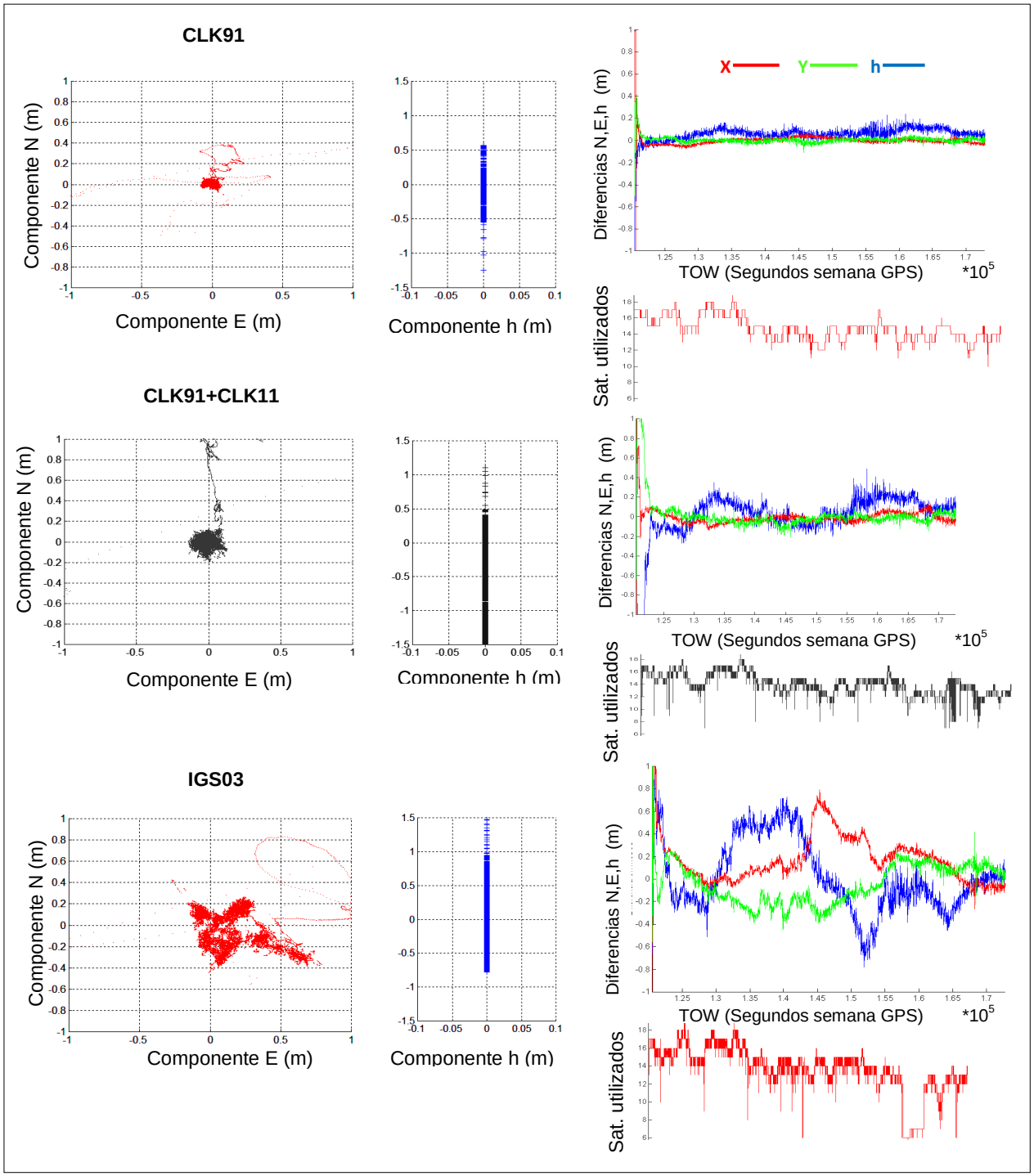


Figura 8.26: Combinación CLK91+CLK11 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 056/2013

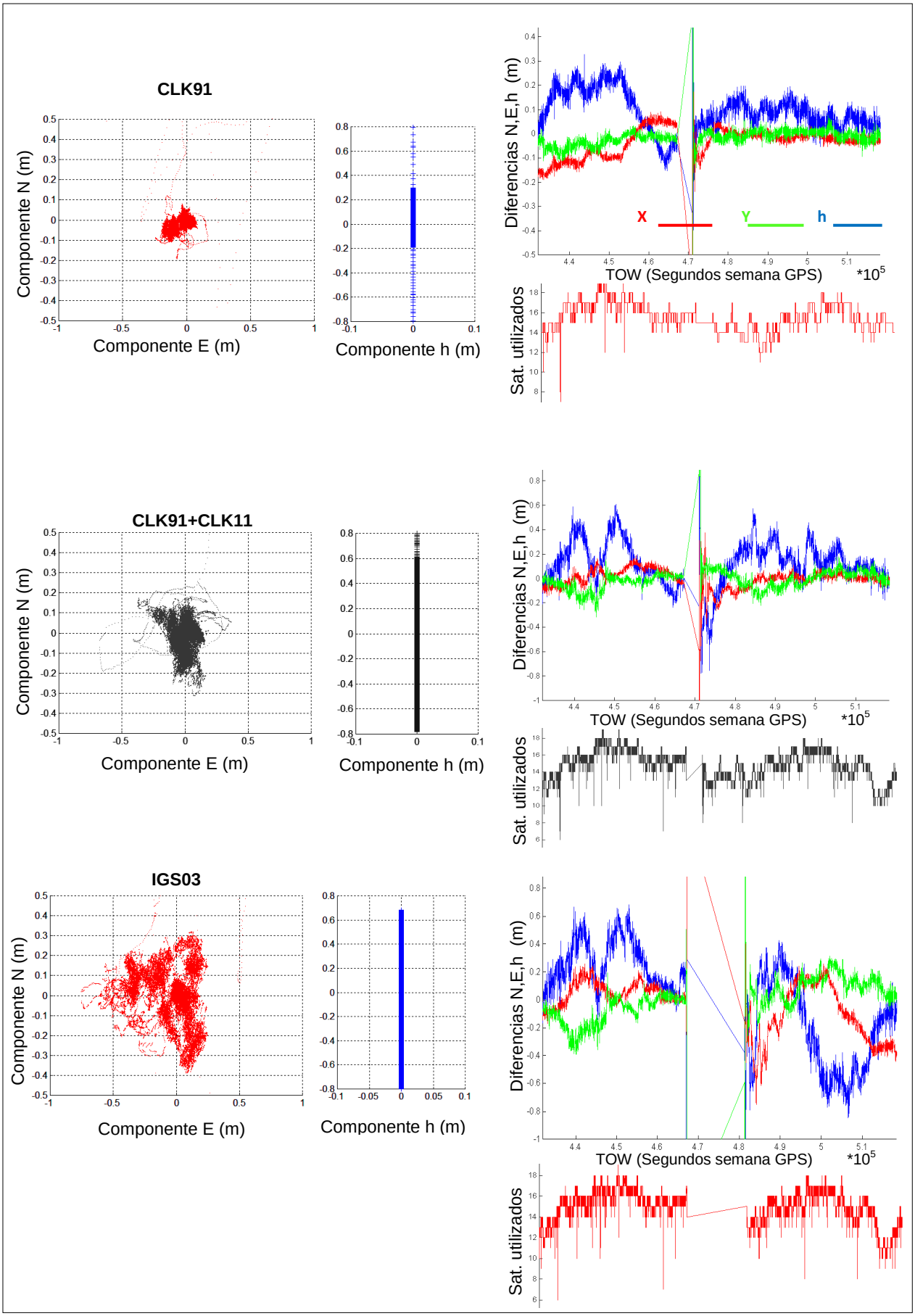


Figura 8.27: Combinación CLK91+CLK11 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 060/2013

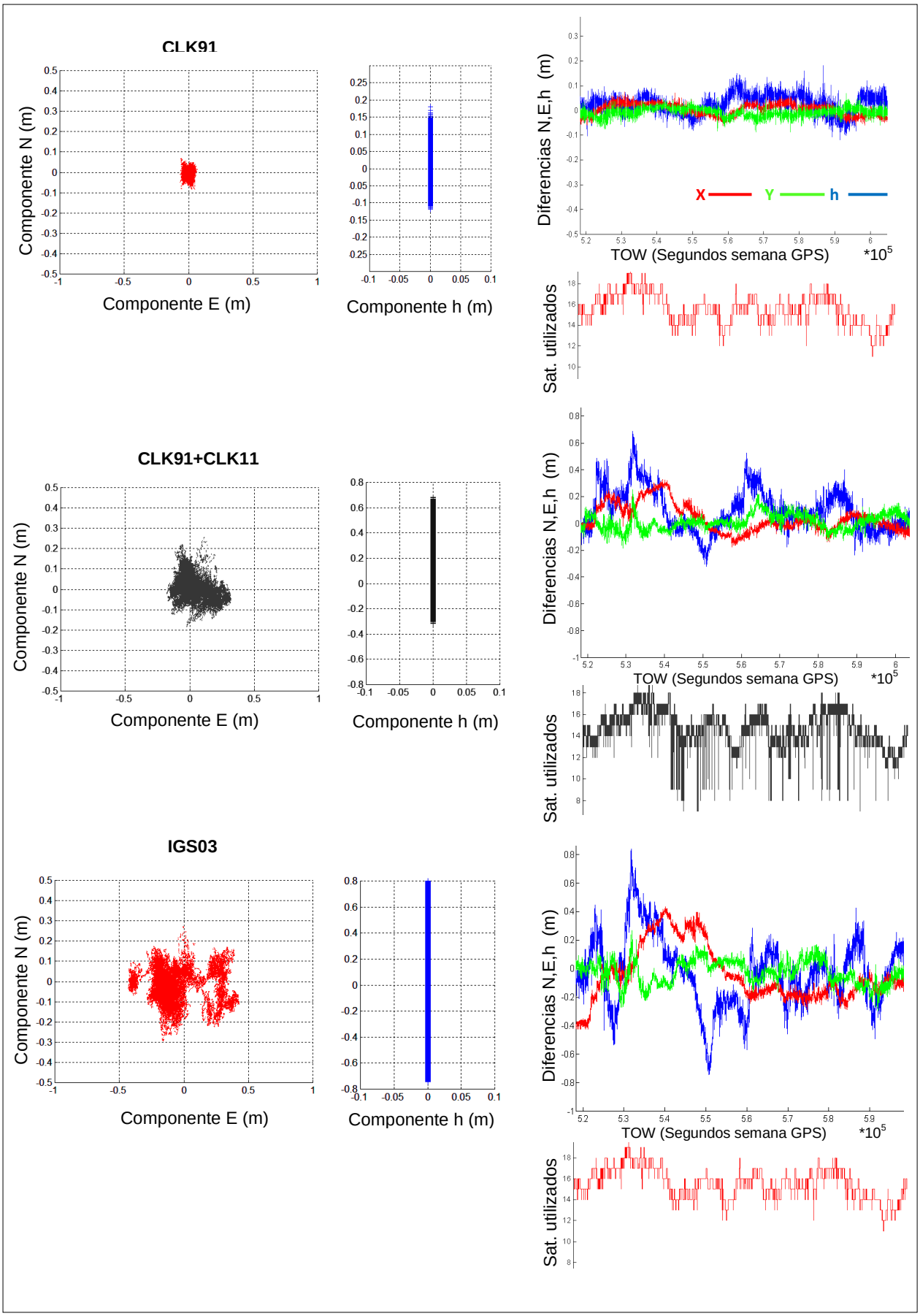


Figura 8.28: Combinación CLK91+CLK11 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 061/2013

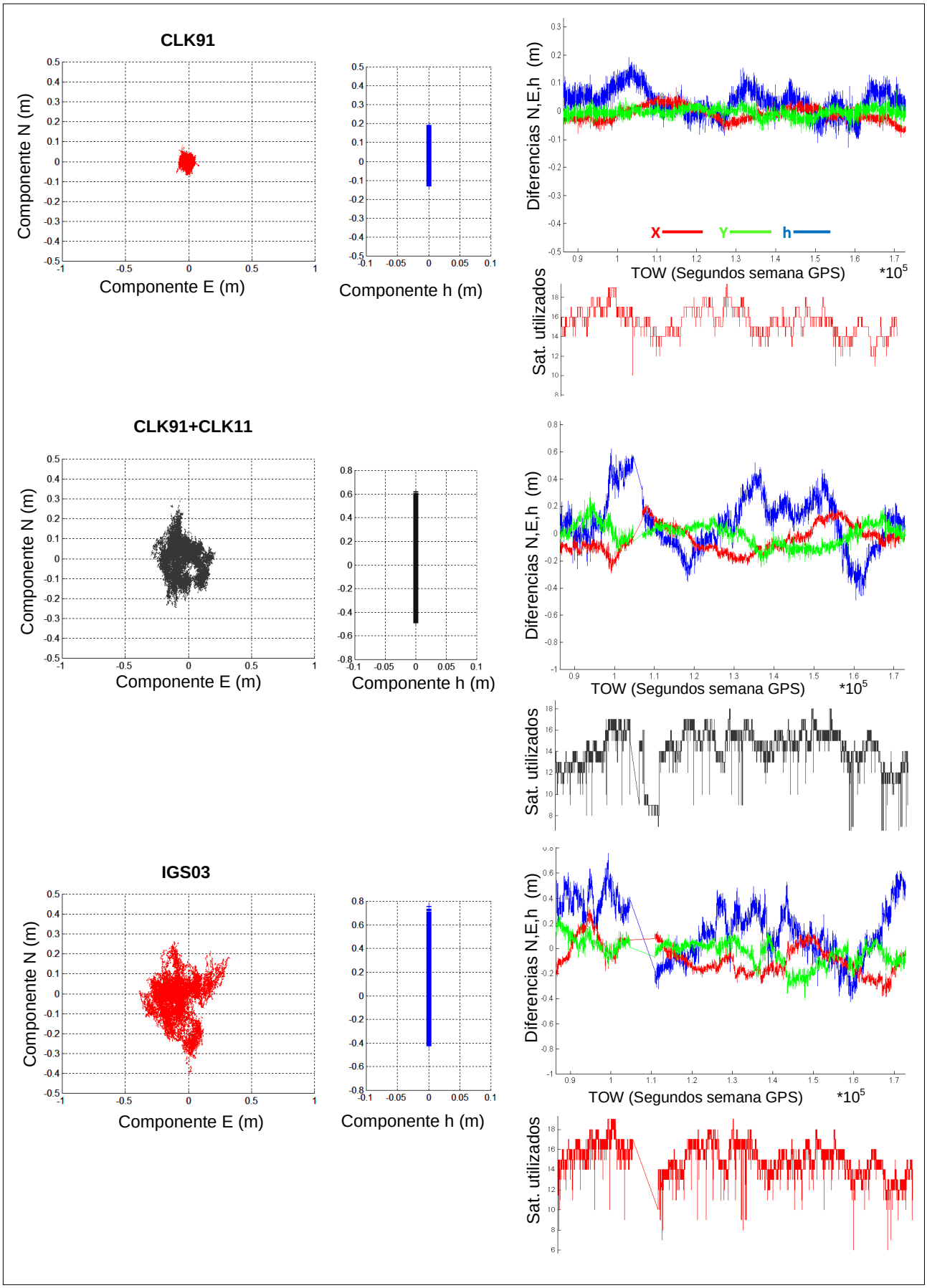


Figura 8.29: Combinación CLK91+CLK11 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 063/2013

A continuación se muestran los estadísticos obtenidos:

CLK91	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1.679	1,79	2,58	Mayor de 20cm	0,7836	0,4621	5,108
Valor Mínimo (m)	-1	-4,24	-2,74	Entre 20 y 10 cm	5,2311	0,2966	14,929
Valor Promedio	0,041	0,024	0,083	Menor de 10cm	93,985	99,241	79,963
Valor Desviación estándar (m)	0,067	0,048	0,098				
CLK91+CLK11	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,3960	5,213	4,239	Mayor de 20cm	5,0415	2,8741	26,5565
Valor Mínimo (m)	-1,4641	-5,062	-2,609	Entre 20 y 10 cm	26,9933	15,7055	25,4361
Valor Promedio	0,0883	0,0786	0,166	Menor de 10cm	67,9651	81,4203	48,0071
Valor Desviación estándar (m)	0,1153	0,1195	0,192				
IGS03	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,3601	1,74	1,206	Mayor de 20 cm	20,4736	6,0943	44,965
Valor Mínimo (m)	-1,0390	-3,736	-5,067	Menor de 20 cm	33,1966	24,6348	25,641
Valor Promedio	0,12833	0,0813	0,2161	Menor de 10cm	46,3296	69,2708	29,393
Valor Desviación estándar (m)	0,1478	0,1081	0,2660				

Tabla 8.11: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLK11, e IGS03.

La conclusión obtenida en el análisis anterior se hace más visible con los resultados de este ensayo. Si bien en la combinación se produce un empeoramiento promedio en torno a 5 cm en cada componente con respecto al modelo individual, si que se mejora el rendimiento con respecto a la combinación del lado del servidor IGS03, que por lo general siempre presenta un *offset* alrededor de los 10-15 cm o superior.

Obsérvese también el comportamiento de los productos, una vez se pierde la convergencia, en el tiempo en que tarda en volver a un determinado umbral, por ejemplo 20 cm. En este caso el producto combinado propio tarda un promedio en torno a 6 minutos en volver a converger para las 3 componentes, mientras que el producto del IGS tarda entre 10-15 minutos.

Si se implementa un modelo combinado propio con otros productos, las conclusiones son análogas, se mejora la solución propuesta por el IGS y se gana en la edad de las correcciones. Asimismo, los productos combinados propios se aplicaron en otros *tests*, empleando observaciones de otras sesiones y de otras estaciones permanentes y las conclusiones resultaron ser similares.

8.2.2.3. Rendimiento de la combinación de modelos CLK91+CLKA1

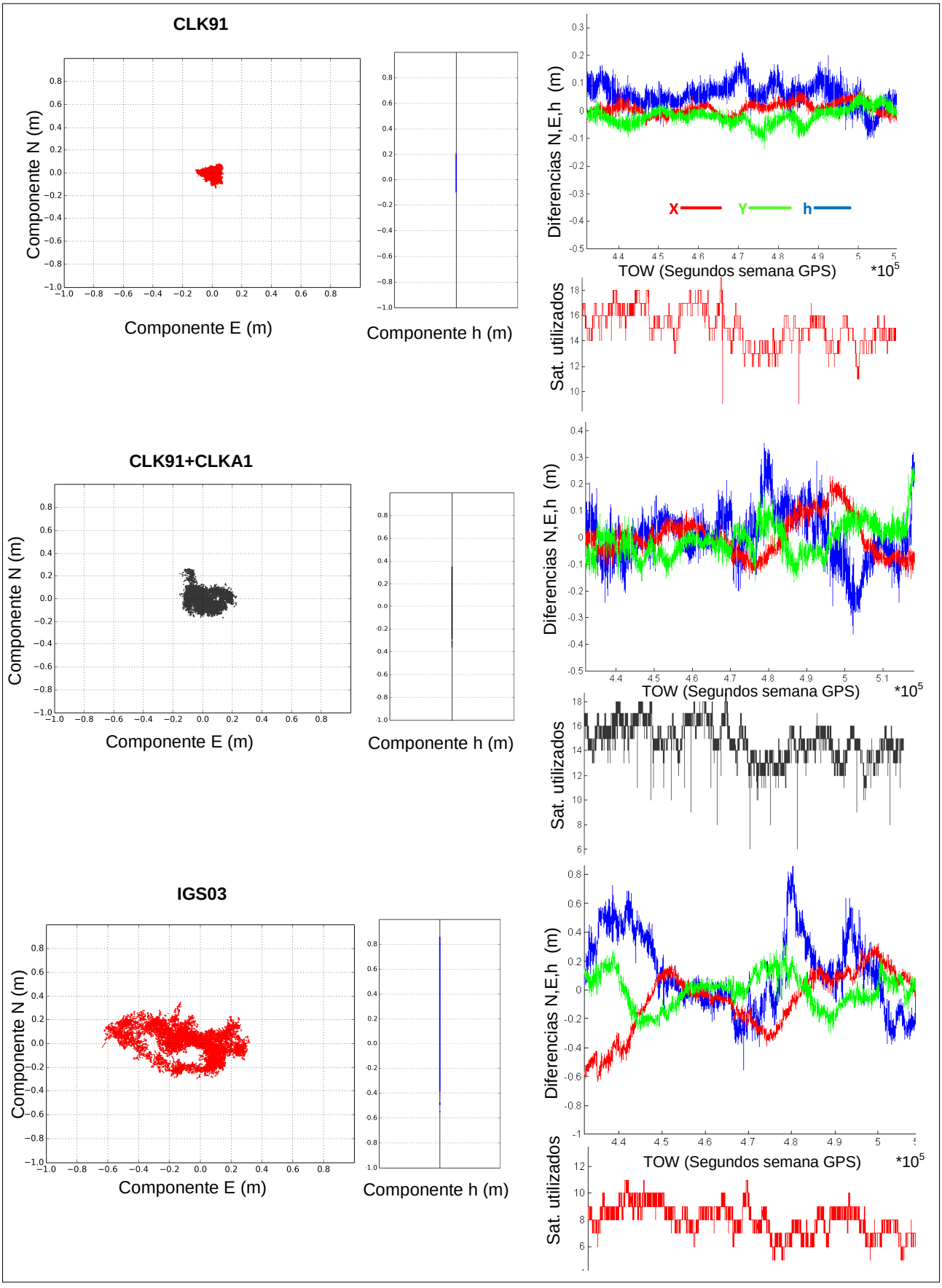


Figura 8.30: Combinación CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 081 /2013

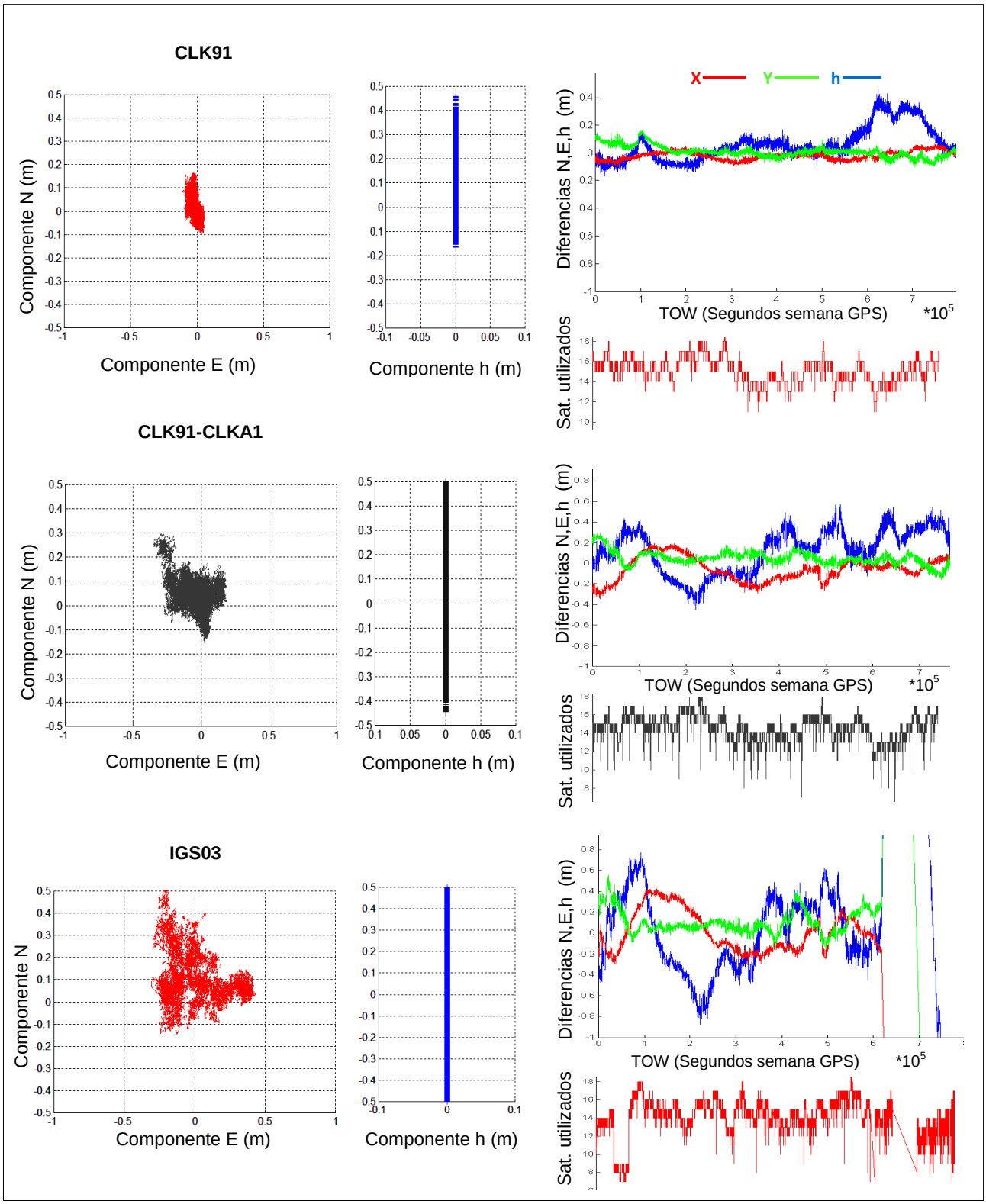


Figura 8.31: Combinación CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 104 /2013

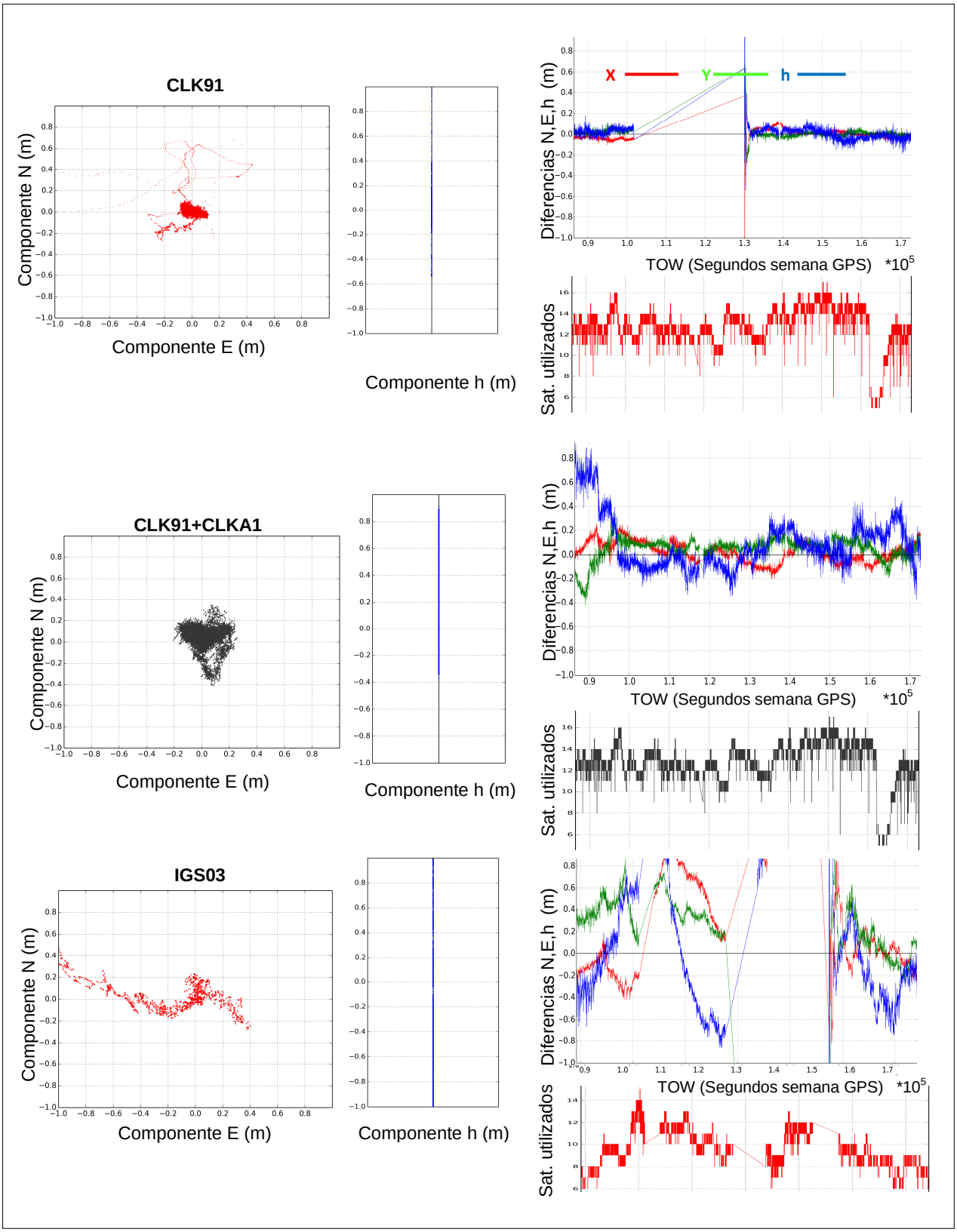


Figura 8.32: Combinación CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 062 /2014

Seguidamente se muestran los estadísticos obtenidos.

CLK91	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,8820	1,5160	2,2640	Mayor de 20 cm	0,2295	0,4325	7,6844
Valor Mínimo (m)	-0,8310	-1,6180	-2,1590	Menor de 20 cm	99,7705	99,5675	92,3156
Valor Promedio (m)	0,0373	0,0290	0,0755				
Valor Desviación estándar (m)	0,0440	0,0453	0,1000				
CLK91+CLKA1	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	1,014	2,309	3,622	Mayor de 20 cm	8,3277	7,5212	22,4192
Valor Mínimo (m)	-1,794	-2,275	-4,489	Menor de 20 cm	91,6723	92,4788	73,4891
Valor Promedio (m)	0,09325	0,08225	0,178				
Valor Desviación estándar (m)	0,1395	0,12425	0,24225				
IGS03	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**H**
Valor Máximo (m)	0,931	3,949	4,561	Mayor de 20 cm	35,7556	25,6646	54,6083
Valor Mínimo (m)	-2,582	-4,031	-2,533	Menor de 20 cm	64,2444	74,3354	45,3917
Valor Promedio (m)	0,26125	0,26575	0,3715				
Valor Desviación estándar (m)	0,37075	0,46675	0,5625				

Tabla 8.12: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLKA1 e IGS03.

El producto combinado IGS03 ofrece los peores resultados del ensayo, con precisiones peores que los 20 cm. Se producen casos donde no existe disponibilidad continua del modelo para ser aplicable a la técnica PPP o la latencia en tiempo real no permite resolver la posición con PPP, como es el caso para el Doy 062/2014 o el Doy 60/2014 mostrado a continuación:

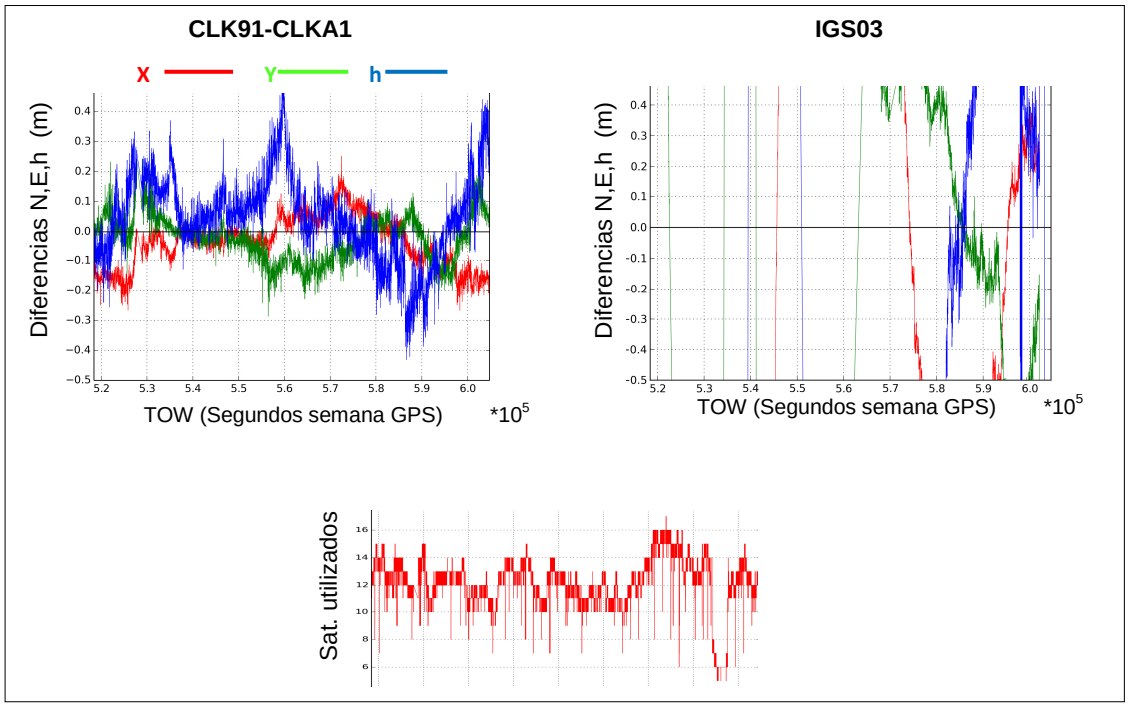


Figura 8.33: Ejemplo del efecto de *outliers* del modelo IGS03 en PPP tiempo real. Doy 60/2014 (01/03/2014)

Por último se muestran los escenarios donde se han llevado a cabo hasta 4 sesiones paralelas, en dos de ellas se implementa una combinación propia, como se puede ver a continuación:

8.2.2.4. Combinación de modelos CLK91+CLKA1 frente a combinación CLK91+CLK11

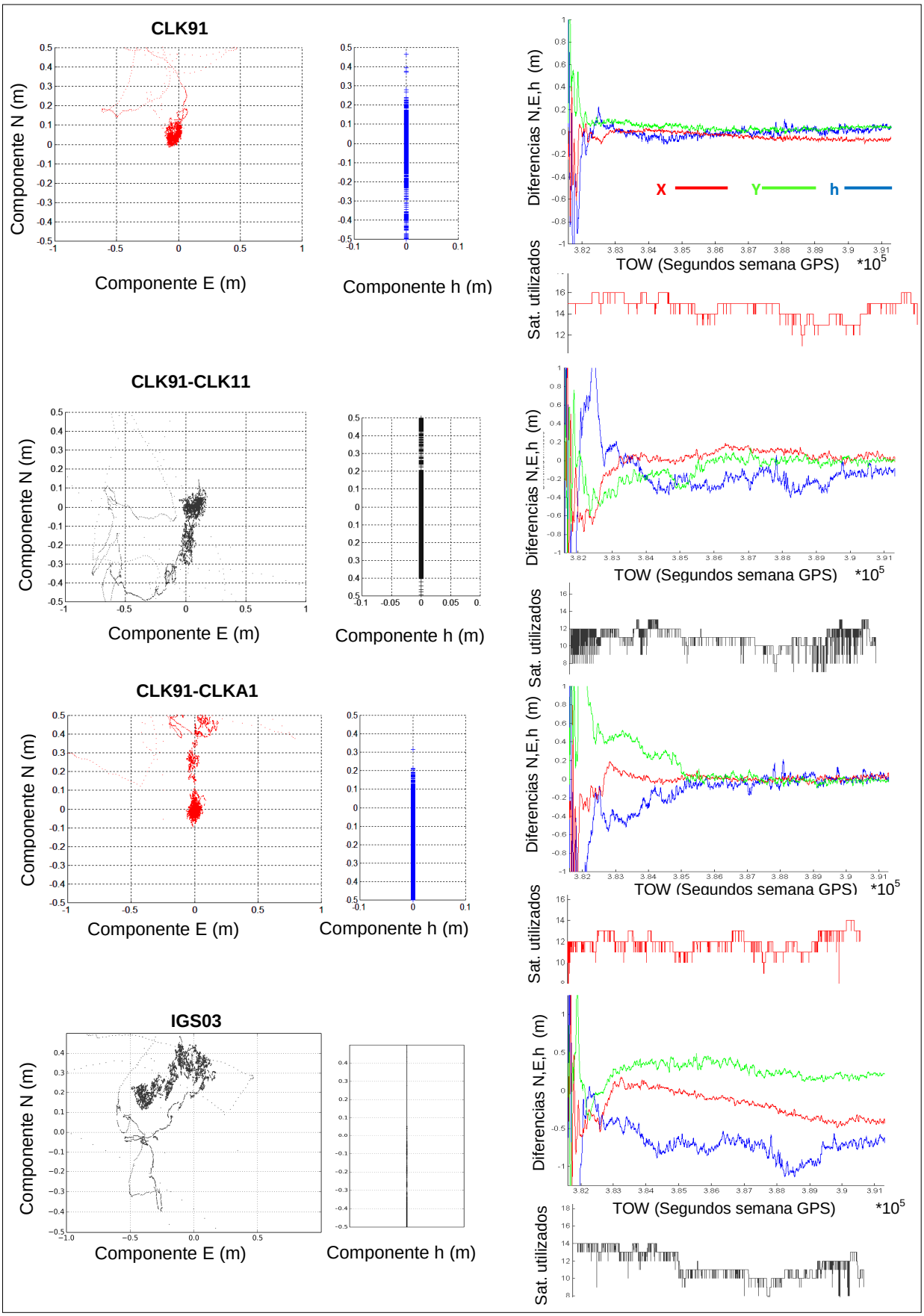


Figura 8.34: Combinación CLK91 +CLK11 y CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS DOY 101/2013

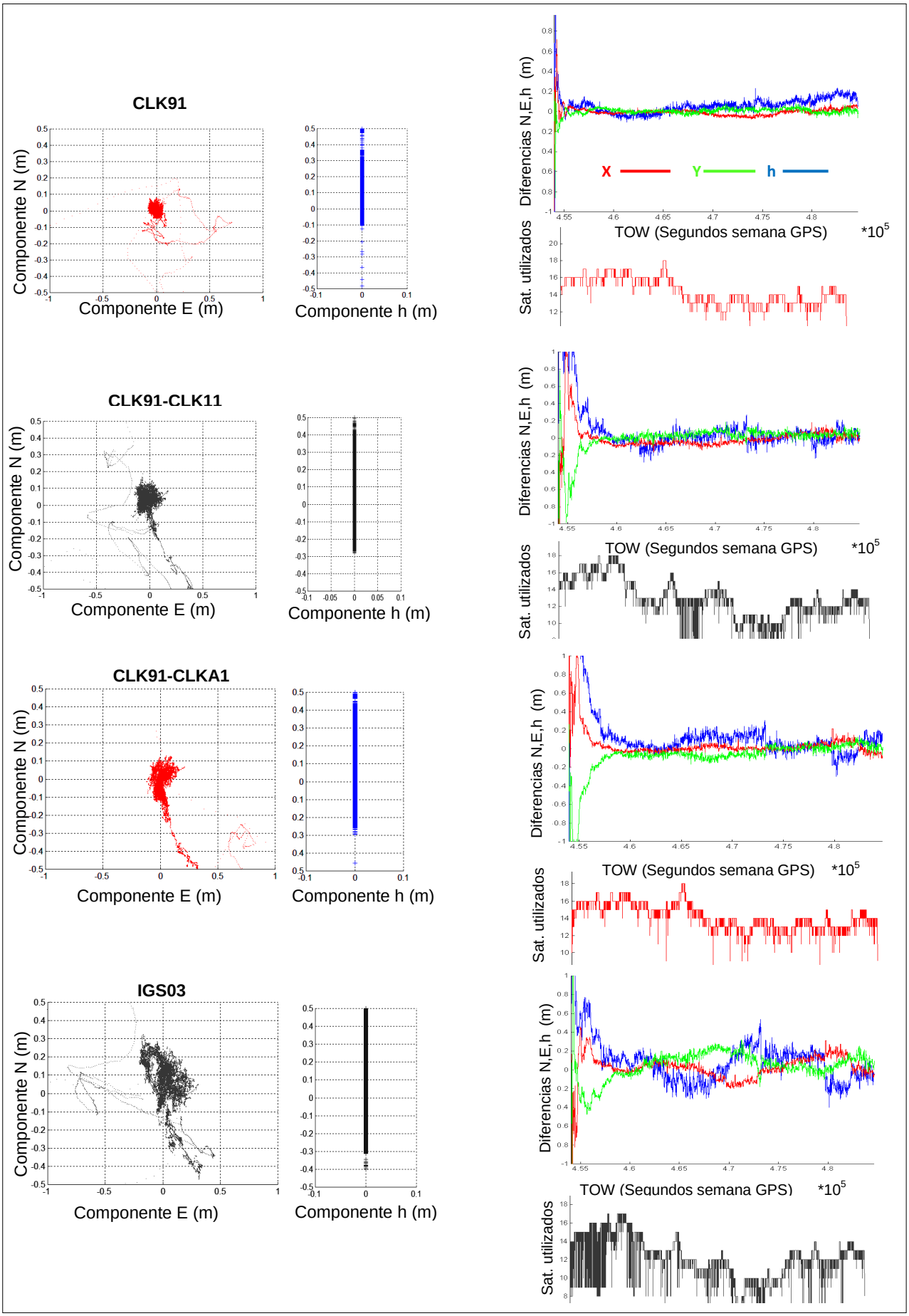


Figura 8.35: Combinación CLK91 +CLK11 y CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS Doy 102/2013

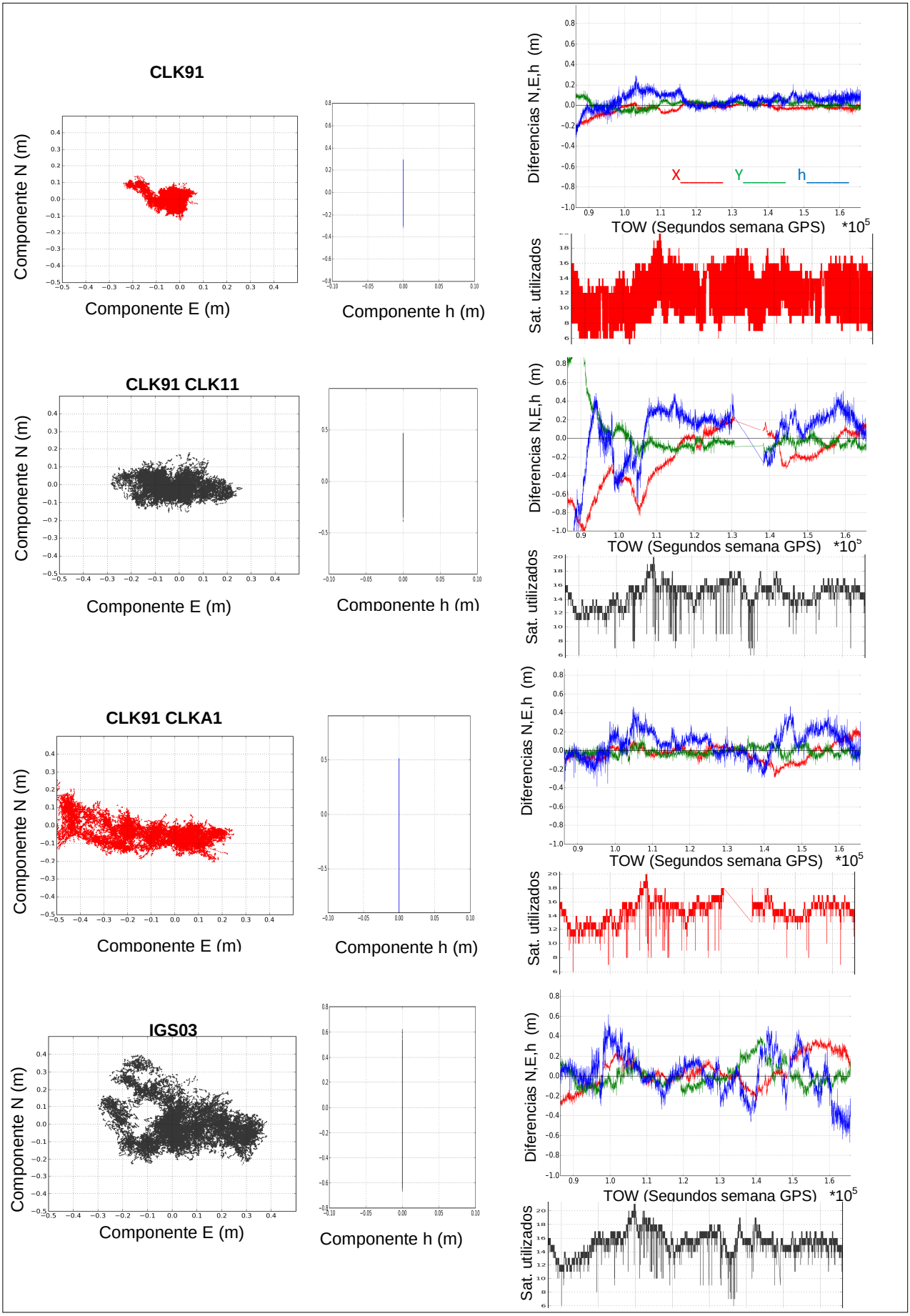


Figura 8.36: Combinación CLK91 +CLK11 y CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 013/2014

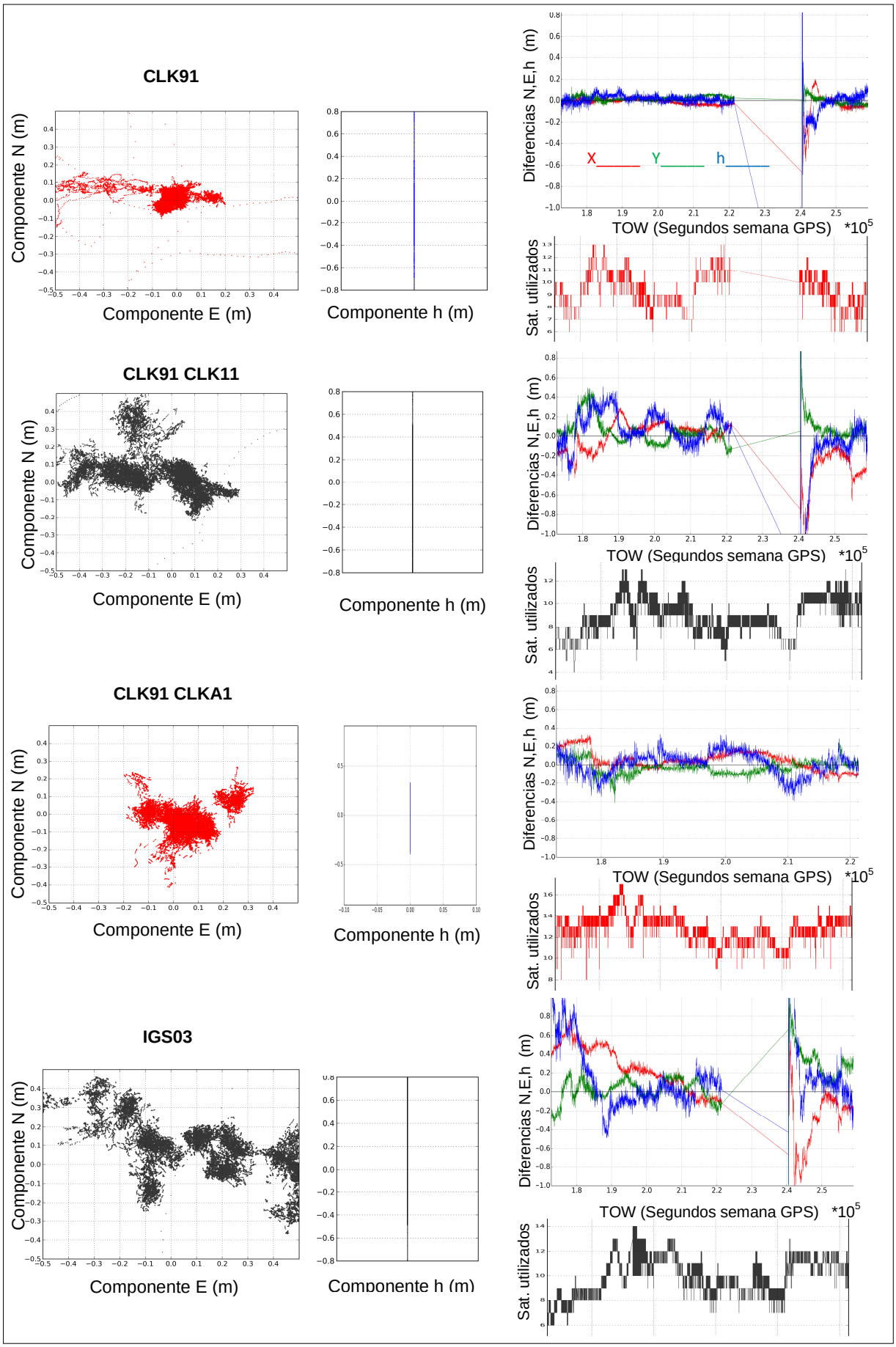


Figura 8.37: Combinación CLK91 +CLK11 y CLK91+CLKA1 frente a producto individual y modelo IGS. Doy 063/2014

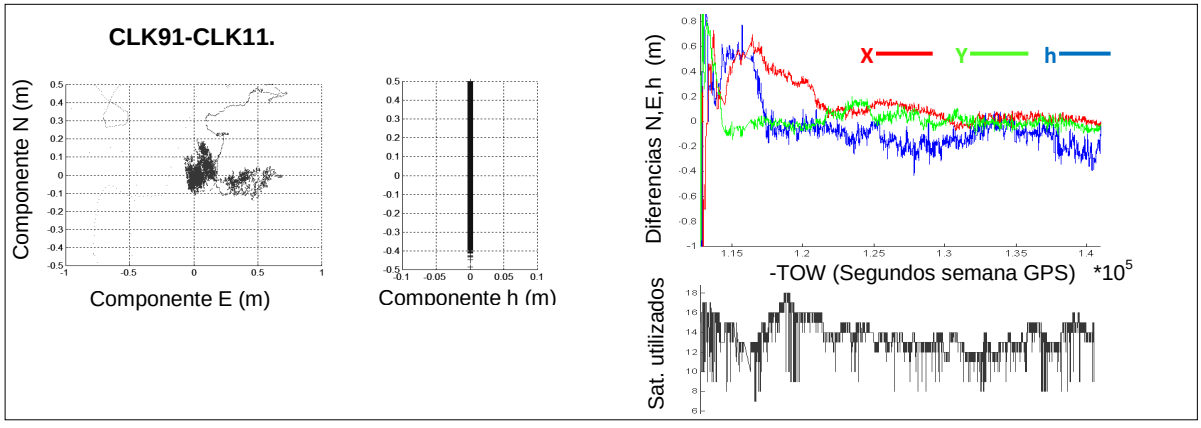
A continuación se muestran los estadísticos para un periodo de 90 días. Puede observarse el grado de acuerdo de estas sesiones en la solución CLK91+CLK11 con respecto a la misma combinación en campañas anteriores, que se encuentra en un rango de magnitudes para los *offsets* obtenidos y para las desviaciones estándar muy similar. Lo mismo sucede para la otra combinación mostrada:

CLK91	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	0,7270	1,6300	3,6760	**Mayor de 20 cm**	1,6305	0,7591	2,9290
Valor Mínimo (m)	-2,6890	-1,9320	-2,7850	**Menor de 20 cm**	98,3695	99,2409	97,0710
Valor Promedio	0,0380	0,0315	0,0660				
Valor Desviación estándar (m)	0,0625	0,0537	0,1093				
CLK91+CLK11	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	2,1850	1,3490	6,5710	**Mayor de 20 cm**	10,5834	9,2896	29,3787
Valor Mínimo (m)	-1,7070	-1,4960	-3,6840	**Menor de 20 cm**	89,4166	90,7104	70,6213
Valor Promedio	0,0965	0,0677	0,1452				
Valor Desviación estándar (m)	0,1277	0,1065	0,1656				
CLK91+CLKA1	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	1,9570	1,6650	4,2290	**Mayor de 20 cm**	16,2149	11,7779	29,8718
Valor Mínimo (m)	-1,4430	-2,0860	-5,9400	**Menor de 20 cm**	83,7851	88,2221	70,1282
Valor Promedio	0,0942	0,0875	0,1532				
Valor Desviación estándar (m)	0,1233	0,1298	0,2254				
IGS03	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	4,2770	6,1320	8,5790	**Mayor de 20 cm**	40,4400	36,9926	50,0982
Valor Mínimo (m)	-3,3580	-2,6150	-18,0500	**Menor de 20 cm**	59,5600	63,0074	49,9018
Valor Promedio	0,2790	0,3306	0,4160				
Valor Desviación estándar (m)	0,1853	0,1465	0,3420				

Tabla 8.13: Estadísticos obtenidos. CLK91 frente a la combinación de los productos CLK91+CLK11, CLK91+CLKA1 e IGS03.

Por lo que respecta a los tiempos de inicialización, los mejores resultados los ofrece nuevamente la observación realizada con el producto individual (en este caso, el producto CLK91), seguidos de la prueba con la combinación de productos individuales propia y, finalmente, la del producto combinado del IGS donde la solución no termina de converger a 20 cm (Doy 101/2013, Doy 64/2014....) y ofrece una precisión inestable.

Obsérvese de nuevo que hay días donde ni siquiera existe disponibilidad continua del producto combinado del IGS, no siendo operativo el posicionamiento PPP en tiempo real (Doy 105 /2013).



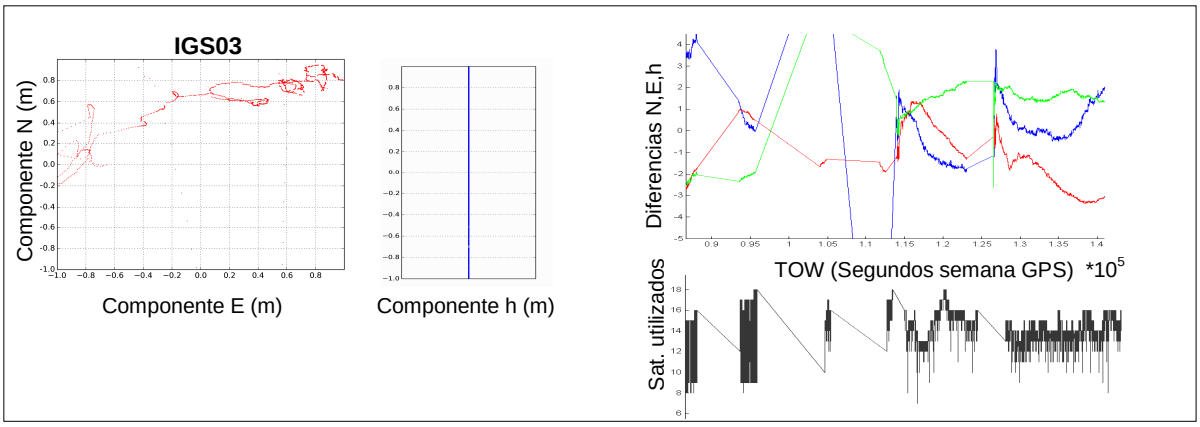


Figura 8.38: Efecto de outlier del modelo IGS03 en posicionamiento PPP en tiempo real, CLK91+CLK11 frente a IGS03. Doy 105/2013.

8.2.3. Discusión sobre la creación de productos combinados para tiempo real y post-proceso

En los apartados anteriores se ha analizado varios escenarios, viéndose que productos o procedimientos obtienen mejores resultados para cada caso. A continuación se agrupan los resultados atendiendo al procedimiento o características del producto utilizado:

-Productos individuales. En la observación solo se utiliza un producto a modo de comparación con las observaciones simultáneas.

- Combinación de productos individuales. Se combinan dos o tres productos individuales para una misma observación elegidos entre los que transmiten los centros de análisis.

-Productos combinados del IGS. Se utilizan productos generados por dicho organismo que a su vez son combinados, pero a diferencia con el anterior, esta combinación se efectúa del lado del servidor. Tal es el caso del IGS03.

De todas las sesiones es necesario analizar la disponibilidad de los modelos para obtener una solución estable, es decir la franja de tiempo en que existe solución PPP en tiempo real. En la tabla se ha calculado sobre un total de 15 días de seguimiento en tiempo real continuo:

	Productos individuales	**Combinación de productos individuales**	**Productos combinados del IGS**
% disponibilidad del modelo / solución PPP	97,64%	96,12%	87,34%

Tabla 8.14: Estadísticos globales. Disponibilidad de los modelos en el total de las sesiones

En la figura siguiente se muestra el porcentaje de valores dentro y fuera del rango de los 20 cm de variación respecto a las coordenadas de referencia. Los productos de un solo centro de análisis ofrecen mayor precisión (pero menor garantía en caso de fallo). Sin embargo, las combinaciones propias realizadas del lado del usuario, pueden ofrecer mayores garantías, y mejoran los productos combinados del IGS, los cuales ofrecen mayores discontinuidades que el resto de categorías con valores dentro del rango de 20 cm cercanos al 80% en planimetría y de tan solo el 50% en altimetría.

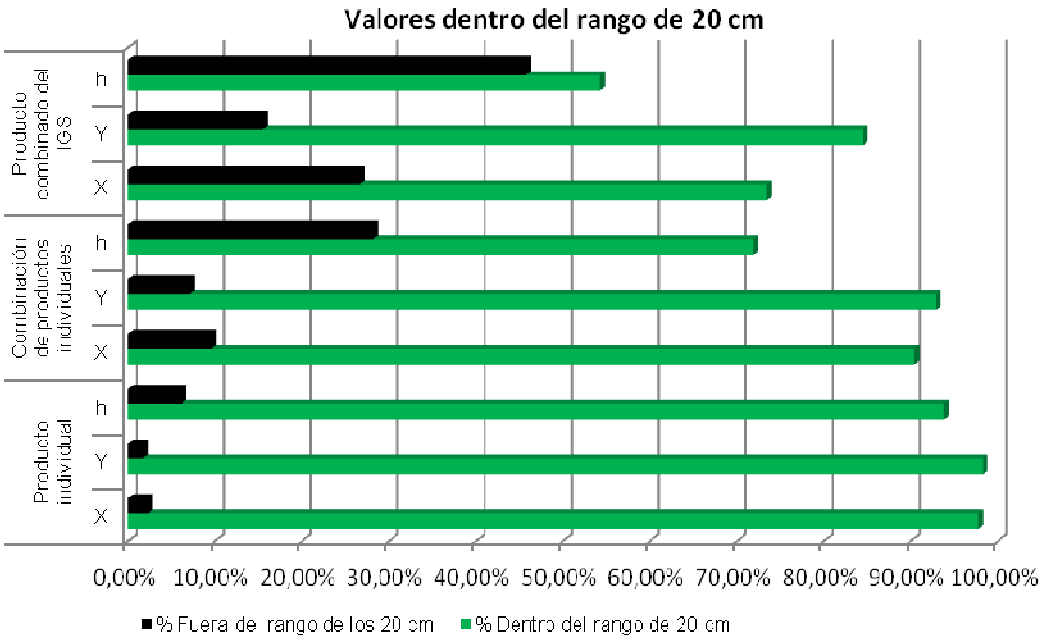


Figura 8.39. Estadísticos globales. –Valores en rango de 20 cm.

Por lo que respecta a los promedios y desviaciones estándar obtenidos a lo largo de todas las observaciones de este análisis, se muestra el gráfico obtenido:

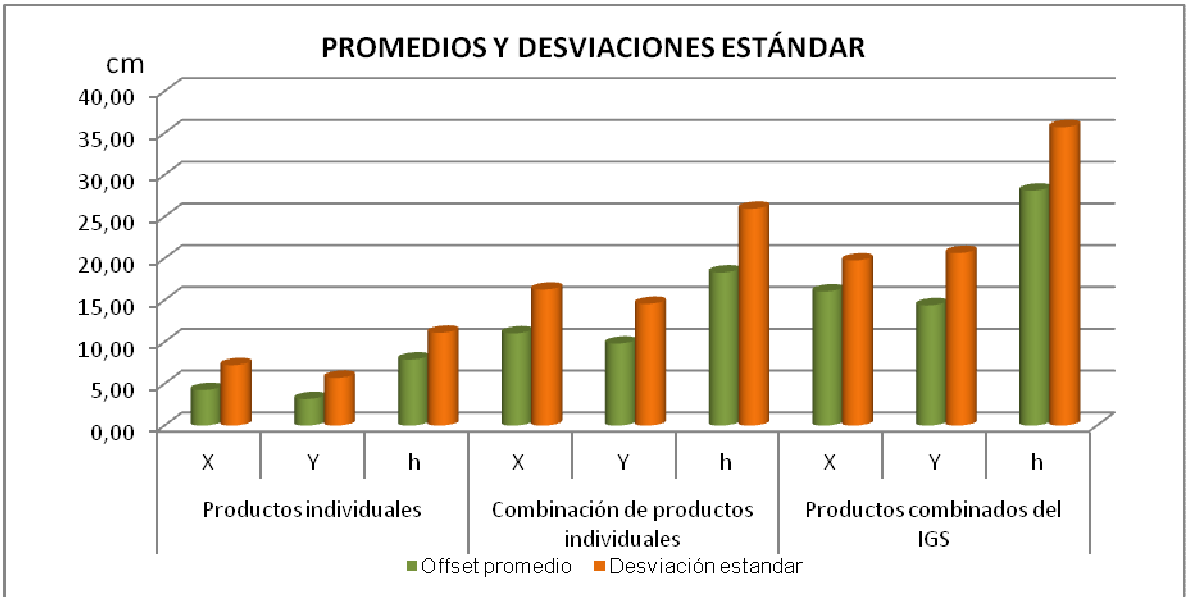


Figura 8.40 -Estadísticos globales. –Valores Promedio y Desviación Estándar

Se detecta claramente, que centrándose solo en el caso de productos combinados los valores obtenidos con la combinación de productos individuales a elección del operador y del lado del usuario, siempre ofrecen mejores resultados que cuando se utiliza un producto combinado como el IGS03.

No obstante, no todas las combinaciones individuales presentan la misma robustez. En algunos casos puede haber diferencias de hasta 10 cm o superiores entre ellas. De todos los escenarios, una de las combinaciones implementadas más robustas y estables en todo el análisis ha sido la combinación de los productos CLK91 y el CLK11.

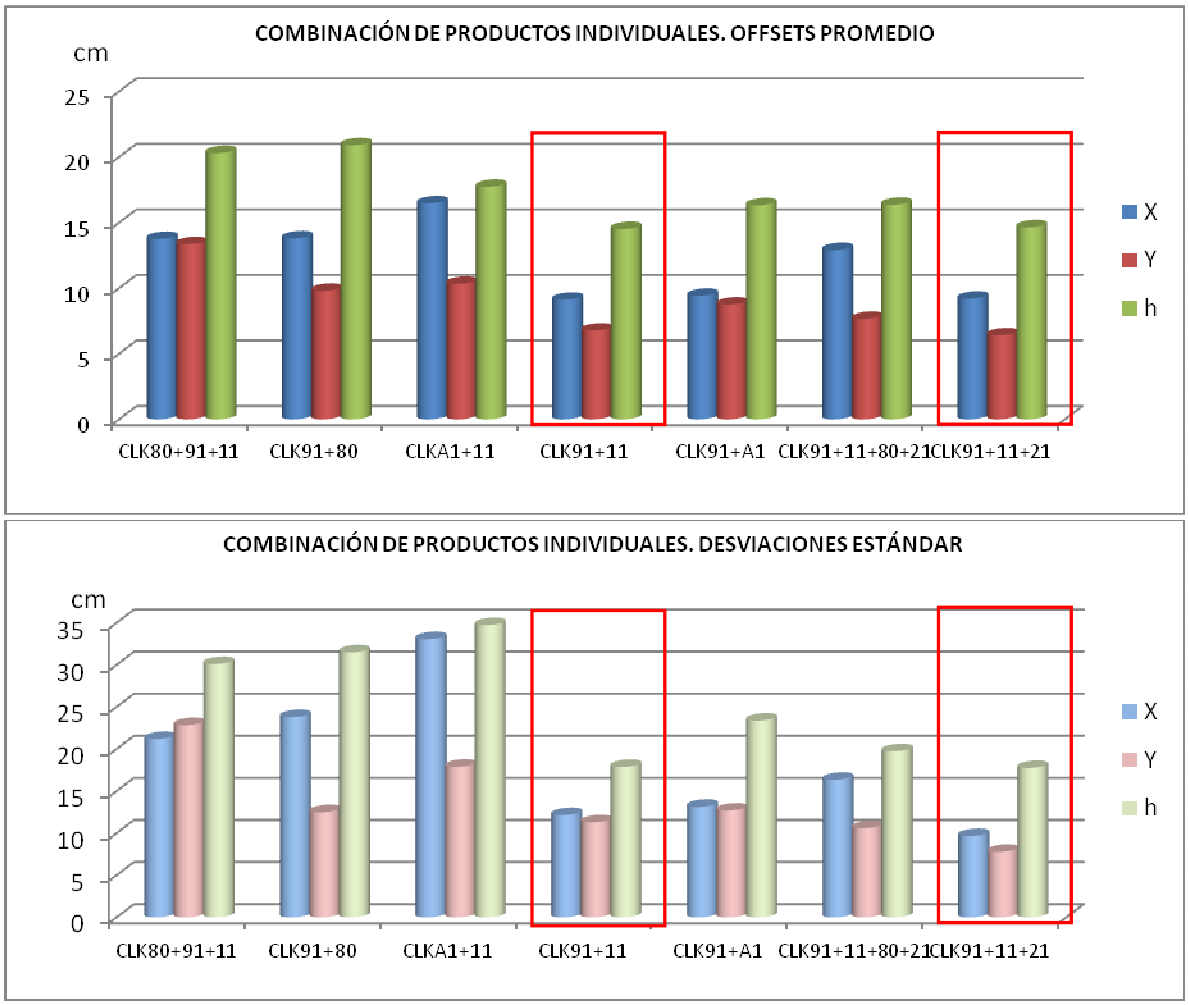


Figura 8.41: Combinaciones de productos individuales. –Offsets Promedio y desviaciones estándar

Nótese que añadiendo más productos a la solución no siempre mejoran los resultados, como puede ser el caso de la combinación CLK91+CLK11+CLK80+CLK21. Sin embargo, la combinación CLK91+CLK11+CLK21, si que resulta bastante parecida a la CLK91+CLK11 en cuanto a los *offsets* de la solución y con unas desviaciones estándar muy óptimas. Si analizáramos el porcentaje de disponibilidad de la solución utilizando estas dos combinaciones, también resultan muy similares entre sí.

Veamos algunos ejemplos concretos de combinaciones efectuadas añadiendo más modelos. En ellas se ve en el caso de la combinación CLK91+CLK11+CLK80+CLK21, que es posible mantener la solución durante toda la sesión aun en el caso de producirse un *outlier* en alguno de los productos como es el caso del Doy 357/2014 o el Doy 361/2014, donde existe un *outlier* en el producto CLK91. Es obvio, que la pérdida momentánea del modelo que forma parte de la combinación hace que se produzca una pérdida de precisión también en dicha solución, aunque la solución sigue siendo continua. Lo mismo sucede para el periodo del Doy 365/2014 al Doy 020/2015, del que se plasma una muestra también, en este caso como se reflejaba en la figura anterior las combinaciones son más parecidas entre sí.

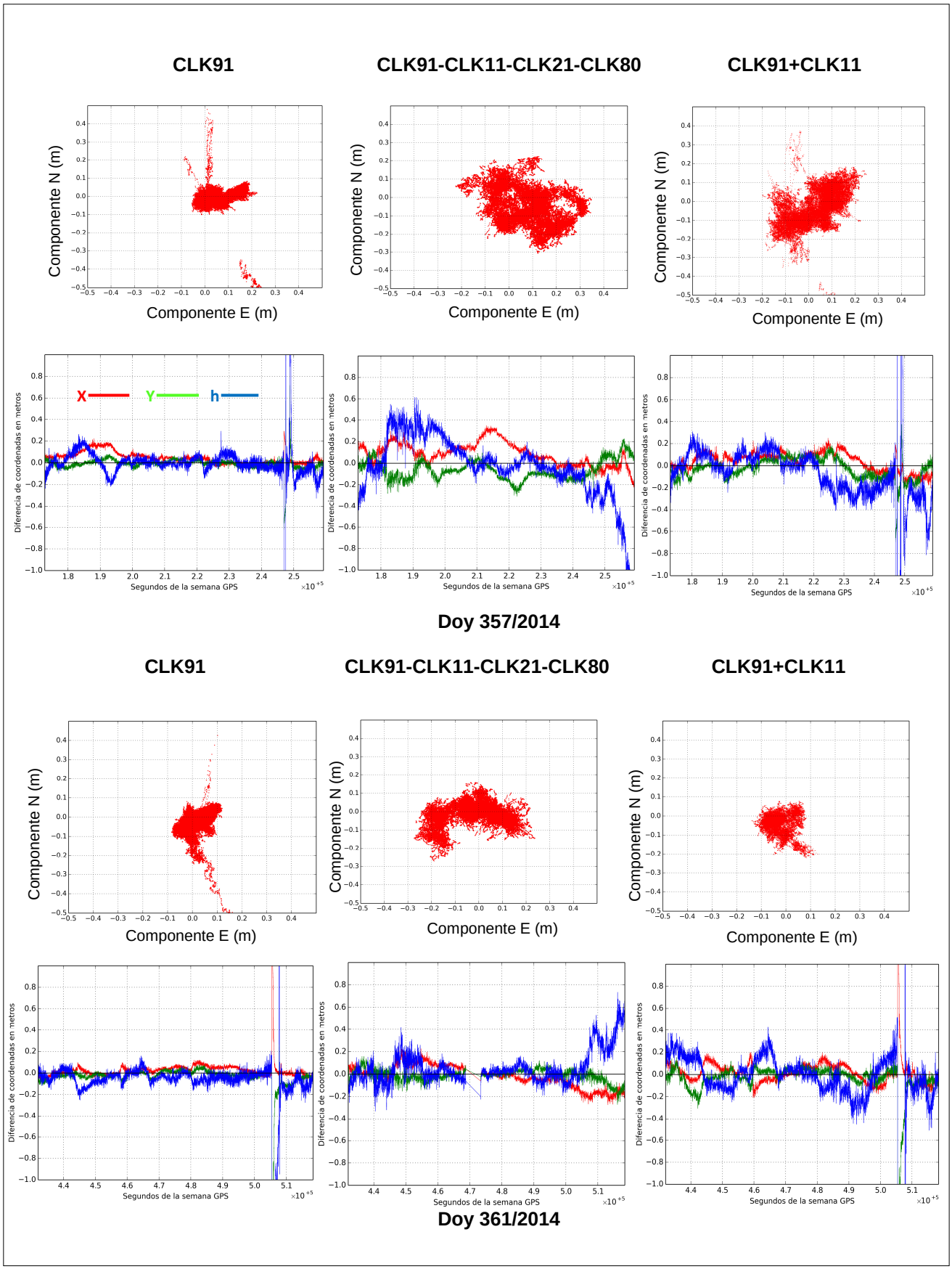


Figura 8.42: Sesgo X,Y y desviación época a época con PPP en tiempo real de la combinación CLK91-CLK11-CLK21-CLK80 frente a la combinación CLK11+CLK91.

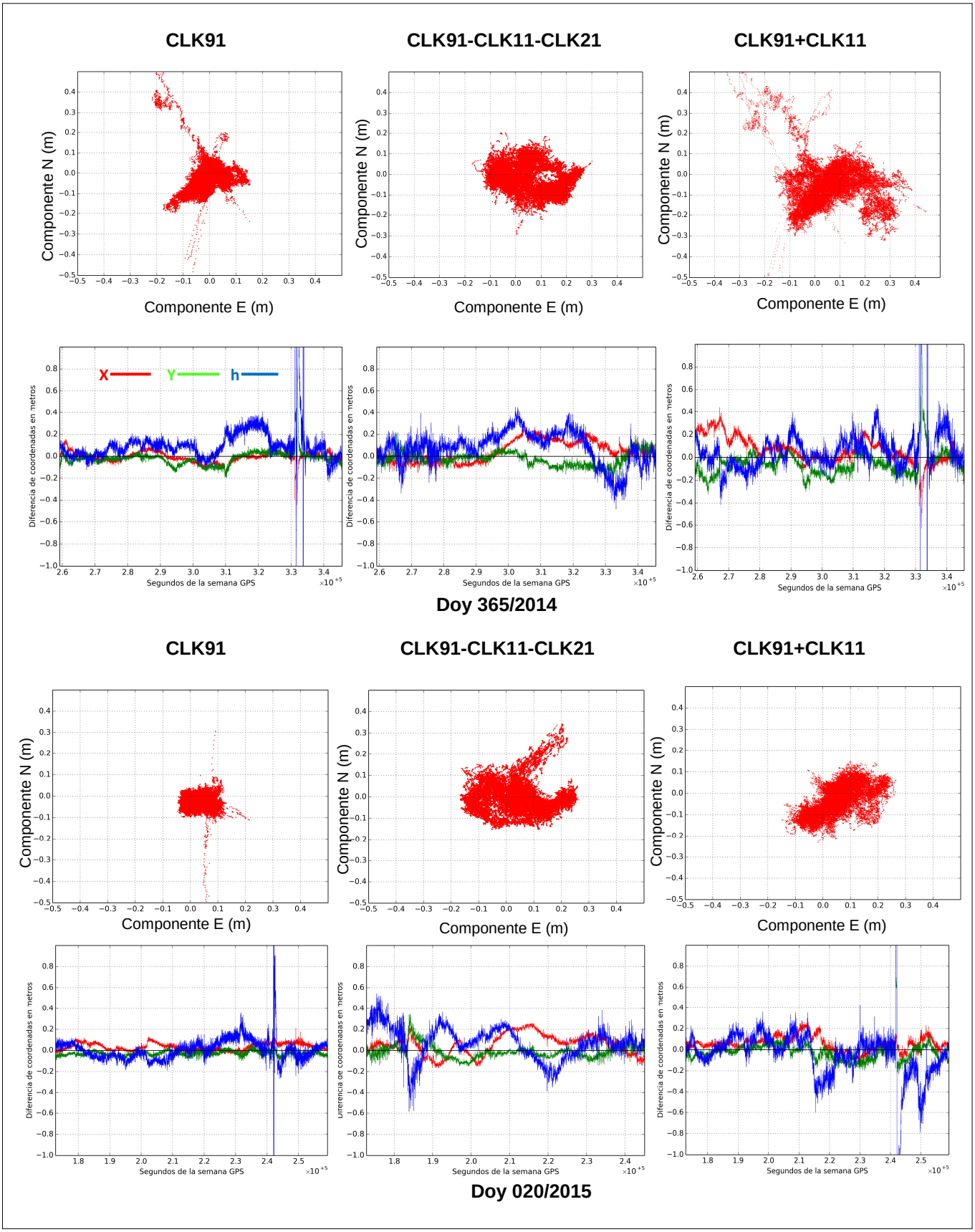


Figura 8.43: Sesgo X,Y y desviación época a época con PPP en tiempo real de la combinación CLK91-CLK11-CLK21 frente a la combinación CLK11+CLK91.

Como conclusiones finales cabe destacar que es posible mejorar y optimizar en gran medida la combinación de productos para tiempo real que realiza el *International GNSS Service* para su aplicación en PPP, si bien la investigación para su optimización tiene todavía amplio recorrido y se basa en los siguientes aspectos:

-Gran parte de la mejora, consiste en reducir la latencia producida por la carga y la combinación del lado del servidor. Como se ha podido demostrar en este capítulo, al realizar la combinación del lado del usuario y reducir la edad de las correcciones recibidas en el modelo del IGS, vemos que los resultados son muchos más óptimos.

-Obsérvese que el filtro Kalman no responde con todas las combinaciones con la misma robustez en el caso de tiempo real, con lo cual es necesario acelerar la convergencia del filtro, a través de varios mecanismos, entre ellos la selección de la combinación más óptima.

-El hecho de añadir más modelos a la combinación no mejora el resultado siempre, ya que en todo momento es necesario conocer las varianzas asociadas a cada uno de los modelos puesto que estas intervienen en el filtro. Si estas varianzas son bien conocidas (como parte de los mensajes RTCM-*State Space Representation*), la elaboración del modelo mediante combinación por filtro Kalman puede ser aún más realista, tanto si se realiza del lado del servidor (como es el caso del IGS), como si se realiza del lado del usuario. Por tanto, la mejora depende fuertemente de que los indicadores de precisión estén contenidos y actualizados dentro de los mensajes RTCM-SSR que llevan los modelos.

-Adicionalmente, de manera análoga al caso de post-proceso, el control de *outliers* en tiempo real época a época añadido al filtro Kalman, también resulta fundamental, para la optimización de la combinación.

Debe considerarse que para el caso de las combinaciones efectuadas para post-proceso del apartado 8.1, la evolución de los modelos en un futuro podría incluso llevar a considerarlos como una alternativa fiable a los productos ultra-rápidos, cuando estos no se encuentren disponibles o su generación haya fallado, para aquellas aplicaciones donde se necesiten resultados con latencia *quasi-real* u horaria, tal y como la estimación de vapor de agua o el control rápido de deslizamientos y deformaciones.

Capítulo 9:

Análisis de estrategias de obtención de productos regionales para PPP en tiempo real.

9.1. Descripción de los modelos existentes

Un aspecto importante a considerar a la hora de obtener resultados, es que a nivel usuario las coordenadas deben estar en el marco regional adoptado referido a la placa continental. En el caso de Europa este se corresponde con el marco ETRF2000[1], por ser el marco convencional adoptado para ETRS89. Mientras que los productos del *International GNSS Service* combinados y algunos productos de los centros de análisis están orientados a obtener resultados en el marco ITRF[2] vigente (productos globales), otros centros de análisis y comisiones orientadas a la definición y mantenimiento de los marcos regionales, se encuentran investigando y generando experimentalmente modelos de correcciones de reloj y órbitas para que, tras su aplicación, directamente se obtengan los resultados en el marco regional.

En el caso concreto de EUREF, en el proceso de generación del *streaming* de los productos en el marco regional, se lleva a cabo la aplicación de la transformación de 14 parámetros entre el marco ITRF actual y el marco de referencia regional, para derivar, a partir de los productos globales, los modelos o productos de correcciones de reloj y órbita para el marco deseado. Para el marco de EUREF, los valores para la transformación entre ITRF2008 y ETRF2000, época 2000.0, aparecen publicados en las especificaciones de Boucher y Altamimi del año 2011, (http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf), extrapolándose a la época de observación actual.

Esta aproximación para generar productos de aplicación en Precise Point Positioning (PPP) para tiempo real, se observa teóricamente en los diagramas siguientes (diagrama de la izquierda), en la que se permite al usuario trabajar directamente con un producto regional y obtener resultados inmediatos en el marco ETRF. En contraposición, el diagrama de la derecha muestra como el usuario aplica un modelo en el marco ITRF, y la transformación se lleva a cabo al final.

[1] *European Terrestrial Reference Frame*
[2] *International Terrestrial Reference Frame*

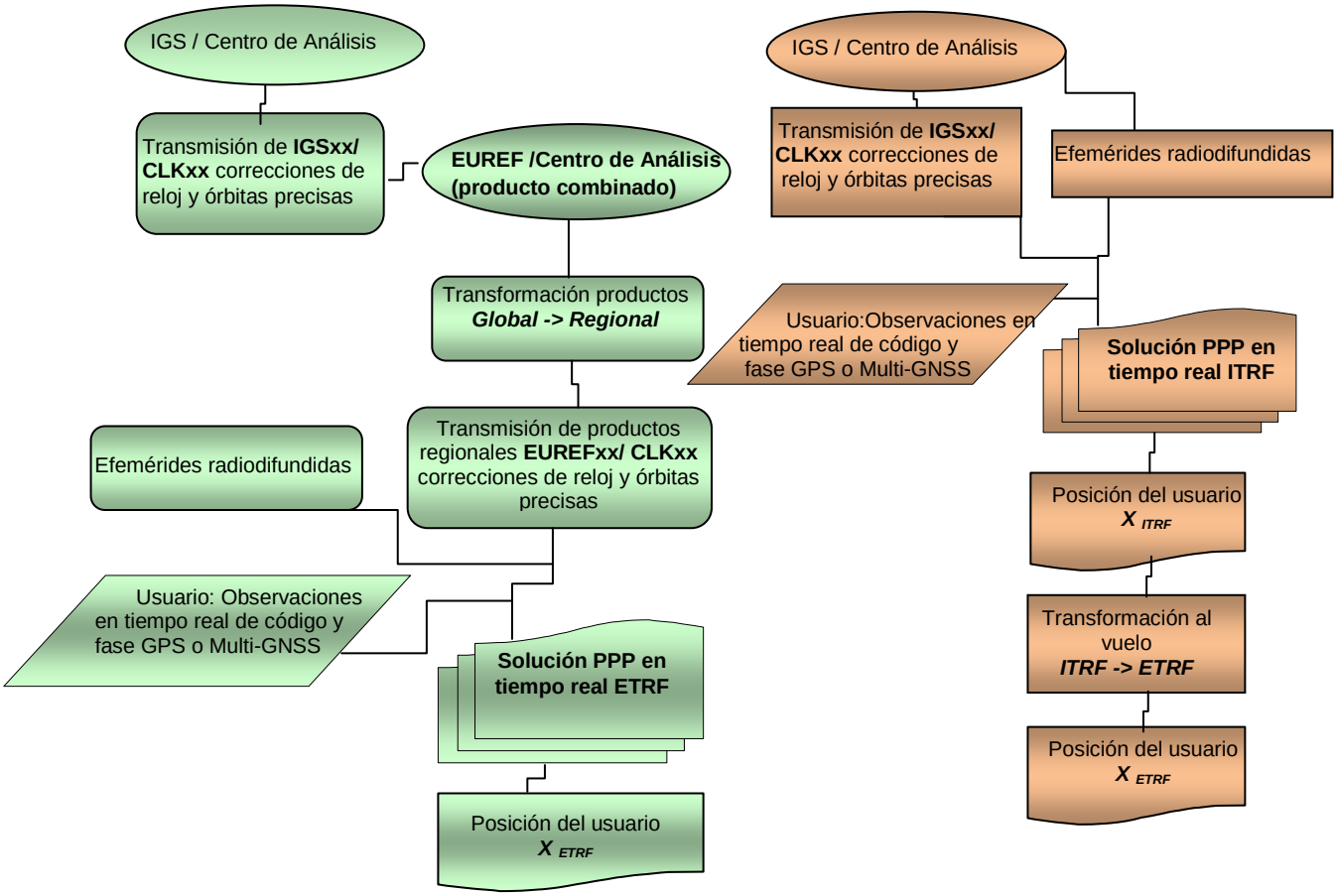


Figura 9.1: Aproximaciones ETRF/ITRF

Con la aproximación mostrada en el diagrama de la izquierda, una vez obtenidos los productos regionales, los modelos de correcciones de reloj y órbitas precisas distribuidos a través de *streams* en tiempo real de EUREF son los siguientes:

Mountpoint	Operatividad	Tipo de solución	Marco	Constelación	Contribuciones individuales
EUREF01	Distribuida y experimental	Combinada	ETRF00	GPS	CLK11, CLK21 , CLK70 , CLK80, CLK91
EUREF02	Distribuida y experimental	Combinada	ETRF00	GPS y GLONASS	CLK11, CLK21 , CLK80 y CLK91
EUREF03	Prevista	Combinada	ETRF00	GPS, GLONASS y Galileo IOV	

Tabla 9.1: Productos en el marco regional (http://www.epncb.oma.be/_productsservices/realtimecorrections/ . Última visita: Mayo 2014)

Adicionalmente, existen otras soluciones individuales que dan resultados en el marco regional, por ejemplo, el modelo CLK41 con solución GPS y GLONASS, realizado para Europa por el BKG[3].

Si bien, el hecho de partir de un marco ITRF materializado para una determinada época u otra influye en los resultados, actualmente el estado de desarrollo provisional de los productos de EUREF también es determinante, debido a varios factores del proceso de generación de productos en el marco regional del usuario (Huisman et al., 2012). Entre otros, cabe citar la latencia que se añade a causa del cómputo del modelo llevado a cabo del lado del servidor que lo genera. También existe un *bias* u *offset* inducido en el resultado final, debido al cambio de escala al transformar desde un marco global al marco regional, que influirá a la hora de generar un producto regional de órbitas y relojes, como se ha mostrado en el capítulo 4. Por lo tanto, un aspecto esencial para conocer el margen de optimización de

[3] *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie-Alemania*

la técnica pasa por evaluar el rendimiento de cada producto y su consistencia con respecto al marco regional final que utilizan los usuarios.

Para analizar la problemática, en los siguientes escenarios se plantea a través de sesiones simultáneas la aplicación de los modelos referidos a distintos marcos de referencia sobre los observables GNSS en la misma ventana de tiempo, pero llevando los resultados al mismo marco final. Tras las sesiones se obtienen las coordenadas con el marco de referencia regional ETRF2000 directamente (en el caso del producto regional), y en el marco de referencia global ITRF2008 (en el caso de emplear el producto global), en la otra observación ejecutada paralelamente.

Como alternativa y mejora a las aproximaciones expuestas en el capítulo 4, para la generación de productos regionales de EUREF, sobre esta sesión paralela, se ha programado la aplicación de la transformación de marco en tiempo real, (o también denominada al vuelo). Para ello, se ha llevado a cabo la propagación en tiempo real de los parámetros a la época de observación de las sesiones a través del ratio de variación anual, siguiendo la formulación de Boucher y Altamimi, (2011), sobre los valores ITRF08, lo que permite obtener los resultados en el marco regional ETRF2000.

Como es obvio, en el planteamiento de las sesiones simultáneas se tienen que utilizar productos de distintos centros de análisis. Para que este aspecto no influya en el análisis final y se produzcan las mínimas inconsistencias, se han escogido aquellos productos de mayor semejanza generados para la constelación GPS+GLONASS, y que las correcciones vengan referidas al centro de fase de la antena (APC), con el fin de proporcionar la necesaria consistencia exigida entre las órbitas y relojes para el cálculo PPP en el que se van a emplear.

Los modelos empleados en los escenarios analizados son los que se muestran en la siguiente tabla, donde se diferencian los productos del marco de referencia regional de los que están en el marco de referencia global:

	CLK41	**EUREF02**	**CLK91**	**IGS03**
Referido al	APC (Antena Phase Center).	APC (Antena Phase Center.	APC (Antena Phase Center).	APC (Antena Phase Center).
Constelación	**GPS +GLONASS**	**GPS +GLONASS**	**GPS +GLONASS**	**GPS +GLONASS**
Mensajes	1059(5)-1060(5)-1065(5)-1066(5)	1057,1058,1059 1063,1064,1065	1059 (5) - 1060 (5) -1065 (5) - 1066 (5)	1057,1058,1059 1063,1064,1065
Marco de referencia	**ETRF2000**	**ETRF 2000**	**ITRF 2008**	**ITRF 2008**
Centro de Análisis/ Organismo	BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)	Producto combinado EUREF	CNES	Producto combinado IGS

Tabla 9.2: Descripción de los modelos RTCM-SSR empleados en los escenarios

Los mensajes transmitidos por cada modelo de la tabla incluyen los coeficientes de la corrección polinomial para el oscilador de cada satélite, las correcciones a las componentes orbitales y sus velocidades, y los sesgos correspondientes a cada observable *(biases)*, si bien en algún caso como el del IGS este sesgo no se llega a transmitir. La descripción del contenido de cada mensaje viene detallada en el capítulo 3.

9.2. Propuesta de transformación implementada en tiempo real

Es sabido que el procedimiento general consiste en la transformación en dos pasos, (Boucher y Altamimi, 2011):

-Paso 1: Transformar coordenadas ITRFyy en el marco global en la época central de las observaciones utilizadas a ITRF2000 utilizando valores derivados de las Tablas 1 y 2 publicadas en las especificaciones del IERS / ITRF (http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf).

-Paso 2: Utilizando la fórmula de transformación habitual que permite transformar de ITRF2000 a ETRF2000, publicada en las anteriores especificaciones.

No obstante, el procedimiento de transformación de dos pasos es habitual realizarlo de una sola vez utilizando los 14 parámetros de transformación calculados por la suma de ambos ITRFyy –a- ITRF2000 y ITRF2000 -a-ETRF2000. Puesto que el proceso seguido en EUREF para la generación del producto regional, (EUREFnn o también CLK41), sigue esa pauta habitual, la transformación al vuelo sobre los resultados en tiempo real en el marco ITRFyy se ha implementado del mismo modo.

Como la publicación de esta transformación viene expresada en la época 2000.0, los parámetros de transformación *(P(2000.0))*, se han propagado a la época (t_c) de las sesiones por medio de la expresión:

$$P(t_c) = P\,(2000.0) + \dot{P}\,(t_c - 2000.0)$$

siendo conocido el ratio $\dot{P}$ de variación anual de cada uno de los parámetros.
La transformación implementada se ejecuta en tiempo real sobre los resultados que arroja la técnica PPP cuando se emplea un modelo global (CLK91, IGS03 …), para ello en *Python* se ha programado la opción de transformación. En cada sesión, tal y como se ha descrito en el apartado de programación, existe un fichero config.txt donde se define que transformación de marco se va a realizar de entre todas las contenidas en una librería creada a tal efecto en *Python*.

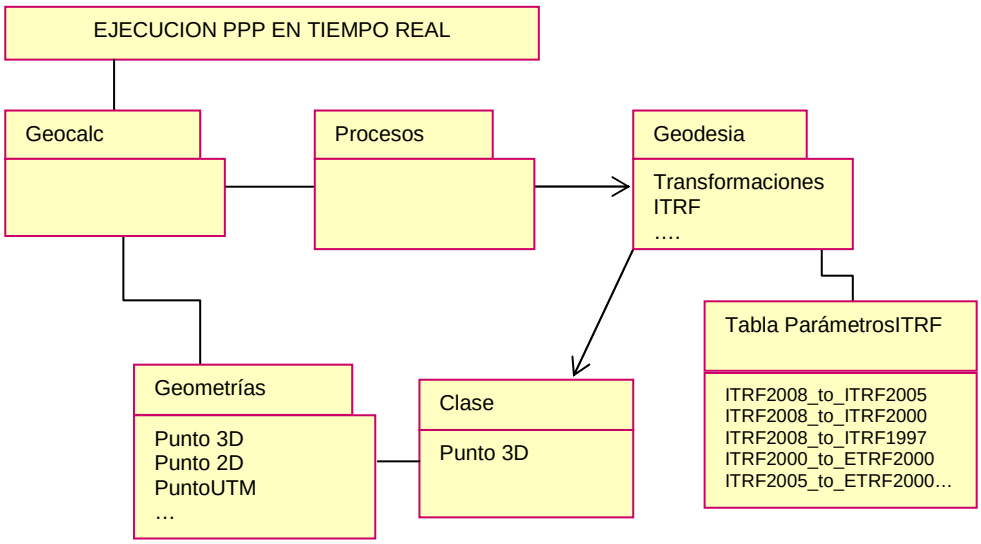


Figura 9.2: Diagrama UML transformación de Marco ITRF con la implementación propia en *Python*

Para todos los análisis, se plasman los gráficos obtenidos, que representan las discrepancias en dirección N, E, h. También se incluye la evolución de la convergencia en función del tiempo, como se muestra a continuación.

9.2.1. Rendimiento de la transformación en tiempo real sobre resultados PPP frente a productos de marcos regionales.

Los escenarios analizados abarcaron desde la semana GPS 1710 a la 1764, equivalente a un año de monitorización continua de la técnica, de los cuales se muestra, un extracto de lo más representativo por días de observaciones de duración entre 12 y 24 horas. Puede observarse en primera instancia como el rendimiento en términos de precisión y estabilidad de la solución es mejor en el caso del empleo del producto en el marco global aplicando la transformación en tiempo real.

Para calcular la posición con PPP en tiempo real, se ha seguido la misma táctica que en escenarios anteriores. Se utilizan observaciones GPS+GLONASS, a 1 Hz de una estación permanente (BRUX), y se

emplea un filtro secuencial para la resolución del algoritmo para PPP que permite asignar varianzas a priori a las coordenadas estimadas, así como a otros parámetros del vector de estado.

9.2.1.1. Modelo en el marco regional frente a transformación al vuelo sobre el modelo CLK91.

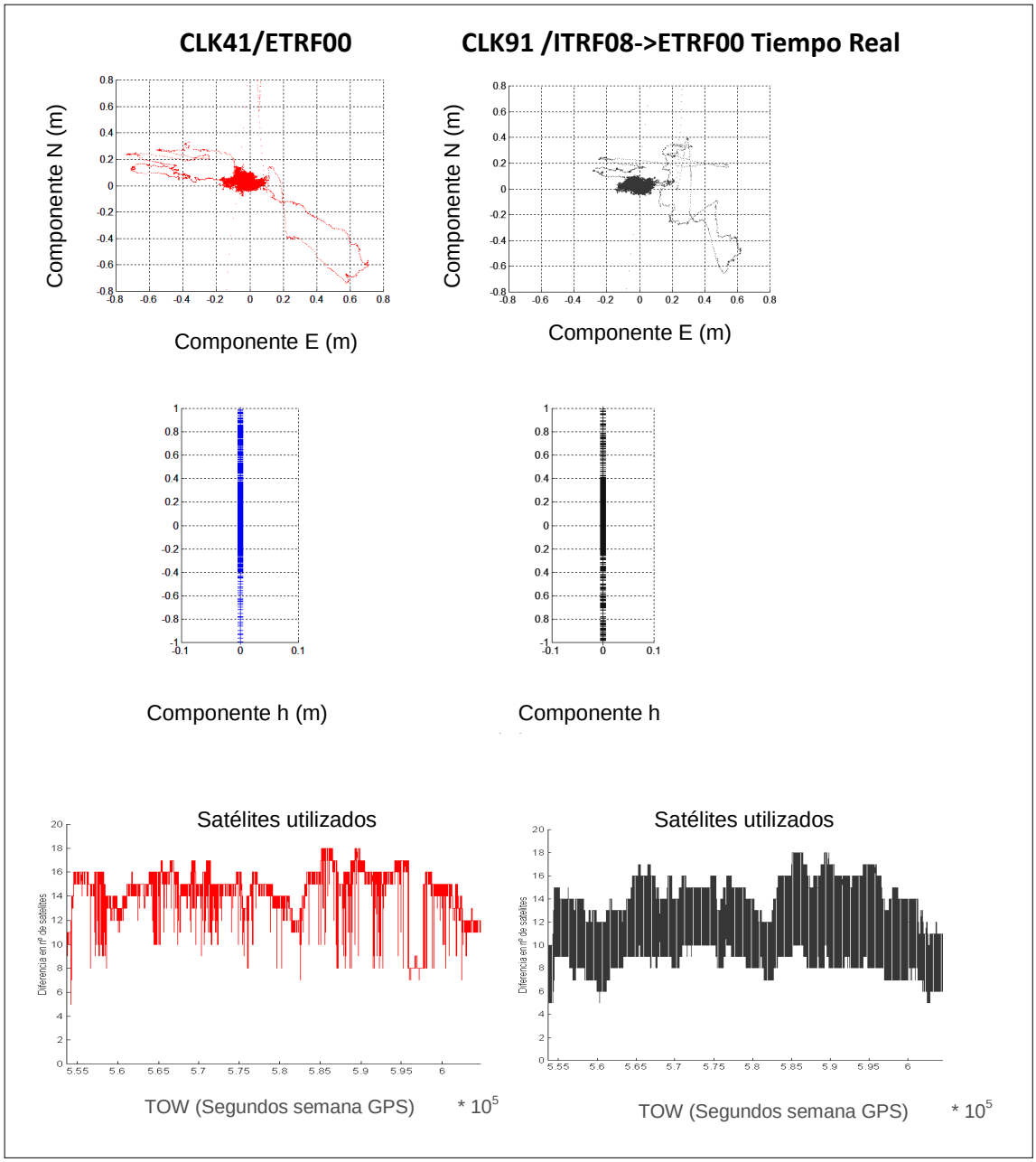


Figura 9.3: Offset X,Y,h y constelación utilizada con el modelo CLK41 frente al modelo CLK91. Doy294/2012

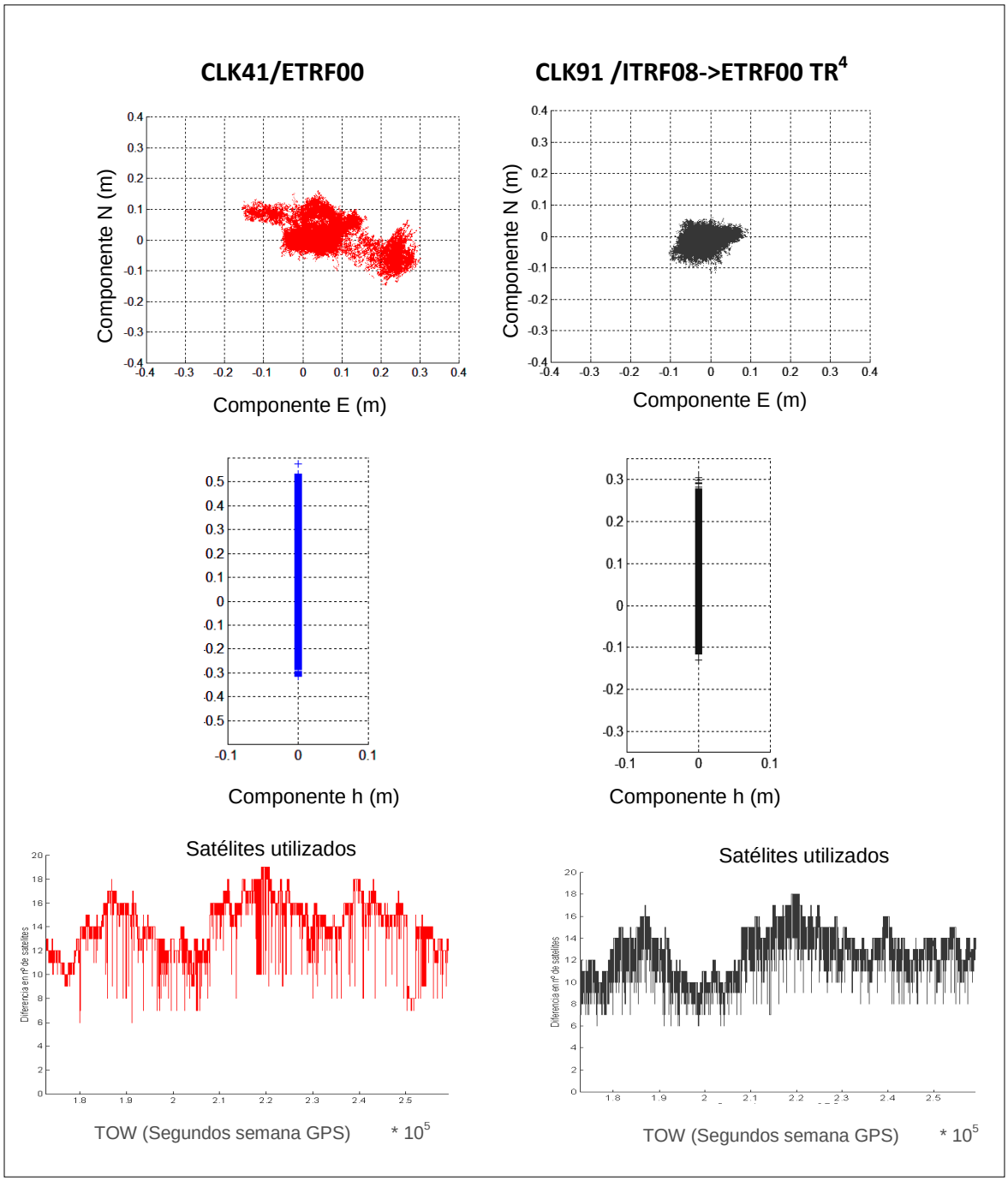


Figura 9.4: Offset X,Y,h y constelación utilizada con el modelo CLK41 frente al modelo CLK91. Doy297/2012

[4] *Transformación en tiempo real*

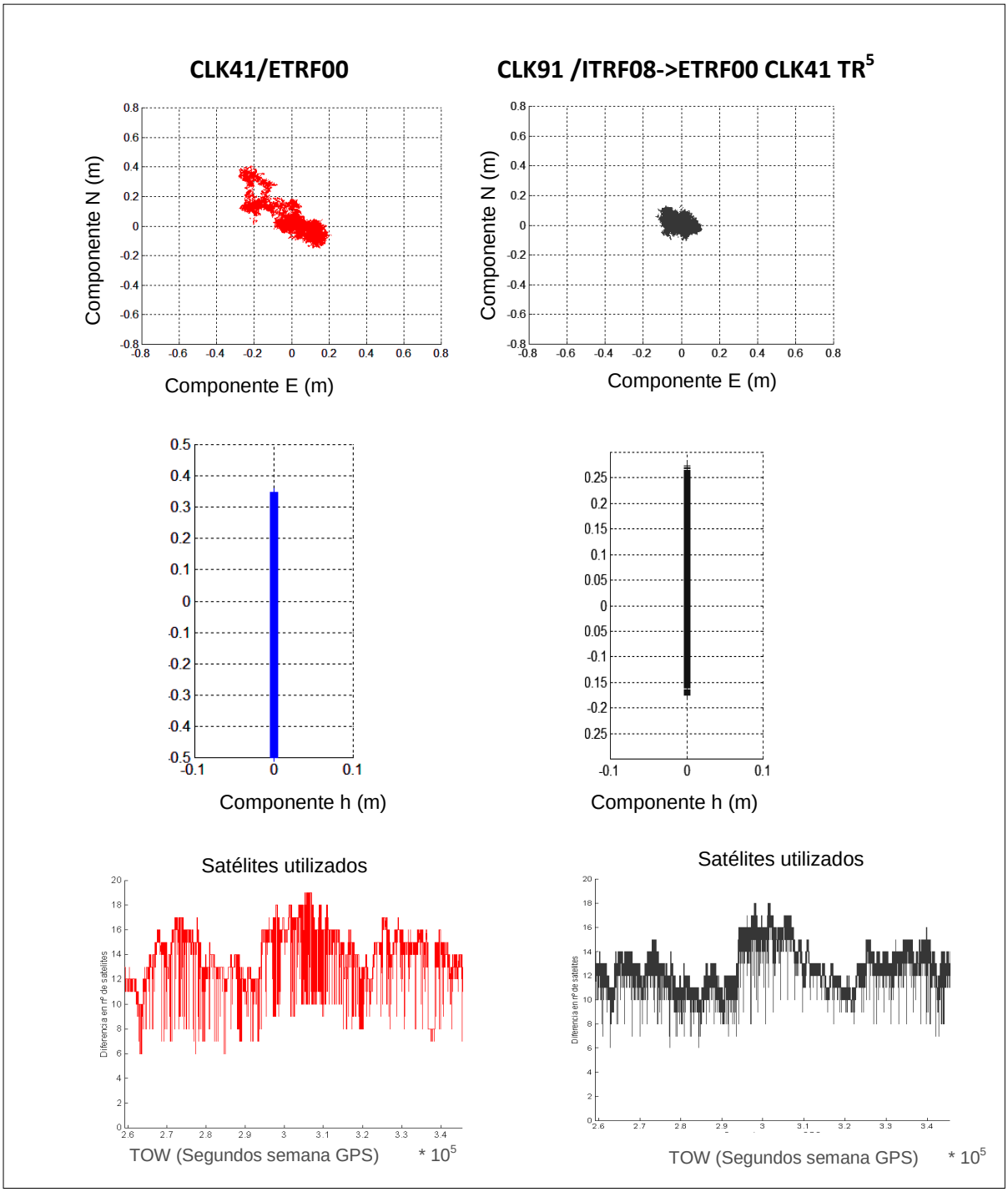


Figura 9.5: Offset X,Y,h y constelación utilizada con el modelo CLK41 frente al modelo CLK91. Doy298/2012

[5] *Transformación en tiempo real*

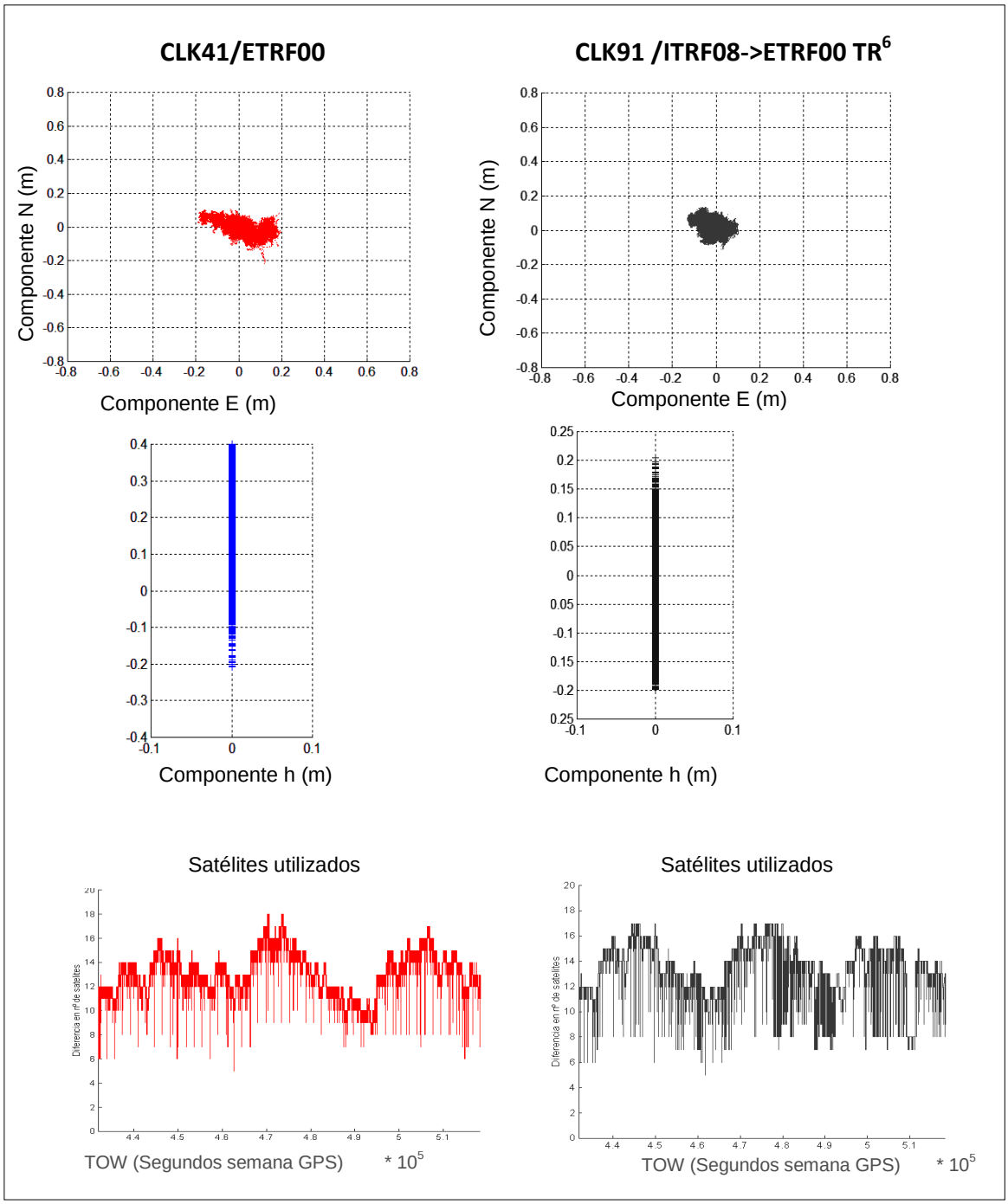


Figura 9.6: Offset X,Y,h y constelación utilizada con el modelo CLK41 frente al modelo CLK91. Doy300/2012

[6] *Transformación en tiempo real*

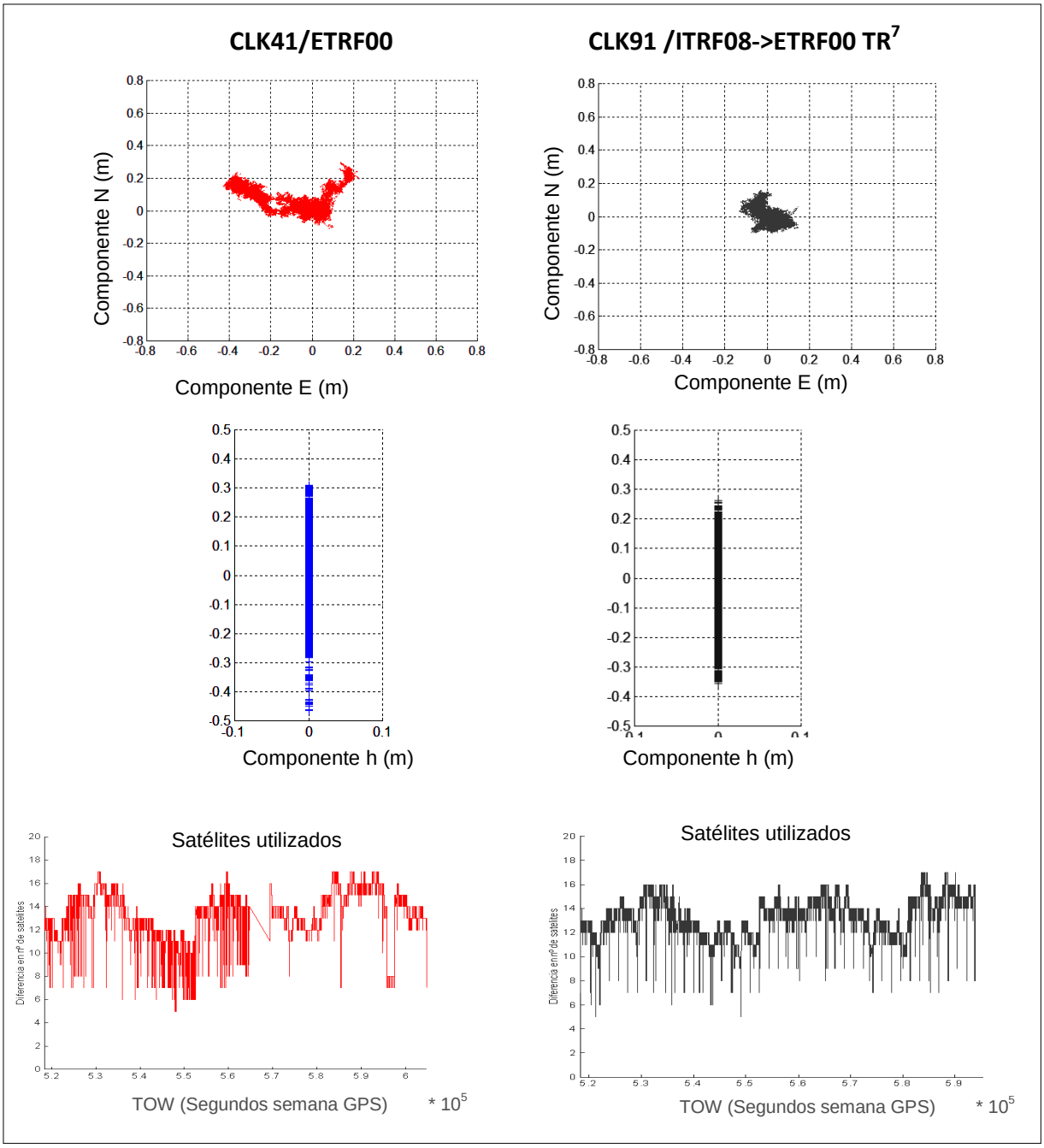


Figura 9.7: Offset X,Y,h y constelación utilizada con el modelo CLK41 frente al modelo CLK91. Doy301/2012

Adicionalmente puede observarse como en la representación época a época con ambos modelos superpuestos, que se adjunta a continuación, algunas componentes, (por ejemplo el valor h representado en amarillo), presenta más dispersión para el caso del producto regional.

[7] *Transformación en tiempo real*

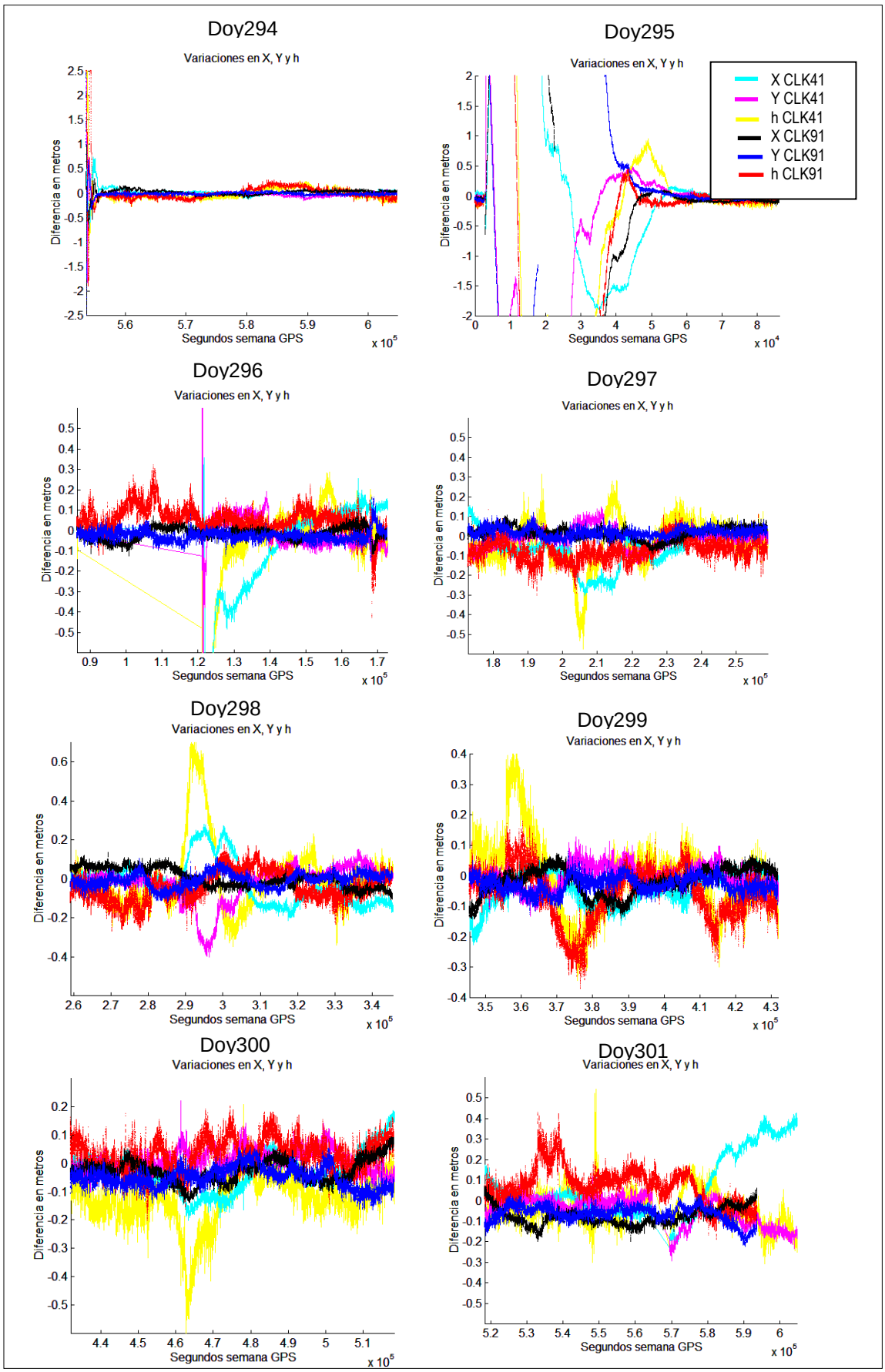


Figura 9.8: Diferencias con PPP en cinemático tiempo real en X,Y,h de la transformación al vuelo frente al modelo regional.

Con los estadísticos para la globalidad del periodo que se muestran a continuación se observa con más claridad los resultados obtenidos.

Producto CLK41	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	0,7340	2,3460	7,9680	Mayor de 20 cm	16,0890	7,0061	14,3453
Valor Mínimo (m)	-1,9850	-1,8210	-4,2270	Menor de 20 cm	83,0922	92,1751	84,8359
Valor Promedio (m)	0,0793	0,0400	0,0964				
Valor Desviación estándar (m)	0,1069	0,0598	0,1675				
Producto CLK91	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	0,4380	2,4600	4,1850	Mayor de 20 cm	5,5389	5,4909	7,7255
Valor Mínimo (m)	-0,6270	-3,0620	-1,9160	Menor de 20 cm	94,4470	94,4950	92,2604
Valor Promedio (m)	0,0311	0,0273	0,0704				
Valor Desviación estándar (m)	0,0378	0,0374	0,0883				

Tabla 9.3 : Resumen de estadísticos obtenidos –CLK91 y CLK41

Tanto para los valores máximo y mínimo como para los promedios, desviaciones estándar, y valores de rango inferiores a los 20 cm, la totalidad de las observaciones con el producto en el marco global ITRF, transformando los resultados al marco regional al vuelo, ofrece mejores resultados que con el producto calculado en el marco regional, y que directamente arroja los resultados en ETRF00. No obstante se llevaron a cabo más sesiones de control, esta vez utilizando el modelo EUREF02 combinado generado y emitido por la subcomisión de EUREF.

9.2.1.2. Modelo EUREF02 frente a la transformación al vuelo con el modelo CLK91

A continuación se muestran los resultados de PPP en tiempo real con el modelo calculado por EUREF en el marco de referencia ETRF2000 y los resultados obtenidos con un modelo en el marco ITRF (CLK91), en el marco de referencia ITRF2008. En la sesión en que se aplica este último modelo en tiempo real se vuelve a aplicar la transformación al vuelo propagando los parámetros de Boucher-Altamimi (2011), a la época de la observación (denotado por las siglas TR en los rótulos).

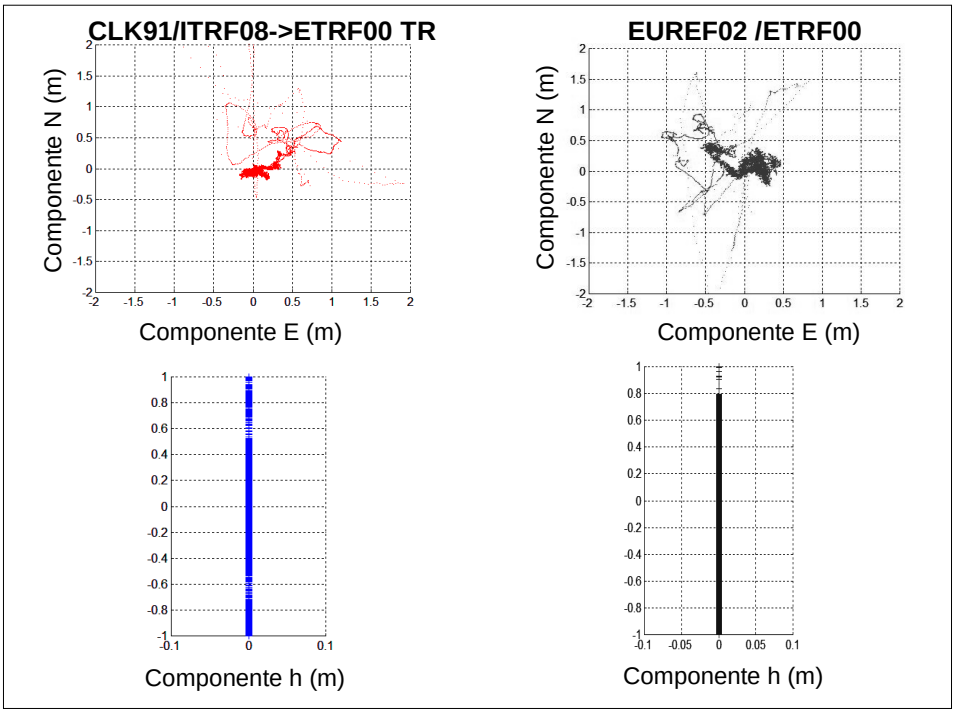


Figura 9.9: Offset X,Y,h del producto regional frente a la transformación al vuelo. Doy342/2012

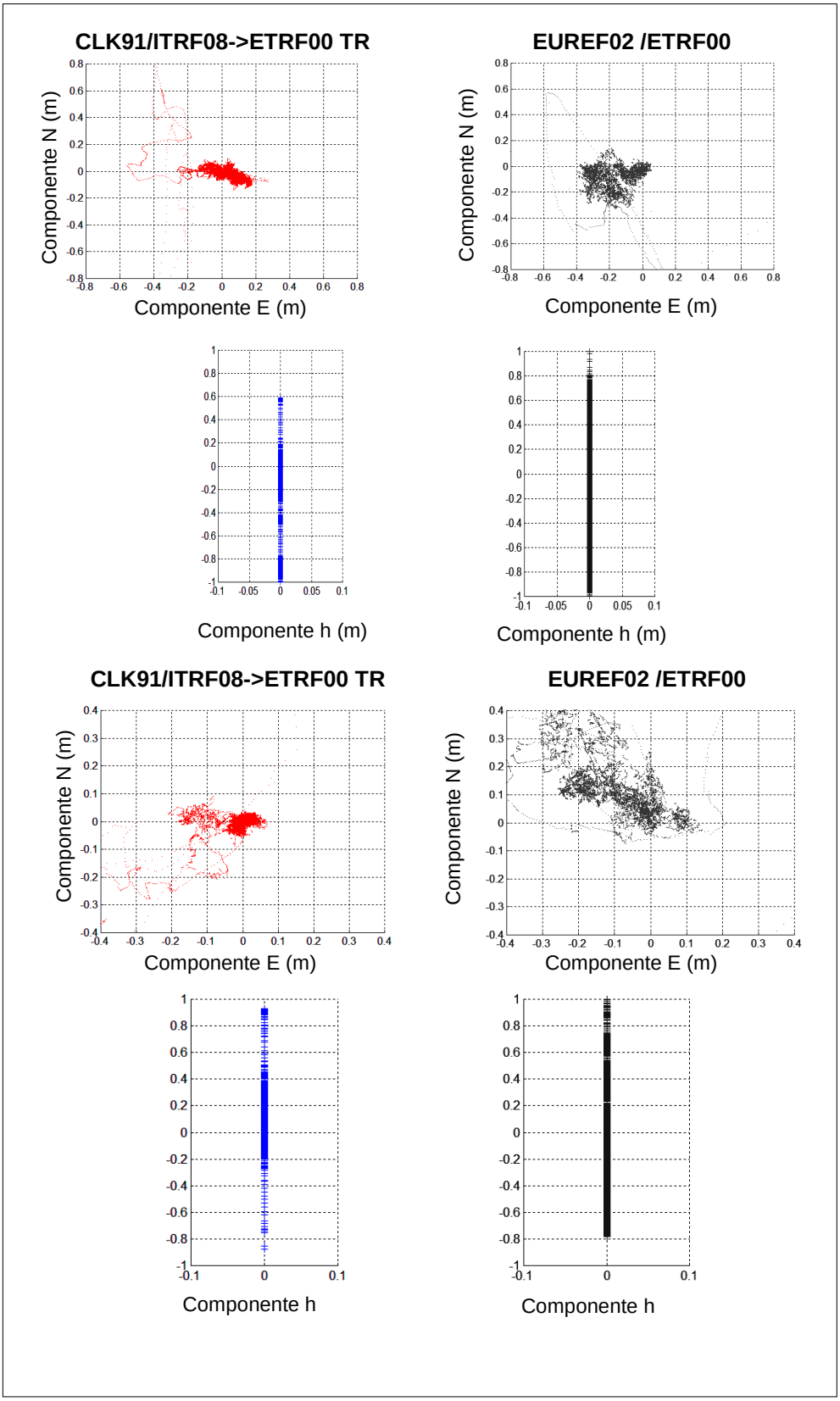


Figura 9.10: Offset X,Y,h del producto regional frente a la transformación al vuelo. Doy343/2012, Doy347/2012

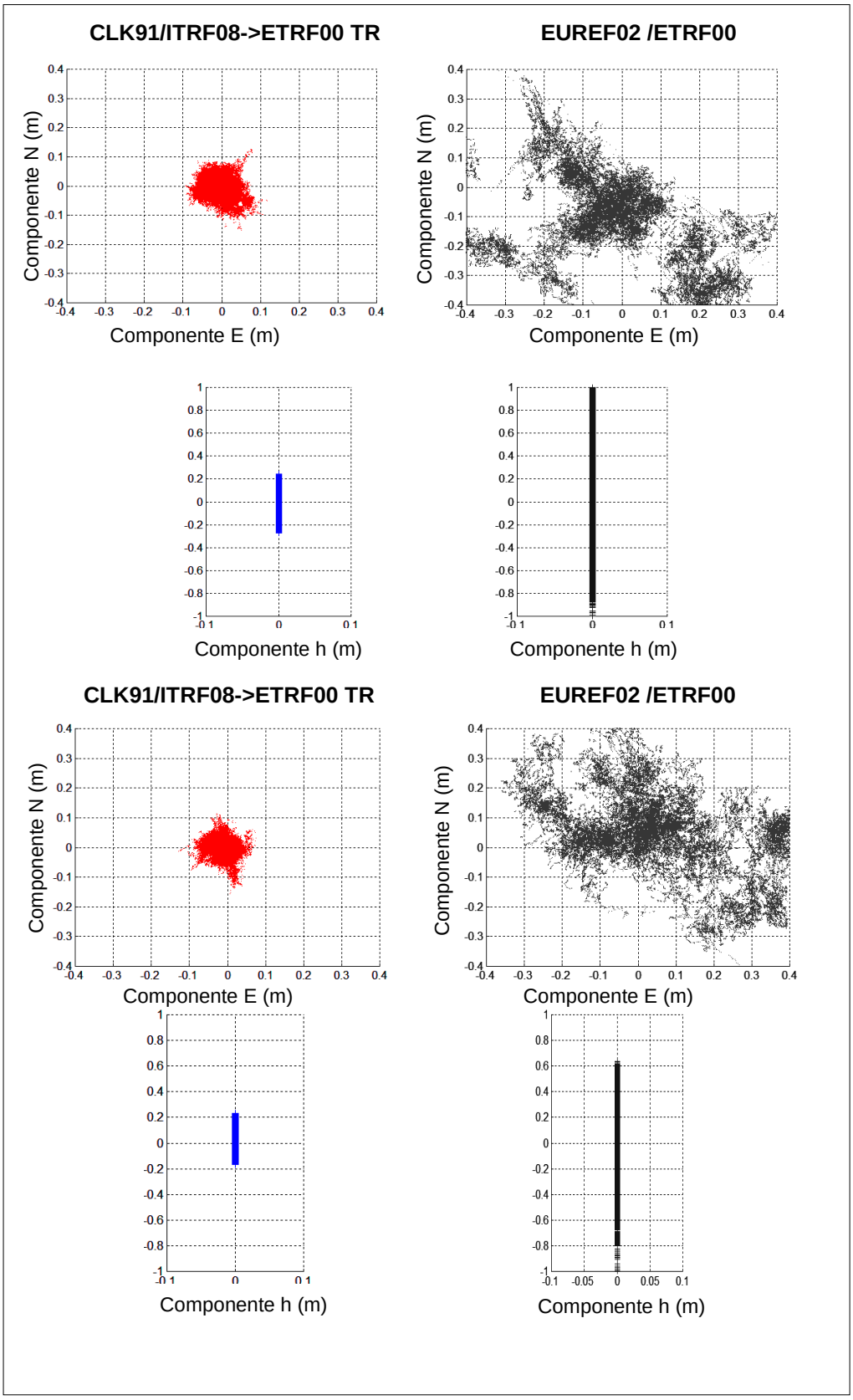


Figura 9.11: Offset X,Y,h del producto regional frente a la transformación al vuelo.
Doy 349/2012 , Doy 350/2012

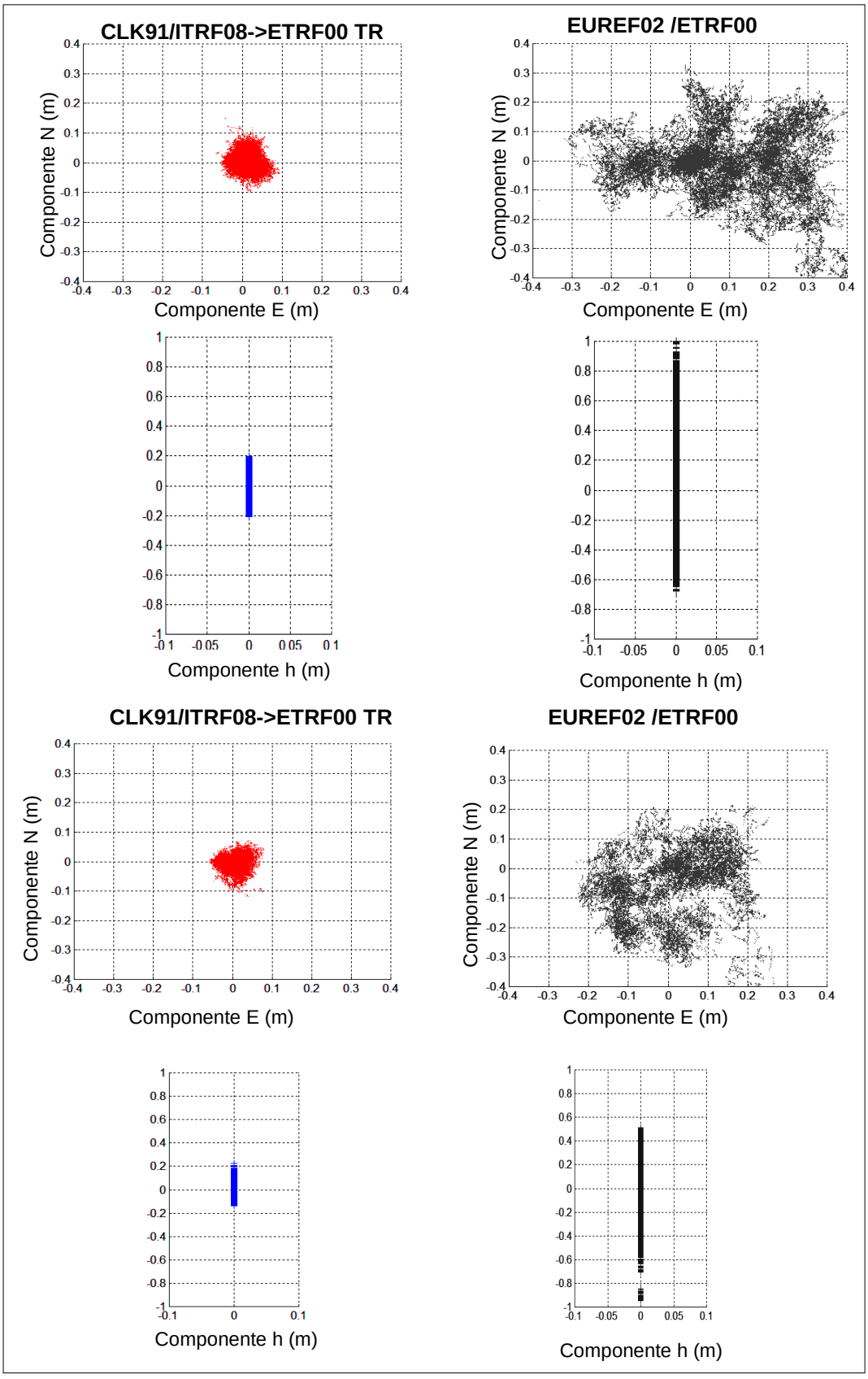


Figura 9.12: Offset X,Y,h del producto regional frente a la transformación al vuelo.
Doy351/2012 , Doy 352/2012

La representación época a época para este escenario puede verse resumida a continuación, donde se observa a simple vista la diferencia en tiempos de convergencia de la solución para un determinado umbral de precisión.

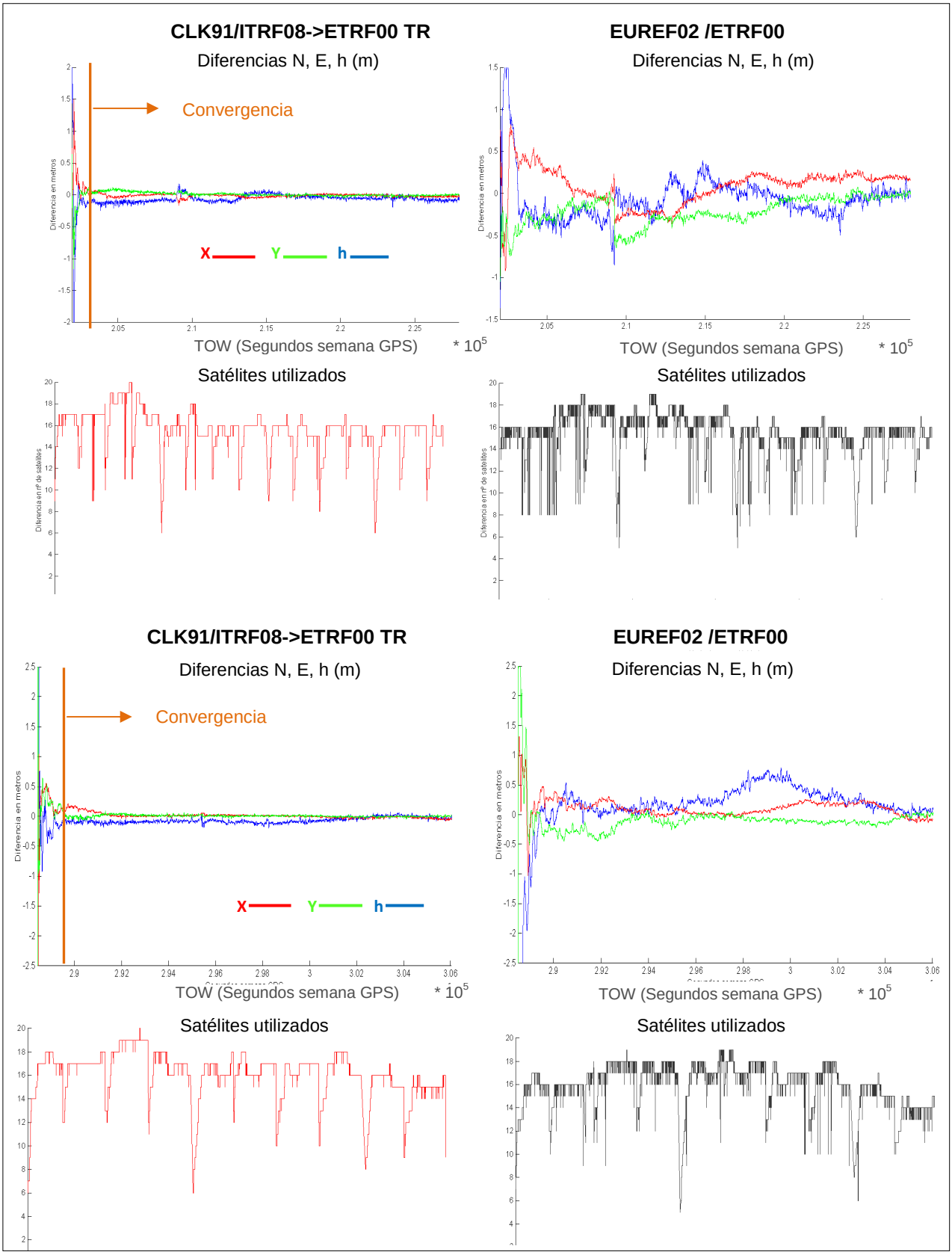


Figura 9.13: PPP cinemático tiempo real con las soluciones global-regional. Doy 346 /2012 , Doy 347/2012

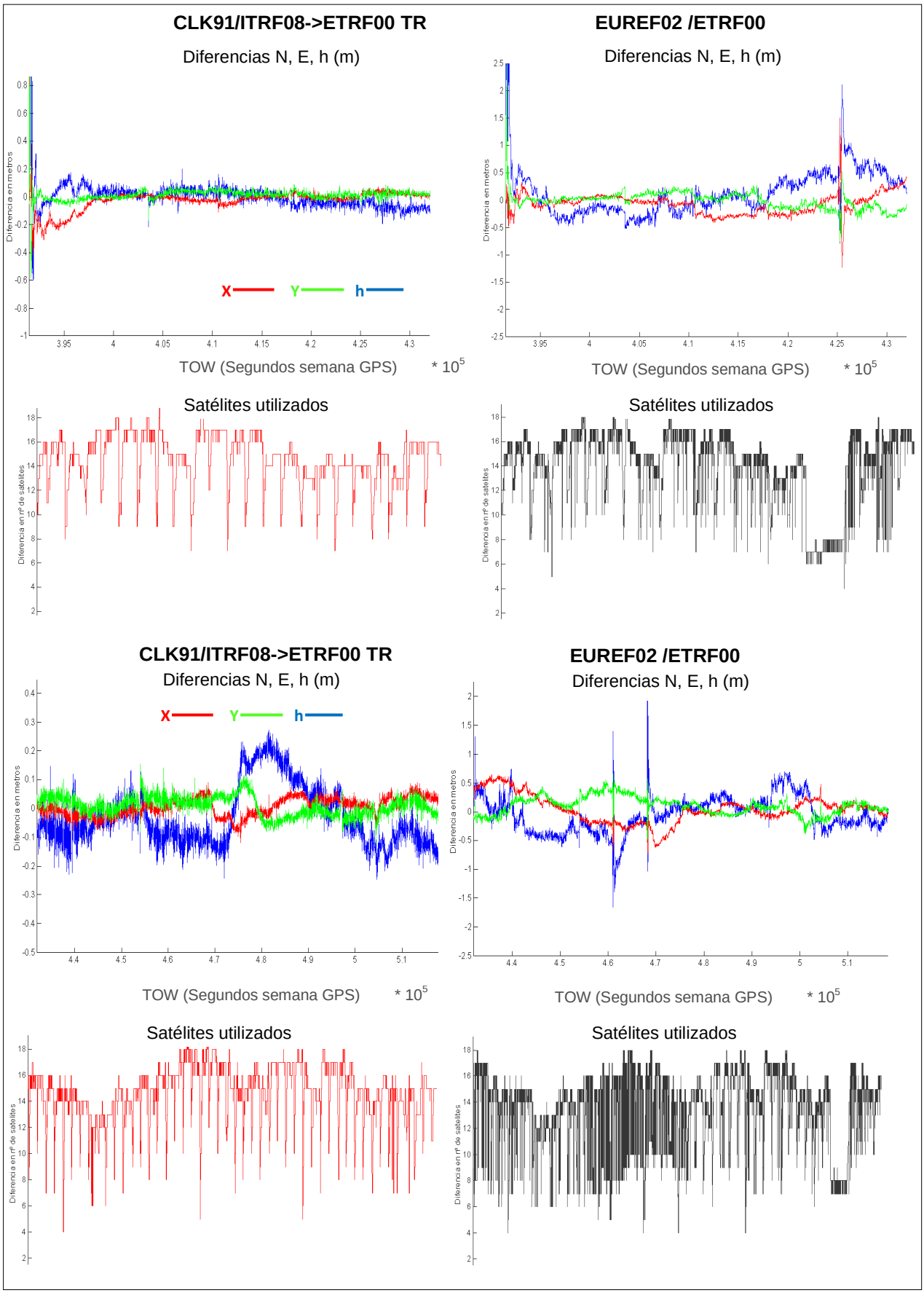


Figura 9.14: PPP cinemático tiempo real con las soluciones global-regional. Doy 348 /2012
Doy 349 /2012

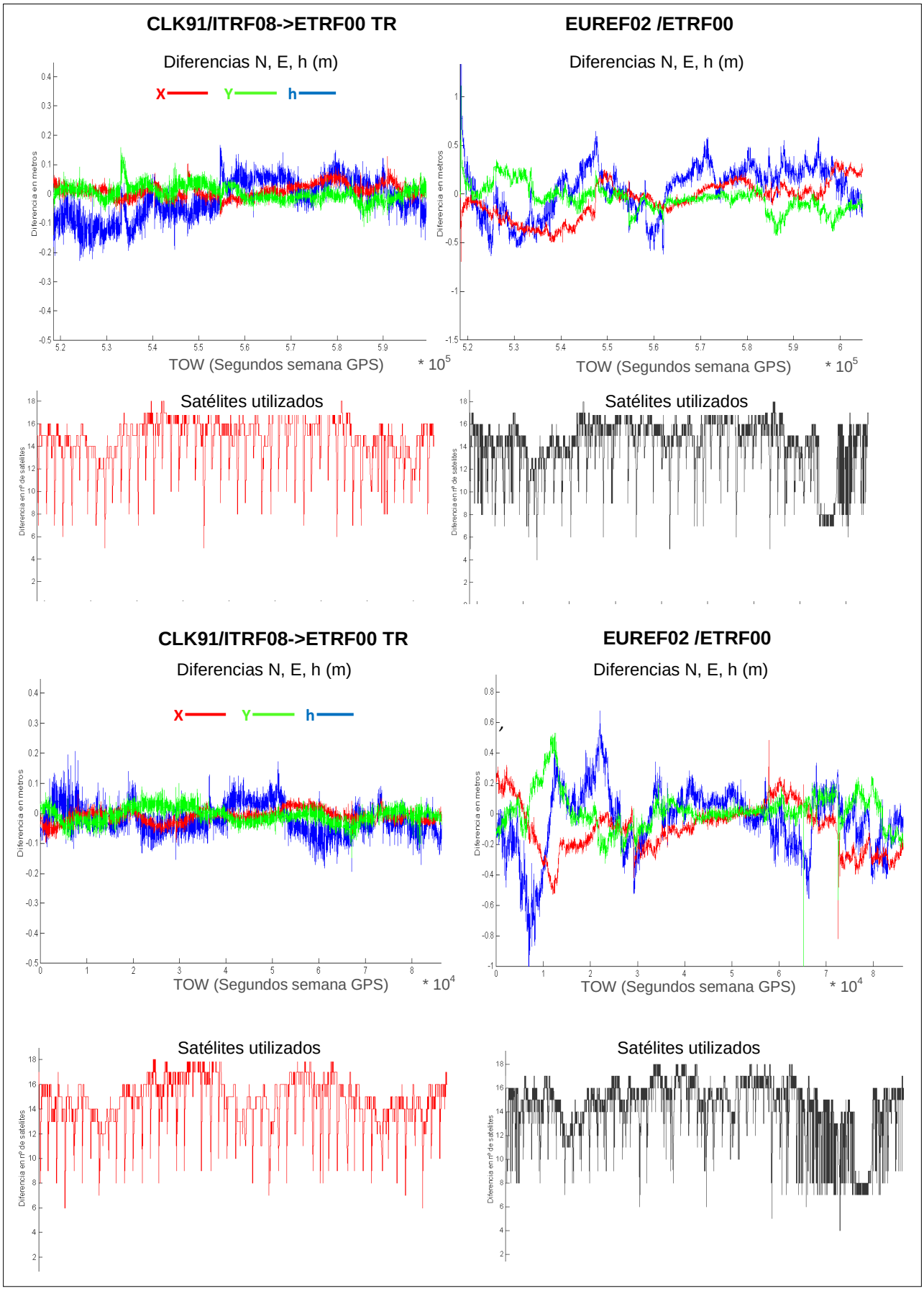


Figura 9.15: PPP cinemático tiempo real con las soluciones global-regional. Doy 350/2012, Doy 351/ 2012

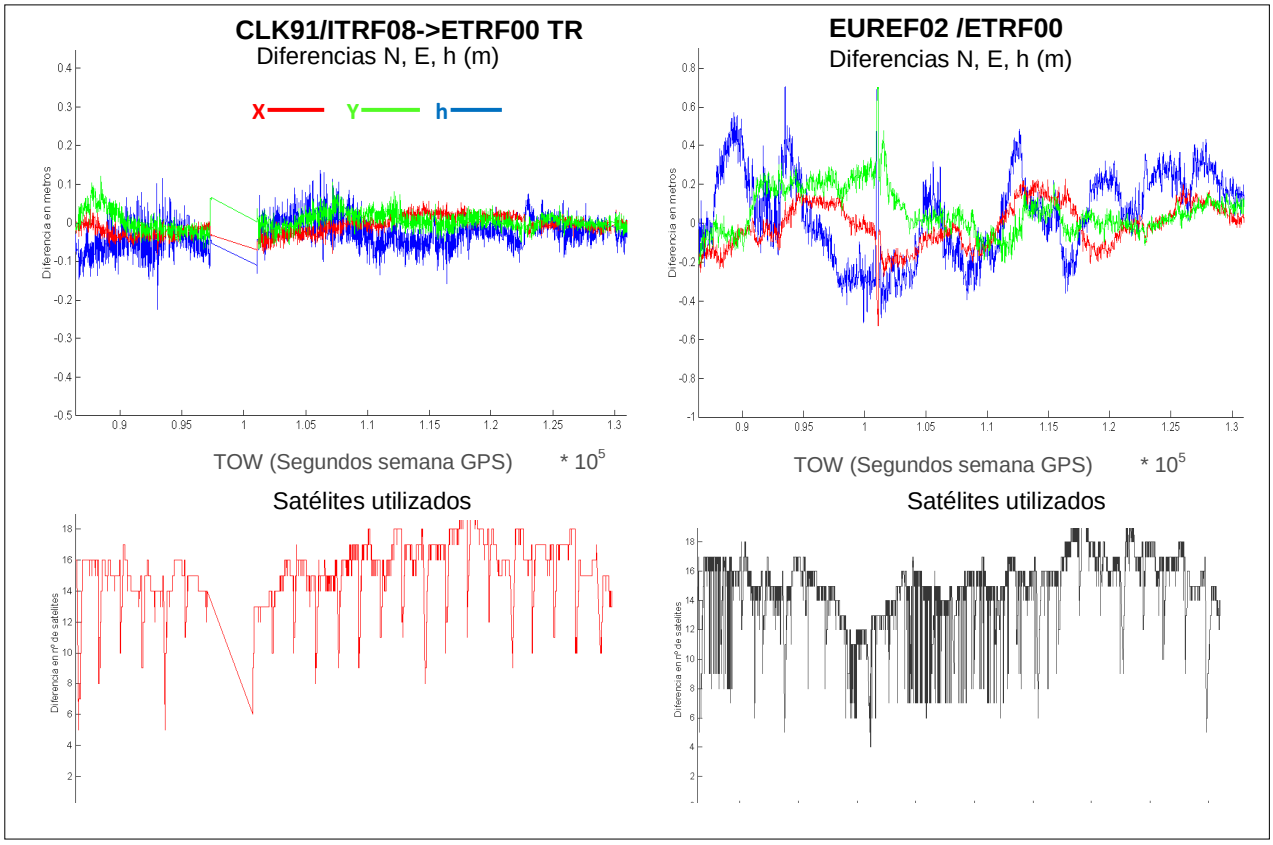


Figura 9.16: PPP cinemático tiempo real con las soluciones global-regional. Doy 352/2012

Al igual que en el caso anterior, en las sesiones representadas se observa la mejor respuesta de la transformación al vuelo en el cálculo PPP en tiempo real, en cuanto a tiempo de inicialización, continuidad, precisión y estabilidad de la solución. A continuación se muestran los estadísticos de los resultados obtenidos:

Producto CLK91	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	17,2540	15,7790	24,1500	**Mayor de 20 cm**	1,3155	0,6994	1,2669
Valor Mínimo (m)	-23,3720	-12,6410	-30,2200	**Menor de 20 cm**	98,6845	99,3006	98,7331
Valor Promedio (m)	0,0316	0,0269	0,0691				
Valor Desviación estándar (m)	0,0420	0,0383	0,0908				
Producto EUREF02	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	1,4980	7,1880	36,0790	**Mayor de 20 cm**	28,6877	21,6818	46,1769
Valor Mínimo (m)	-1,5660	-13,7580	-16,8430	**Menor de 20 cm**	71,3123	78,3182	53,8231
Valor Promedio (m)	0,1507	0,1343	0,2429				
Valor Desviación estándar (m)	0,1718	0,1428	0,2618				

Tabla 9.4 : Estadísticos promedio de las soluciones acumulativas diarias para PPP-Tiempo real con el modelo regional frente al global.

En cuanto al tiempo en que la solución tarda en entrar en un rango determinado, la observación con el producto CLK91 también ofrece mejores resultados. La inicialización es muy rápida en las sesiones evaluadas, con alrededor de 7-10 minutos se obtienen valores por debajo de los 20 cm, y en 20 minutos desde el inicio alcanza precisiones inferiores a los 5 cm. El producto EUREF02 obtiene tiempos de inicialización muy superiores a estos, ya que necesita entre 15- 45 minutos para alcanzar precisiones de 20cm y en ningún momento consigue alcanzar y mantener precisiones menores a los 5 cm. Es de destacar que la aproximación efectuada para el modelo EUREF02, para la época de realización de las sesiones, solo tiene en cuenta la transformación sobre las componentes orbitales y mantiene las correcciones de reloj invariables.

Otra nueva sesión de contraste fue ejecutada simultaneando dos productos en el marco global y uno en el marco regional, pero en este caso uno de los productos en el marco global es el resultado de la combinación de varios modelos de centros de análisis individuales (IGS03). Esta sesión se realizó con el fin de analizar el origen de la imprecisión del modelo EUREF02 y si guarda correlación con los problemas de generación de productos combinados que arrastra el modelo IGS03.

9.2.1.3. Modelo en el marco regional frente a modelos globales transformados al vuelo.

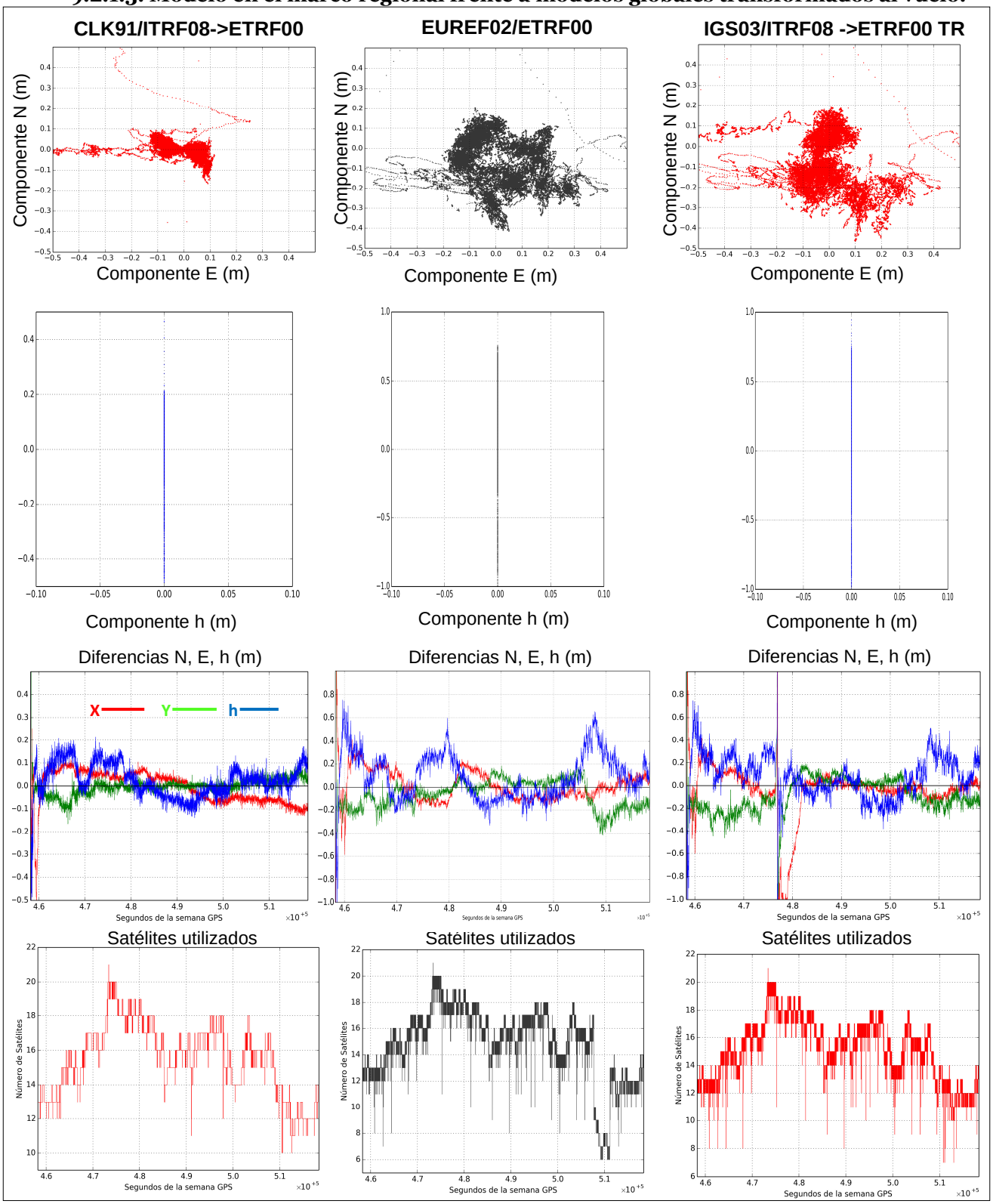


Figura 9.17: Offset X,Y,h y posiciones cinemáticas época a época con PPP con soluciones regionales frente a regionales. Doy 298/2013

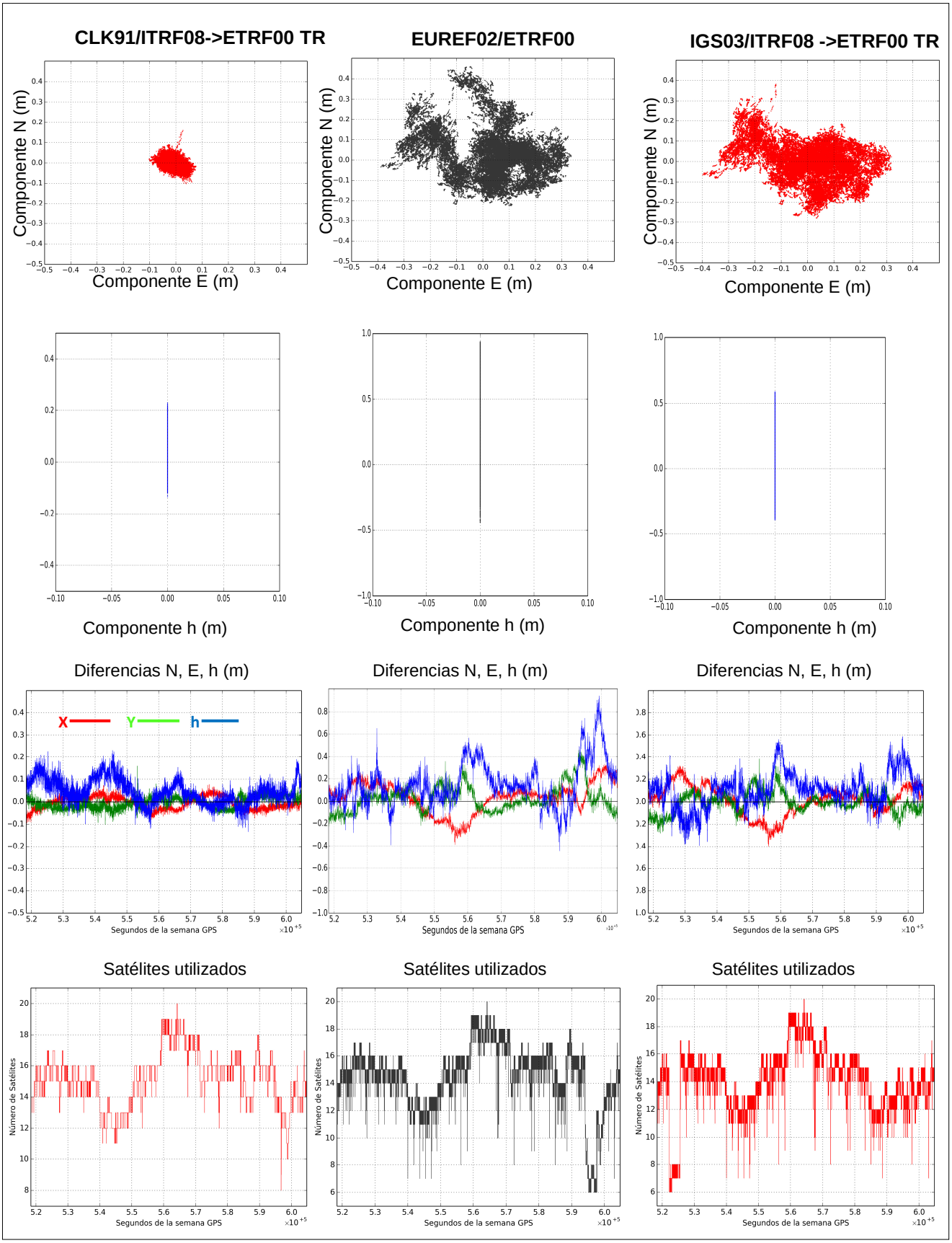


Figura 9.18: Offset X,Y,h y posiciones cinemáticas época a época con PPP con soluciones regionales frente a regionales. Doy 299/2013

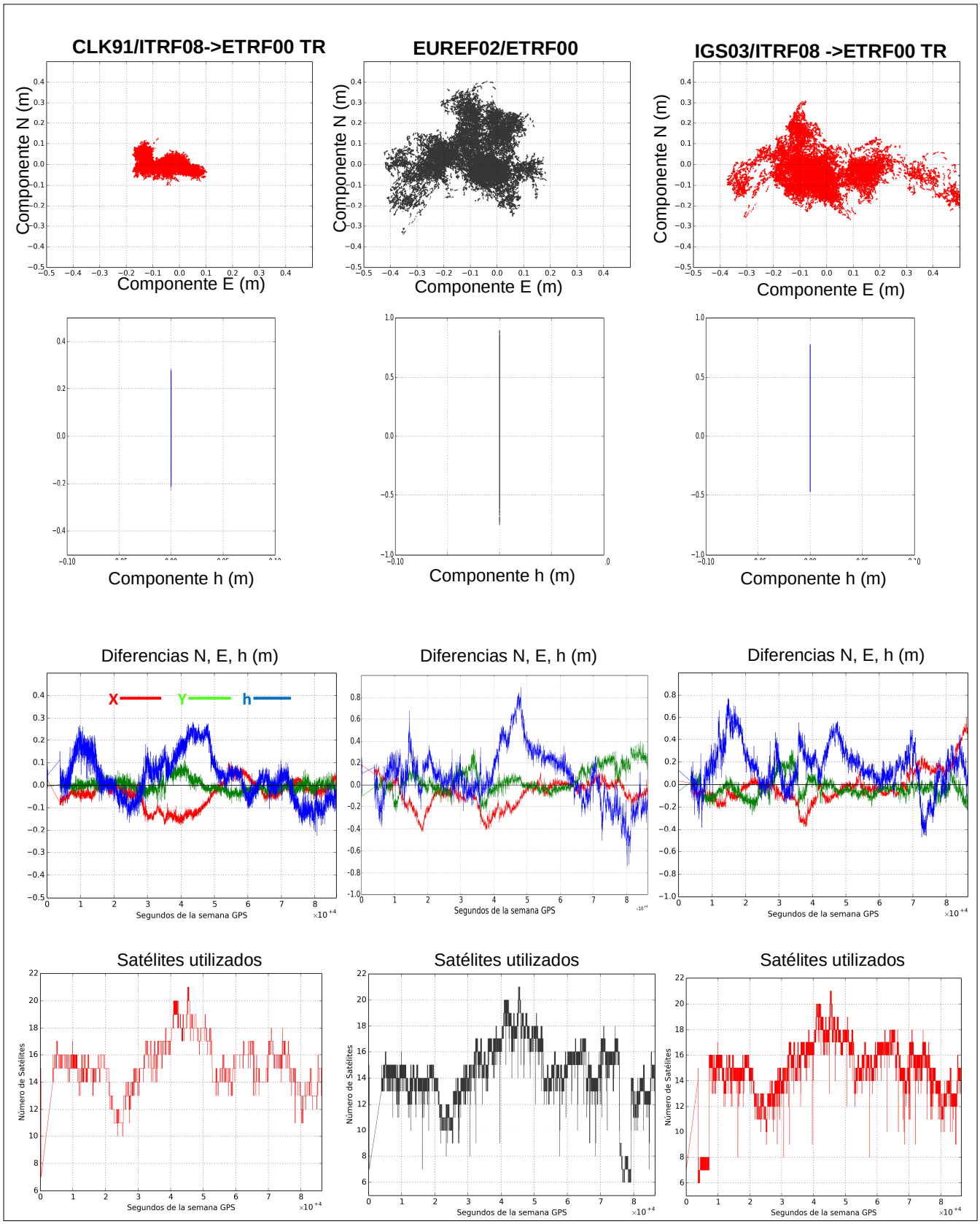


Figura 9.19: Offset X,Y,h y posiciones cinemáticas época a época con PPP con soluciones regionales frente a regionales. Doy 300/2013

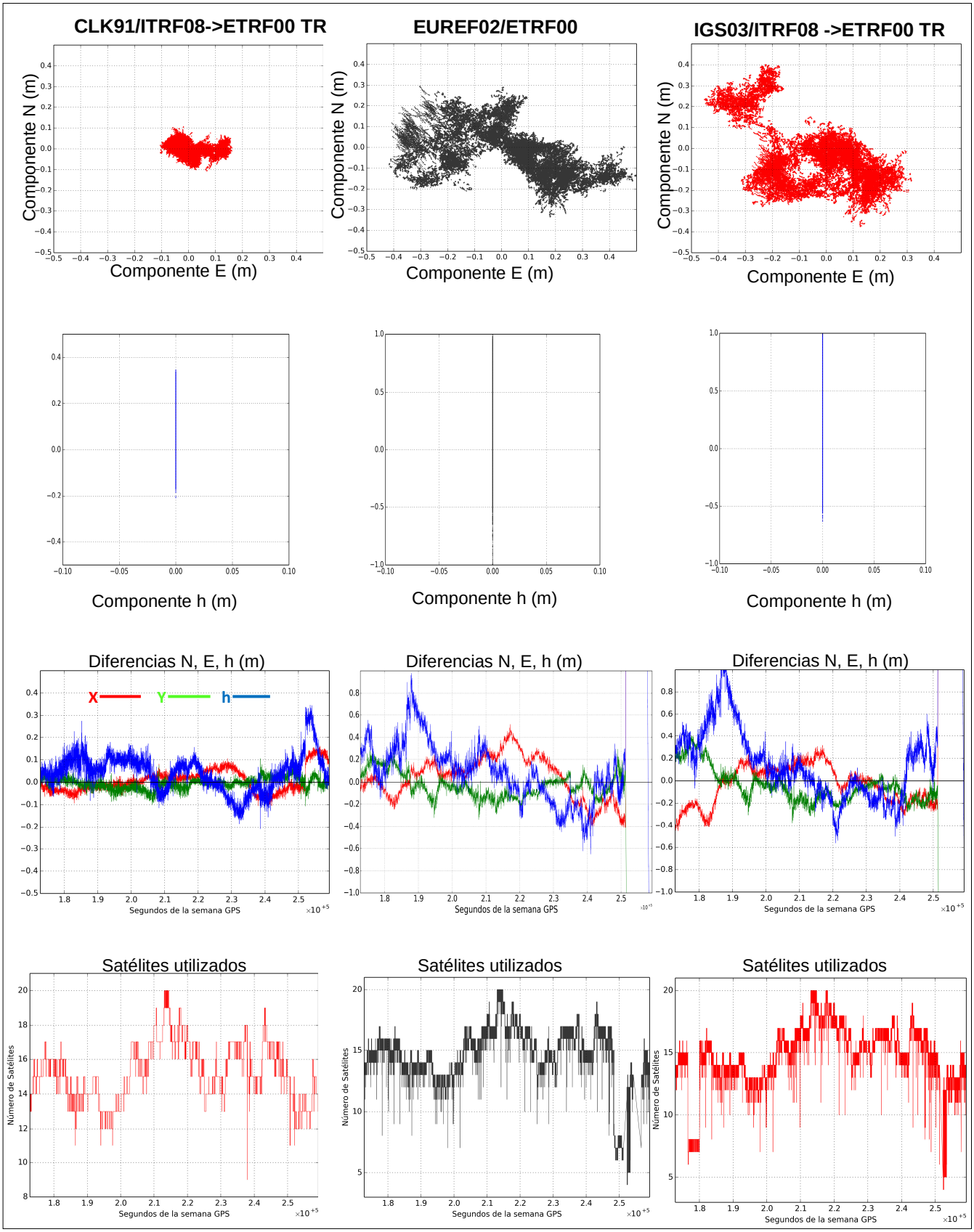


Figura 9.20: Offset X,Y,h y posiciones cinemáticas época a época con PPP con soluciones regionales frente a regionales. Doy 302/2013

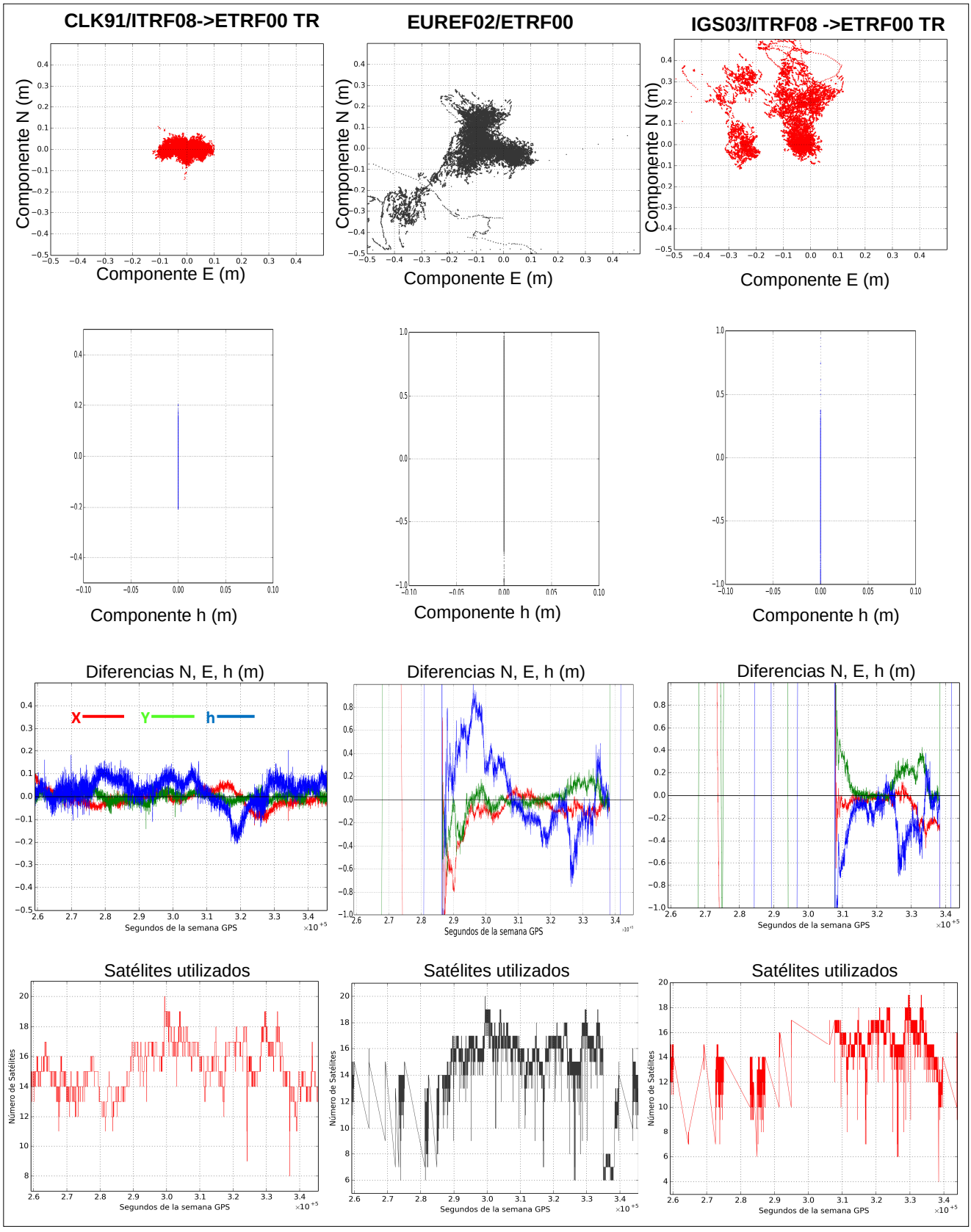


Figura 9.21: Offset X,Y,h y posiciones cinemáticas época a época con PPP con soluciones regionales frente a regionales . Doy 303/2013

Producto CLK91	E	N	h	Tiempo en Rango (%)	E	N	h
Valor Máximo (m)	1,2480	1,3460	1,6700	Mayor de 20 cm	0,2672	0,0684	4,6223
Valor Mínimo (m)	-0,7700	-0,3560	-1,5660	Menor de 20 cm	99,7328	99,9316	95,3777
Valor Promedio (m)	0,0397	0,0203	0,0715	Menor de 5 cm	72,5875	94,0244	45,6325
Valor Desviación estándar (m)	0,0488	0,0300	0,0820				
Producto EUREF02	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	1,1200	3,2920	1,1440	Mayor de 20 cm	25,6407	24,6578	37,6904
Valor Mínimo (m)	-1,9070	-1,3390	-4,2980	Menor de 20 cm	74,3593	75,3422	62,3096
Valor Promedio (m)	0,1177	0,0818	0,1997	Menor de 5 cm	29,5872	42,4868	18,0192
Valor Desviación estándar (m)	0,1552	0,1273	0,2775				
Producto IGS03	**E**	**N**	**h**	**Tiempo en Rango (%)**	**E**	**N**	**h**
Valor Máximo (m)	2,565	3,276	1,272	Mayor de 20 cm	22,6283	16,2325	42,9000
Valor Mínimo (m)	-1,877	-3,815	-4,296	Menor de 20 cm	77,3717	83,7675	57,1000
Valor Promedio (m)	0,132	0,1071	0,2116	Menor de 5 cm	32,0131	35,1709	15,3684
Valor Desviación estándar (m)	0,1762	0,1485	0,2598				

Tabla 9.5: Estadísticos del escenario simultáneo de modelos globales frente al modelo regional.

Queda patente a la vista de los resultados, que algunas de las fluctuaciones del modelo EUREF02 son muy similares a las del modelo IGS03, debido a la metodología de generación de la combinación que afecta a ambas soluciones.

9.2.2. Discusión de los escenarios

Viendo el conjunto de las observaciones obtenidas para este análisis, se observa en primera instancia que respecto al tamaño de las mediciones, los productos globales que utilizan el marco ITRF2008, siempre que sea un modelo de un centro de análisis individual, obtienen un porcentaje de disponibilidad superior a los productos regionales, (continentales), que trabajan con el marco ETRF. En los estadísticos siguientes no forma parte el producto combinado IGS03, ya que se ha analizado en capítulos anteriores.

	ITRF	ETRF
% solución disponible	97,38%	94,72%
% solución no disponible	2,62%	5,28%

Tabla 9.6: Disponibilidad de las muestras para un total de 15 días

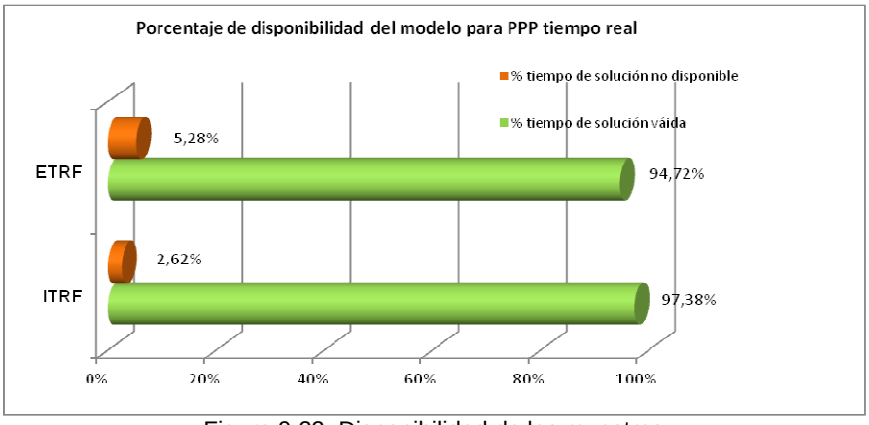


Figura 9.22: Disponibilidad de las muestras

Esto es debido a que utilizando productos en el marco ITRF e implementando la transformación en tiempo real los resultados son más estables, con menos interrupciones en su emisión o menos franjas con ausencia de datos, y con más continuidad. La generación de un modelo que arroja resultados directamente en el marco ETRF, (tal y como EUREF02), conlleva más carga del lado del servidor, con lo cual el producto llega con más latencia. Esta carga incluye procesos tales como la combinación de productos individuales y a su vez la transformación de órbitas, por lo que en parte adolece del mismo problema que el modelo IGS03.

Considerando el conjunto de sesiones, se puede observar el porcentaje de valores dentro y fuera del rango de los 20 cm de variación respecto a las coordenadas de referencia. En este caso, se detecta que con los productos ITRF se obtienen resultados donde, una vez transformados a ETRF, los valores dentro del rango son mayores que utilizando productos en el marco regional. Nótese que se obtienen porcentajes dentro del rango de 20cm de error superiores al 90% de las observaciones.

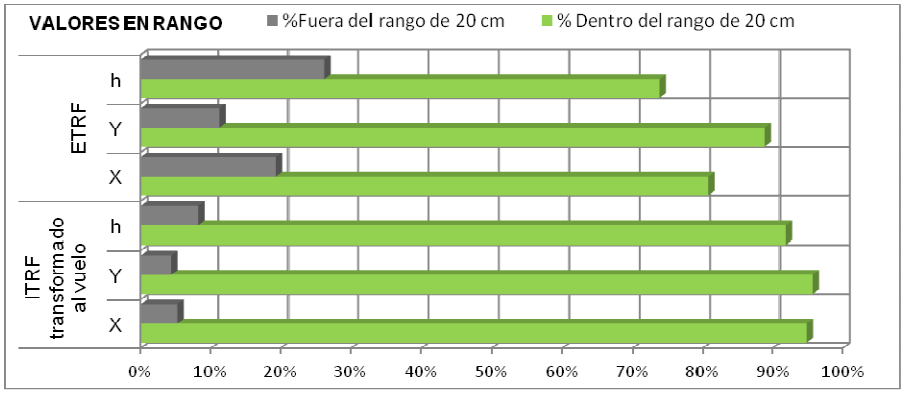


Figura 9.23: Estadísticos globales. Valores en rango para los marcos ITRF2008 y ETRF2000

Estudiando los estadísticos en función del *offset* o sesgo de la solución, se muestra como al emplear un producto como el CLK91, realizando los cálculos en el marco ITRF y pasando al marco ETRF en tiempo real, se obtienen valores promedios mejores que 5 cm de error para las componentes planimétricas y entre 5- 10 cm para la altimétrica. Mientras que con los productos que trabajan con el marco ETRF2000 directamente, los errores aumentan considerablemente, obteniendose valores entre 10 y 18 cm de error. Para el caso de las desviaciones estándar sucede exactamente lo mismo.

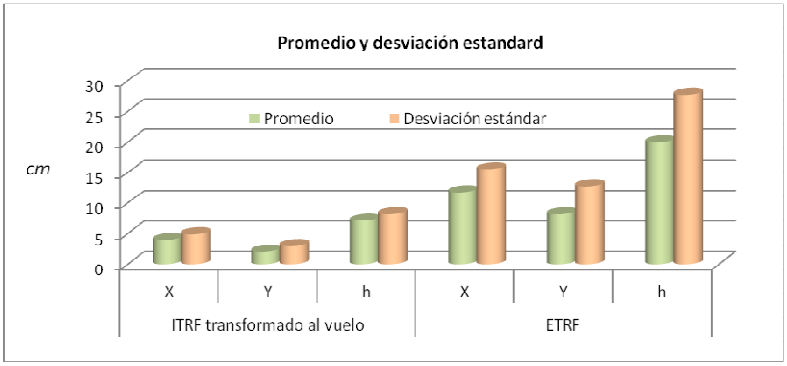


Figura 9.24: Estadísticos globales. Valores Promedio y desviación estándar para los marcos ITRF2008 y ETRF2000

Puede observarse a efectos prácticos el problema de escala que supone aplicar el cambio de marco para obtener un producto regional, (citado en el capítulo 4), y la influencia de la edad de las correcciones del producto EUREF02. Posibles soluciones, además de la adoptada de implementar librerías estándar del lado del usuario que propaguen directamente en tiempo real la transformación del marco global ITRF al regional ETRF00, en la época de observación del usuario, pueden ser las siguientes:

-Búsqueda de un modelo más robusto que el modelo EUREF02 combinado, que podría estar basada en la combinación de productos depurada con las condiciones expuestas en el capítulo anterior, sobre la que se podría realizar la transformación del modelo directamente o la transformación al vuelo sobre la solución PPP en tiempo real.

-La emisión junto con el modelo global de los parámetros de transformación en mensajes estandarizados RTCM-SSR, estos parámetros podrían ya venir propagados a la época de observación del usuario. Recordemos que un precedente de esto ya existe en los mensajes del rango 1021-1027 de la versión RTCM 3.1. En Capilla et al., (2012), se demostraba la eficiencia de la emisión en tiempo real de una única transformación de marco, de sistema de referencia o modelo de geoide desde el centro proveedor de servicios o proveedor de correcciones, con el fin de que todos los usuarios dispongan de la misma transformación transportada por protocolo NTRIP[8], para ser aplicada en campo al seleccionar un determinado Mountpoint. Otras aproximaciones, estudiadas en Huisman et al., (2013), consistentes en suprimir o absorber el factor de escala en la transformación, han demostrado diferencias de precisión en función de la localización del *rover*, o de la geometría de la sesión, lo que justifica por tanto la ampliación del estándar con nuevos mensajes de transformación de marco como parte del vector de estado SSR.

[8] *Network Transport of RTCM via IP*

Capítulo 10:
Diseño de la interface de monitorización global en tiempo real con PPP

En el contexto de la presente investigación y como herramienta complementaria de visualización y análisis se ha desarrollado un sistema de seguimiento remoto, cálculo con la técnica Precise Point Positioning en tiempo real, monitorización y publicación *on-line* horaria o sub-horaria de resultados correspondientes a estaciones GNSS distribuidas globalmente.

Previamente se ha indagado sobre la existencia de sistemas similares en funcionamiento actualmente. Cabe citar la labor que realizan los centros de análisis ya reseñados en la presente tesis, adscritos al *Real Time Pilot Project* del IGS *(International GNSS Service)* o al proyecto de EUREF para tiempo real, denominado Euref-IP, con el fin de calcular y analizar productos.

Recordemos además, que para que sea viable el posicionamiento en tiempo real con PPP en una estación remota, se debe acceder a los datos en *streaming* via TCP[1]/IP, o por protocolo NTRIP *(Network Transfer of RTCM/IP),* o también *in situ* por medio de las librerías y algoritmos descritos, y transfiriendo los resultados. Existen redes a nivel global que permiten la monitorización de las estaciones en tiempo real, como las citadas del IGS o la de EUREF. También existen grandes consorcios de redes orientados a fines muy concretos, desplegadas en ubicaciones estratégicas y promovidas por instituciones científicas como la red Geonet en Japon cuyos datos en tiempo real con cruciales para estimar de la manera más rápida la deformación producida después de un terremoto, (Hatanaka et al., 2004), o la California Real Time Network, (Bock, 2012), cuyo fin es monitorizar la falla de San Andrés, el consorcio Sirgas-RT (Real Time) en Sudamérica. Recientemente se ha definido el programa para Europa EPOS[2] (Lidberg et al., 2013), infraestructura que aglutinará datos de distinto instrumental y también de GNSS para tiempo real para tectónica, geodinámica superficial, vulcanismo y sísmica. Finalmente, hay que citar las redes públicas o de iniciativa privada cuya finalidad es proporcionar datos multi-servicio, dado el uso tan extendido y la demanda existente de correcciones diferenciales en tiempo real y datos para post-proceso en diversas aplicaciones. El servicio es prestado por parte de organismos públicos estatales y autonómicos en el caso de España, u otras regiones sub-estatales existentes en distintos países como los *Länder* en el caso de Alemania.

10.1. Diagrama de despliegue del sistema de monitorización

El sistema diseñado incluye todas las librerías de programación reseñadas anteriormente para PPP en tiempo real, scripts para el transporte automatizado de datos y programación web en HTML[3] 5.

[1] *Transmission Control Protocol*
[2] *European Plate Observing System*
[3] *HyperText Markup Language*

En el siguiente gráfico se puede observar el diagrama de despliegue aproximándose a la modelización UML[4] 2.0, que esquematiza el funcionamiento del sistema incluyendo el software y hardware, donde se muestran las componentes y las asociaciones entre ellas.

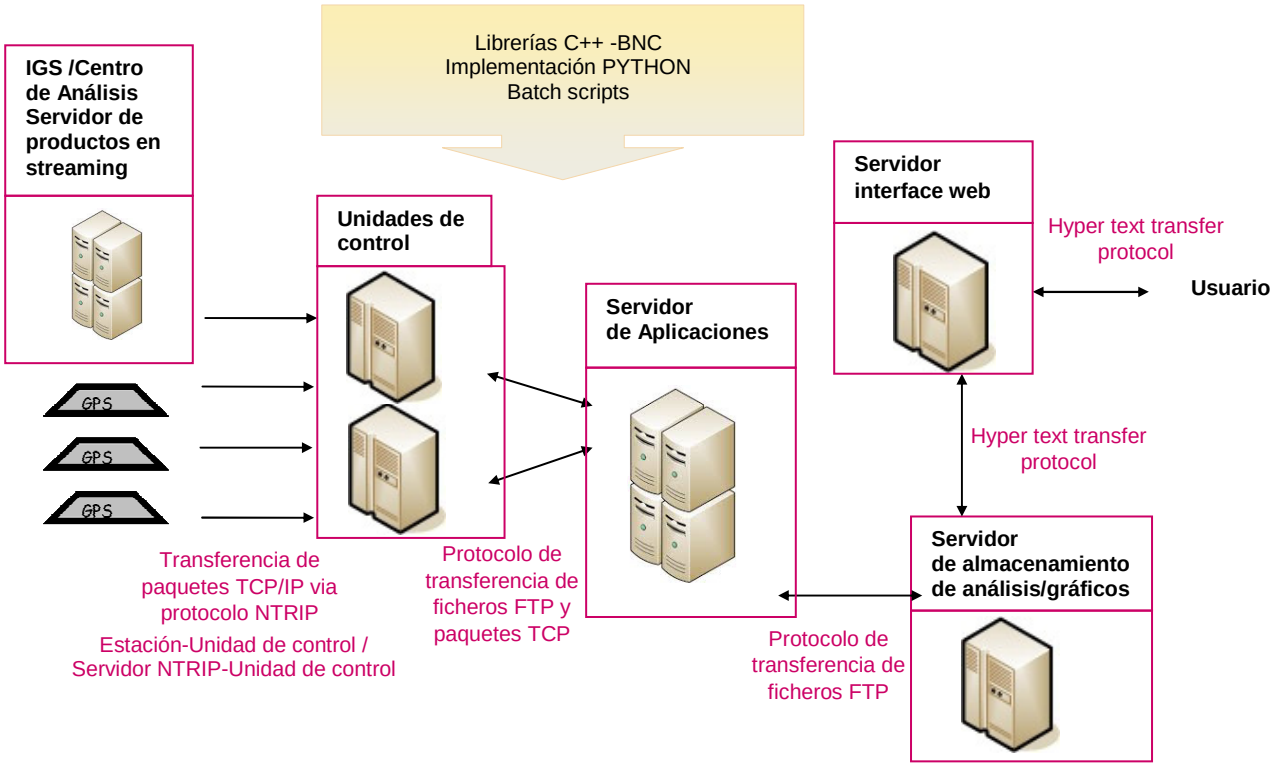


Figura 10.1: Diagrama de despliegue UML

El servidor que contiene la interface web prototipo se encuentra implementado bajo el sistema *free web hosting* y permite crear una versión de la web para dispositivos móviles como tablets o teléfonos móviles equipados con sistemas operativos Android o IOS. Admite la asignación de un dominio propio, y la optimización para motores de búsqueda (http://pppcontrol.webnode.es/).

El servidor de almacenamiento de análisis/gráficos, es un FTP server (*File Transfer Protocol*), basado también en *free web hosting*, accesible por protocolo de transferencia de hipertexto (http). Soporta adicionalmente, bases de datos SQL[5], App$_s$ de terceros, y scripting con lenguajes como php.

Las unidades de control, son las descritas en anteriores capítulos, en algunos casos es posible la implementación de la unidad de control *"in situ"*, es decir en el emplazamiento de la estación permanente. La misión de la unidad de control, explicada en otros capítulos, es obtener el posicionamiento PPP en tiempo real con la aplicación de los modelos en formato RTCM-SSR de correcciones de oscilador, órbitas, velocidades y *bias* de los observables, para ello se utiliza una extensión de las librerías C++ distribuidas por el BKG para su paquete de software BNC[6]. El servidor de aplicaciones realiza el análisis con el software y librerías programadas en el lenguaje multiplataforma *Python* con el fin de realizar el análisis en tiempo real, conforme se resuelve el posicionamiento PPP. Esta componente de aplicaciones también puede integrarse en las unidades de control, de manera que la programación de *Python* se ejecute con las librerías del BNC.

La transferencia de datos entre los distintos servidores se realiza a través de *batch scripts* programados por los protocolos FTP, NTRIP para transferencia del *streaming* y http para visualización y acceso del usuario. A continuación se puede ver la interface accesible por http, alojada en http://pppcontrol.webnode.es/:

[4] *Unified Modeling Language*
[5] *Structured Query Language*
[6] *BKG Ntrip Client*

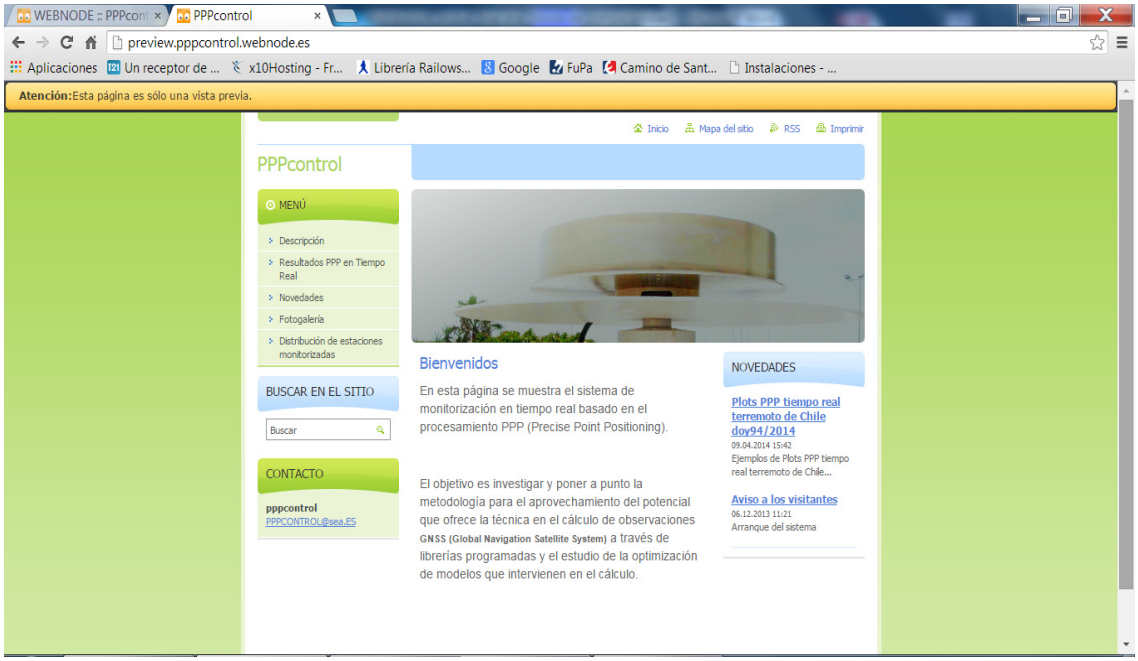


Figura 10.2: Interface de inicio alojada en el servidor web implementado (http://pppcontrol.webnode.es/)

10.2. Infraestructura global monitorizada

La potencia del desarrollo de un sistema de monitorización y visualización de estas características, es que permite realizar análisis sobre la respuesta de los productos a nivel global simultáneamente en varios emplazamientos, y obtener resultados de análisis visualizables en una interface más amigable.

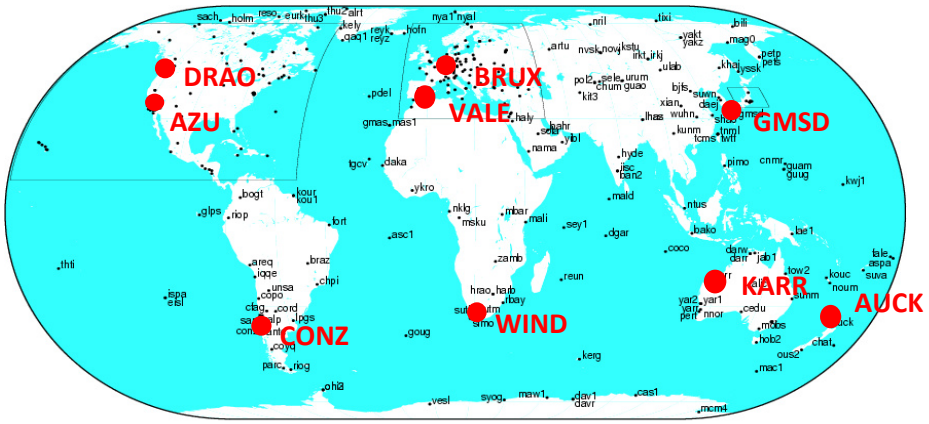


Figura 10.3: Distribución global de estaciones integradas en el ejemplo de sistema de monitorización PPP en tiempo real.

El actual sistema experimental monitoriza algunas de las siguientes estaciones entre otras:

Nombre	Localización	Constelaciones rastreadas	Placa continental
BRUX	Bruselas (Bélgica)	GPS +GLONASS	Euro-asiática
CONZ	Concepción(Chile)	GPS+GLONASS	Sudamericana
DRAO	Penticton (Canada)	GPS	Norteamericana
GMSD	Nakatane town (Japón)	GPS+GLONASS	Euro-asiática-Ojotsk-Filipina
WIND	Windhock (Nambia)	GPS+GLONASS+GALILEO	Africana
KARR	Karratha (Australia)	GPS+GLONASS+GALILEO	Indo-Australiana
AZU	Azusa (USA)	GPS	Norteamericana
AUCK	Nueva Zelanda	GPS	Indo-Australiana

Tabla 10.1: Características principales de las estaciones monitorizadas

La ubicación de las estaciones monitorizadas también se muestra en el portal a través de las App de Google Maps embebidas en la interface web.

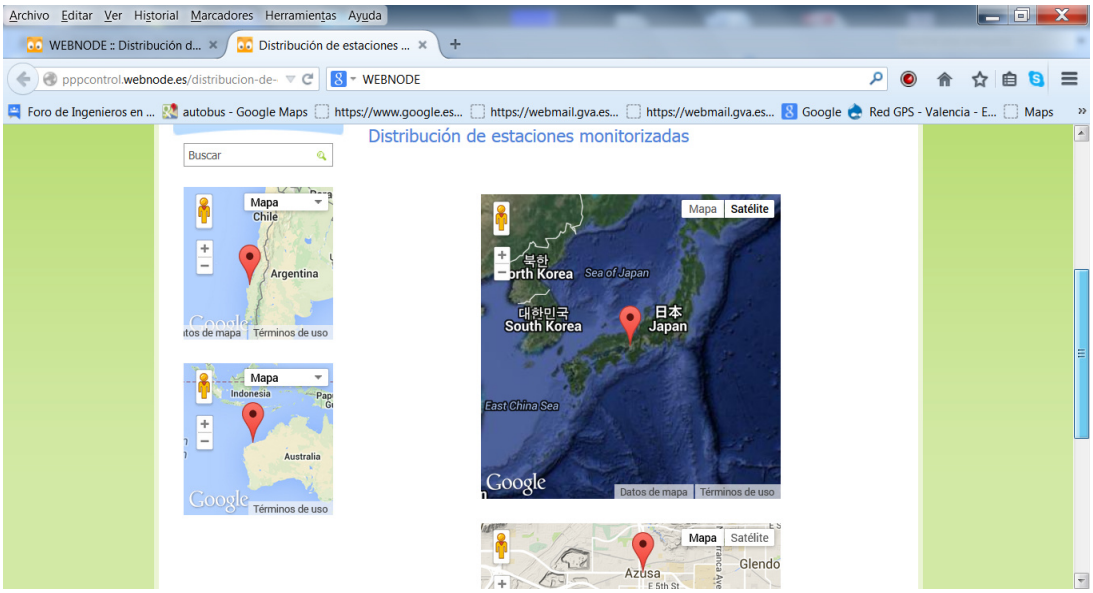


Figura 10.4: App de google maps embebida en la interface web (http://pppcontrol.webnode.es/distribucion-de-estaciones-monitorizadas/)

10.3. Distribución de resultados

La información resultado del análisis se muestra estructurada por estaciones, junto con un registro de resultados históricos:

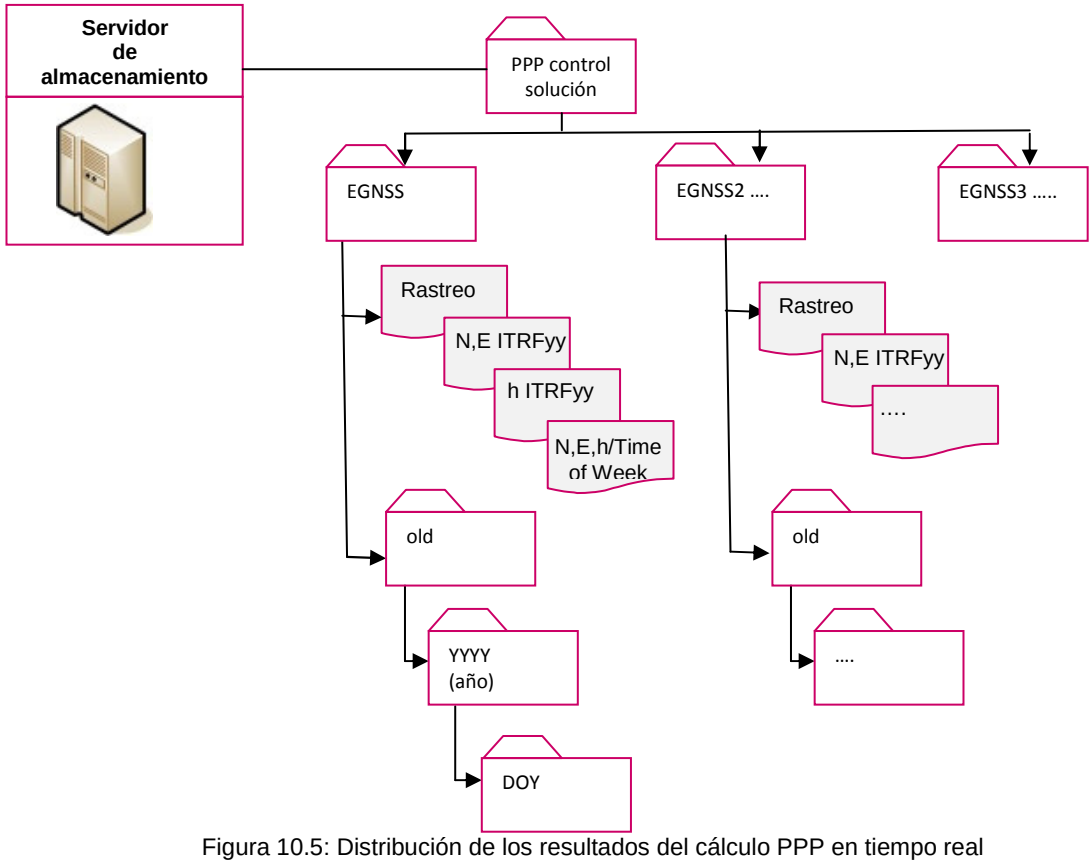


Figura 10.5: Distribución de los resultados del cálculo PPP en tiempo real

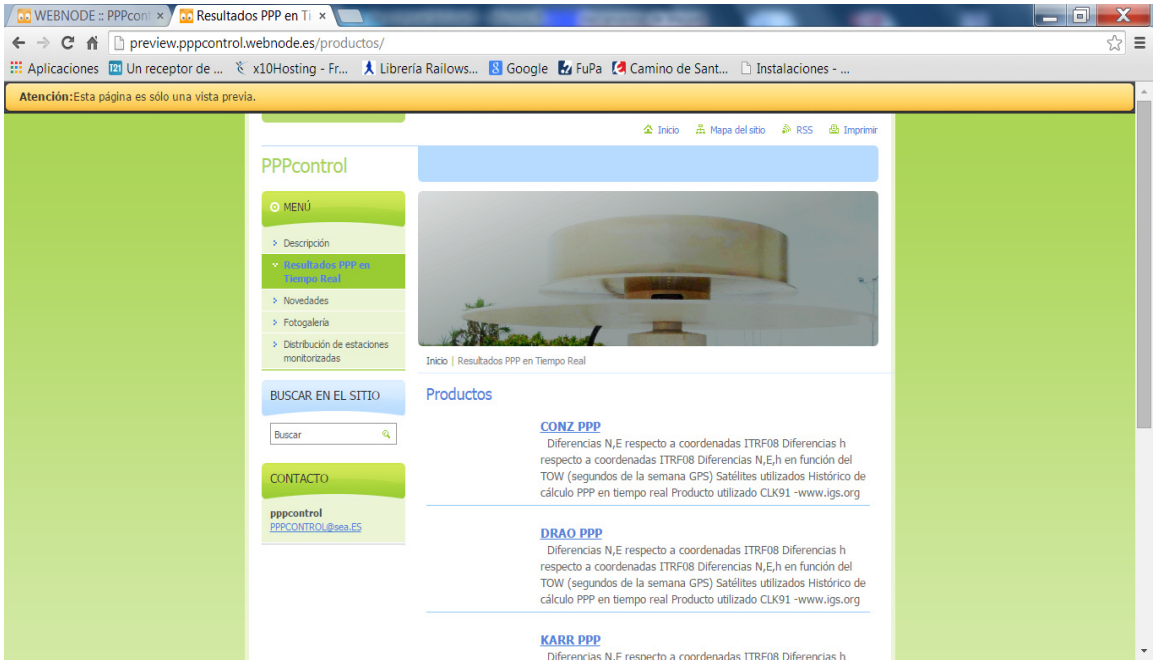


Figura 10.6: Acceso a las carpetas de resultados (http://pppcontrol.webnode.es/)

Figura 10.7: Visualización de resultados a través de la interface web (http://pppcontrol.webnode.es/resultados-con-ppp-en-tiempo-real-/)

10.4. Respuesta a nivel global de los modelos de correcciones para PPP en tiempo real

A continuación se muestra un ejemplo de la respuesta simultánea de los modelos para posicionamiento PPP en tiempo real, en varias partes del mundo.

Para los cálculos de las estaciones monitorizadas se ha empleado el marco de referencia global ITRF08 vigente en la época de las sesiones. Veamos el comportamiento del modelo CLK91 simultáneamente sobre algunas estaciones distribuidas globalmente, en la componente N, E, para una solución

acumulativa de 24 horas en tiempo real, y posteriormente el resumen tipo de varios días para todas las componentes. El intervalo de muestreo de todas las estaciones es de 1 Hz. Para la obtención de la solución PPP en tiempo real se ha utilizado la estrategia de cálculo secuencial en cada paso coincidente con las épocas de observación.

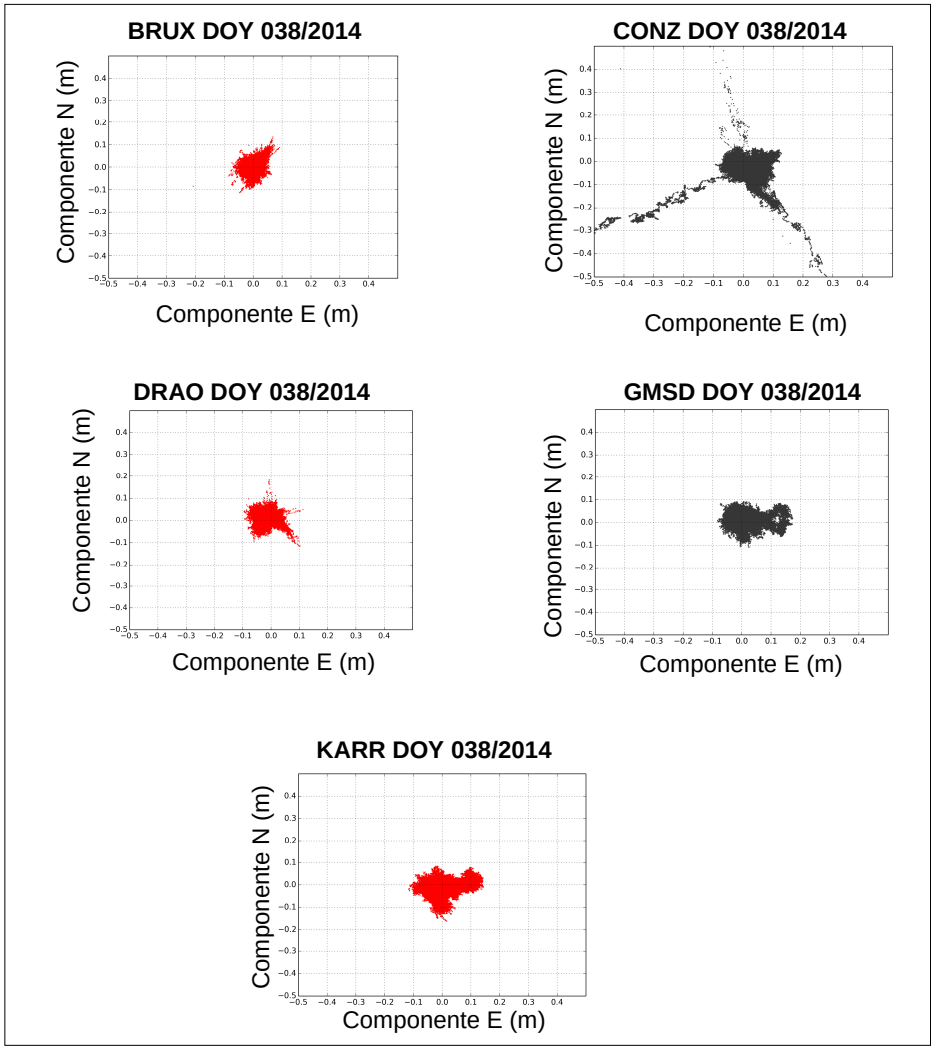
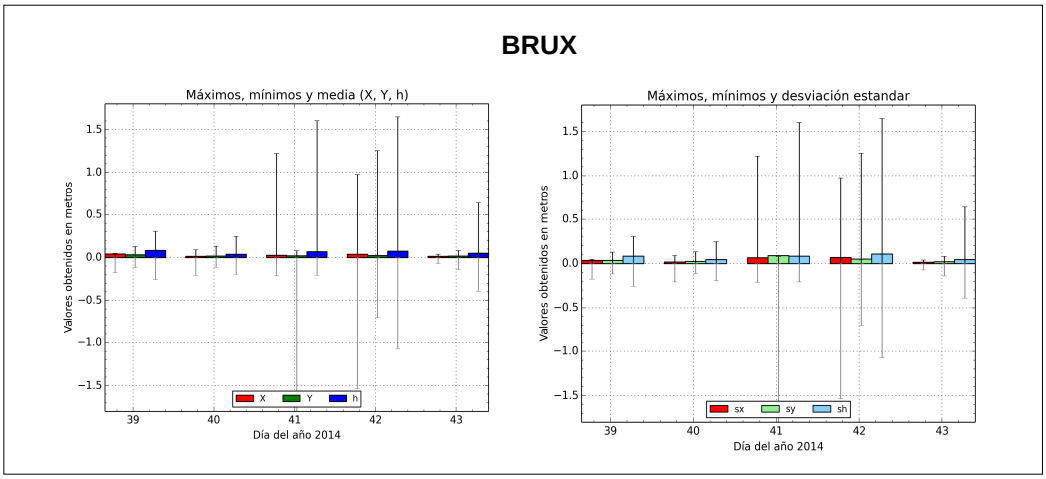


Figura 10.8: Sesgo X,Y de los resultados con PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente



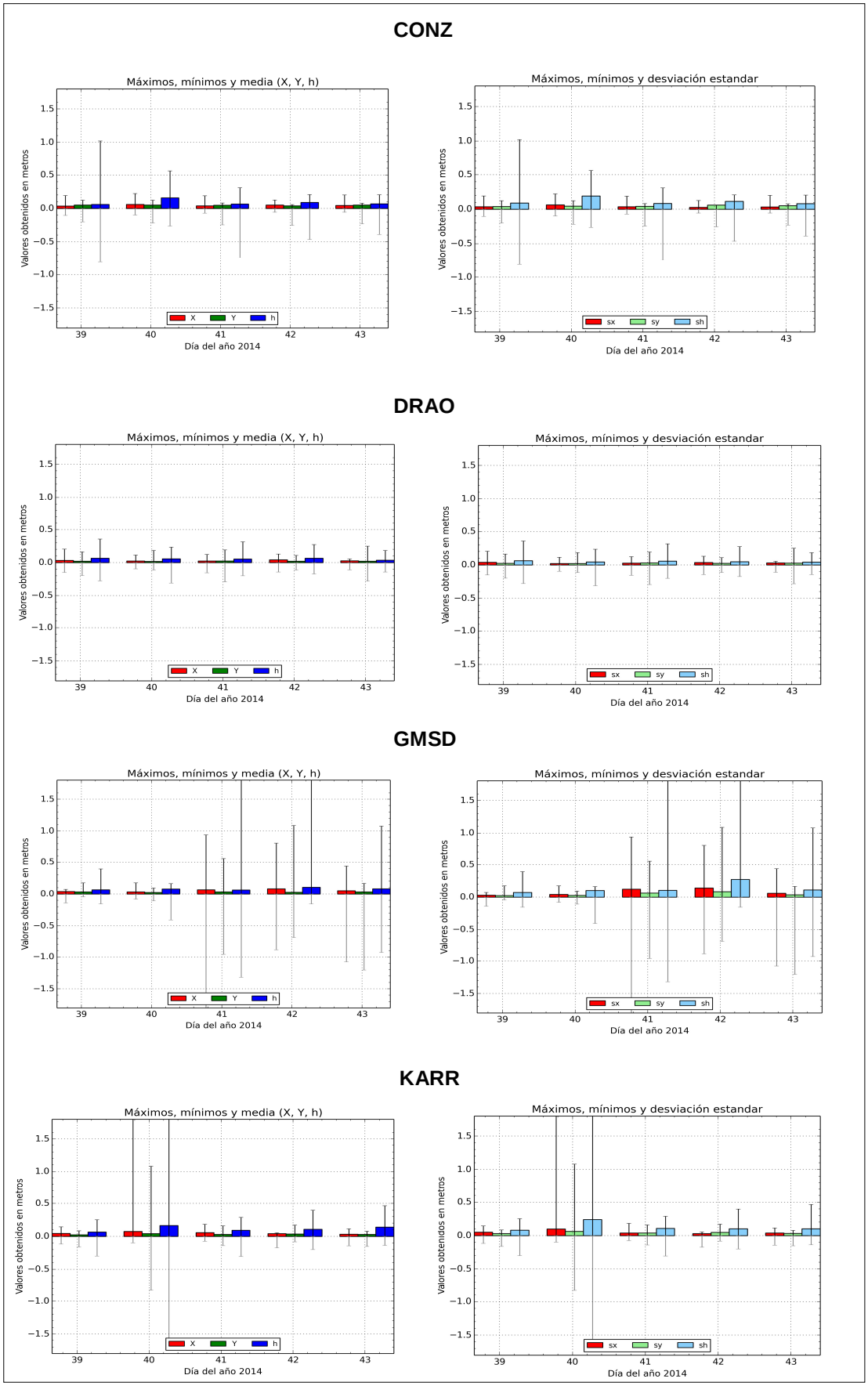


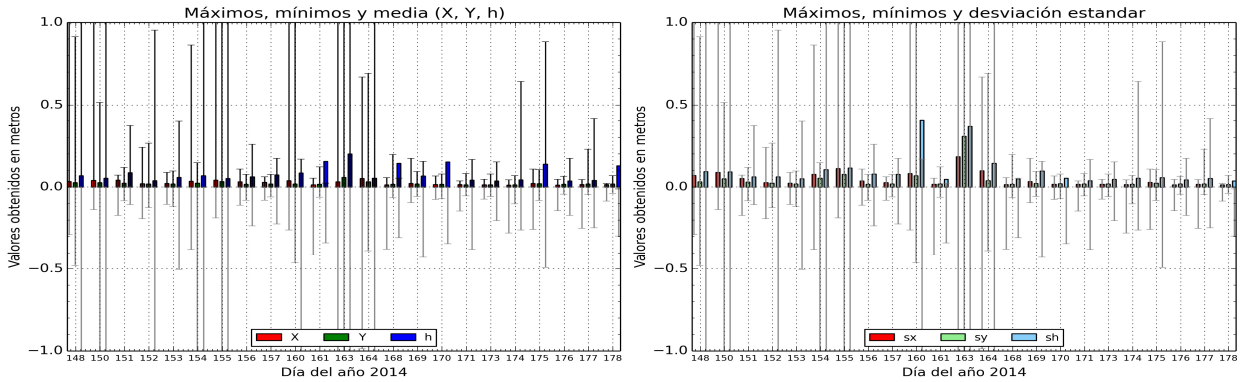
Figura 10.9: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente. Resumen semanal

	BRUX			CONZ		
Máximo X,Y,h	1,2200	1,2550	1,6470	0,222	0,124	1,021
Mínimo X,Y,h	-1,5360	-1,9150	-1,0750	-0,105	-0,255	-0,81
μ X,Y,h	0,0270	0,0232	0,0636	0,0466	0,048	0,0888
σ X,Y,h	0,0408	0,0442	0,0736	0,0382	0,0476	0,1124
	DRAO			GMSD		
Máximo X,Y,h	0,205	0,25	0,356	0,938	1,087	2,962
Mínimo X,Y,h	-0,155	-0,295	-0,313	-3,232	-1,206	-1,32
μ X,Y,h	0,0298	0,0208	0,056	0,0544	0,0302	0,0784
σ X,Y,h	0,031	0,0254	0,051	0,0788	0,0466	0,1326
	KARR					
Máximo X,Y,h	1,934	1,079	2,983			
Mínimo X,Y,h	-0,175	-0,83	-1,75			
μ X,Y,h	0,0504	0,0324	0,1144			
σ X,Y,h	0,0512	0,0424	0,1264			

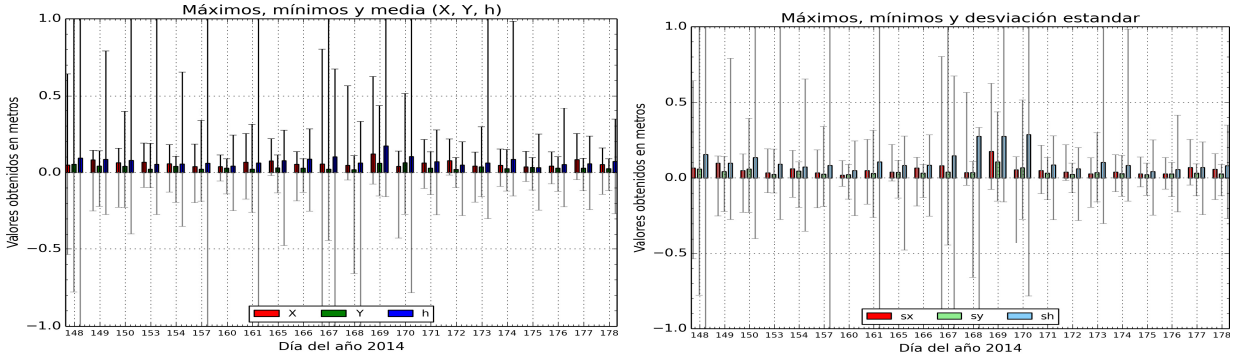
Tabla 10.2: Estadísticos de la técnica PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente. Unidades en metros.

Para la ventana de tiempo de un mes se incluye a continuación una muestra de la solución PPP en tiempo real para varias estaciones de las cuales también se ha hecho el seguimiento. En la columna de la izquierda se representan los *offsets* promedios diarios de la solución, máximos y mínimos y en la de la derecha las desviaciones estándar:

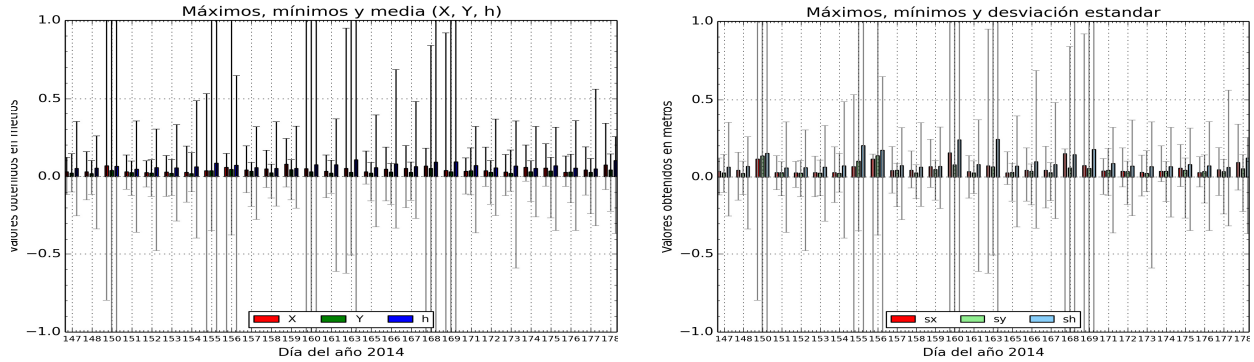
VALE



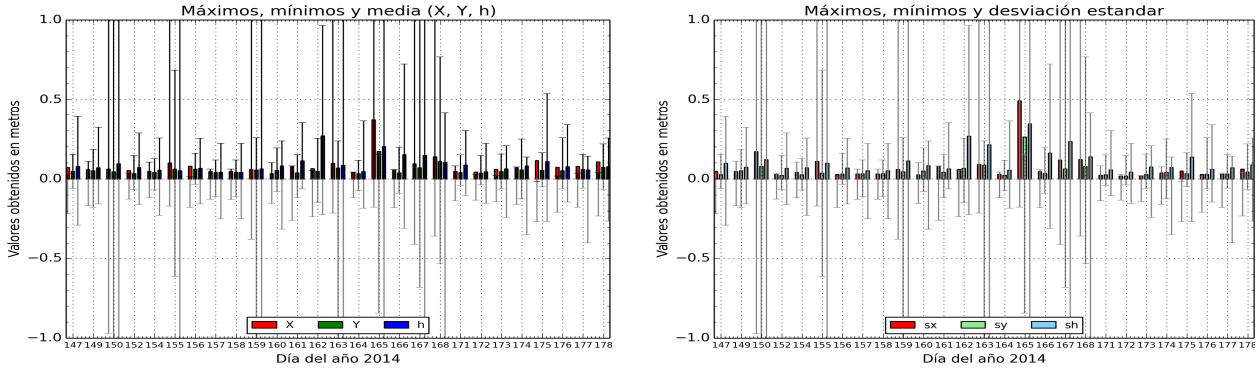
CONZ



AZU



GMSD



KARR

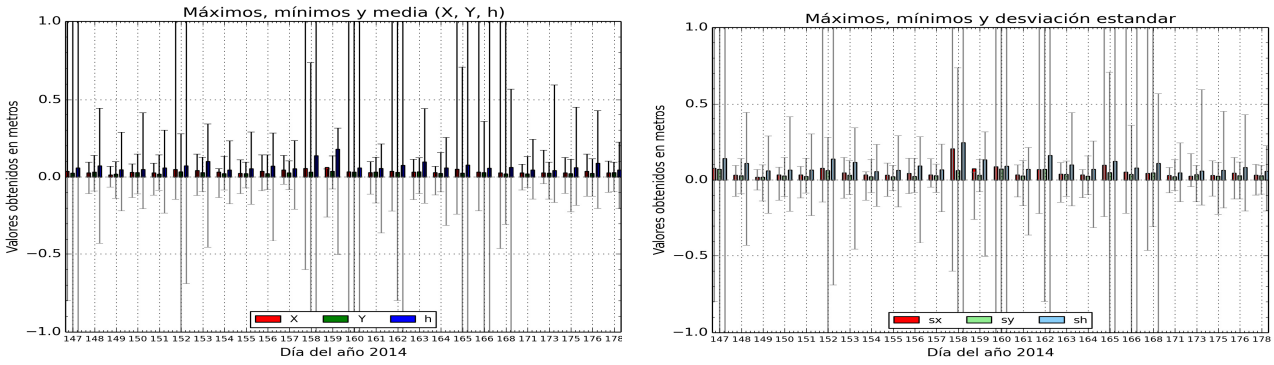
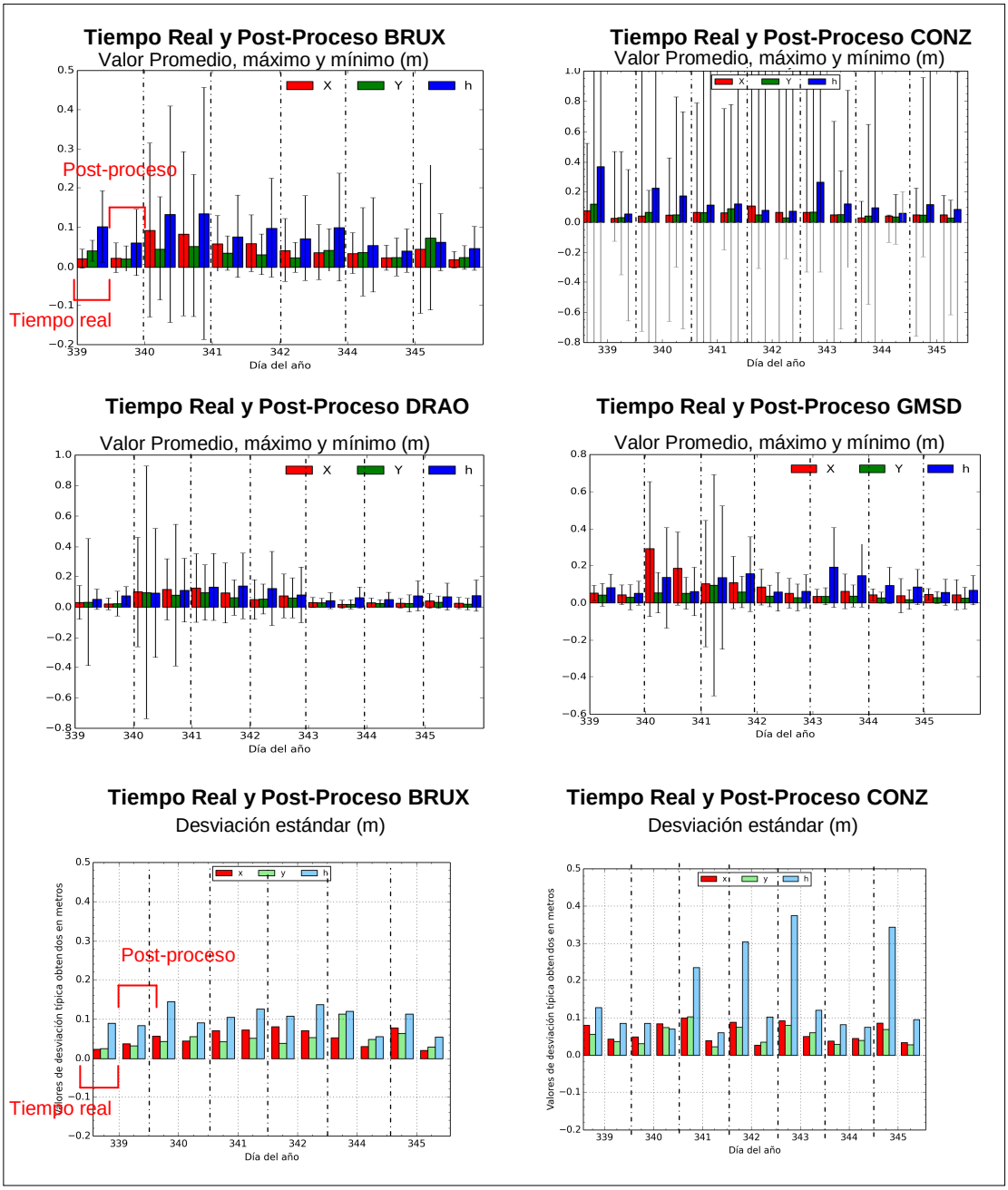


Figura 10.10: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente. Doy 147-178/2014.

10.4.1. Contrastación de distintos modelos de osciladores y órbitas a nivel global

Como complemento al análisis sobre la respuesta de los modelos a nivel global, a continuación se plasma el análisis con otros productos diferentes. Adicionalmente, se realiza un post-proceso en PPP con el objeto de analizar el rendimiento en las soluciones acumulativas diarias en tiempo real con el sistema de monitorización creado. Para cada DOY se representan los valores estadísticos para la solución con PPP en tiempo real, junto con los valores para la solución PPP post-procesada con el mismo modelo. En el primer grupo de resultados se muestra la respuesta del producto CLK91 y en el segundo la respuesta del producto IGS03:



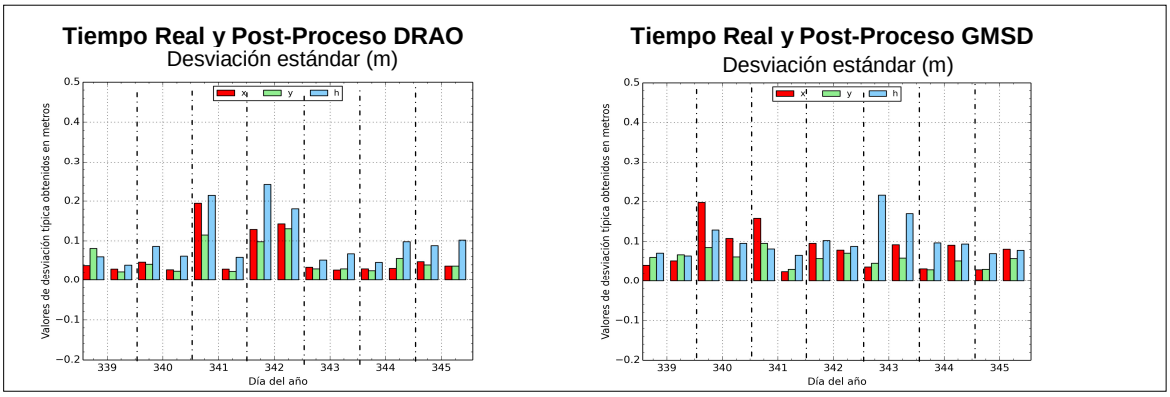
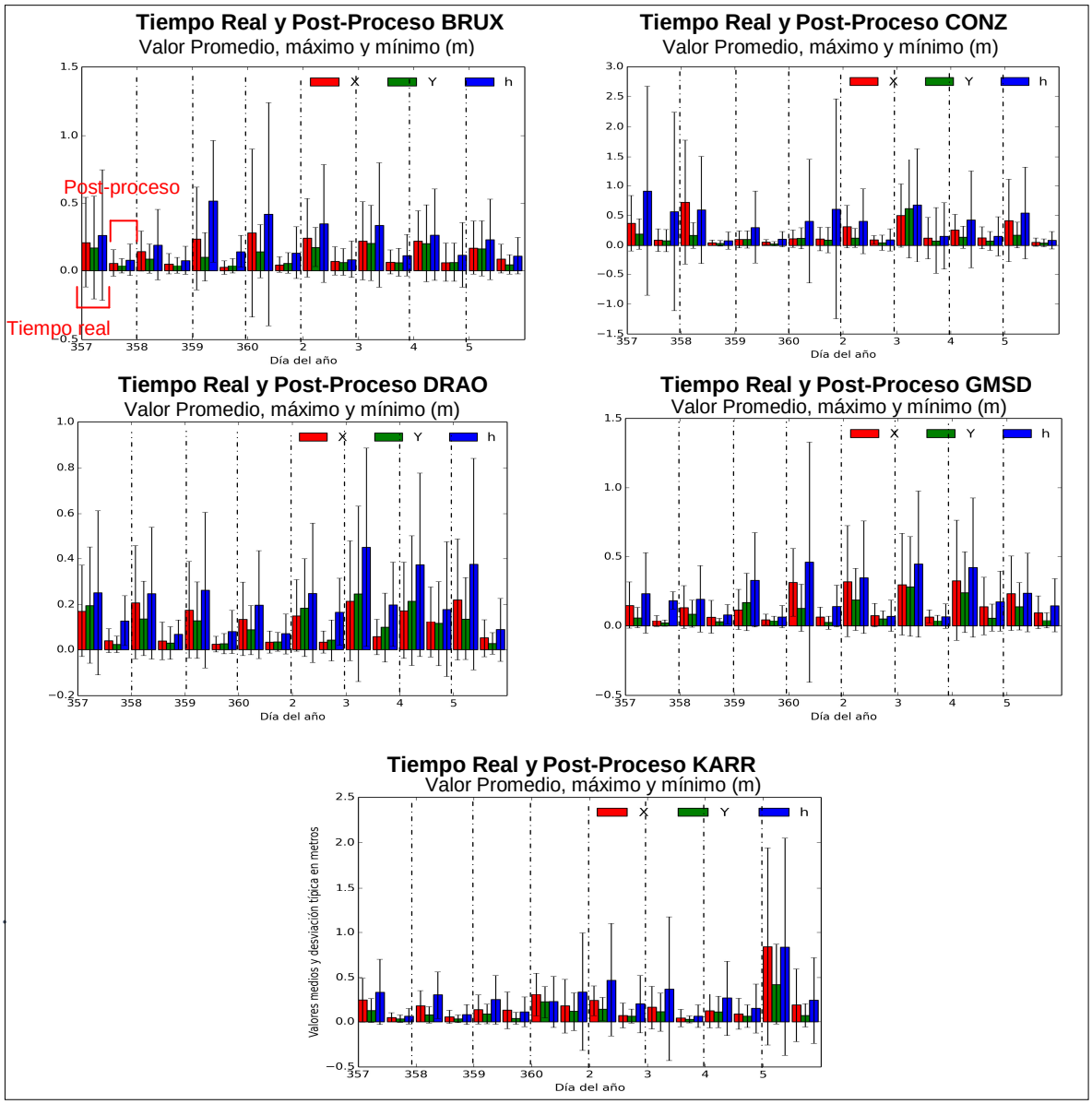


Figura 10.11: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real y en post-proceso con el modelo CLK91 sobre estaciones distribuidas globalmente

A continuación se plasma la respuesta del producto IGS03 sobre varias estaciones distribuidas globalmente, obsérvese la representación de los valores promedio y desviaciones estándar, que resultan superiores al caso de uso del producto individual CLK91. También puede notarse la diferencia al realizar el post-procesado con el modelo IGS03, que es mucho mayor que con el CLK91, plasmándose así la degradación con la edad de las correcciones recibidas en tiempo real del modelo IGS.



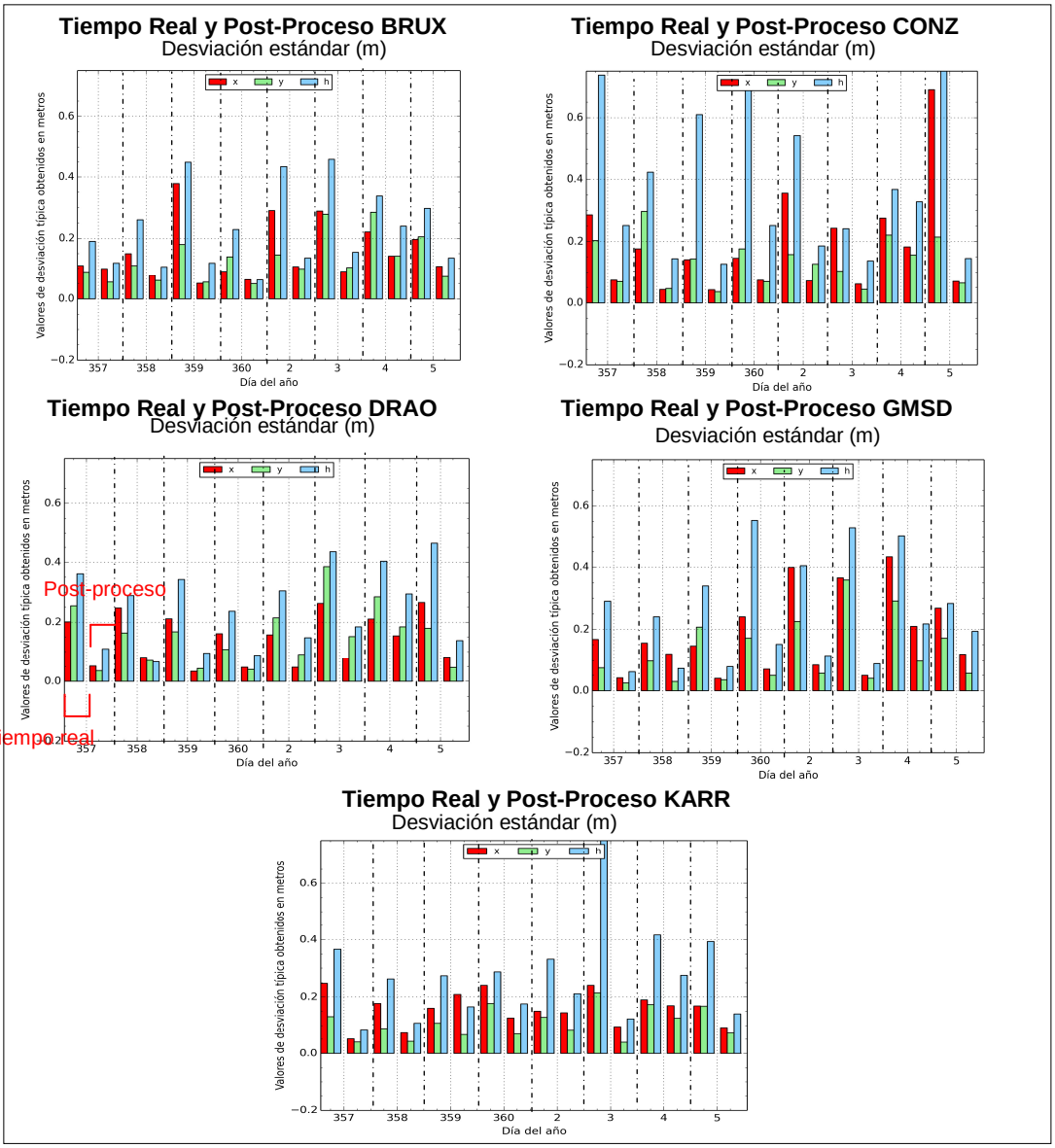


Figura 10.12: Máximos, mínimos, media y desviación estándar con PPP en tiempo real y en post-proceso con el modelo IGS03 sobre estaciones distribuidas globalmente

Tras analizar los resultados, en cuanto a precisiones obtenidas en el caso del tiempo real frente al post-procesado, sobre las diferentes estaciones seleccionadas distribuidas globalmente, se detecta que el producto CLK91 obtiene diferencias de posición promedio del orden de 5 cm en planimetría y altimetría y mejoras de precisión del mismo orden. Se puede observar también que existen sesiones en las que estas mejoras son superiores, pero son casos con pérdidas de conexión en tiempo real con la estación.

Nótese, en cuanto a la repetitividad de resultados y precisiones que ofrece el producto, que es bastante homogénea en todas las estaciones chequeadas en varias ubicaciones geográficas, salvo cuando se pierde la conexión con una estación concreta y por lo tanto no es posible resolver el posicionamiento.

Para diferenciar cuando es un corte del producto o de la conexión con la estación, se puede analizar los gráficos para todo un día publicados en la interface web antes descrita, donde si existe un corte en una franja horaria para todas las estaciones, con toda seguridad será un fallo del producto, y si existe un corte en una estación aislada será un problema de conexión en la estación en particular.

Teniendo en cuenta estas discontinuidades, se observa como en pocas ocasiones existe pérdida de recepción del producto de correcciones, pero por el contrario la pérdida de conexión con determinadas estaciones suele ser más frecuente, (como en la estación de CONZ), con lo cual limitaría la aplicación de la técnica en tiempo real de manera remota (aunque no *in situ*). Desechando los problemas de

conexión de las estaciones, que producen una pérdida en la solución PPP, la mayor discrepancia en coordenadas entre las soluciones en tiempo real y post-proceso está en el rango de 15 cm.

Si se contrasta el rendimiento de otro tipo de modelos, tal y como el modelo IGS03, vemos que se comporta de manera estable, independientemente de la estación en la que se observe, si bien aporta peores estadísticos como se pudo comprobar en el capítulo de productos combinados al no considerar los *bias* de los observables C1,P1, P2,..., y al ser un modelo que se recibe con mucha más latencia. Con respecto a la mejora que ofrece el post-proceso en los resultados en tiempo real, se puede observar que en planimetría hay una mejora promedio en torno a los 10 cm y en altimetría de 15 cm. Estos resultados se dan en todas las estaciones que se han analizado.

Analizando cada estación, en general la respuesta es mejor en las zonas situadas en el hemisferio norte, (BRUX, DRAO y GMSD), aportan resultados más estables y ofrecen una garantía de continuidad en la medición en tiempo real, mientras que en otras zonas como KARR y CONZ se nota un empeoramiento de los resultados. La causa, en las sesiones llevadas a cabo, se achaca a las interrupciones en la recepción del *streaming*, más que a un comportamiento desigual de los productos para PPP en tiempo real según la ubicación geográfica.

10.5. Discusión de la técnica para distintas aplicaciones

Una de las utilidades de la técnica PPP, que se puso de manifiesto a través de los análisis continuos efectuados en la presente investigación es la posibilidad de realizar una caracterización remota de movimientos o deslizamientos debidos a fenómenos naturales. La disponibilidad de los datos obtenidos en tiempo real para su aplicación y cálculo empleando la técnica PPP también tiene impactos importantes en cómo la sociedad puede prevenir, prepararse y hacer frente a los desastres naturales, como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas o deslizamientos de tierra, ya que requiere el conocimiento de la ciencia subyacente junto con información sobre eventos específicos y actualizados entregados tan pronto como sea posible. Sirvan unos ejemplos de las sesiones calculadas con la técnica PPP en tiempo real coincidentes con los episodios sísmicos y sus réplicas (líneas continuas verticales) en el terremoto de Chile de Abril de 2014, en la estación GNSS de Concepción (Chile).

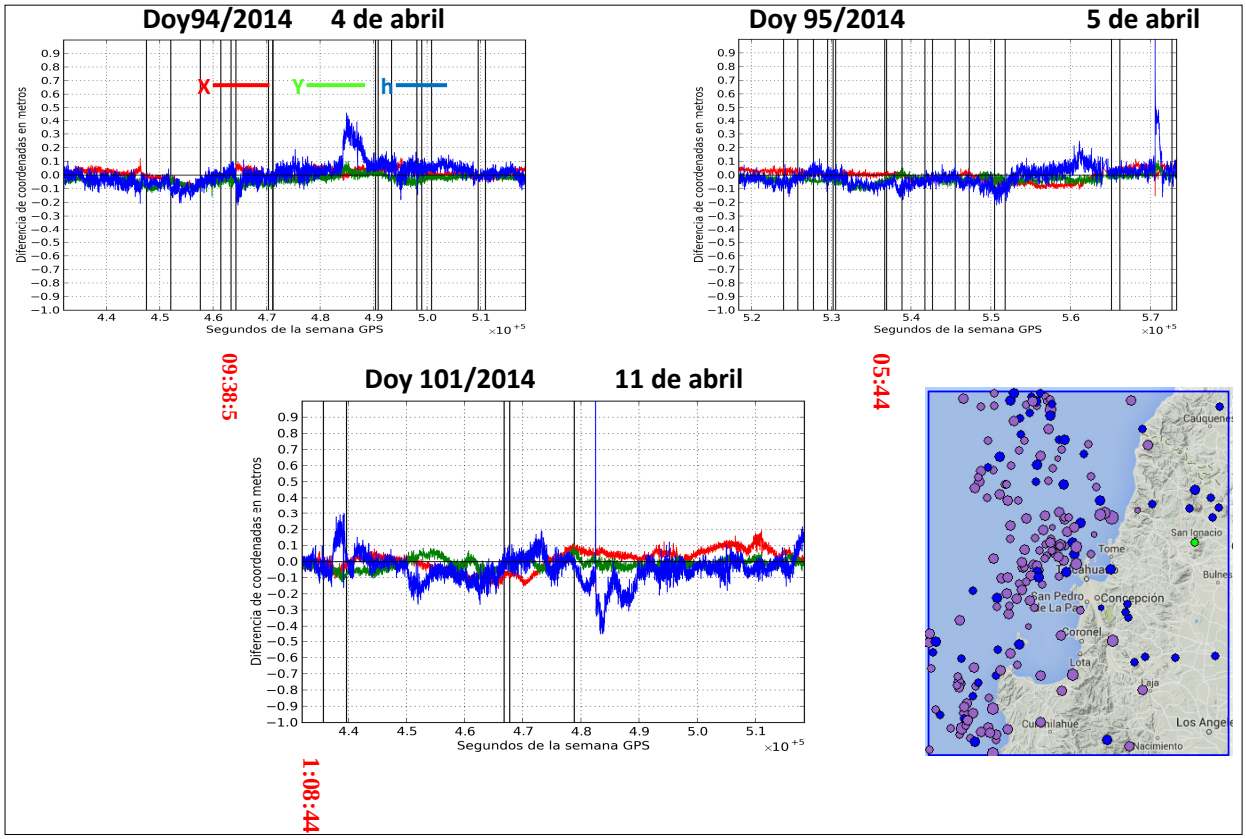


Figura 10.13: Episodios de movimiento sísmico

FECHA - HORA (UTC) día-mes-año hora:min:seg	MAGNITUD	PROFUNDIDAD km	LOCALIDAD
11-ABR-2014 01:08:03	5.1	25	APAGADO DE LA COSTA CENTRAL DE CHILE
05-ABR-2014 05:44:55	5.3	19	CERCA DE LA COSTA DEL NORTE DE CHILE
04-ABR-2014 09:38:55	5.1	13	CERCA DE LA COSTA DEL NORTE DE CHILE

Tabla 10.3: Réplicas del terremoto de Iquique de Abril de 2014
http://www.iris.edu/latin_am/evlist.phtml?region=chile

La aportación de este tipo de sistemas a la rápida detección y caracterización de determinados desastres naturales puede suponer una diferencia crucial en los minutos u horas siguientes a cuando se produzcan. Casos de estudio podrían ser algunos de los episodios sísmicos y tragedias que se han producido durante la última década, como el tsunami de 2004 en Sumatra o el terremoto de *Tohoku-Oki* el 11 de marzo 2011 que ocasionaron miles de muertes, (William et al., 2011), o el de Iquique (Chile), de abril de 2014.

A continuación se presentan ejemplos de fenómenos naturales estudiados por distintos autores sobre los que se puede hacer un control de seguimiento con la técnica PPP.

- Seísmos: La integración de técnicas GNSS con series sísmicas, resolviendo el posicionamiento con PPP o con dobles diferencias, (Garrido-Villén et al., 2013), (Staller et al., 2008), puede servir para comprender mejor el comportamiento de los deslizamientos de fallas asociadas con el ciclo de un terremoto y poder generar sistemas de alerta y áreas de afección. Un ejemplo con PPP, podemos obtenerlo a partir de los estudios realizados en Chen et al., (2008), donde se detecta el desplazamiento obtenido de la solución época a época en modo PPP cinemático, mediante el procesamiento de los datos de la estación TALA. Los resultados se muestran para el evento sísmico de magnitud 7.7 de Chile, para el DOY 318/2007, en que la estación se emplaza a 100 km del epicentro.

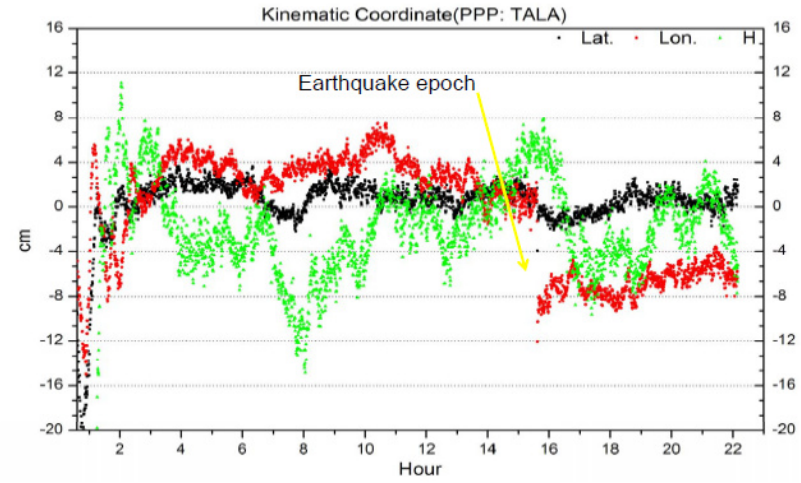


Figura 10.14: Deformación detectada tras el terremoto de Chile, 14-15/11/2007 con la técnica PPP (Imagen cedida por Chen et al., 2008)

Demostraciones recientes de tasas anuales de deformación, empleando PPP en post-proceso, pueden verse en Sánchez-Alzola et al., (2014), donde se aplica el método en el estudio de la cuenca del Bajo Segura.

- Tsunamis. Con PPP sería posible reconocer rápidamente que un tsunami está ocurriendo a partir de factores característicos, tales como dirección de propagación y movimiento vertical y

horizontal del suelo marino. Con ello, se pueden mejorar las predicciones y avisos del impacto de éste sobre las costas cercanas y lejanas.

- Detección de deslizamientos. Existen zonas del terreno que debido a características morfológicas inestables, su proximidad a núcleos urbanos, asentamientos emplazados en zonas de pendiente, o el propio clima de la zona, requieren de un estudio o control a lo largo del tiempo de subsidencias o movimientos de ladera. Las técnicas GNSS han sido utilizadas con este fin durante largo tiempo (Gili et al., 2003). El potencial del método PPP, para comprobar que no existen grandes movimientos que puedan suponer un riesgo para la población, se ha comenzado a evaluar por parte de algunos autores. Tal es el caso de estudio mostrado en Wang, (2013), en el que se lleva a cabo la monitorización de deslizamientos arrojando resultados con un rendimiento similar a la determinación por la técnica de dobles diferencias:

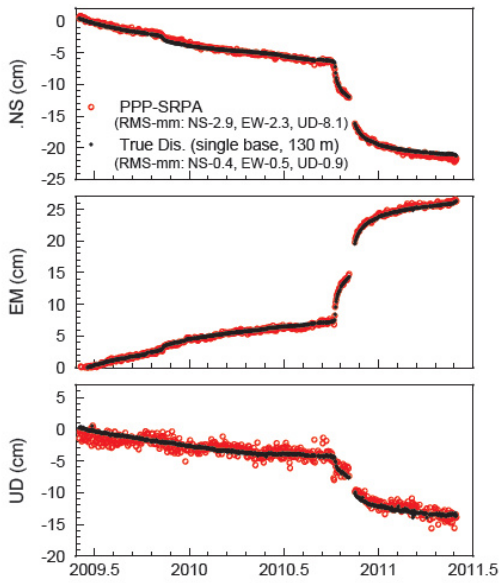


Figura 10.15: Deslizamiento detectado con PPP post-procesado con ambigüedades enteras para un gran periodo de tiempo (Imagen cedida por Wang (2013))

- Eventos volcánicos. Las actividades volcánicas, las intrusiones de diques, y las erupciones efusivas y/o explosivas suelen producir deformaciones superficiales medibles. Con este tipo de técnicas se puede generar información de apoyo a los sistemas de alerta antes de que ocurran.

- Criosfera. Los cálculos GNSS en Tiempo Real con la técnica PPP, pueden contribuir a una mejor comprensión de la dinámica de los glaciares así como su flujo y evolución, dando lugar a mejoras en las mediciones de las velocidades de flujo, las tasas de nieve sobre la superficie, y el ajuste isostático asociado con el cambio de masa glacial (William et al., 2011).

Basándonos en estos casos, se puede afirmar que la técnica PPP presenta varias ventajas, aunque también algunas limitaciones, respecto a la dependencia de un despliegue de una infraestructura de red de estaciones. Con este método se resuelve el posicionamiento en un receptor GNSS de forma absoluta sin que le influyan la falta de datos de otros puntos fiduciales que compongan una red, siendo la única solución en áreas muy remotas aisladas, como ciertas zonas de alta montaña, zonas desérticas, árticas, antárticas o en el mar.

Puesto que la técnica se encuentra en estudio y más aún en el caso de tiempo real, es necesario analizar si es viable o no su aplicación para este tipo de análisis, ya que como hemos comentado es una técnica muy sensible a *outliers*, problemas de latencia, fluctuaciones de la constelación, y el propio estado de desarrollo de los modelos de vector de estado es determinante en su rendimiento. Veremos a continuación de este capítulo, un estudio sobre la capacidad de detección de desplazamientos de distintas magnitudes a partir de la simulación de los mismos.

Capítulo 11:

Respuesta de la técnica PPP en tiempo real en desplazamientos naturales o inducidos.

La técnica PPP, (Precise Point Positioning), en tiempo real presenta varias ventajas respecto a la típica solución RTK[1] o solución de red en tiempo real, ya que sitúa a un receptor *rover* en un punto de forma absoluta sin tener en cuenta la posible deformación de los otros puntos que conforman la red y es la única técnica viable en zonas muy aisladas.

A través de ella, teóricamente, podría hacerse un seguimiento en tiempo real de movimientos que sufra una determinada zona de estudio, (Chen et al., 2008 y 2009), un deslizamiento o deformación de origen sísmico o volcánico, pudiéndose generar sistemas de apoyo que alerten en el momento en que el fenómeno en cuestión ocurra o como herramienta adicional para mecanismos de prevención. Al ser PPP una técnica experimental, y más aun en lo que se refiere a su cálculo en tiempo real, todo su potencial se encuentra todavía por analizar.

Por ello, en este capítulo se evalúa su aptitud mediante casos reales de deformaciones inducidas, con el fin de contrastar su capacidad al intentar detectarlas en tiempo real, utilizando los productos que mejores resultados hayan ofrecido en las pruebas en gabinete. A partir de las observaciones realizadas se testearán los resultados y se compararán con los valores reales del deslizamiento, ya que éstos son conocidos. Se pretende valorar la inmediatez de la solución, y contrastar estos datos con el post-procesamiento en tiempo *quasi-real* de los observables registrados, y con un cálculo con productos de alto-ratio en dobles diferencias, para analizar la fiabilidad de la técnica en el escenario que se presenta.

11.1. Diseño de la unidad de control de desplazamientos

En los análisis y pruebas realizadas en gabinete a lo largo de capítulos anteriores, se utilizaban estaciones GNSS permanentes en los escenarios y unidades de control establecidas. Para estas situaciones la ubicación de las estaciones, (lugares elevados y despejados), y la ausencia de multipath hacía que las condiciones de observación fueran las ideales. También en algunos casos la conexión de banda ancha posibilitaba la recepción de los modelos de manera sincronizada con las observaciones cuando estos eran emitidos por el servidor que los genera con una baja latencia. En las sesiones presentadas a continuación, se va a trabajar con un entorno real, es decir con conexión a internet móvil con GPRS/3G, y con observaciones no exentas de *multipath* debido al arbolado u otros factores.

Por otro lado, los controladores de campo de los equipos GNSS no se encuentran preparados para la decodificación directa de los modelos más recientes en el formato RTCM-SSR, *(State Space*

[1] *Real Time Kinematic*

Representation), ó para la obtención directa del posicionamiento PPP en tiempo real. Tal es el caso del receptor Novatel Flex6 (OEM628), el único receptor comercial que decodifica el nuevo estándar, pero sin soportar los mensajes RTCM-SSR de las fases 2 y 3 de desarrollo (Capítulo 3). Por este motivo se ha empleado las extensiones de las librerías descritas y el software programado en apartados anteriores, que proporcionan cálculos y análisis en tiempo real. A través de un LAPTOP, un equipo *rover* de campo del tipo R8 GNSS de Trimble, se conecta por un puerto serie y por internet realiza la conexión GPRS/3G al servidor de productos IGS para recibir los modelos de osciladores de satélites, órbitas y *biases* para la resolución del posicionamiento PPP en tiempo real. De esta manera se ha conformado la unidad de control de campo para la monitorización de la respuesta de la técnica.

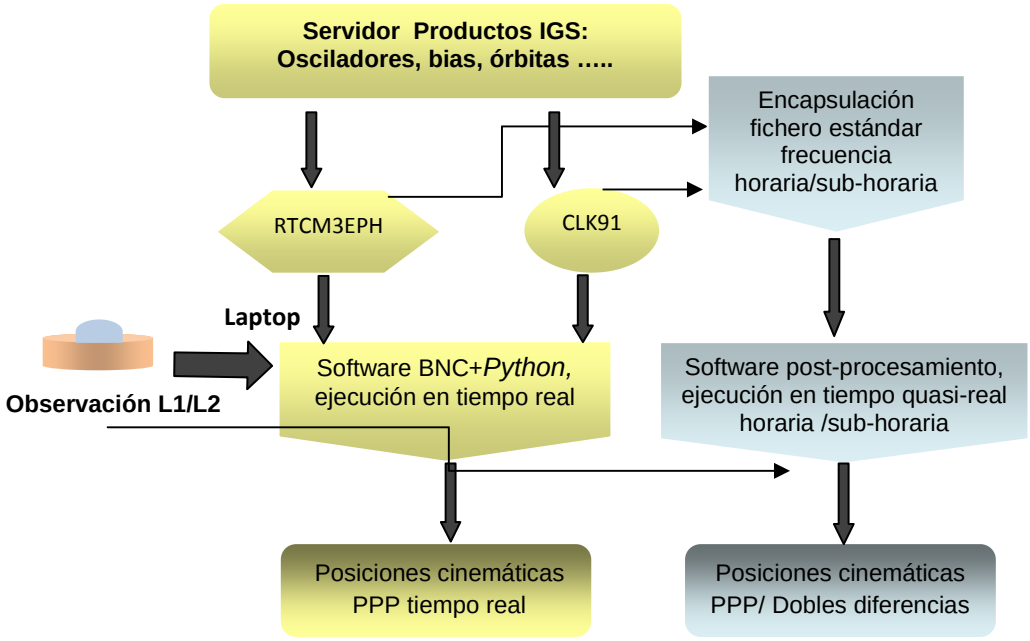


Figura 11.1: Esquema de flujo de la observación en Tiempo Real en la unidad de control.

Al mismo tiempo, el streaming del modelo de correcciones de reloj, órbitas y *biases* de los satélites se encapsula, y con él se genera un fichero estándar a modo de producto ultra-rápido pero con latencia horaria y sub-horaria. Adicionalmente, si los datos del *rover* se transfieren a un servidor de cálculo, en formato RINEX, con frecuencia horaria o sub-horaria es posible realizar el procesamiento *near-real time* tanto en PPP como en dobles diferencias.

La unidad de control para los desplazamientos inducidos ha sido evaluada en la base de calibración de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), (Berné et al., 2008).

Para estas campañas de observación se utiliza el producto de correcciones CLK91, GPS+GLONASS, épocas de observación a 1 Hz, junto con las efemérides del IGS que también trabajan con GPS+GLONASS. El motivo de la elección del CLK91 es debido a que de todos los análisis realizados en las pruebas de gabinete, este producto ha resultado ser uno de los más estables, con mejores inicializaciones, precisiones, y periodos de convergencia con buena repetitividad en coordenadas.

Figura 11.2: Situación de la base de calibración de la UPV

La resolución de la posición se lleva a cabo mediante los algoritmos secuenciales para PPP ejecutados de manera automatizada en tiempo real, mediante una extensión de las librerías C++ del BKG Ntrip Client y el software programado mediante las librerías de *Python*. La estrategia es exactamente igual a la de otros escenarios en tiempo real evaluados en otros capítulos. Para estos casos, se muestran los resultados, gráficos y los estadísticos obtenidos en el marco de referencia ETRF2000.

De todas las sesiones efectuadas se plasman las campañas efectuadas entre los *Day of Year* (DOY) 107/2013 y DOY 135/2014. En el apartado 11.2 se muestran los desplazamientos bidimensionales inducidos, y en apartado 11.3 los desplazamientos en la componente vertical.

11.2. Desplazamiento horizontal inducido

11.2.1. Ensamblaje del dispositivo

En las tres sesiones que se detallan, se induce un movimiento bidimensional de la antena GNSS. Para ello, se ha diseñado y fabricado un dispositivo, en el cual la antena GNSS se desliza a través de una guía de acero que dispone de un recorrido de 232 mm, manteniéndose fija la parte inicial, tal y como se muestra en los croquis. Para que la antena se mantenga sujeta y estable se requiere de la utilización de un tornillo largo y estrecho que atraviese la guía, una tuerca que lo sujete por la parte inferior y un tornillo de tres cuartos que actúe como puente entre la rosca de 5/8 de la antena y el tornillo de la guía. A continuación se muestra el ensamblaje de la antena:

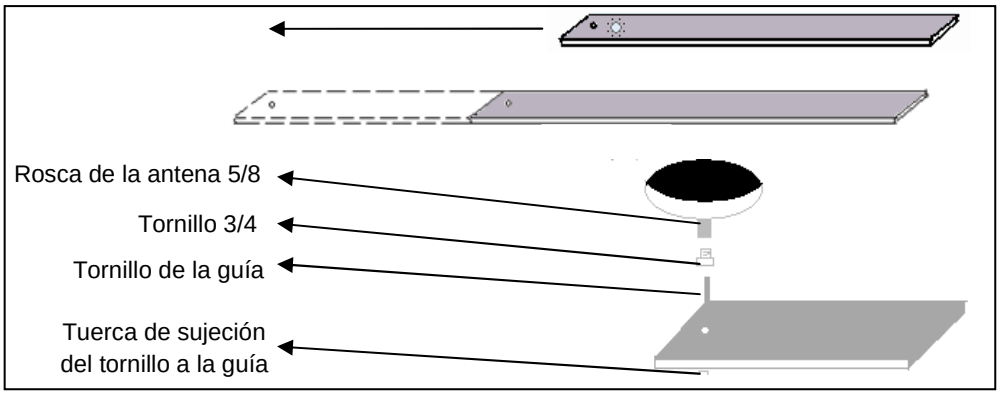


Figura 11.3: Croquis de la guía utilizada y de las piezas para el ensamblado.

Previamente, en gabinete, se comprobó la resistencia a la flexión y/o torsión de la guía para soportar la antena GNSS. Adicionalmente, una varilla de graduación milimétrica se acopla a la guía y se fija con mini-abrazaderas para conocer la magnitud del desplazamiento. Como tiempo de inicialización se espera a que haya transcurrido entre 25-40 minutos con la antena en posición estática para garantizar el poder partir de una solución PPP lo más estable posible, antes de iniciar el movimiento de la antena.

Figura 11.4: Montaje de la antena GNSS sujeta a la guía

Tras la espera del tiempo de inicialización, se desliza la antena por la guía hasta el extremo de ésta, manteniéndose constante su altitud.

Figura 11.5: Antena GNSS en la posición inicial con la varilla milimétrica acoplada.

Las magnitudes inducidas son del orden centimétrico, (entre 5 y 24 cm), por la propia precisión intrínseca de la técnica en tiempo real.

Tras unos minutos en esa posición, se puede volver a provocar otro desplazamiento inducido, bien en la misma dirección o bien volviendo a la posición inicial. Los gráficos que se muestran para las distintas sesiones, representan los incrementos de coordenadas obtenidos entre las coordenadas fijas del pilar de la base de calibración elegido y las obtenidas en el posicionamiento PPP en tiempo real en campo, además del número de satélites y estadísticos. En algunos casos, se ha introducido una nueva componente (XY), formada por la componente cuadrática de los incrementos de las coordenadas X e Y, que representa la distancia observada de la posición de la antena con respecto al centro del pilar. De este modo el análisis del error cometido se puede realizar directamente sobre esta componente, ya que éste valor es conocido.

11.2.2. Sesión DOY 107/2013

A continuación se analizan los resultados obtenidos para la componente bidimensional para PPP aplicado en tiempo real. En el gráfico podemos observar la observación planimétrica entera y los puntos de inflexión de la misma, (líneas de color naranja), para el doy 107/2013.

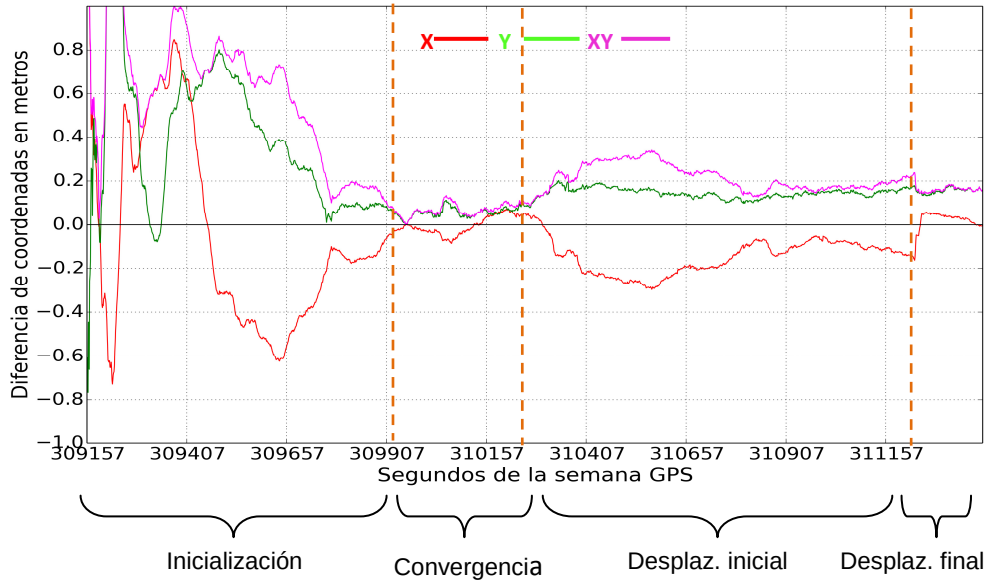


Figura 11.6: PPP tiempo real época a época componente planimétrica. Doy 107/2013

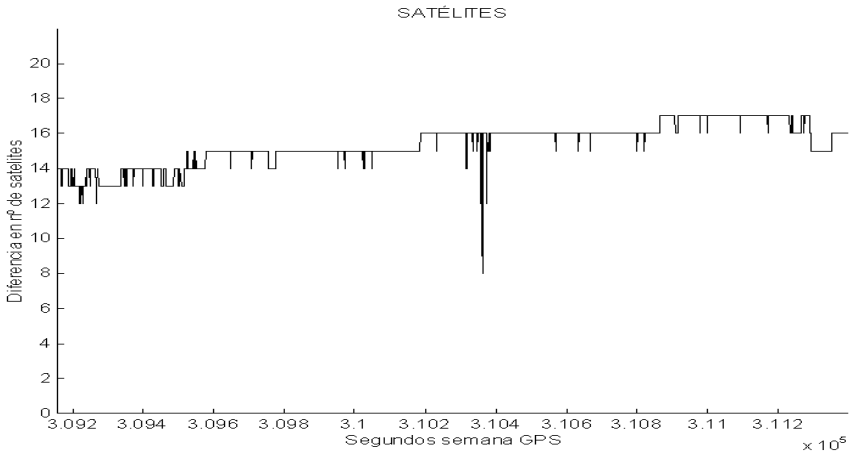


Figura 11.7: Satélites rastreados. Doy 107/2013. Duración de la medición: 40 minutos.

Observando el gráfico 11.6, pueden describirse cuatro bloques distintos en la sesión: La inicialización, el momento de convergencia con la antena en la posición inicial, el instante del desplazamiento inducido de ésta, y el desplazamiento final en donde vuelve a la posición inicial.

Inicialización y convergencia

El tiempo que la solución tarda en entrar en el rango de los 20 cm, es de 12 min y 23 segundos para las componentes XY. En este caso, el tiempo de inicialización ha sido bastante corto.

En los estadísticos se representan los resultados durante la ventana de tiempo en que existe la convergencia antes de que se produzca el desplazamiento. Se comprueba que el tiempo en que la componente XY está en el rango menor que los 20 cm, comprende la totalidad de la parte de la observación, desde que la solución ha convergido hasta que se induce el desplazamiento, con un error promedio de 6 cm y una desviación estándar de 2,6 cm., estando dentro de los valores esperados.

Duración de la medición (segundos)	2400
Duración de la medición (minutos)	40
Tamaño de la muestra (segundos)	2400

Valores de los estadísticos de la componente XY			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,1344	0,00046	0,0639	0,0266

Tiempo en que la componente XY está en Rango (segundos)	
Mayor de 20 cm	Menor de 20 cm
0	280

Tabla 11.1 Convergencia en planimetría durante la ventana de tiempo antes del desplazamiento. Doy 107/2013

Desplazamiento inicial

A continuación se representan los resultados obtenidos para el siguiente bloque, en el cual se realiza el desplazamiento horizontal en dirección Este, de la antena a través de la guía.

En este caso se ha marcado con una línea naranja la posición teórica de la componente XY, (correspondiente a los 23,2 cm de recorrido de la guía). Obsérvese que de esta componente se representa su valor absoluto real obtenido, (color magenta), mientras que en la representación por separado de las componentes X e Y, (en rojo y verde respectivamente), se plasma la diferencia detectada con su signo.

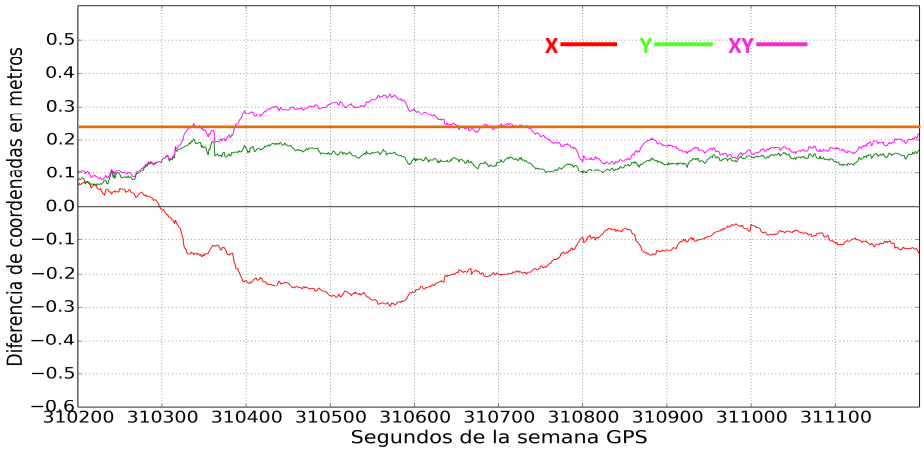


Figura 11.8: Desplazamiento inicial en planimetría. Doy 107 /2013

Teniendo en cuenta un desplazamiento de la antena de 23,2 cm, los estadísticos se han obtenido nuevamente partiendo de este valor como posición teórica (línea naranja). En esta franja de observación se obtiene un valor promedio de 5,9 cm de diferencia con la posición teórica, y una desviación estándar en torno a los 6 cm.

Duración de la medición (segundos)			2400
Duración de la medición (minutos)			40
Tamaño de la muestra (segundos)			2400
Valores de los estadísticos de la componente XY			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,10713	-0,15311	0,0589	0,0638
Tiempo en que la componente XY está en Rango (segundos)			
Mayor de 20 cm		Menor de 20 cm	
0		1038	

Tabla 11.2: Estadísticos. Desplazamiento inicial en planimetría. Doy 107 /2013

Desplazamiento final

Del último bloque encontramos el siguiente gráfico, que corresponde al último movimiento inducido donde la antena vuelve a su posición inicial. Para este desplazamiento se determina la magnitud detectada con PPP en tiempo real y sus estadísticos, tal y como se mostrará al final del apartado.

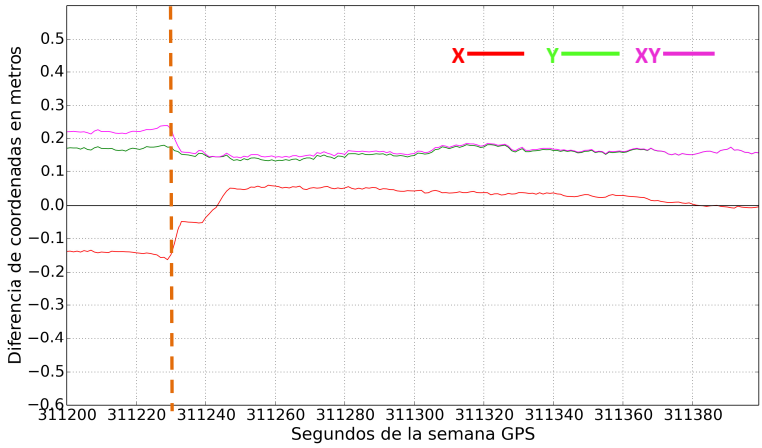


Figura 11.9: Desplazamiento final en planimetría. Doy 107/2013

En la componente altimétrica no se ha inducido ningún desplazamiento por lo que se mantiene constante tras inicializar. En esta componente, la solución solo tarda en converger 21 min 50 segundos, tiempo acorde con los resultados previstos.

Se muestra a continuación los resultados de post-procesar con la técnica PPP la misma ventana de datos en tiempo *quasi-real*, marcando con la línea naranja discontinua el instante del desplazamiento. Para este procesamiento se ha utilizado exactamente el mismo modelo de correcciones de los relojes de satélites, órbitas y *bias* aplicado en tiempo real, la combinación de frecuencias L3 *(iono-free)*, resolviendo el algoritmo PPP de manera secuencial, como en casos anteriores.

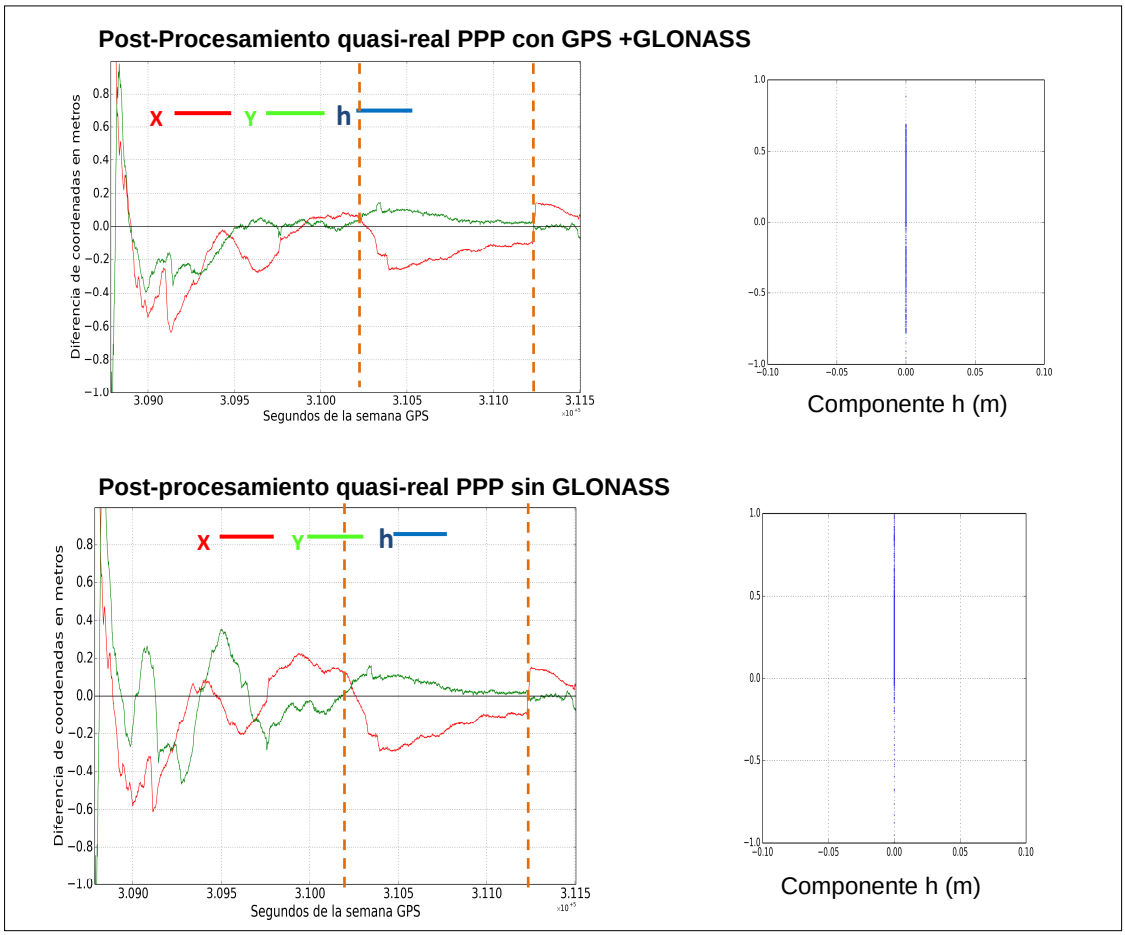


Figura 11.10: Post-procesamiento quasi-real PPP de la sesión con desplazamiento inducido. Doy 107/2013

Las principales diferencias entre ambas soluciones se observan en el tiempo de convergencia y en el periodo en que las posiciones están en un rango menor que 5 cm respecto al valor real. En lo referente a las diferencias y desviaciones estándar puede haber en torno a 5 cm o más de diferencia en todas las componentes. No obstante el comportamiento de la solución después del desplazamiento es bastante parecido en términos relativos, para este caso.

En cuanto a los desplazamientos estimados con los distintos cálculos, (tiempo real y *quasi-real*), se obtiene las siguientes magnitudes, viendo que en términos relativos las magnitudes observadas en tiempo real son bastante coherentes con la precisión de la técnica en sí:

Desplazamiento inducido (m)	Desplazamiento detectado en tiempo real con PPP (m) GPS+GLONASS	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
0.232	0.275	0,2624	0,2010
0.232	0.202	0,2403	0,2290

Tabla 11.3: Desplazamiento detectado en PPP tiempo real y con post-procesamiento PPP.

En los siguientes apartados se plasman el resto de sesiones con la evaluación del comportamiento del método, tras las cuales al final del capítulo se establecerá un análisis conjunto.

11.2.3. Sesión DOY 142/2013

A continuación se incluye otra campaña de observación, donde se induce de nuevo un desplazamiento para estudiar el comportamiento de la técnica sobre la componente bidimensional (horizontal). Se utiliza el producto CLK91, (modelo GPS+GLONASS), en el marco de referencia ITRF2008. Para este caso también se plasma una selección de los gráficos y los estadísticos obtenidos en el marco de referencia ETRF2000.

Transcurrido un tiempo con la antena en posición estática se inicia el movimiento de ésta a través de la guía. En las imágenes se observa la antena en la posición final tras el desplazamiento, el cual ha sido de 23,2 cm en dirección nordeste. En esta posición se mantiene hasta el final de la observación.

Figura 11.11: Antena GNSS en la posición final tras el desplazamiento

Con los gráficos se puede analizar los resultados obtenidos para las componentes planimétricas y los puntos de inflexión de la misma (líneas naranja), debido al deslizamiento inducido y su posterior convergencia.

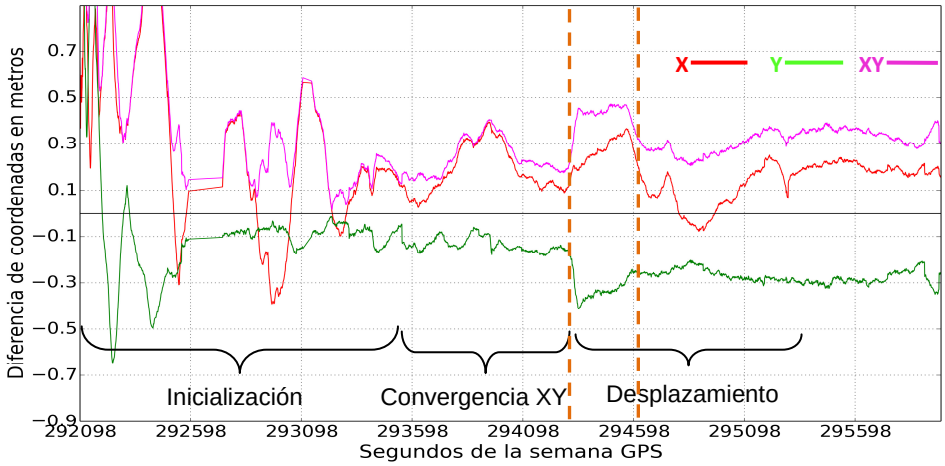


Figura 11.12: Observación planimétrica. Doy 142/2013 . Duración de la medición: 64 minutos

El tiempo que ha transcurrido hasta alcanzar una posición estable por debajo de los 20 cm es inicialmente de 20 min 50 segundos. Como el horizonte de satélites en este intervalo de observación es peor que en la anterior sesión y tiene más pérdidas, tal y como se representa en el siguiente gráfico correspondiente al rastreo, se produce una repercusión directa sobre la convergencia y estabilidad de la solución.

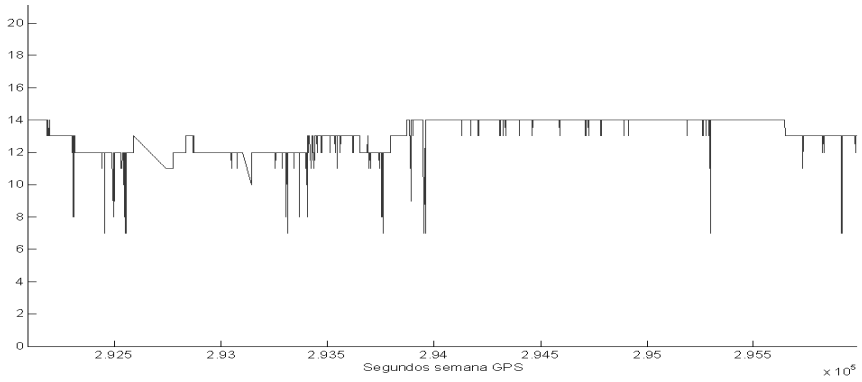


Figura 11.13: Constelación rastreada

Observando más detenidamente el momento del desplazamiento horizontal, (figura 11.12), se obtiene que, en valores relativos ha habido un desplazamiento equiparable al desplazamiento real de la guía, el cual era de 23,2 cm. Se puede deducir que al igual que en la observación del Doy 107/2013, el cambio de la posición en tiempo real es detectado con bastante precisión en valores relativos.

En esta parte de la sesión, el tiempo que se tarda en la ejecución del movimiento inducido ha sido de 30 segundos, similar al del detectado en tiempo real (ya que no fue un movimiento brusco).

Desplazamiento –Convergencia

Teniendo en cuenta un desplazamiento de la antena de 23,2 cm en la componente XY, los estadísticos que se obtienen parten de este valor como posición teórica, con lo que las variaciones obtenidas son respecto a este valor.

Duración de la medición (segundos)	3840
Duración de la medición (minutos)	64 minutos
Tamaño de la muestra (segundos)	3840

Valores de los estadísticos de la componente XY			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,16997	-0,02463	0,0680	0,0794

Tiempo en que la componente XY está en Rango (segundos)	
Mayor de 20 cm	Menor de 20 cm
9	1357

Tabla 11.4: Estadísticos. Desplazamiento-convergencia en planimetría. Doy 142 /2013

Aunque en la componente altimétrica la posición permanece constante, el gráfico siguiente muestra su comportamiento durante la observación. Así como los puntos de inflexión de la misma (líneas de color naranja), entre el periodo de inicialización y el periodo de convergencia.

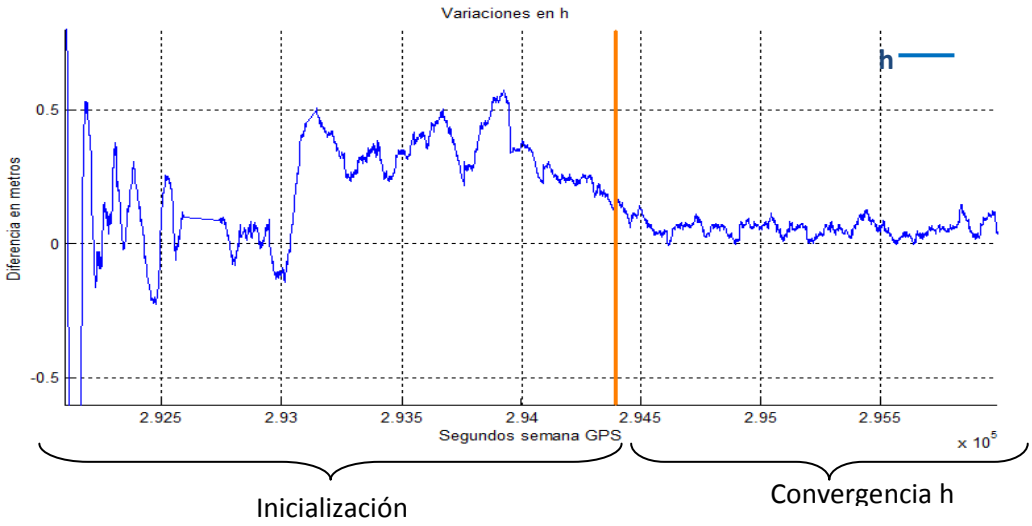


Figura 11.14: Comportamiento de la componente altimétrica durante la sesión. Duración de la medición: 64 minutos

El tiempo en segundos que la solución tarda en entrar en un rango inferior a los 10 cm es de 37 min y 12 seg para la componente h.

Una vez que la solución se mantiene estable, en los estadísticos se observa que el total de esta parte de la observación está dentro del rango de los 20 cm, con un valor promedio de 6 cm y una desviación estándar de 3,5 cm.

Valores de los estadísticos de la componente h			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,18583	-0,00716	0,0630	0,0353
Tiempo en que la componente h está en Rango (segundos)			
Mayor de 20 cm		Menor de 20 cm	
0		1624	

Tabla 11.5: Estadísticos. Convergencia en altimetría. Doy 142

A continuación se representa el post-procesamiento llevado a cabo con la técnica PPP en tiempo *quasi-real* en toda la ventana de tiempo, empleando de nuevo los mismos modelos aplicados en tiempo real**.**

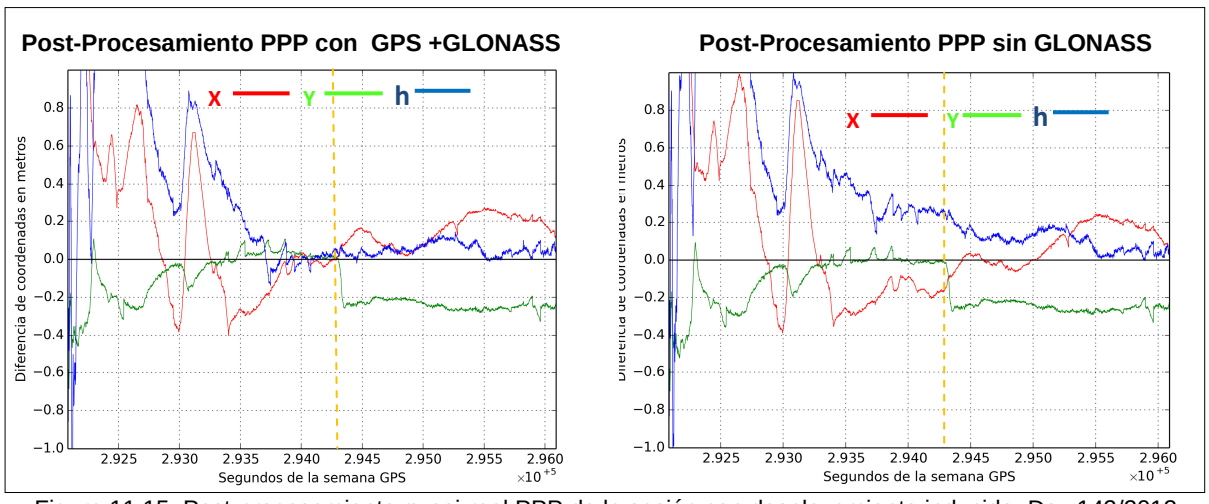


Figura 11.15: Post-procesamiento quasi-real PPP de la sesión con desplazamiento inducido. Doy 142/2013

El post-procesamiento con PPP se ha llevado a cabo siguiendo la misma estrategia que en la sesión reseñada en el apartado 11.2.2.

Se puede observar que en el caso de post-procesar la solución cinemática con PPP, el tiempo que tarda la solución en bajar del umbral de los 20 cm es en torno a 21 minutos con GPS+GLONASS, muy similar a la ventana para tiempo real, solo que en el post-proceso la solución se mantiene más estable. La convergencia es un poco más lenta en el caso de post-procesar solo con GPS como se puede ver en el gráfico, habiendo diferencias época a época hasta de 10 cm.

Las magnitudes del desplazamiento obtenidas se plasman en el siguiente cuadro:

Desplazamiento inducido (m)	Desplazamiento detectado en tiempo real con PPP (m) GPS+GLONASS	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
0,232	0,255	0,2404	0,224

Tabla 11.6: Desplazamientos detectados en PPP tiempo real y en post-procesamiento PPP ultra-rápido. Doy 142/2013

11.2.4. Sesión DOY 135/2014

Como en las sesiones anteriores, se lleva a cabo una simulación, pero esta vez de cortos deslizamientos de inferior tamaño en un sentido y en otro sobre la componente Y, de una magnitud similar a la precisión de la técnica, para evaluar la capacidad de detección del fenómeno. La observación se llevó a cabo el Doy 135/2014, se muestran a continuación los gráficos obtenidos durante toda la ventana de tiempo. Con líneas discontinuas naranjas se representan los instantes con deslizamientos provocados.

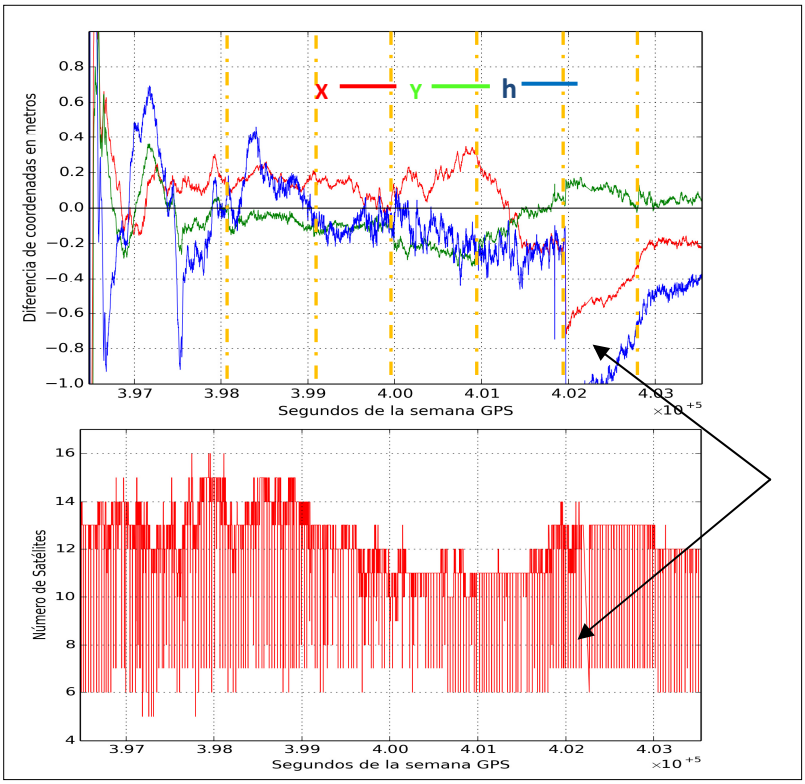


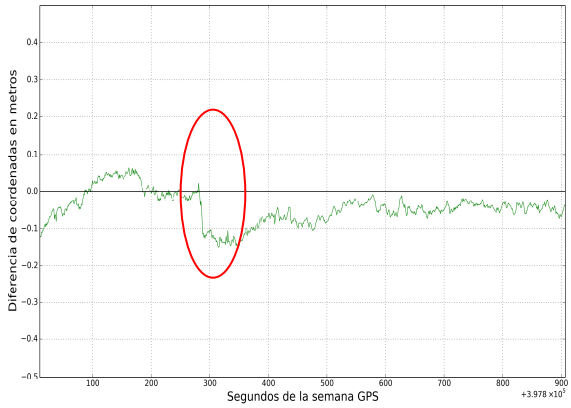
Figura 11.16: Cinemático PPP tiempo real y rastreo. Doy 135/2014

El tiempo de convergencia para la planimetría se cifra en 16 minutos 24 segundos y para altimetría en 19 minutos 48 segundos. Nótese la pérdida de convergencia de la solución hacia el final de la sesión debida probablemente a un problema en la recepción, que no afecta por igual a todas las componentes.

A continuación se plasman las ampliaciones de las ventanas de tiempo en que se produjeron los desplazamientos:

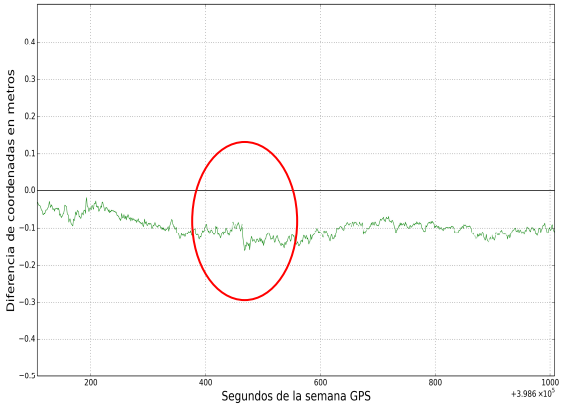
Primer desplazamiento inducido:

Magnitud del desplazamiento: 10 cm en dirección Norte.



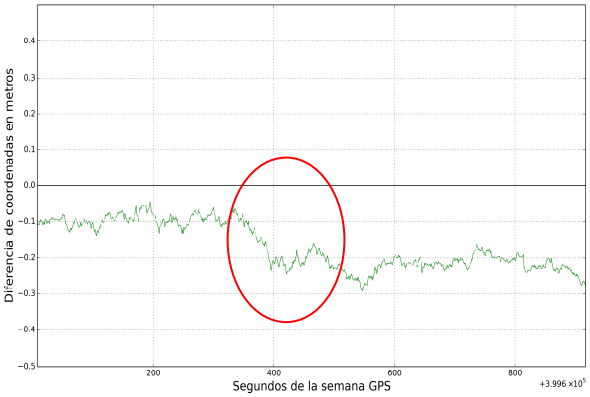
Segundo desplazamiento inducido:

Magnitud del desplazamiento: 5 cm en dirección Norte.



Tercer desplazamiento inducido:

Magnitud del desplazamiento: 6 cm en dirección Norte.

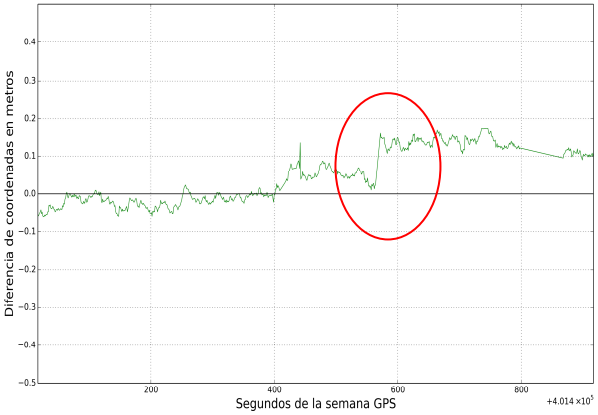


Cuarto desplazamiento inducido:

Magnitud del desplazamiento: 6 cm en dirección Sur

Quinto desplazamiento inducido:

Magnitud del desplazamiento: 6 cm en dirección Sur



Sexto desplazamiento inducido:

Magnitud del desplazamiento: 9 cm en dirección Sur

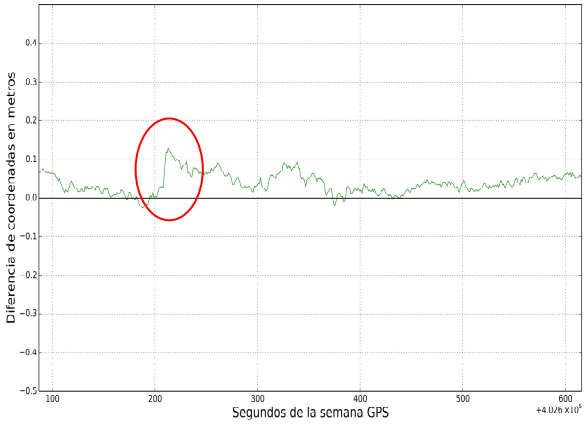


Figura 11.17: Desplazamientos inducidos detectados en PPP –tiempo real dirección N-S. Doy 135/2014

En el gráfico inicial de la sesión en tiempo real para este día, (figura 11.16), se pone de manifiesto la sensibilidad de la técnica a determinados *outliers* en el producto cuando se trabaja en tiempo real, por la pérdida de precisión que se produce hacia el final de la observación (segundos de la semana GPS 402250). En ese instante se produce una fluctuación en la solución PPP, sin embargo en el post-procesamiento *quasi-real* este aspecto vemos que no influye, por lo que probablemente el problema en tiempo real se debió a un incremento puntual en la edad de las correcciones o latencia de llegada.

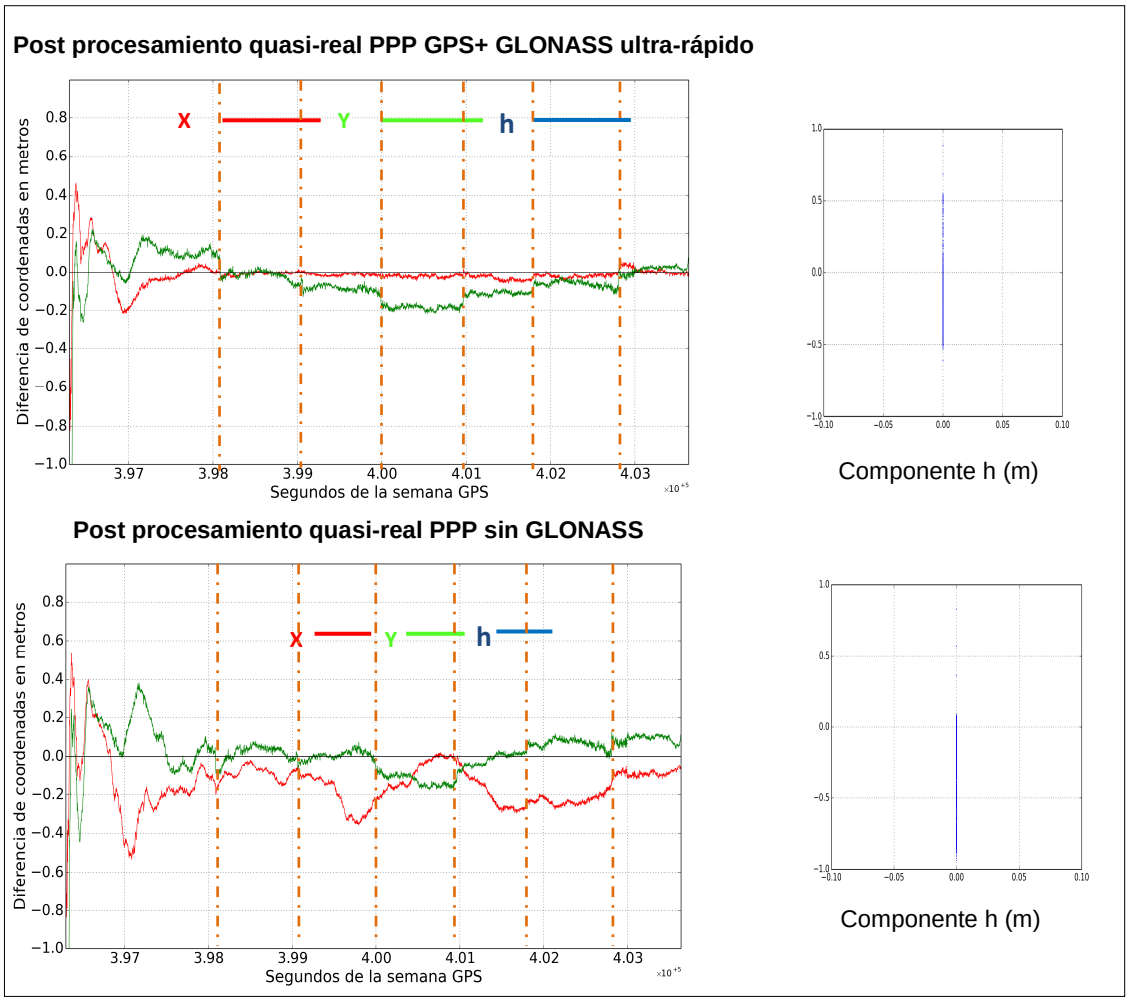


Figura 11.18: Post-procesamiento quasi-real PPP con GPS+GLONASS y sin GLONASS. Doy 135/2014

A continuación se muestra el desplazamiento determinado en los distintos instantes y con las diferentes soluciones:

Desplazamiento inducido (m)	Desplazamiento detectado en tiempo real con PPP (m) GPS+GLONASS	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
0,10	0,1121	0,1242	0,1256
0,05	0,0480	0,0583	0,0541
0,06	0,0596	0,0593	0,0656
0,06	0,0630	-0,0547	-0,0552
0,06	0,040	-0,0498	-0,0519
0,09	0,1020	-0,0746	-0,1246

Tabla 11.7: Desplazamientos detectados en PPP tiempo real y con post-procesamiento PPP ultra-rápido. Doy 135/014

Como complemento para establecer la discusión de la técnica, en los sub-apartados siguientes se plasman los resultados de la simulación del desplazamiento en altimetría.

11.3. Desplazamiento vertical inducido

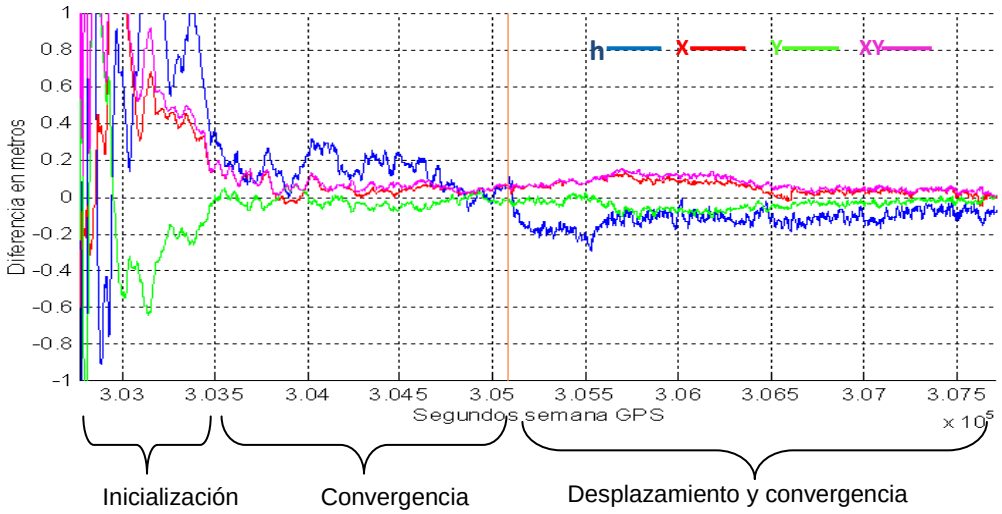
Al contrario que en los casos anteriores, donde se realizaba un desplazamiento bidimensional y la altitud se mantenía constante, en este escenario lo que se realiza es un movimiento a lo largo de la componente h, manteniéndose la antena GNSS fija en planimetría.

En las siguientes sesiones, se toman las coordenadas de un excentro como punto origen, donde se realiza una observación estática y post-procesamiento para determinar sus coordenadas, en el que han intervenido estaciones GNSS de Referencia pertenecientes al Instituto Geográfico Nacional y al Instituto Cartográfico Valenciano, (VALE, VCIA, ALAC y BORR), como puntos fijos. En el excentro, se sitúa un jalón de acero, que se fija al pilar a través de abrazaderas transversales, enroscadas entre sí para garantizar su estabilidad. Así mismo se enrosca a un bípode clavado en el suelo, y se comprueba el aplomado a través de la burbuja del jalón. Las magnitudes inducidas son, como en el caso anterior, del orden de centímetros, coherente con la precisión esperada de la técnica PPP en tiempo real.

Figura 11.19: Aplomado del jalón para inducción del desplazamiento

11.3.1. Sesión DOY 142/2013

Transcurridos entre 30-40 minutos con la antena en posición estática, y habiendo garantizado la inicialización, se inicia el desplazamiento de la antena acortando o alargando el jalón. En las imágenes se observa la antena en la posición inicial y final tras el desplazamiento, el cual ha sido de 25 cm, en donde se mantiene hasta el final de la observación.



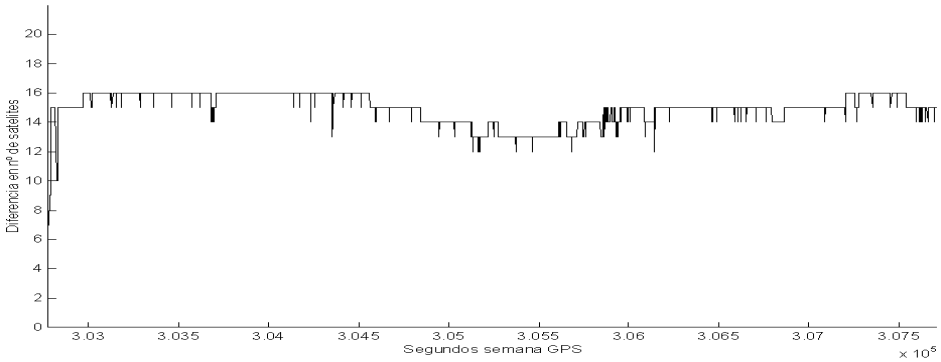


Figura 11.20: Representación en dirección N,E,h, y NE de las posiciones cinemáticas con PPP en tiempo real y rastreo de satélites. Doy 142/2013. Sesión 2.

Inicialización y convergencia

El tiempo que la solución tarda en converger dentro de un rango aceptable, (inicialización), es de 12 min y 5 segundos para la componente XY. En este caso, el tiempo de inicialización ha sido bastante corto.

En los estadísticos se ve que el tiempo en que la componente XY está en el rango menor que los 20 cm comprende prácticamente la totalidad de esta parte de la observación, con un error promedio de 7 cm y una desviación estándar de 3,6 cm.

Duración de la medición (segundos)			4245
Duración de la medición (minutos)			70,75
Tamaño de la muestra (segundos)			4244
Valores de los estadísticos de la componente XY			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,20463	0,0007	0,0707	0,0361
Tiempo en que la componente XY está en Rango (segundos)			
Mayor de 20 cm		Menor de 20 cm	
4		4240	

Tabla 11.8: Estadísticos. Convergencia en planimetría. Doy 142/2013

Para la componente altimétrica, en el siguiente gráfico se distinguen varios bloques. El primero de ellos es el tiempo de inicialización, pasando por el tiempo de convergencia, y finalmente el tramo con el desplazamiento inducido.

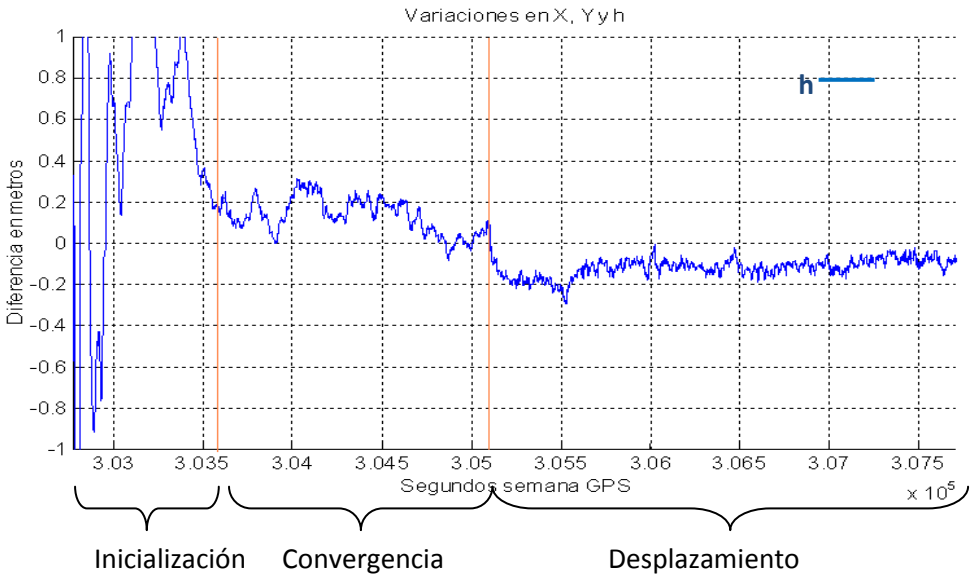


Figura 11.21: Observación altimétrica. -Doy 142./2013. Franja de 25 minutos.Sesión 2

En el caso del periodo de inicialización para la componente h, la solución solo tarda en converger 12 minutos y 52 segundos, tiempo acorde con los resultados previstos.

Duración de la medición (segundos)	4245
Duración de la medición (minutos)	70,75
Tamaño de la muestra (segundos)	4244

Valores de los estadísticos de la componente h			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,3133	-0,0817	0,1386	0,0855

Tiempo en que la componente h está en Rango (segundos)	
Mayor de 20 cm	Menor de 20 cm
381	1151

Tabla 11.9: Estadísticos. Convergencia en altimetría tras la inicialización. Doy 142/2013

Convergencia tras el desplazamiento vertical:

El último bloque corresponde a la convergencia tras el desplazamiento, observándose ampliado en el siguiente gráfico:

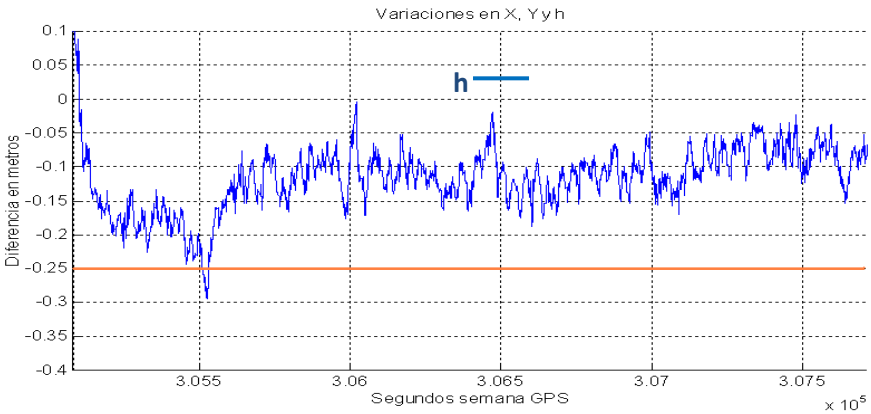


Figura 11.22: Desplazamiento en altimetría. Doy 142/2013. Franja total de 43 minutos. Sesión 2.

Duración de la medición (segundos)	4245
Duración de la medición (minutos)	70,75
Tamaño de la muestra (segundos)	4244

Valores de los estadísticos de la componente h			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0,3583	-0,0437	0,1201	0,0510

Tiempo en que la componente h está en Rango (segundos)	
Mayor de 20 cm	Menor de 20 cm
54	2578

Tabla 11.10: Desplazamiento en altimetría. -Doy 142

Analizando más detenidamente el momento de cambio en el desplazamiento vertical, se deduce que, en valores relativos ha habido un desplazamiento de la posición de 26,5 cm (líneas rojas).

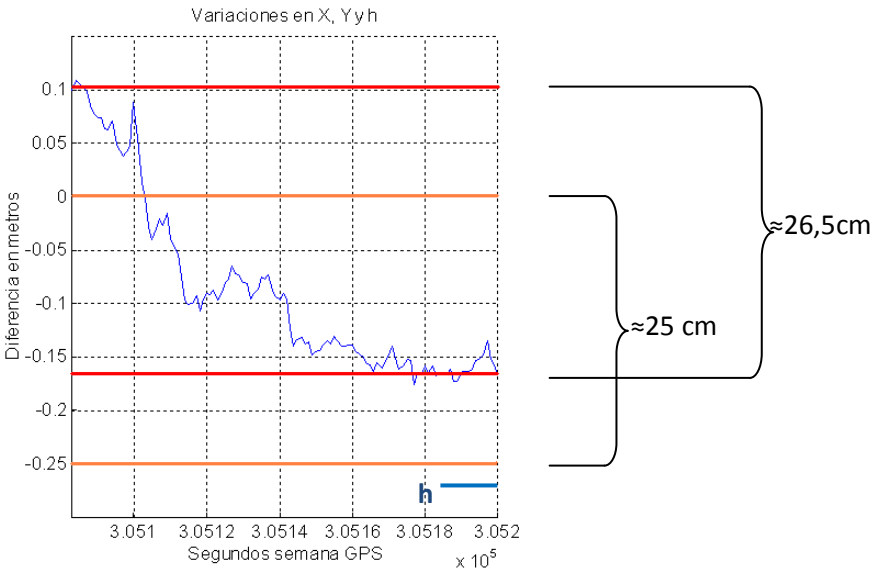


Figura 11.23: Instante del desplazamiento inducido en altimetría. Doy 142/2013. Sesión2.

El incremento obtenido se puede equiparar al desplazamiento real de la guía, el cual era de 25 cm (líneas naranjas) con un error en valores relativos de tan solo 1,5 cm.

Se adjunta a continuación el post-procesamiento PPP en tiempo quasi -real llevado a cabo:

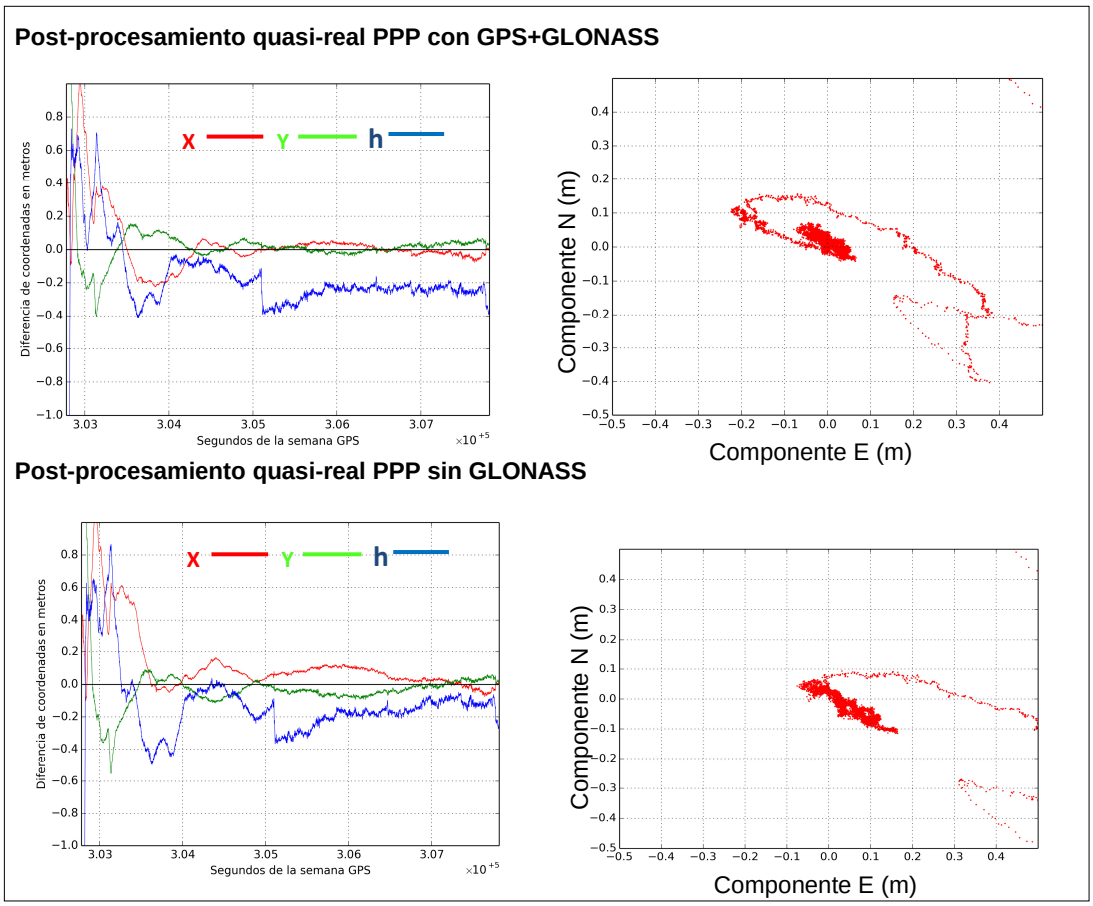


Figura 11.24: Post-procesamiento quasi-real PPP con GPS+GLONASS y sin GLONASS. Doy 142/2013. Sesión2

Se puede deducir al igual que en todos los casos anteriores, que el momento de desplazamiento de la posición en tiempo real es detectado con bastante precisión en valores relativos y acorde con el instante real de la observación si comparamos las magnitudes expresadas en la siguiente tabla:

Desplazamiento inducido (m)	Desplazamiento detectado en tiempo real con GPS + GLONASS (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
0,2502	0,2741	0,2231	0,1856

Tabla 11.11: Desplazamiento detectado con PPP. Doy 142/2013.Sesión2

11.3.2. Sesión DOY 84/2014

En la siguiente sesión se llevaron a cabo varios desplazamientos de corta magnitud en la componente vertical, en un sentido y en otro, para evaluar hasta que rango es posible detectar el desplazamiento inducido. Para toda la sesión se muestran los gráficos del cálculo con posicionamiento PPP en tiempo real y los instantes del desplazamiento destacados. La constelación rastreada, como en los casos anteriores, es GPS+GLONASS.

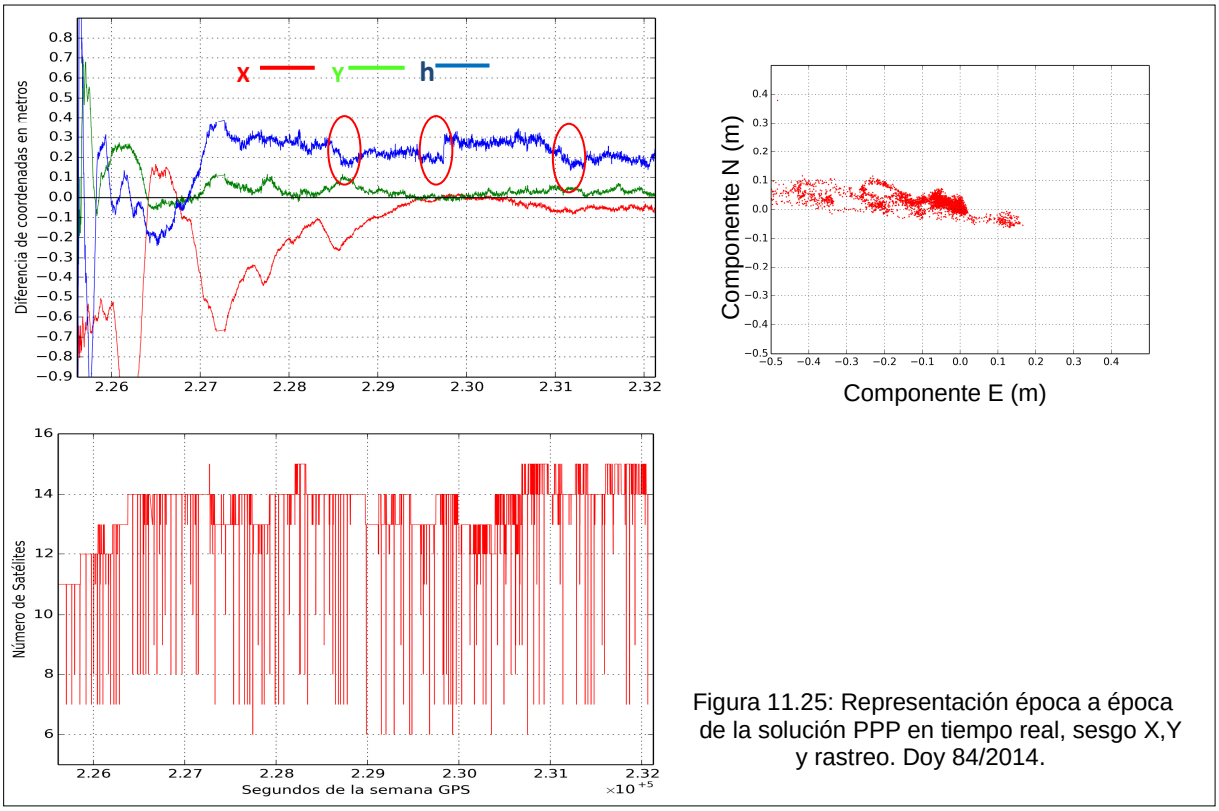


Figura 11.25: Representación época a época de la solución PPP en tiempo real, sesgo X,Y y rastreo. Doy 84/2014.

Incialización y Convergencia en planimetría

El tiempo de convergencia para alcanzar una precisión por debajo de los 20 cm ha sido en torno a los 30 minutos, se muestran a continuación los estadísticos en planimetría desde el momento en que la solución alcanza este umbral:

Valores de los estadísticos de la componente XY			
Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)	Desv. estándar (m)
0.115	-0.265	0.069	0.0702
Tiempo en que la componente XY está en Rango (segundos)			
Mayor de 20 cm		Menor de 20 cm	
234		3089	

Tabla 11.12: Estadísticos en planimetría en PPP tiempo real. Doy 84/2014

Desplazamiento inducido en altimetría

La posición PPP en tiempo real queda estable para la componente h a los 33 minutos de iniciar la sesión.

En los gráficos ampliados que se muestran a continuación, se observan los instantes de desplazamiento donde se distingue la magnitud detectada:

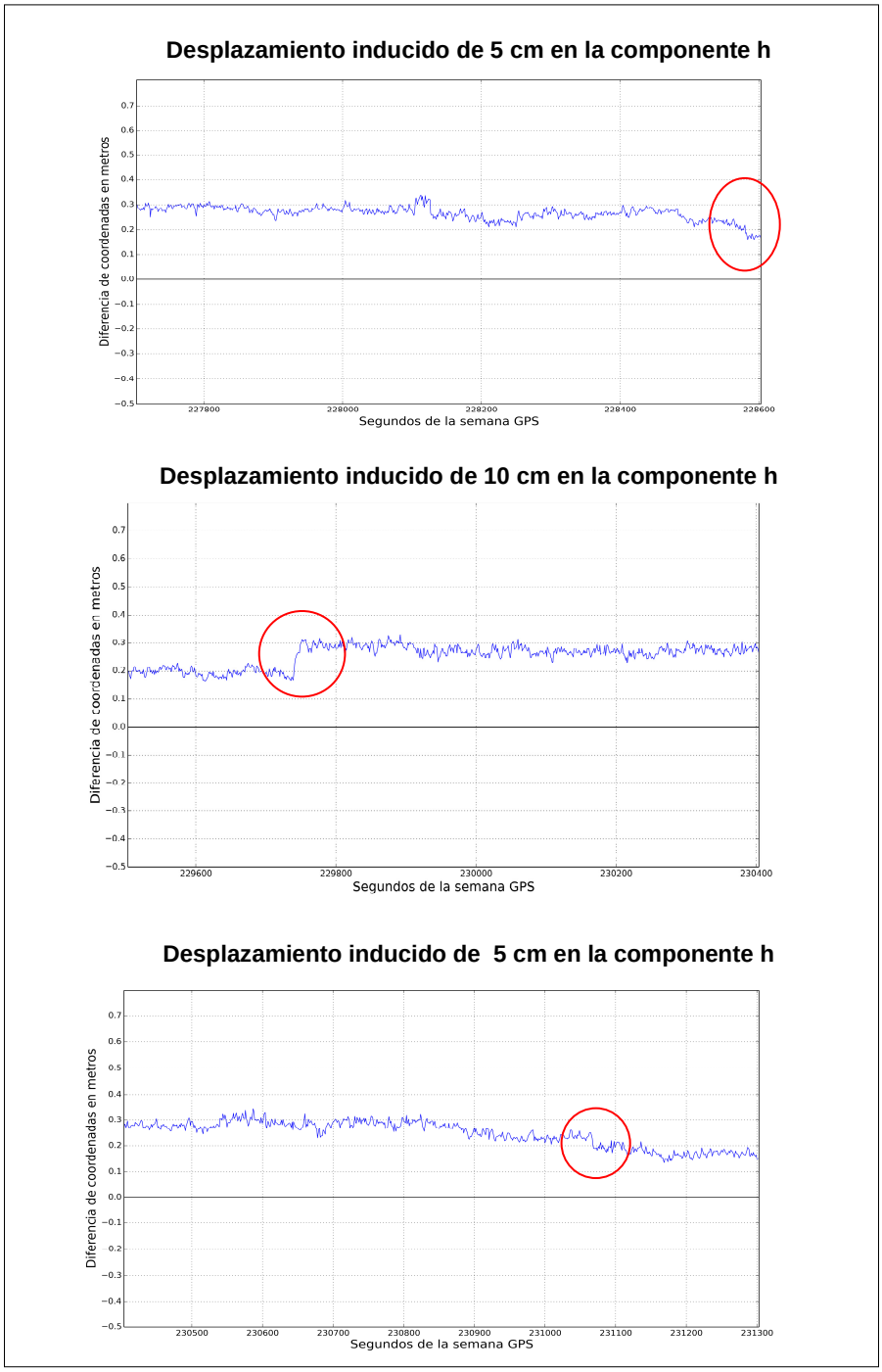


Figura 11.26: Desplazamientos detectados con PPP en tiempo real DOY 84/2014

Con el post-procesamiento realizado, en los siguientes gráficos se presenta también la detección del desplazamiento en los instantes en que se ha producido:

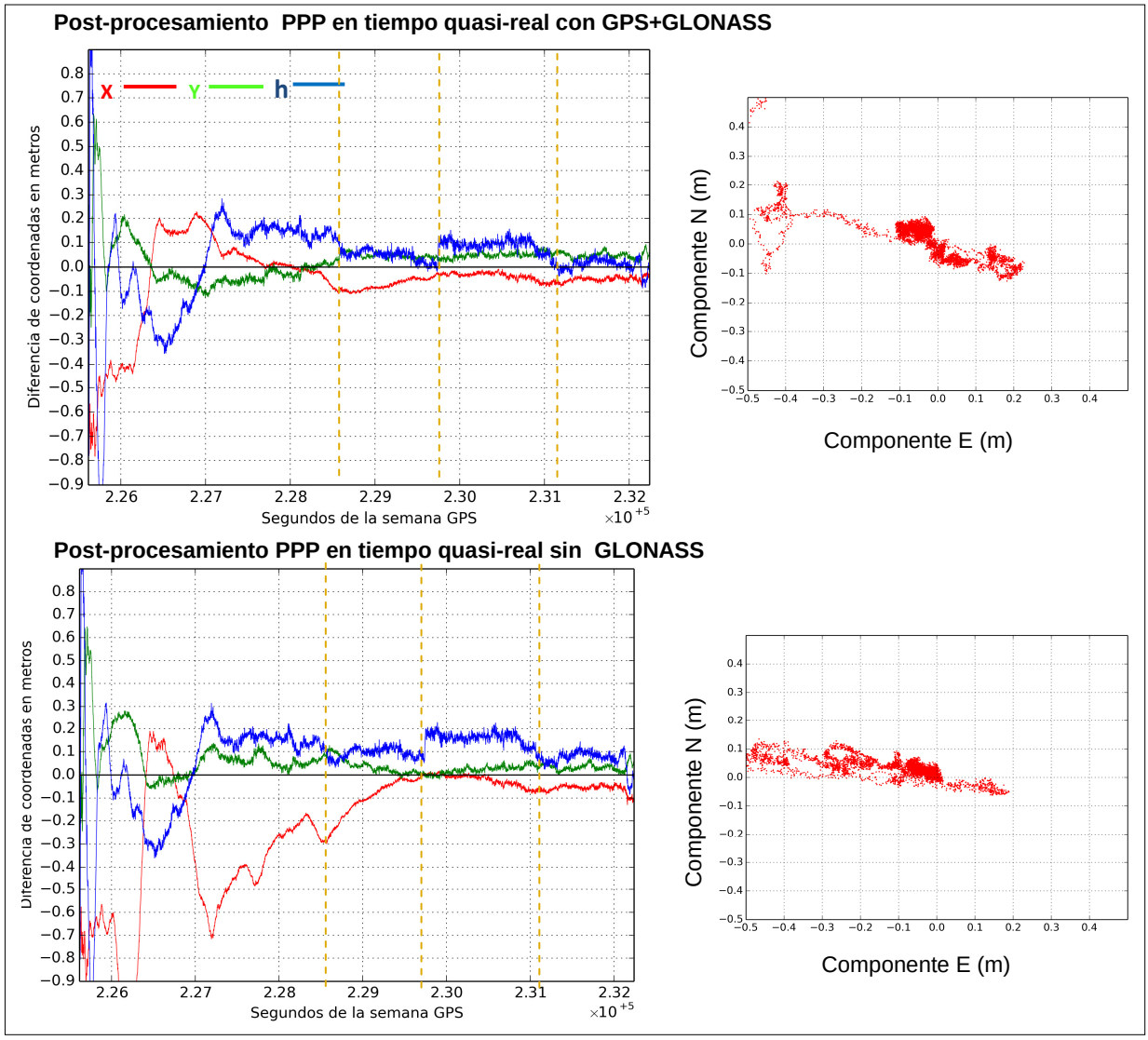


Figura 11.27: Post-procesamiento quasi-real PPP con GPS+GLONASS y sin GLONASS. Doy 84/2014

Desplazamiento inducido (m)	Desplazamiento detectado en tiempo real (m) GPS +GLONASS	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
0,050	0,056	0,058	0,075
-0,100	-0,146	-0,102	-0,101
0,050	0,058	0,066	0,066

Tabla 11.13: Desplazamiento detectado con PPP. Doy 84/2014

11.3.3. Sesion DOY 80/2014

La siguiente sesión se llevó a cabo el 21 de marzo de 2014. A continuación se evalúa un escenario en el que en tiempo real se aplicó la técnica PPP, pero solo con la constelación GPS. En este caso se observa que al ser una ventana de tiempo con una constelación pobre, el periodo de convergencia es muy lento. Además se produce una pérdida de satélites y el algoritmo no es capaz de volver a resolver posición fija y converger de nuevo hasta 14 minutos después hacia el final de la sesión, si bien la posición altimétrica había alcanzado previamente una solución estable con una desviación típica de 4,1 cm:

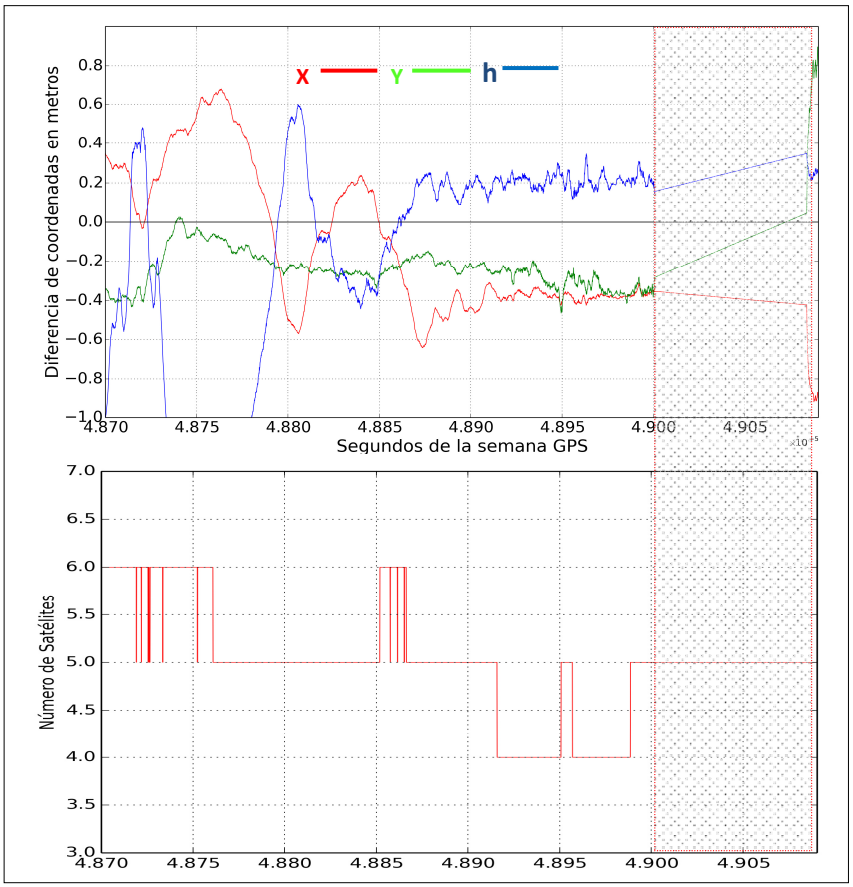
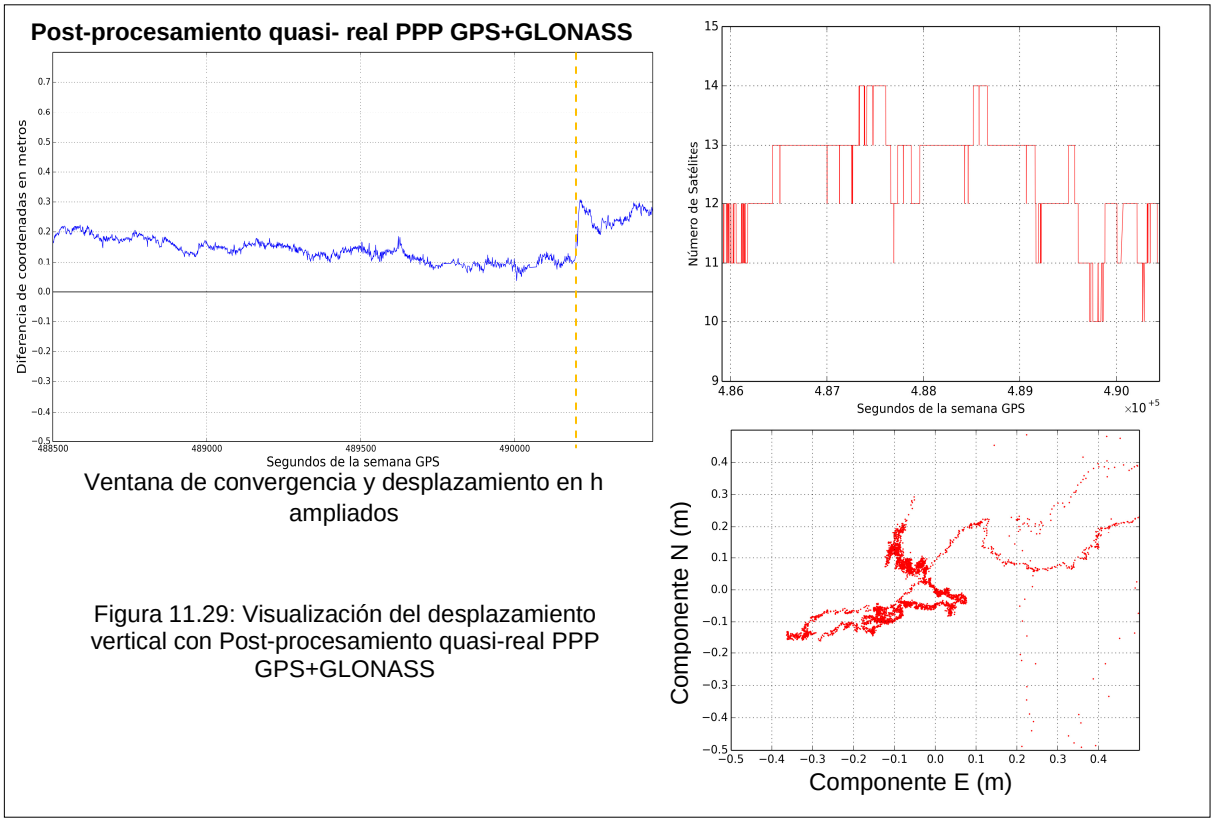


Figura 11.28: Sesión PPP en tiempo real GPS. Doy 80/2014

En el caso del post-proceso ultra-rápido de la sesión, sin embargo, no se pierde la convergencia, como podemos observar a continuación:



Ventana de convergencia y desplazamiento en h ampliados

Figura 11.29: Visualización del desplazamiento vertical con Post-procesamiento quasi-real PPP GPS+GLONASS

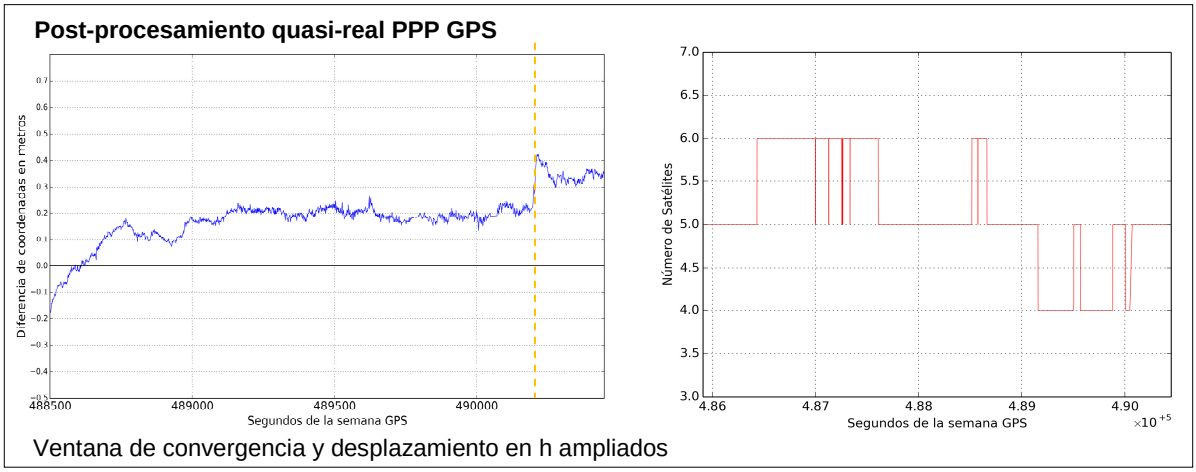


Figura 11.30: Visualización del desplazamiento vertical con Post-procesamiento quasi-real PPP GPS

Al igual que en el resto de sesiones, se han empleado los mismos modelos que en tiempo real.

Desplazamiento inducido (m)	Desplazamiento detectado en tiempo real con GPS (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
0,150	-0,190	-0,153	-0,154

Tabla 11.14: Desplazamiento detectado con PPP. Doy 80/2014

11.4. Discusión de la técnica: Disponibilidad y precisión de la solución

-Disponibilidad de la solución: En el caso de tiempo real resulta, si cabe, más complejo disponer en todas las épocas de la solución continua debido a veces a *outliers* en los productos o problemas con la edad de las correcciones. En lo referente a cómo influye este aspecto en la continuidad de la solución de la técnica PPP en tiempo real, con las muestras del conjunto de observaciones de todas las campañas, en la figura siguiente se observa el porcentaje de valores dentro y fuera del rango de los 20 cm de variación respecto a las coordenadas de referencia.

Observando los valores obtenidos en el conjunto de las campañas, se obtiene valores en el rango del 99,6% en la componente planimétrica y de 83,8 % para la altimétrica una vez que la solución converge.

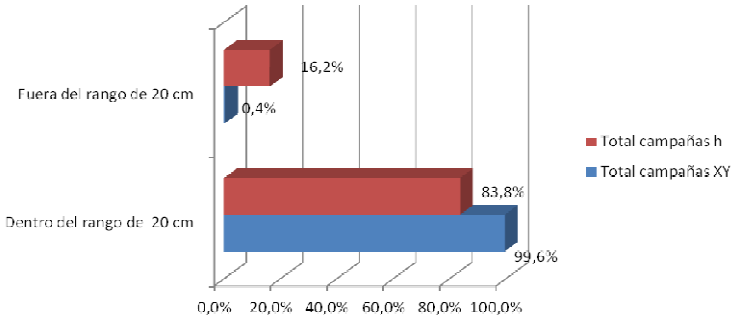


Figura 11.31: Estadísticos globales. Campañas de campo –Valores en el rango de 20 cm.

El tiempo en que se encuentra fuera del rango la solución con PPP, engloba los posibles outliers por los efectos comentados pudiéndose cifrar en un 16.2% como promedio para h, e inferior al 1% para XY. Si se comprueba para las tres componentes veriamos que es ligeramente inferior a la disponibilidad de la solución que se tiene cuando se trabajaba en gabinete.

-Constelaciones rastreadas y precisión: Por lo que respecta a los promedios $\boldsymbol{\mu}$ y desviaciones estándar $\boldsymbol{\sigma}$ obtenidos a lo largo de todas las observaciones, hay que destacar que al no situarnos en el escenario ideal de las pruebas de gabinete, (es decir la simulación como *rover* de una estación permanente con horizonte despejado), sino en un entorno real, se observan pequeñas pérdidas de rastreo. Estos problemas de rastreo se reflejan en los resultados, tanto en la componente altimétrica

como en la planimétrica, generando mayores *offsets* en la solución con respecto a la posición esperada, aunque la solución tiende a estabilizarse rápidamente. En algunos casos, (Doy 142/2013), si se analiza conjuntamente toda la sesión junto con la representación de los satélites, se observa claramente la influencia de la pérdida de estos. Centrándose en la zona inestable *1 del gráfico siguiente, se ve que la pérdida de satélites provoca inestabilidades en la posición, haciendo que el tiempo de inicialización aumente con respecto al valor esperado. Cuando se estabiliza el rastreo, la solución converge rápidamente, poniéndose de manifiesto que en momentos concretos la pérdida puntual de los satélites provoca picos en la posición (*2 y *3 de la figura siguiente).

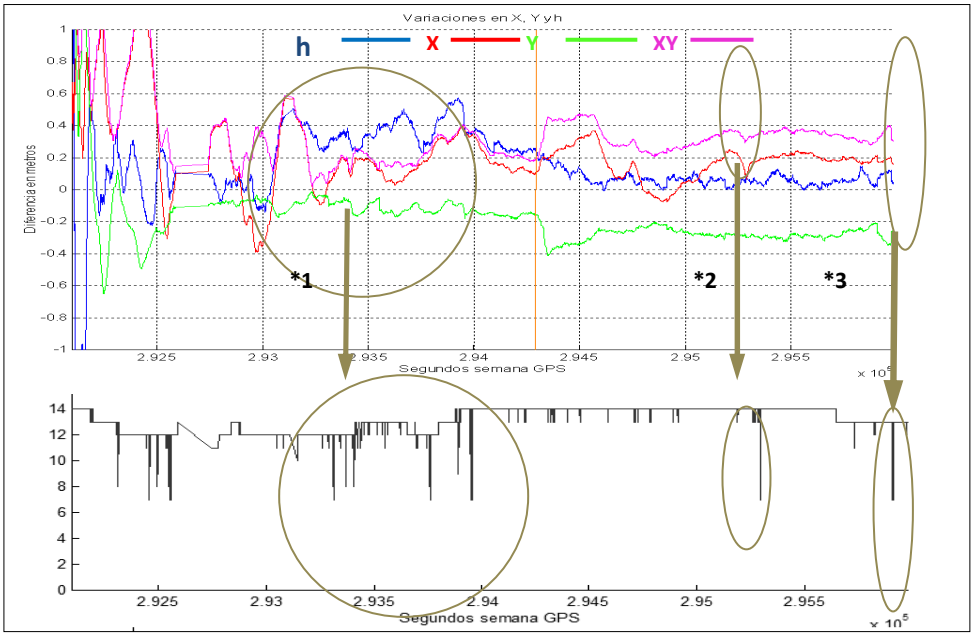


Figura 11.32: Representación X, Y, XY, h y número de satélites. -Doy 142 / 2013

En varias sesiones, simultáneamente se puso otra en gabinete a modo de comprobación, con el mismo producto (CLK91) y con una conexión por *streaming* a la estación de VALE del IGN, (a unos metros de la base de calibración), que simulaba ser un *rover*. En el siguiente gráfico se muestran los resultados obtenidos época a época para la prueba realizada en gabinete en idéntica ventana de tiempo.

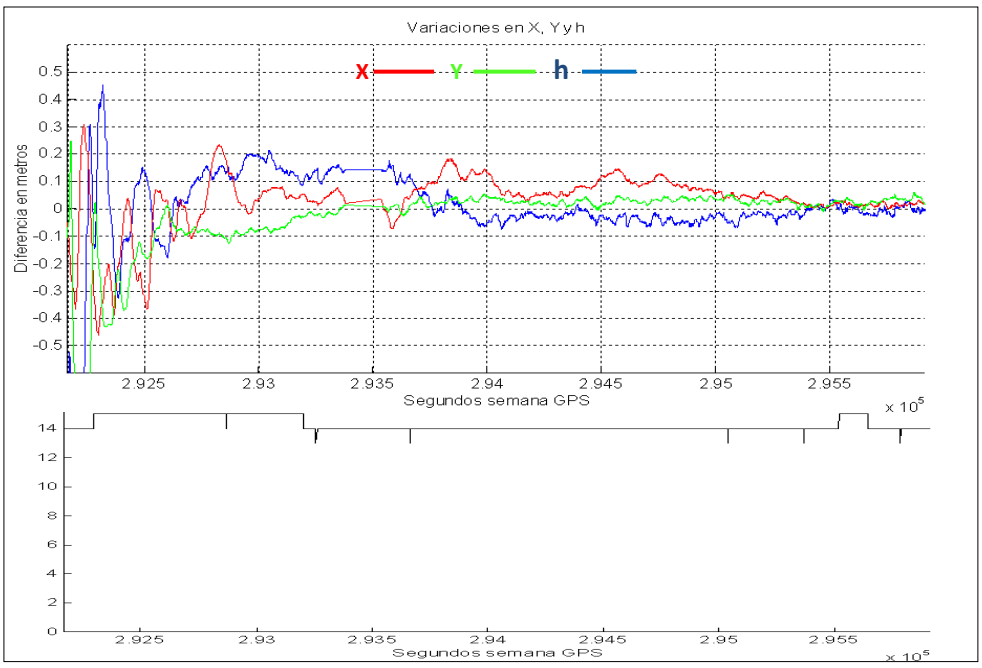


Figura 11.33: PPP tiempo real con la EGPS VALE, diferencias X, Y, h en cinemático y rastreo. Doy 142 /2013

De este modo se verifica el rendimiento del producto durante la sesión y el origen de los *outliers*. En los gráficos de la sesión simultánea se observa que los tiempos de inicialización son muy inferiores a los obtenidos en campo, donde en este caso en pocos minutos la solución converge a menos de 10 cm.

Este hecho puede ser debido a una mejor latencia en la recepción de los productos época a época, ya que en gabinete se cuenta con un ancho de banda mejor, mientras que en campo se cuenta con la conexión GPRS/3G. Es evidente, que también se debe al número de satélites que han intervenido en la solución, oscilando en número entre 14 y 15 satélites durante la sesión simulada en gabinete al haber empleado una estación permanente ubicada con horizonte despejado. Otro caso similar podemos verlo en el DOY 107/2013, donde las pequeñas pérdidas de rastreo o efectos *multipath* pueden llevar a anomalías en la convergencia:

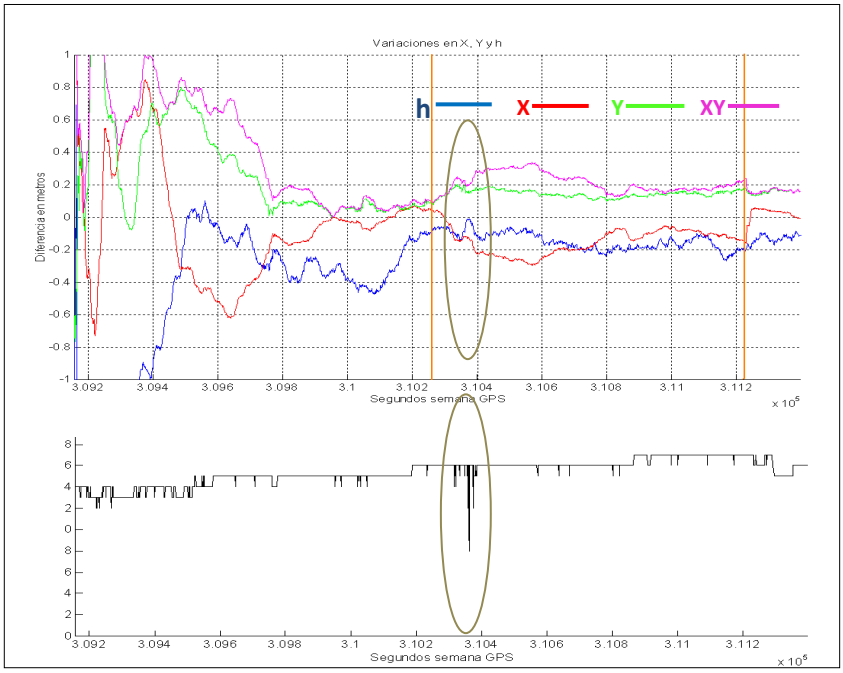


Figura 11.34: Representación X, Y, XY, h y número de satélites. Doy 107/ 2013

En términos de precisión, comparando los promedios y desviaciones estándar obtenidos en ambas pruebas simultáneas, pueden observarse las diferencias en el siguiente gráfico. Resaltar de nuevo que, en las pruebas de campo se está trabajando con la componente XY que integra los desplazamientos inducidos en horizontal.

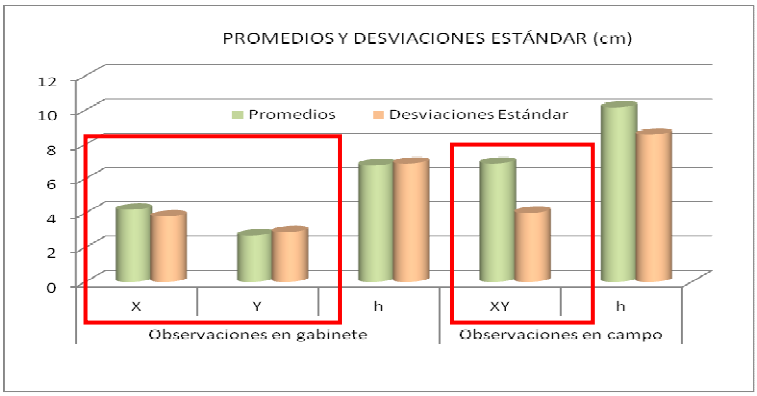


Figura 11.35: Comparativa entre observación en campo y gabinete, para las sesiones con desplazamiento horizontal. Valores Promedio y Desviación Estándar

No obstante, pese a la sensibilidad de la técnica, las muestras de datos en un entorno real en campo analizadas, son sesiones que arrojan resultados con suficiente precisión durante el tiempo de convergencia como para poder detectar un movimiento importante de la superficie de estudio como

veremos al final del apartado. Por lo que respecta al valor promedio de h, en este caso se detecta un empeoramiento de algo más de 5 cm, en el sesgo de la solución, respecto a las sesiones paralelas realizadas sobre una estación permanente de manera simultánea.

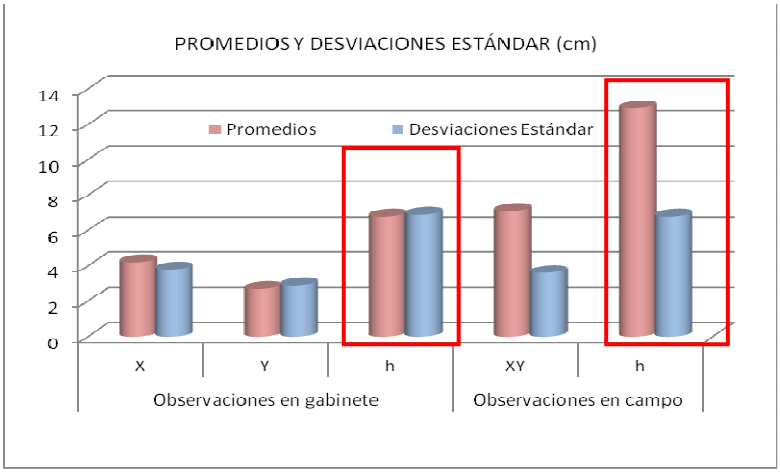


Figura 11.36: Comparativa entre observación en campo y gabinete para las sesiones con desplazamiento vertical. Valores Promedio y Desviación Estándar.

-Estadísticos de las magnitudes detectadas: En lo referente al desplazamiento horizontal inducido, es posible conocer con que exactitud podemos obtener la magnitud del deslizamiento. En la siguiente tabla se muestran las estadísticas de los desplazamientos detectados con la técnica PPP en tiempo real rastreando GPS y GLONASS, con la técnica PPP mediante post-proceso ultra-rápido utilizando GPS y GLONASS, y por último post-procesando los resultados solo con GPS.

	Desplazamiento detectado en tiempo real con PPP (m) GPS+GLONASS	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
μ sesgo promedio	0,01617	0,01236	0,01387
σ desviación estándar	0,02179	0,01513	0,01936
MÁXIMO	0,04300	0,03040	0,03460
MÍNIMO	0,00040	0,00070	0,00300

Tabla 11.15: Estadísticos de las series de datos del desplazamiento inducido horizontal

Prácticamente el grado de acuerdo en el *offset* de las tres soluciones se encuentra al nivel de unos pocos milímetros, y con respecto al desplazamiento real inducido la discrepancia máxima se encuentra en torno a los 4 centímetros para el caso de tiempo real. Como se puede observar en la tabla se puede detectar un desplazamiento con un *offset* promedio de 1.6 cm en tiempo real empleando la técnica PPP, mientras que si realizamos un procesamiento *quasi-real* las discrepancias son de 1.2 cm. Evidentemente, entre los tres conjuntos de soluciones, el cálculo que arroja resultados más aproximados a los reales corresponde al realizado en post-proceso con solución PPP e incluyendo ambas constelaciones GPS y GLONASS.

Analizando globalmente los resultados para el desplazamiento inducido en altimetría, se procede al calculo de estadísticos de todas las sesiones mostrando las diferencias entre los desplazamientos inducidos y los detectados en los cálculos efectuados.

	Desplazamiento detectado en tiempo real con PPP (m) GPS +GLONASS	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS+GLONASS) (m)	Desplazamiento detectado en Post-procesamiento ultra-rápido (GPS) (m)
μ	0,02480	0,01117	0,02208
σ	0,01900	0,01622	0,03528
MÁXIMO	0,04600	0,02683	0,06440
MÍNIMO	0,00600	0,00200	0,00100

Tabla 11.16: Estadísticos de las series de datos del desplazamiento inducido vertical

Entre las tres soluciones vemos que para la componente h se alcanza un grado de acuerdo al nivel de centímetros. Con respecto al desplazamiento real inducido la discrepancia máxima se encuentra en torno a los 4 cm. El *offset* promedio es de 2,4 cm si comparamos el desplazamiento conocido con el calculado por la técnica PPP en tiempo real, siendo el cálculo que arroja resultados más aproximados a los reales el que corresponde al realizado en post-proceso con solución PPP e incluyendo ambas constelaciones GPS y GLONASS.

Los estudios pueden realizarse calculando variaciones respecto a las coordenadas del punto de referencia, pero como se ha podido observar en la mayoría de los casos, si lo que realmente interesa es obtener la variación que ha sufrido la zona, se obtienen mejores precisiones trabajando con valores relativos. Hemos visto que así, el desplazamiento detectado con la técnica e instrumental utilizado en tiempo real, para la componente planimétrica y la altimétrica tiene una precisión que se puede cifrar entre 1.5 y 2 cm, (valores a 1σ), y en algún caso se puede detectar deformaciones correspondientes a magnitudes de 5 cm con bastante aproximación.

No obstante, para poder trabajar con valores relativos se tiene que tener en cuenta que en este estudio el cambio se produce de forma muy rápida, (en pocos segundos), y no gradualmente en el tiempo. Con ello, los errores que existen antes del desplazamiento se mantienen similares en valor y signo tras el movimiento. En deformaciones o deslizamientos más dilatados en el tiempo ha podido demostrarse por diversos autores que también es posible la determinación de la magnitud del desplazamiento con la técnica PPP pero solo en post-proceso, (Sánchez-Alzola et al., 2014), (Wang, 2013). Por lo tanto una posible vía de trabajo a desarrollar es la determinación en tiempo real para ventanas más prolongadas, (de varios meses o años), empleando sistemas de monitorización y visualización continua similares al diseñado en el capítulo 10.

11.4.1. Determinación del desplazamiento con PPP en tiempo real frente a la determinación por dobles diferencias con productos de alto-ratio.

De unos años a esta parte se han orientado los esfuerzos por parte de diversos centros de análisis, hacia la obtención de productos de alto-ratio. Entre ellos, cabe citar los productos de alto ratio a 5 segundos, que se encuentran disponibles con una o dos semanas de latencia para el caso de los productos generados por el CODE *(Center for Orbit Determination in Europe*), donde se representan tabulados los estados de reloj e interpolados a 5 segundos basándose en la solución de fase. Los productos se encuentran en el marco IGS08, y en ellos se han incluido los valores *DCB (Differential Code Biases)* para los observables de código en el proceso de obtención.

La importancia de disponer de estos productos de alto-ratio, tanto finales como predichos, reside entre otras cosas en su potencial uso para aplicaciones cinemáticas, geodinámicas, determinación de deslizamientos o detección de movimientos por fenómenos sísmicos o vulcanológicos. En estos casos, las técnicas GNSS se encuentran interactuando, junto con otro tipo de sensores de movimiento, que permiten mediciones a alta frecuencia (hasta 200 Hz), pero que están sujetos a derivas rotacionales de los sensores o tensores, o fenómenos de histéresis. Por ello, la sinergia entre las técnicas GNSS y otros instrumentos sísmicos, es beneficiosa para diversas aplicaciones geofísicas debido a su carácter complementario.

Con determinados softwares científicos, la utilización de estos modelos de alto-ratio en post-procesamiento no resulta inmediata, al contrario de lo que sucede con otros productos finales del IGS de ratios más bajos. Para el procesamiento se disponía, en la época de realización de la investigación,

del software científico BERNESE 5.0 desarrollado por la Universidad de Berna, del cual posee licencia el departamento de Ingeniería Cartográfica de la Universidad Politécnica de Valencia. La estación de trabajo utilizada, constaba de un procesador Intel Core 2 Quad de CPU Q800 de 2.33 GHz con una RAM de 4 GB, y un sistema operativo de 32 bits.

Recompilación del software BERNESE 5.0, procesamiento y resultados.

Previamente al procesamiento, ha sido necesaria la re-programación de distintas librerías y rutinas en lenguaje Fortran, que constituye el lenguaje de programación del software BERNESE, para poder emplear productos de alto-ratio y por tanto poder aumentar el número de parámetros que intervienen en el cálculo. La re-compilación se llevó a cabo sobre una estación de trabajo con el sistema operativo Windows 7.

Para ello se reprogramó y se modificaron una serie de variables de entrada de las rutinas Fortran M_MAX_DIM.f90, MAXPAR, GTSCLK.f, RNXSMT.f que vienen con el software BERNESE. Las variables modificadas corresponden a MAXEPH, MAXREC, MAXSAS. La variable MAXEPH permite utilizar productos de reloj a un intervalo de muestreo mayor que los productos convencionales. La variable MAXSAS, nos permite incorporar en el procesamiento un número de satélites mayor que 15, que es el que trae la última actualización disponible de esta versión por defecto, en el caso en que queramos aprovechar con plena capacidad las constelaciones GPS y GLONASS. MAXREC permite incrementar el número de observaciones.

Para este tipo de cálculos, una de las rutinas de Fortran principales denominada P_GPSEST.f90, que incluye BERNESE 5.0, deber ser capaz de trabajar con el modelo de memoria asignado para Windows denominado LARGE, en el cual es posible incrementar el número de parámetros y variables a procesar (MAXLOC y MAXPAR), con respecto al modelo de memoria MEDIUM, que es el que viene por defecto con BERNESE 5.0.
P_GPSEST.f90 gestiona las dimensiones máximas de los arrays y parámetros que emplea otro de los sub-programas principales de BERNESE 5.0, denominado GPSEST.EXE, que realiza como funciones principales el procesamiento de las observaciones de código y fase, la estimación de ambigüedades, la creación de ecuaciones normales y el ajuste final mínimo- cuadrático. La variable MAXLOC permite incrementar el número de parámetros que intervienen en el cálculo, para los cuales, existe otro valor, MAXPAR que indica los que son procesados simultáneamente. Estas modificaciones del número de parámetros son muy importantes si lo que se desea es realizar un cálculo época a época cinemático para ver la evolución de la solución, convergencia y desplazamiento detectado con productos de alto ratio.

Posteriormente a la modificación del código del software BERNESE 5.0, se llevó a cabo la re-compilación de las rutinas Fortran con la herramienta Lahey- Fujitsu Fortran 7.3. La re-compilación es posible por línea de comandos, y una vez efectuada, como salida se generan nuevos ficheros binarios (.exe) que constituyen el motor del software científico modificado y adaptado al análisis a efectuar.

De esta manera con la versión de BERNESE 5.0 modificada, el procesamiento efectuado con dobles diferencias tiene las siguientes características:

-Coordenadas en el marco IGb08, de las estaciones permanentes más cercanas. Se incluyen estaciones clase A de EUREF, como VALE, BORR y ALAC, y otras más cercanas clase B, como VCIA. Se emplean productos en el marco global vigente.

-Productos de alto ratio procedentes del CODE. Con el fin de conseguir la mayor consistencia posible entre todos los modelos utilizados en el procesamiento, se emplean parámetros de orientación de la tierra, (erp), generados por el mismo organismo. También se dispone de modelos ION producidos por el CODE.

-Como calibración de antenas se emplea el modelo igs08.atx, idéntico a las pruebas de campo que además, es el mismo modelo que emplea el CODE para el procesamiento realizado con el fin obtener sus productos de alto ratio y otros productos para procesamiento científico.

-Si lo que se desea es una solución de dobles diferencias, primero debe obtenerse el procesamiento con la solución Φ_3, (L_3 en BERNESE), sin pre-eliminar ambigüedades flotantes, con el fin de obtener el

fichero de residuos de las observaciones. Con esta información puede procederse a depurar las observaciones de campo, sobre todo del *rover* con el que se efectúa la simulación del desplazamiento. En segundo lugar se genera una solución libre de ionosfera, también con la solución Φ_3, pre-eliminando las ambigüedades del sistema de ecuaciones normales. En el procesamiento la máscara de elevación se fija igual que en la campaña de campo en tiempo real.

Finalmente, se procede a realizar un último procesamiento, con la solución de dobles diferencias con las frecuencias L1, L2. Se establece el constreñimiento a las estaciones seleccionadas, y se obtiene la solución con ambigüedad de fase fija. En el caso en que la solución en dobles diferencias se necesite época a época en modo cinemático, el proceso final con BERNESE 5.0, requiere que se utilice la solución de dobles diferencias, pero con la solución L_3 e indicando la no pre-eliminación de determinados parámetros a determinar para cada época, es decir, las coordenadas cinemáticas del punto.

-Por último, tras la obtención de las coordenadas, se lleva a cabo la transformación al marco del usuario ETRF2000 siguiendo las especificaciones vigentes para marcos de referencia para campañas GNSS, (Boucher -Altamimi, 2011), publicadas en http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf.

Para la componente horizontal se incluye el rendimiento que ofrecen las soluciones de dobles diferencias determinadas con este último procesamiento para cada campaña, a través de los estadísticos resultado de comparar el desplazamiento real con el calculado:

	Estadísticos en dobles diferencias (m) de la serie de desplazamientos. Productos de alto-ratio
μ	0,00770
σ	0,00823
MÁXIMO	0,01422
MÍNIMO	0,00133

Tabla 11.17: Estadísticos de los desplazamientos medidos con dobles diferencias con productos de alto-ratio. Componente horizontal

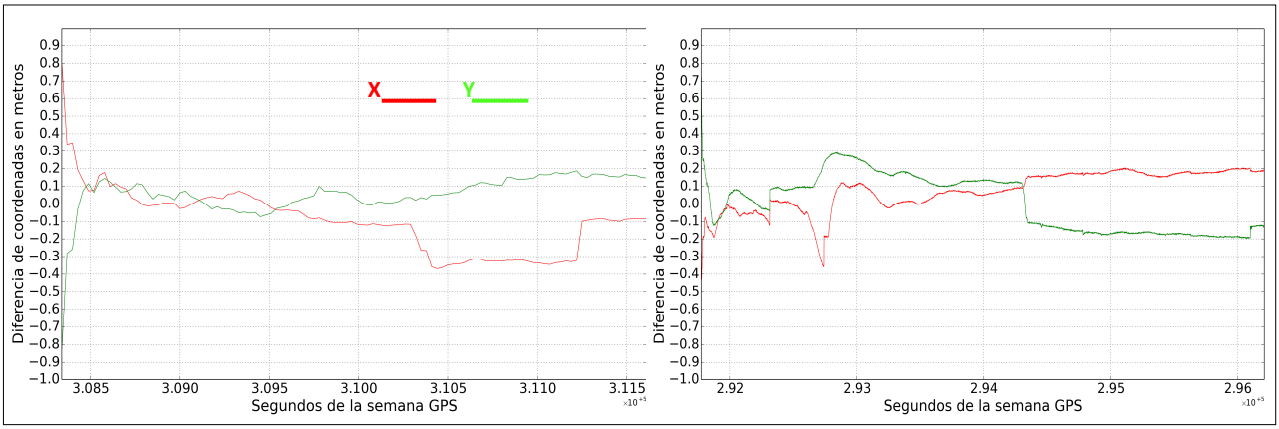


Figura 11.37: Desplazamientos detectados con dobles diferencias en dirección E, y en dirección N,E. Doy107/2013, Doy142/2013

De manera análoga se calcula para los desplazamientos inducidos en la componente vertical:

	Estadísticos en dobles diferencias (m) con productos de alto-ratio de la serie de desplazamientos medidos
μ	0,00896
σ	0,01120
MÁXIMO	0,01266
MÍNIMO	0,00220

Tabla 11.18: Estadísticos de los desplazamientos medidos con dobles diferencias con productos de alto-ratio. Componente vertical.

Con respecto al desplazamiento real evidentemente ofrece mejores resultados el cálculo con dobles diferencias, pero existe un grado de acuerdo razonable con las anteriores soluciones, si consideramos los desplazamientos obtenidos en PPP como valores relativos. Para la componente horizontal el grado de acuerdo entre el *offset* de esta solución y las anteriores se encuentra de nuevo al nivel del centímetro, mientras que para un desplazamiento altimétrico sucede prácticamente lo mismo.

La base del método con PPP en tiempo real, reside sobre todo, en la capacidad de disponer de una solución que haya alcanzado la convergencia, a ser posible con pocas pérdidas de solución para un determinado umbral, y disponer de rastreo GPS+GLONASS como mínimo, puesto que añade robustez a la solución. La recuperación de ambigüedades fijas de fase para este tipo de aplicación, es muy útil, (Capítulo 7), ya que compensa las pérdidas de convergencia de la solución debido a factores externos (*multipath*, peor rastreo de satélites, falta de productos por una mala latencia), y será esencial la aplicación de modelos estandarizados de correcciones ionosféricas en un futuro para garantizar inicializaciones más rápidas. También es necesario monitorizar el modelo utilizado, y tener un sistema paralelo para diferenciar la pérdida de precisión debida a los *outliers* de los productos en tiempo real, (mediante indicadores o avisos), con respecto a un verdadero deslizamiento o deformación.

Capítulo 12:
Conclusiones, discusión y perspectivas futuras.

Si bien se han llevado a cabo varios análisis e implementaciones, donde las mejoras alcanzadas y vías de desarrollo quedaban patentes en cada capítulo, se procede a continuación a inferir de manera global las siguientes líneas de trabajo y perspectivas, para proporcionar una visión más amplia de las aportaciones de esta investigación.

Como se ha podido comprobar, los modelos de correcciones actuales para obtener una solución con la técnica Precise Point Positioning, (PPP), en tiempo real, las implementaciones efectuadas y los avances en el proceso de aproximación a la naturaleza entera de las ambigüedades, han supuesto una mejora sustancial para la evolución de la técnica. Tal es la situación, que cabe preguntarse si nos encontramos ante una precisión que va a alcanzar a la del posicionamiento relativo y en qué plazo puede presentarse esta situación. De entrada, el hecho de trabajar con la técnica PPP reduce los costes de observación, ya que únicamente es necesaria la observación con un único receptor, el del usuario.

-En cuando al rendimiento de la técnica PPP en tiempo real veíamos que es posible alcanzar *offsets* en soluciones época a época con los modelos más avanzados de 2-3 cm en las componentes N,E, en un 99% de los casos estudiados y de 6-7 cm para h en los mismos casos, con desviaciones estándar 1σ de 5 cm (N,E,) y 8 cm (h), y en ocasiones, incluso más óptimas.

-Con la exhibición práctica implementada del método de recuperación del carácter entero de las ambigüedades de fase para todas las frecuencias, aplicando el *bias* de fase generado para los modelos, es posible una mejora promedio en precisión de 3 -4 cm, que en algunos casos alcanza hasta los 10 cm de diferencia en el sesgo de la solución. Cuando interviene la ambigüedad entera, las pérdidas de convergencia por encima de los 5 cm se cifran en un número promedio de 20 cada 24 horas en xy para periodos de observación continua en tiempo real y 170/día para h, frente a 81/día (xy) y 250/día (h) sin el método de resolución de ambigüedades. Por encima de los 10 cm, lógicamente, aún es mejor el rendimiento, sufriendo solo 1 pérdida como promedio cada 24 horas en X,Y, y 43 cada 24 horas en h, frente a 9/día (xy) y 96/día (h) para la solución PPP estándar. En lo referente a la vía de trabajo a seguir, esta debe basarse en el estudio de la mejora de los tiempos de convergencia e inicialización, y debe ir de la mano del siguiente paso, que consiste a corto plazo en la explotación de los modelos que contienen las correcciones ionosféricas de la componente VTEC[1] de muy reciente estandarización.

Hay que recalcar que la fase 3 del desarrollo del estándar es la última en abordar, por parte del RTCM Working Group, enfocada a la definición de la estandarización donde se contempla la inclusión de mensajes *Slant-TEC* para correcciones ionosféricas, como se ha explicado en el capítulo 3. A medio y largo plazo es fundamental investigar en la optimización de este aspecto, y en la estandarización del vector de estado de modelos troposféricos de baja latencia y en tiempo real. Estos a su vez, también se pueden enriquecer tomando como predicción los modelos y estimaciones del contenido de vapor de

[1] *Vertical Total Electron Content*

agua que consideran efectos más locales, procedentes de los cálculos horarios de proyectos como EGVAP[2] reseñado en el capítulo 1.

-Un modelo robusto combinado, como los elaborados en este trabajo, mejora los resultados de la combinación oficial del IGS[3] en 5 cm en las componentes N,E y hasta 10 cm en h y acorta su tiempo de inicialización (apartado 8.2.). Adicionalmente, supone menos pérdidas de convergencia, disminuyendo la edad de las correcciones del modelo del IGS. Es cierto, que puede empeorar la precisión ligeramente respecto al producto de un solo centro de análisis, pero evita las pérdidas de solución por los *outliers* de un solo modelo. El rendimiento aún puede depurarse conociendo valores realistas de las varianzas de los productos determinados por los centros de análisis en todo momento, (es decir enviadas con el propio *stream* de datos en tiempo real), que intervienen en la combinación a través del filtro Kalman. Es fundamental insistir en las ventajas demostradas de un adecuado control de *outliers* de los modelos que intervienen en la combinación (apartado 8.1), por lo que es necesario continuar en esta vía de trabajo.

-Una de las fortalezas de la técnica para PPP en tiempo real es el ratio de las observaciones y los productos. Tradicionalmente, una de las limitaciones de los productos del IGS y de los centros de análisis para post-procesamiento en determinadas aplicaciones, ha sido el ratio de generación de los modelos de efemérides y de relojes. Esta situación está evolucionando, pero puede beneficiarse de las investigaciones que se están realizando. En lo referente a la inicialización o si la comparamos con la conocida técnica RTK[4] para tiempo real, es lógico afirmar que todavía tiene gran margen de recorrido, y por tanto deben tenerse en cuenta las mejoras alcanzadas en el presente trabajo que contribuyen a que la técnica alcance un rendimiento competitivo.

-Por otro lado, con los avances técnicos actuales, junto con la disminución de los costes en la adquisición de datos, se ha conseguido un incremento en la inmediatez y accesibilidad a los datos GNSS para la comunidad científica y el usuario en general, con flujos de datos continuos a alto ratio e información específica que llega en cuestión de minutos o segundos al usuario, en lugar de en meses o días. Estos datos proporcionan la oportunidad de observar procesos del sistema terrestre a medida que ocurren con un mayor detalle. El principal beneficio de los datos obtenidos para aplicarlos con la técnica PPP en tiempo real es que la alta velocidad de transmisión de la información contribuye a la mejora de la resolución temporal en las observaciones de los procesos naturales. Por este motivo tiene un impacto como herramienta de apoyo para las observaciones geofísicas (por ejemplo, con las redes sismológicas), la propagación de las ondas sísmicas, erupciones volcánicas, efectos por deshielo, o deslizamientos de tierras.
Se ha demostrado que esta técnica tiene un gran potencial futuro, ya que puede hacerse un seguimiento en tiempo real para detectar posibles movimientos que puedan sufrir áreas determinadas, y ayudar a construir sistemas de alerta temprana para el momento en que suceda un fenómeno de estas características. En el caso de estudio reseñado, vemos que hablando en términos relativos, la técnica PPP en tiempo real, arroja precisiones promedio de 2 cm para detectar deslizamientos, y con respecto a los valores reales los *offsets* resultaban ser parejos al nivel de centímetros.

-En cuanto a las herramientas implementadas en esta investigación con código abierto y software libre multi-plataforma, se abre una perspectiva importante para la incorporación del cálculo con esta técnica a varios tipos de plataformas y dispositivos móviles. Los equipos GNSS comerciales todavía se encuentran limitados en la decodificación y aplicación del estándar RTCM-SSR *(State Space Representation)*, pero con las librerías desarrolladas, la integración diseñada y llevada a la práctica a lo largo del trabajo, que aplica los modelos sobre el *streaming* de datos de un receptor o placa GNSS embebida en un dispositivo móvil, sí que es posible, como se ha demostrado.

Un ejemplo de integración se podría realizar fácilmente en los *smart-phones* o *tablets*, ello proporciona grandes expectativas para utilizar un posicionamiento preciso con un solo receptor a otro tipo de aplicaciones con un rendimiento hasta ahora inimaginable. No sólo a las que se han citado en este trabajo, sino también a otros ámbitos como los de los servicios basados en localización (LBS[5]), para humanos, para logística o para guiado agrícola. Un receptor de una sola frecuencia, (utilizado en alguna de estas aplicaciones), va a ser en breve capaz de corregir su posición alcanzando un grado de

[2] *EUMETNET GNSS Water Vapour Programme*
[3] *International GNSS Service*
[4] *Real Time Kinematics*
[5] *Location Based Services*

precisión no visto hasta ahora por sí solo, si los modelos emitidos en tiempo real en el estándar RTCM-SSR son capaces de transportar la información de los retardos no calibrados, los productos combinados optimizados como los que se han implementado, así como las ampliaciones de los modelos de correcciones ionosféricas para receptores de una sola frecuencia.

Es necesario insistir que estas investigaciones abren muchas más posibilidades incluso en la integración de la técnica con plataformas del tipo UAV[6], para su inclusión en un amplio abanico de trabajos. Para aplicaciones que requieran un cálculo cinemático en tiempo real, en los siguientes gráficos podemos observar el rendimiento que nos ofrecerían actualmente las distintas técnicas para un cálculo época a época, como es el caso de un control con un vehículo aéreo no tripulado o telemetría y seguimiento de un móvil en una zona aislada.

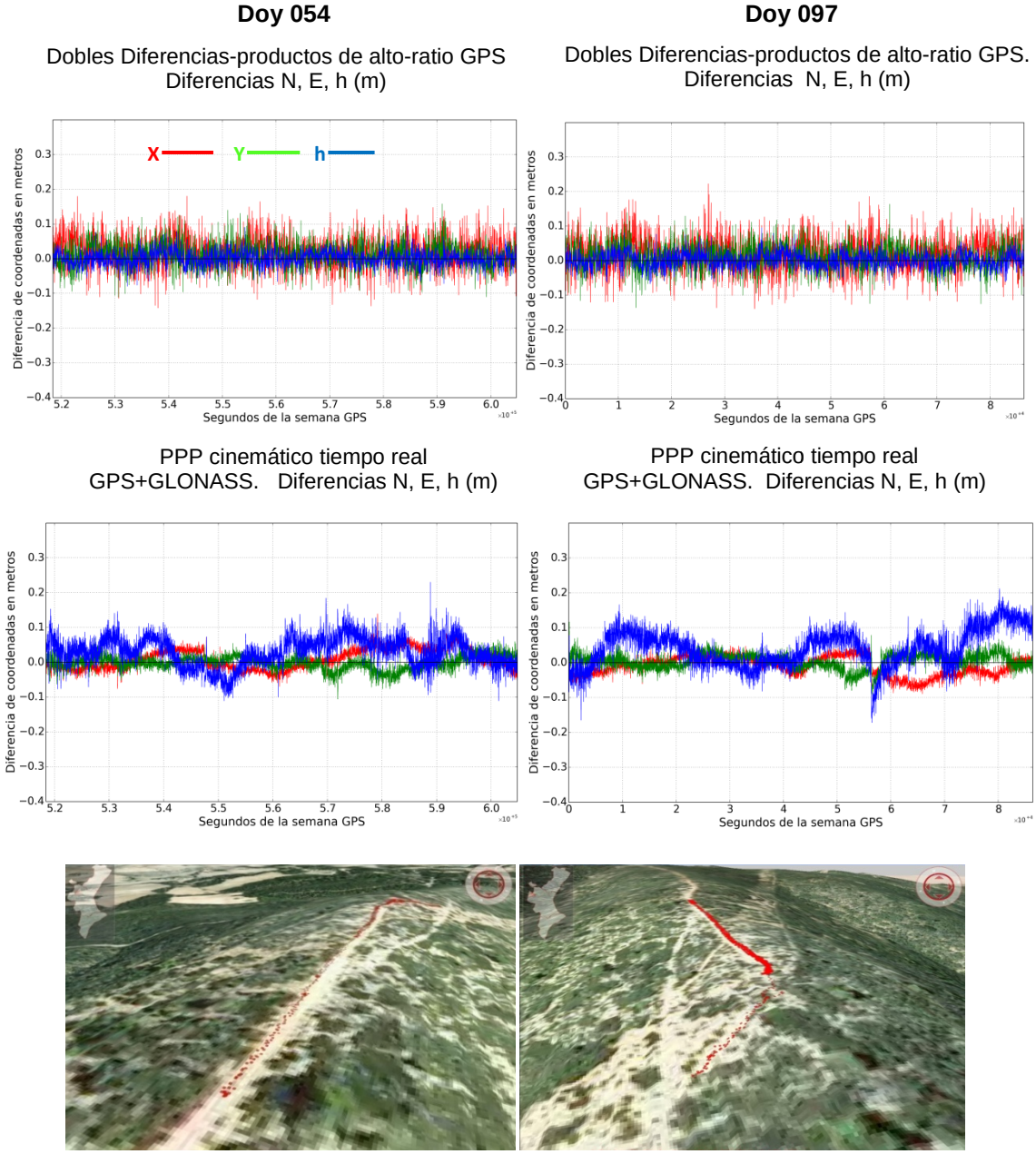


Figura 12.1: Ejemplo de observación cinemática con PPP en dispositivo móvil integrado

[6] *Unmanned Aerial Vehicle*

-En cuando a la revisión realizada del estándar RTCM –SSR y aspectos de mejora detectados, cabe citar la inclusión de más indicadores de integridad y precisión de los modelos. Para ello es fundamental, a través de una ampliación del estándar, la emisión continua de las varianzas realistas actualizadas asociadas a las componentes del vector de estado por parte de los centros de análisis. También es fundamental, como se ha demostrado, la inclusión en el *streaming* de parámetros de cambio de marco propagados a la época de observación en tiempo real.

-El rendimiento de los productos, se incrementa en sobremanera en el atractivo escenario multi-constelación hacia el que caminamos a nivel global y regional. Así se ha podido verificar en la respuesta de cada test a los tiempos de inicialización y recuperación de la solución PPP dentro de un determinado umbral. Los productos de constelaciones como GALILEO están en una fase temprana de desarrollo y de establecimiento de tácticas homogéneas para su obtención, por lo que su utilización, de momento, no proporciona mejorías sustanciales más allá de aportar mayor estabilidad y continuidad en la solución. No obstante, si se extrapolan los resultados obtenidos con las constelaciones GPS y GLONASS a unos productos operativos para todas las constelaciones, los resultados con PPP en tiempo real podrán optimizarse de forma significativa en un futuro. En este contexto existen más tipos de satélites diseñados, (GPS III, GLONASS-K, GALILEO FOC[7], etc..), sensibles a efectos que deberán ser bien modelados y/o conocidos, a la hora de generar los productos.

-Es necesario promover que la subcomisión de EUREF sea proveedor de servicios PPP proporcionando información que lleve directamente a un resultado en el marco regional ETRF[8] en lugar de una solución en el marco ITRF[9]. El desarrollo de este servicio debe llevarse a cabo a partir de una solución combinada optimizada como las propuestas con el fin de evitar al máximo las discontinuidades o latencias excesivas. Un desarrollo más extenso de la tecnología tendrá, como hoja de ruta en un futuro, promover la coordinación de servicios en Europa y a nivel nacional, para la determinación de productos PPP robustos, que modelen efectos más locales, escalables y el desarrollo de servicios más sostenibles.

[7] *Full Operational Capability*
[8] *European Terrestrial Reference Frame*
[9] *International Terrestrial Reference Frame*

Anexo I

1. Próximos lanzamientos 2015 y estado actual de las constelaciones

Upcoming GNSS Satellite Launches				
System	**Satellite**	**Launch Site**	**Launch Date (UTC)**	**Launch Time (UTC)**
IRNSS	IRNSS-1D GEO	Sriharikota	NET 15 March 2015	TBD
GPS	**IIF-9**	**Cape Canaveral**	**25 March 2015**	**TBD**
Galileo	FOC FM3, FM4	Kourou	26 March 2015	TBD
IRNSS	**IRNSS-1E GEO**	**Sriharikota**	**NET April 2015**	**TBD**
GLONASS	3 GLONASS-M	Baikonur	April/May 2015	TBD
GPS	**IIF-10**	**Cape Canaveral**	**16 June 2015**	**TBD**
GPS	IIF-11	Cape Canaveral	16 September 2015	TBD
Galileo	**FOC FM5, FM6**	**Kourou**	**Fall 2015**	**TBD**
Galileo	FOC FM11, FM12, FM13, FM14	Kourou	Late 2015	TBD
WAAS	**Eutelsat 117W B**	**Cape Canaveral**	**Late 2015**	**TBD**

Updated: 12 January 2015

Tabla 1: Próximos lanzamientos 2015. http://gpsworld.com/resources/upcoming-gnss-satellite-launches/ . (Langley, 2015. Visitado Enero 2015)

Desglose actual satélites GPS 01/2015

Plane	Slot	SVN	PRN	Block-Type	Clock	Outage Date	Nanu-Type	Nanu-Subject
	0		8					
A	1	65	24	IIF	CS			
A	2	52	31	IIR-M	RB			
A	4	48	7	IIR-M	RB			
A	6	64	30	IIF	RB			
B	1	56	16	IIR	RB			
B	2	62	25	IIF	RB			
B	3	44	28	IIR	RB			
B	4	58	12	IIR-M	RB			
C	1	57	29	IIR-M	RB			
C	2	66	27	IIF	RB			
C	3	59	19	IIR	RB			
C	4	53	17	IIR-M	RB			
D	1	61	2	IIR	RB			
D	2	63	1	IIF	RB			
D	3	45	21	IIR	RB			
D	4	34	4	IIA	RB			
D	5	46	11	IIR	RB			
D	6	67	6	IIF	RB			
E	1	69	3	IIF	RB			
E	1	51	20	IIR	RB			
E	2	47	22	IIR	RB			
E	3	50	5	IIR-M	RB			
E	4	54	18	IIR	RB			
E	5	23	32	IIA	RB			
E	6	40	10	IIA	CS			
F	1	41	14	IIR	RB			
F	2	55	15	IIR-M	RB			
F	3	43	13	IIR	RB			
F	4	60	23	IIR	RB			
F	5	26	26	IIA	RB	05 JAN 2015	UNUSUFN	2015004 - SVN26 (PRN26) UNUSABLE JDAY 005/1750 - UNTIL FURTHER NOTICE
							DECOM	2015005 - SVN26 (PRN26) DECOMMISSIONING JDAY 006/2200

Tabla 2: Estado de la constelación GPS (www.gps.gov. Visitado: Enero de 2015)

Desglose actual de satélites GLONASS

Orb. slot	Orb. pl.	RF chnl	# GC	Launched	Operation begins	End	Life-time (months)	Satellite health status		Comments
								In almanac	In ephemeris (UTC)	
1	1	01	730	14.12.09	30.01.10		61.2	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
2	1	-4	747	26.04.13	04.07.13		20.8	+	+ 13:00 20.01.15	In operation
3	1	05	744	04.11.11	08.12.11		38.6	+	+ 14:01 20.01.15	In operation
4	1	06	742	02.10.11	25.10.11		39.6	+	+ 14:01 20.01.15	In operation
5	1	01	734	14.12.09	10.01.10		61.2	+	+ 14:01 20.01.15	In operation
6	1	-4	733	14.12.09	24.01.10		61.2	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
7	1	05	745	04.11.11	18.12.11		38.6	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
8	1	06	743	04.11.11	20.09.12		38.6	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
9	**2**	**-2**	**736**	**02.09.10**	**04.10.10**		**52.6**	**+**	**+ 12:59 20.01.15**	**In operation**
10	2	-7	717	25.12.06	03.04.07		96.9	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
11	2	00	723	25.12.07	22.01.08		84.9	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
12	2	-1	737	02.09.10	12.10.10		52.6	+	+ 13:30 20.01.15	In operation
13	2	-2	721	25.12.07	08.02.08		84.9	+	+ 14:00 20.01.15	In operation
14	2	-7	715	25.12.06	03.04.07		96.9	+	+ 14:00 20.01.15	In operation
15	2	00	716	25.12.06	12.10.07		96.9	+	+ 14:01 20.01.15	In operation
16	2	-1	738	02.09.10	11.10.10		52.6	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
17	**3**	**04**	**746**	**28.11.11**	**23.12.11**		**37.8**	**+**	**+ 12:59 20.01.15**	**In operation**
18	3	-3	754	24.03.14	14.04.14		9.9	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
19	3	03	720	26.10.07	25.11.07		86.9	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
20	3	02	719	26.10.07	27.11.07		86.9	+	+ 13:31 20.01.15	In operation
21	3	04	755	14.06.14	03.08.14		7.2	+	+ 14:01 20.01.15	In operation
22	3	-3	731	02.03.10	28.03.10		58.7	+	+ 14:00 20.01.15	In operation
23	3	03	732	02.03.10	28.03.10		58.7	+	+ 14:01 20.01.15	In operation
24	3	02	735	02.03.10	28.03.10		58.7	+	+ 12:59 20.01.15	In operation
09	2		702	01.12.14			1.6			Flight Tests
20	3	-5	701	26.02.11			46.8			Flight Tests
17	3		714	25.12.05	31.08.06	11.04.14	108.9			Spares
21	3		725	25.09.08	05.11.08	02.08.14	75.9			Under check by the SPC
8	1		712	26.12.04	07.10.05	22.11.12	120.9			Spares

Tabla 3: Estado de la constelación GLONASS (http://glonass-iac.ru/en/GLONASS/). Visitado: Enero de 2015)

Desglose actual de satélites Beidou

Common Name	SVN	Int. Sat. ID	NORAD ID	PRN	Notes
BEIDOU M1	C001	2007-011A	31115	C30	Suspected clock problems
BEIDOU G2	C002	2009-018A	34779	n/a	Inactive uncontrolled
BEIDOU G1	C003	2010-001A	36287	C01	140.0° E
BEIDOU G3	C004	2010-024A	36590	C03	110.5° (moved from 84.0° to new position)
BEIDOU G4	C005	2010-057A	37210	C04	160.0° E
BEIDOU IGSO 1	C006	2010-036A	36828	C06	~120° E
BEIDOU IGSO 2	C007	2010-068A	37256	C07	~120° E
BEIDOU IGSO 3	C008	2011-013A	37384	C08	~120° E
BEIDOU IGSO 4	C009	2011-038A	37763	C09	~95° E
BEIDOU IGSO 5	C010	2011-073A	37948	C10	~95° E
BEIDOU G5	C011	2012-008A	38091	C05	58.75° E
BEIDOU M3	C012	2012-018A	38250	C11	
BEIDOU M4	C013	2012-018B	38251	C12	
BEIDOU M5	C014	2012-050A	38774	C13	
BEIDOU M6	C015	2012-050B	38775	C14	
BEIDOU G6	C016	2012-059A	38953	C02	80.3°E

Tabla 4: Status constelación Beidou, www.igs.org. Visitado Junio 2014

2. Descripción del formato RTCM.

Hay gran variedad de formatos propietarios para la transmisión de observaciones y correcciones diferentes según el fabricante del equipo GNSS. Por la diversidad de formatos y por la necesidad de aprovechar la misma base por receptores de diferentes marcas, se decidió definir un formato estándar. La Radio Technical Comisssion for Maritme Services, (www.rtcm.org), es una organización internacional formada por empresas científicas, profesionales y universidades, tanto públicas como privadas, que se encarga de informar y de desarrollar diferentes Normas Técnicas para sistemas de radionavegación, radiocomunicación, señales de emergencia o transmisión de información. En 1947 comenzó como un Comité Consejero del gobierno de los EEUU, pero en la actualidad es una organización independiente que da soporte a diferentes sistemas de navegación y posicionamiento en tiempo real.

Se compone de más de 100 miembros en todo el mundo, incluyendo fabricantes de sistemas de radionavegación y radiocomunicación, agencias gubernamentales con interés en estándares y desarrollos para radionavegación marítima y radiocomunicaciones, operadores y dueños de servicios marítimos, instituciones educativas y proveedores de servicios.

Dispone de varios comités especiales que elaboran normas internacionales para la radionavegación marítima y las radiocomunicaciones. Para el caso de correcciones diferenciales GNSS está el comité SC-104 encargado de su desarrollo. El protocolo más actual de transmisión vía internet es el NTRIP, (Network Transport of RTCM vía Internet Protocol), y las correcciones se transmiten en el formato estándar RTCM-SC104.

Contenido del formato

Formato estándar en que se envían las correcciones en tiempo real para las aplicaciones DGPS/RTK. Está disponible en casi todos los navegadores y receptores GNSS. La trama es similar para todas las versiones y cada registro de datos contiene varios tipos de mensajes. Cada mensaje tiene un tamaño de n+2 palabras de 30 bits cada una, 2 palabras para la cabecera y n para los datos.

El encabezado contiene el tipo de mensaje, el identificador de la estación de referencia, la hora a la que es generada la corrección, el número de secuencia, la longitud del mensaje y la salud de la estación de referencia, en cambio el cuerpo contiene los datos correspondientes a cada tipo de datos.

Las primeras versiones del formato, aceptaban mensajes que realizaban correcciones de pseudodistancias por medio de observaciones del código C/A. Posteriormente se han efectuado modificaciones, apareciendo nuevas versiones (Souto et al., 2010) .

Toda la información necesaria puede transmitirse con un ancho de banda ≤1.200 bits/sg (según el ratio de datos y el número de satélites, el ancho puede reducirse a 100bps). Desde finales de los años 90, es posible realizar correcciones de fase y así, resolver ambigüedades en la estación móvil, necesario para resolver la posición mediante RTK (Real Time Kinematics) y necesita, al menos, un ancho de banda de 4.800bps. La evolución de las distintas versiones RTCM se plasma a continuación.

- **RTCM 2.2:** Desde 1998, incluye los mensajes 31–36, incluye más información y la opción de transmitir correcciones de más sistemas GNSS, como GLONASS.
- **RTCM 2.3:** Desde 2001, contiene tipos de antena (mensaje 23) e información del punto de referencia de la antena o (ARP) (mensaje 24). Permite incluir datos de variación del centro de fase de la antena. Requiere 4.800 bps para la emisión de correcciones de código y fase en L_1 y L_2 de 12 satélites.
- **RTCM 3.0:** Pensado para trabajar en redes RTK, (reduce la cabecera de los mensajes para aumentar la velocidad de transmisión). La emisión de correcciones de código y fase en L_1 y L_2 para 12 satélites se envía con 1.800 bps.
- **RTCM 3.1:** Definida y publicada en los años 2007 y 2008. Diseñada para enviar correcciones de red (capítulo 3) y definir los mensajes portadores de transformaciones geodésicas. Se define el rango de mensajes 1021-1027 capaces de transmitir en tiempo real, transformaciones geodésicas entre marcos de referencia. La definición de estos nuevos mensajes con las especificaciones para

los sistemas de referencia de coordenadas, se establecen en el documento RTCM 010-2006-SC104-411 del estándar RTCM 10403.1 .

-RTCM-SSR: Representación del vector de estado vista en el capítulo 3**.**
-RTCM-MSM: Transmisión de observaciones multi-señal de todas las constelaciones GNSS vista en el capítulo 3.

3. Descripción del protocolo NTRIP.

Protocolo actual de transporte de correcciones diferenciales y observables GNSS, en formato RTCM a través de Internet. Desarrollado por el BKG, *(igs.bkg.bund.de),* junto con la universidad de Dortmund y basado en el protocolo Hyper Text Transfer Protocol 1.1 .

Es un protocolo no propietario y transmite correcciones diferenciales o cualquier otro tipo de datos GNSS a usuarios conectados a Internet, permitiendo conexiones simultaneas de PC, portátil, PDA a un mismo servidor. Soporta el transporte por conexiones inalámbricas o mediante redes GSM, GPRS o UTMS.

El flujo de datos es enviado a un servidor que hace posible el acceso a los mismos a través de Internet. Un usuario móvil puede acceder a las correcciones vía Internet con tarjeta móvil o radio modem GPRS, empleando un programa *cliente* que accede a la dirección IP del servidor. El flujo se transmite exclusivamente a través de un puerto abierto a todos los usuarios, así que los problemas habituales de firewall y proxies se eliminan. El puerto asignado por IANA, (Internet Assigned Numbers Authority), para este protocolo es el 2101.

Una arquitectura tipo para el transporte de datos NTRIP está compuesta por cuatro elementos: NtripSource, NtripServer, NtripCaster, y NtripCliente.

- NtripSource: receptor GNSS que genera flujos de datos DGPS-RTK (en una posición determinada) conectado a Internet. Puede consistir en varias estaciones de referencia GNSS que generan una solución de red.

- NtripServer: software del procesador del Centro de control que transfiere correcciones en formato RTCM desde un receptor GNSS (NtripSource) o solución de red, al sistema de difusión y repartidor de flujos (NtripCaster).

- NtripCaster: sistema de difusión y repartidor de datos. Software de un servidor HTTP, (situado en el centro de control de la red), que actúa como un nodo distribuidor entre el NtripServer y el NtripCliente. También chequea la calidad e integridad de los datos e identifica a los usuarios con su nombre y clave.

Para recibir el flujo de datos desde el NtripServer contiene una lista de puntos de acceso o mountpoints para proveer al NtripCliente de varios tipos de correcciones o de correcciones de distintas estaciones. Se encarga de definir los mountpoints y, cada uno de ellos es único.

- NtripCliente: software cliente de los receptores de datos o para PC, MAC, Laptop o Tablet, que permite acceder a la lista de mountpoints del NtripCaster y, por selección en la lista, poder recibir las correcciones diferenciales que envía el NtripServer y aplicarlas al móvil. Cada cliente sólo necesita saber el nombre del mountpoint de la secuencia de datos que desea, para seleccionarlo.

Este último viene instalado actualmente en los controladores GNSS actuales por defecto, así que con introducir la dirección IP del Centro de Control para recibir las correcciones, el usuario y password asignados y conectarse al NtripCaster es suficiente. La conexión del receptor GNSS a internet puede realizarse mediante una conexión Bluetooth a un móvil, mediante un cable desde el puerto serial del receptor al móvil, mediante una tarjeta GPRS insertada o mediante WIFI.

Para algunos casos, es necesario enviar la posición del NtripCliente al NtripCaster en formato NMEA, que puede emplearla para proporcionar una secuencia de datos a la solución de red RTK o para determinar la mejor secuencia de datos para transmitir. NTRIP permite a los clientes enviar cadenas NMEA después de la petición http para una secuencia de datos. Si el parámetro <nmea> se activa a “1” en el mountpoint o servicio, el NtripCaster debe recibir al menos, una cadena NMEA GGA.

4. Descripción del estándar NMEA (National Marine Electronics Association)

El estándar de NMEA, (www.nmea.org), define un protocolo de datos para comunicaciones de posiciones entre la instrumentación de navegación.

En concreto el estándar NMEA-0183 contiene datos que se transmiten en forma de "sentencia", donde cada una puede llegar a contener 82 caracteres. Hay dos tipos de sentencias cuyos formatos son:

- Sentencia normal: $, seguido de 2 caracteres de identificación del emisor, 3 de identificación del tipo de sentencia, campos de datos separados por comas, con la fecha, coordenadas geodésicas en un formato propio y otros campos optativos, retorno de carro y una feed line.

- Sentencia propietaria: definidas por el fabricante: $P, 3 caracteres de identificación de la casa, datos que el fabricante desee, seguido del formato general de las sentencias normales.
  Entre los diferentes tipos de sentencias normales, la sentencia GGA da información sobre la posición con GNSS.

El formato NMEA contiene posiciones que pueden haber sido obtenidas con distintas técnicas de posicionamiento (GPS diferencial de código, RTK o PPP en tiempo real por ejemplo).
Una sentencia NMEA estándar que contenga estos mensajes, tiene la siguiente estructura:

$GPRMC,081412,A,5047.885,N,00421.515,E,,,070214,,*16
$GPGGA,081412,5047.8845085,N,00421.5145249,E,1,14,2.0,159.030,M,0.0,M,,*72
$GPRMC,081413,A,5047.884,N,00421.514,E,,,070214,,*17
$GPGGA,081413,5047.8844748,N,00421.5142679,E,1,14,2.0,158.783,M,0.0,M,,*7ª

La sentencia se va repitiendo según un intervalo de tiempo establecido, donde para la sentencia con el encabezado $GPRMC cada uno de sus doce valores indica lo siguiente:

1. Nombre de la sentencia en uso, RMC (Recommended mínimum sentence C)
2. Hora en tiempo UTC.
3. Estado, Activo A o nulo V.
4. Latitud
5. Posición de la latitud N o S.
6. Longitud
7. Posición de la longitud W o E
8. Velocidad… (en este caso no se ha registrado)
9. Angulo… (en este caso no se ha registrado)
10. Fecha.
11. Variación magnética (en este caso no se ha registrado)
12. Digito de validación de los datos, siempre empieza por *

Y para la sentencia $GPGGA cada uno de sus quince valores indica lo siguiente:

1. Nombre de la sentencia en uso, GGA (Global Position System Fix Data)
2. Hora en tiempo UTC.
3. Latitud.
4. Posición de la latitud N o S.
5. Longitud.
6. Posición de la longitud W o E.
7. Valor numérico para indicar el modo con el que se han obtenido las coordenadas:

    - 0: Invalido
    - 1: GPS fijo (SPS)
    - 2: DGPS fijo.
    - 3: PPS fijo.
    - 4: RTK.
    - 5: RTF flotante.

- 6: Estimado.
- 7: Entrada manual.
- 8: Simulación.
  ....

8. Número de satélites registrados.
9. HDOP
10. Altitud en metros sobre el nivel del mar.
11. Ondulación del geoide (sobre el nivel medio del mar) para el elipsoide WGS84.
12. Campo vacío, tiempo en segundos desde la última actualización en modo DGPS.
13. Campo vacío, número de identificación de la estación en modo DGPS.
14. Dígito de validación de los datos, siempre empieza por *

Bibliografía

Agrotis L., Dow, J., Garcia- Martinez, C., Ballereau, A., Alfaro, P., (2008): *Real Time GNSS Processing at ESOC: Infrastructure and Initial Results*. Proceedings International GNSS Service Workshop, 2008 Miami.

Agrotis L., Alfaro, P., Dow, J., Zandbergen,R., Svehla, D., Alexandre Ballereau, (2010): *ESOC's RETINA System and the Generation of the IGS RT Combination*. Proceedings International GNSS Service Workshop, Newcastle, UK, 28.06. – 02.07.2010.

Ahmed , F. (2010): *Evaluation of GNSS as a Tool for Monitoring Tropospheric Water Vapour*. Thesis of Master Degree of Science. Department of Earth and Space Sciences CHALMERS University Of Technology.Göteborg, Sweden, 2010.

Alegsa, L., (2014): *Diccionario de Informática y Tecnología*. http://www.alegsa.com.ar/ . Visitado: Noviembre 2014.

Allan, D.W., Hellwig, H., Kartaschoff, P., Vanier, J., Vig, J.,Winkler, G.M.R., Yannoni, N.F. (1988): *Standard Terminology for Fundamental Frequency and Time Metrology*. Proceedings 42nd Annual Freq. Control Symp, Baltimore, MD,June 1-4, 419-425.

Altamimi, Z., Sillard P., Boucher C., (2002): *ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters* . Journal of Geophysical Research: Solid Earth 107(B10):ETG 2–1—-ETG 2–19, 2002. ISSN 2156-2202.

Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher C., (2007): *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Volume 112, Issue B9, September 2007 .ISSN 2156-2202.

Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier L., Rebischung P., Lercier D.(2014): *Preparation for ITRF2013*. EUREF Symposium, Vilnius, June 4-6, 2014 .

Anquela, A., Martín, A., Berné, J., Padín, J., (2013): *GPS and GLONASS Static and Kinematic PPP Results*. J. Surv. Eng., 139(1), 47–58. ISSN (print): 0733-9453 ISSN (online): 1943-5428. Publisher: American Society of Civil Engineers.

Ashby, N.(2003): *Relativity in the Global Positioning System*. Living Reviews in Relativity, 6(1), 2003. doi: 10.12942/lrr-2003-1.

BeiDou (2011): *BeiDou Navigation Satellite System signal in space interface control document*. Technical report, China Satellite Navigation Office, 2011. http://wenku.baidu.com.

Berné, J.L., Garrigues, P., García-Asenjo, L., Baselga.S., (2008): *Descripción y aplicaciones de la base de calibración de la Universidad Politécnica de Valencia*. Congreso internacional de Ingenieria Geomática y topográfica. IX Congreso Nacional Topcart 2008 . Valencia , FEBRERO 2008.

Bertiger, W., Desai, S., Haines, B., Harvey , N., Moore, A., Owen, S., Weiss, J., (2010): *Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data*. Journal of Geodesy. May 2010, Volume 84, Issue 5, pp 327-337 . ISSN: 0949-7714 DOI 10.1007/s00190-010-0371-9.

Beutler, G., (2005): Methods of celestial mechanics volume II: application to planetary system, geodynamics and satellite geodesy. Springer Berlin Heidelberg, 2005. ISBN 978-3-540-40750-8. doi: 10.1007/b137725.

Beutler, G., Dach, R., Hugentobler,U., Montenbruck, O., Weber, G., Brockmann, E., (2014): *The System: GLONASS in April, What Went Wrong*. GPS World June 24, 2014 . ISSN: 1048-5104.

Bierman G.J., (1976): *Measurement Updating Using the U-D Factorization*. Automatica, Volume 12, Issue 4, July 1976, Pages 375–382 .

BKG, (2012): *BKG Ntrip Client (BNC) MANUAL. Versión, 2.7, 2.8,2.9, 2.10, 2.11*. Bundesamt für Kartographie Und Geodäsie . Frankfurt, Germany (2012).

Bock, Y., (2012): *California Spatial Reference Network (CSRN) Continuous GPS Stations (CGPS): Usage, Advantages and Limitations*. California land surveyors symposium, 2012

Boehm, J., Werl, B., Schuh, H., (2006): *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B2), 2006. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/2005JB003629.

Bosy, J., Szafranek, K., Wielgosz, P., Rohm, W., Figurski, M., Kaplon, J., Kroszczynski, K., Stepniak, K., Hadas, T., Wilgan, K., Nykiel, G., Sierny, J., Hordyniec, P., Paziewski, J., (2014): *GNSS and GNSS-met activities in POLAND*. COST ACTION ES1206 GNSS4SWEC MC & WG, Golden Sands, Bulgaria, 11 - 12 September 2014.

Boucher, C., Altamimi, Z., (2008): *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf Visitado: Enero 2013.

Boucher, C., Altamimi, Z., (2011): *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf . Visitado: Enero 2014.

Boy, J.,(2011): *A new and improved loading service for precise geodetic observations*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract #G53B-0906.

Bruyninx C., Becker, Stangl, G. (2001): *Regional Densification of the IGS in Europe Using the EUREF Permanent GPS Network (EPN)*. Phys. Chem. Earth, Vol. 26, No 6-8, pp.531-538

Bruyninx C., Habrich, H., Sõhne, W., Kenyeres, A., Stangl, G. , Võlksen, C. (2012): *Enhancement of the EUREF Permanent Network Services and Products*. Geodesy for Planet Earth, IAG Symposia Series, Vol 136, pp. 27-35, DOI 10.1007/978-3-642-20338-1_4

Burbidge, G. T. A., (2007): *Development of the navigation payload for the Galileo in-orbit validation (IOV) phase*. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2007, Sydney, Australia, 2007. The University of New South Wales.

Caissy, M., (2008): *Real-time Format Issues*. IGS Analysis Center Workshop 2008 - MiamiBeach, Florida, USA, June 2 - 6, 2008.

Caissy, M., Agrotis, L., Weber,G., Hernandez-Pajares, M., Hugentobler, U., (2012): *Innovation: Coming Soon. The International GNSS Real Time Service*. GPS World. June 1, 2012. 23 (6), 52

Caissy, M, Agrotis, L, Weber, G, (2013): *IGS Real Time Service meeting the needs of the IGS Real time PPP User Community*. PPP Workshop Otawa . Canada June 12-14 2013.

Cano, J.L., (2014): *Introducción a Python para científicos e ingenieros*. http://pybonacci.org/ . Visitado: Mayo 2014.

Cao, W., Hauschild, A., Steigenberger, P., Langley, R. B., Urquhart, L., Santos, M.,Montenbruck, O.,(2010): *Performance evaluation of integrated GPS/GIOVE precise point positioning*. Proceedings of the 2010 International Technical Meeting (ITM) of the Institute of Navigation, pp 540-552, 2010.

Capilla, R.M., Die, J, (2007): *Diseño, aplicaciones integradas y rendimiento de la red activa GPS/GNSS de Valencia*. 7 International Geomatic Week . Dep Legal: B 9432 2007. Febrero 2007 – Barcelona.

Capilla, R.M, Esteso E., Saa J.M., Palau A. (2008) : *The Active Geodetic Network of Valencian Community: E.R.V.A.* I International congress on Geomatic and Surveying Engineering, Valencia (Spain). Papers in CD.

Capilla, R.M. (2009): *Rendimiento y demanda de servicios GNSS autonómicos en el campo de la Geomática. Investigación y requisitos del Sistema Galileo.* Ponencia de la JORNADA GALILEO-ITACA –IV JORNADA SOBRE SERVICIOS DE MOVILIDAD. 22-23 de Abril de 2009. Valencia.

Capilla, R.M., Martín, A., Anquela, A.B., Berné, J.L.,Zaragoza, M. (2009): *Transporte NTRIP de transformaciones geodésicas y ondulaciones del geoide a través de mensajes RTCM 3.1 en redes GNSS locales y regionales.* REVISTA MAPPING, 136, 52-58.

Capilla, R.M., Martín, A., Anquela, A.B., Berné (2012): *Frame transformation and geoid undulation transfer to GNSS real time positions through the new RTCM 3.1 transformation messages.* Survey Review, 44(324), pp:30-36; Print ISSN: 0039-6265; Online ISSN: 1752-2706; http://dx.doi.org/10.1179/1752270611Y.0000000010

Chen J., Ge M., Vennebusch M., Gendt G., Rothacher M (2008): *GFZ prototype for GPS-based realtime deformation monitoring*. EGU 2008, Session G7. Vienna, Austria 13-18 April, 2008.

Chen J., Ge M., Dousa J., Gendt G. (2009): *Evaluation of EPOS-RT for Real-time Deformation Monitoring*. Journal of Global Positioning Systems (2009) Vol.8, No.1:1-5.

Chen, W., Hu, C., Gao. S., Chen, Y., Ding, X., (2009): *Error correction models and their effects on GPS precise point positioning*. Survey Review, 41(313), 238-252.

Collins, P. (2008): *Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities*. Proceedings of ION National Technical Meeting, the Institute of Navigation Inc., Fairfax, US, pp. 720-732, 2008.

CSNO (2011): *Report on the Development of BeiDou (COMPASS) Navigation Satellite System (V1.0)*. August 2011, URL: http://www.beidou.gov.cn/attach/2011/11/29/201111292061d0391c074ed0bee-7493617237c88.pdf . Visitado: Julio 2014

Curtis, H., (2005): *Orbital Mechanics for Engineering Students*. Chapter 5; Elsevier (2005) ISBN 0-7506-6169-0.

Dach, R., Schaer, S., Bock, H., Lutz, S., Beutler, G. (2010): *CODE's New Combined GPS/GLONASS Clock Product*. Proceedings of International GNSS Service IGS Workshop 2010, Newcastle upon Tyne, England.

Dai, L., S. Han, J. Wang, C. Rizos (2003): *Comparison of interpolation algorithms in network-based GPS Techniques*. Journal of Navigation, 2003. Vol. 54

De Lacy, M.C., Gil, A. J., Rodriguez-Caderot, G., Moreno, B.(2008): *A method to estimate the Ionospheric bias by using the new GNSS frequencies: an analysis of its theoretical accuracy in a PPP context*. Física de la Tierra (Editores M. Herraiz y B. de la Morena). Vol. 20, pp. 133-150 (2008).

De Smet, P., (2013): *Galileo and EGNOS Programmes DG Enterprise & Industry* . European Commission ENP countries meeting, Brussels, 3 December 2013

Dettmering,D., Söhne W.,, Franke, P,. Weber G. (2007): *The use of GNSS real-time data streams for geodetic applications – first results and perspectives.* EGU General Assembly, Vienna, April 16, 2007

Dousa J. (2008): *Eficient dissemination of the orbit predictions in real-time.* IGS Analysis Center Workshop 2008 - MiamiBeach,Florida, USA, June 2 - 6, 2008.

Douša, J., Václavovic, P., Györi, G., (2012): *G-Nut Software Library Development and its Application Examples*. EUREF Symposium, Paris,June 5-7, 2012

Dow, J., Neilan, R., Rizos, C. (2009): *The International GNSS Service in a changing landscape*

of Global Navigation Satellite Systems. Journal of Geodesy (2009) 83:191–198
DOI 10.1007/s00190-008-0300-3

El Assir, R., (2012): *Global Navigation Satellite Systems and Their Applications*. MICROWAVE JOURNAL Volume: 55. Edition: 5 May, 2012.

ESA-CNES-ARIANESPACE/Optique Vidéo du CSG – Baudon, P., (2014): *Galileo 5 & 6 upper composite launcher integration*.
https://www.flickr.com/photos/europeanspaceagency/sets/72157646207518707/ . Visitado: Enero, 2015

Euler, H-J, Keenan, C.R, Zebhauser, BE, Wübbena, G., (2001): *Study of a simplified approach in utilizing information from permanent reference station arrays*. Proceedings of ION GPS 2001 , Salt Lake City, UT, 379-391

Eumetnet (2011): *Programme Decision for the EUMETNET Optional Programme GNSS Water Vapour (E-GVAP II)*. Reg. 0818.801.249 - RPM Bruxelles

Euref Resolutions, (1990): *Euref Symposium Florence, 28-31.05.1990* .

Euref Resolutions (2010): *Symposium de Euref, Gavle Suecia, Junio 2010*.

Euref Resolutions (2013): *Symposium de Euref, Budapest,Mayo 2013*.

European Comission, (1999): *Galileo. Involving Europe in a New Generation of Satellite Navigation Services* European Comission Report. Brussels, 9 February 1999.

Feng, Y., Rizos C., Higgins, M. (2009): *Developing Regional Precise Positioning Services Using the Legacy and Future GNSS Receivers*. Journal of Global Positioning Systems (2009) Vol.8, No.1: 17-25

Galileo, (2010, 2014): *European GNSS (Galileo) open service signal in space Interface Control Document*. European Union & European Space Agency . September 2010. New Release Junio 2014.

Gao, Y., Chen, K. (2005): *Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products*. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 3, No. 1-2: 95-100.

Gao, Y., Wang, M. (2009): *Real-time kinematic OTF positioning using a single GPS receiver*. International Association of Geodesy Symposia133: Observing our changing Earth: 655-668.

Garber, S., (2009) : *Sputnik and The Dawn of the Space Age*.
http://history.nasa.gov/sputnik/gallerysput.html . Visitado: Junio 2013

Garrido-Villén, N., Berné-Valero, J.L., Antón-Merino, A., Huang, C.Q., (2013): *Displacement of GNSS permanent stations depending on the distance to the epicentre due to Japan's earthquake on 11 March 2011. Survey Review*. Volume 45, Issue 330 (May 2013), pp. 159-165DOI: http://dx.doi.org/10.1179/1752270612Y.0000000025

Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., Liu, J., (2008): *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations*. J. Geod. 82(7), 389-399, 2008.

Gendt, G., (2006): *[IGSMAIL-5438] -IGS switch to absolute antenna model and ITRF2005*. IGS Central Bureau, 2006.

Geng, J., X. Meng, F. N. Teferle, A. H. Dodson(2010): *Performance of precise point positioning with ambiguity resolution for 1- to 4-hour observation periods*. Survey Review 42, No. 316 April 2010
Geng, J., Teferle, F.N., Meng, X., Dodson A.H., (2011): *Towards PPP-RTK:Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning*. Advances in Space Research . Elsevier, 01/2011, 47(10):1664-1673. DOI: 10.1016/j.asr.2010.03.030

Geng, J., Meng, X., Dodson, A., Teferle, N., (2011): *Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning: What Method should we use for Geosciences*. European Geosciences Union General Assembly Vienna Austria 3-8 April 2011. 15 pp.

Gili, J.A., (2003): *Instrumentación para control de movimientos de ladera: sistema GPS y otros*. En Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos. Instituto Geológico y Minero. MADRID 2003. ISBN: 84-7840-485-6. http://www.igme.es/actividadesigme/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7b.pdf . Visitado: Mayo 2013

GLONASS (2008): *Interface control document navigation radio signal in bands L1, L2*. Technical report, Moscow, Russia, Russian Institute of Space Device Engineering, 2008.

Gómez J., (2013): *Investigación y análisis de las comunicaciones satelitales actuales y futuras en España y la Unión Europea*. Tesis Doctoral, Mayo 2013 . Universidad Pontificia de Comillas.

GPS (2006): *INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200, GPS JOINT PROGRAM OFFICE*. Revision D ,IRN-200D-001,7 March 2006. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interface. 221 pp.

GPS (2012, 2013): *GPS Interface Control Documents (ICDs) e Interface Specifications (ISs) ICDs/ISs 2012a,b,c*. Technical report, Global Positioning Systems Directorate Systems Engineering & Integration, 2012a,b,c. http://www.navcen.uscg.gov/pdf/ . Revision 2013.

Griffiths J., Ray J.R., (2009): *On the precision and accuracy of IGS orbits*. Journal of Geodesy, 2009, 83(3-4), 277--287, ISSN 0949-7714. DOI: 10.1007/s00190-008-0237-6.,

Grinter, T., Roberts, C., (2013): *Real Time PrecisePoint Positioning: Are We There Yet?*. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2013 Outrigger Gold Coast, Qld, Australia 16 –18 July 2013

Hatanaka, Y., Iizuka, T , Sawada, M., Yamagiwa, A. , Kikuta, Y., Johnson J. M., Rocken C., (2004): *Improvement of Analysis Strategy of GEONET*. Bulletin of Geographical Survey Institute. 2004.

Hauschild A., Montenbruck O., (2008): *Real-time Clock Estimation for Precise Orbit Determination of LEO-Satellites*. ION-GNSS-2008 Conference, 16-19 Sept. 2008, Savannah, Georgia (2008)

Hauschild, A. (2010): *[IGSMAIL-6133]: New GPS + GIOVE Real-Time Clock Product*. International GNSS SERVICE-MAIL LIST . Mon, 19 Apr 2010

Hauschild, A., (2010): *Real-Time Clock Estimation (RETICLE)* . www.dlr.de. Visitado: Junio, 2014.

Hauschild, A., (2012): *E-mail personal en respuesta a solicitud.*

Heo, Y., Yan, T., Lim, S., Rizos, C.(2009): *International Standard GNSS Real-Time Data Formats and Protocols*. IGNSS Symposium 2009Holiday Inn Surfers Paradise, Qld, Australia 1 – 3 December, 2009

HJS-Hernández-Pajares, M., Juan-Zornoza, M., Sanz-Subirana, J., Samson, J. , Tossaint, M.,(2011): *Method, Apparatus and System for Determining a Position of an Object Having a Global Navigation Satellite System Receiver by Processing Undiferenced Data Like Carrier Phase Measurements and External Products Like Ionosphere Data*. International patent application PCT/EP2011/001512 (ESA ref.: ESA/PAT/566).

Herring, T., (1992): *Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data*. Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, number 36, 157–164, The Hague, 1992. Netherlands Geodetic Commission Series.

Hesselbarth, A., Wanninger, L., (2008): *Short-term Stability of GNSS Satellite Clocks and its Effects on Precise Point Positioning*. Proceedings ION GNSS 2008, Savannah, GA, 1855-1863

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger H., Collins J. (1992): *Global Positioning System. Theory and Practice*. Wien, New York: Springer-Verlag. 1992. ISBN 3 211 82364 6. 326 pp.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., (2008): *GNSS: Global Navigation Satellite Systems – GPS, GLONASS, GALILEO & more*. SpringerWienNewYork-2008

Huart J. (2014) : *http://www.esa.int / spaceinimages/ content/search? SearchText =galileo&img=1&SearchButton=Go* . Visitado: Diciembre 2014

Hugentobler, U., Steigenberger, P., Montenbruck, O., Hauschild, A., Webe, G., Hessels, U.,(2010): *Evaluation of GIOVE Satellite Clocks using the CONGO Network*. Proceedings of the 24th European Frequency and Time Forum; 13-16 April 2010, Noordwijk, The Netherlands

Hugentobler, U., Rizos, C., Caissy, M., Weber,G., Montenbruck, O., Neilan. R., (2013): *Real-Time and Multi-GNSS –Key Projects of the International GNSS Service.* EUREF 2013 Symposium Budapest, Hungary, May 29, 2013

Huisman, L., Teunissen P., (2012): *ITRF-scaled real-time broadcast corrections in regional datum* . EUREF Symposium 6-8 June 2012 Paris, France.

Huisman, L., Teunissen, P., Congwei Hu, C., (2012): *PPP using satellite positions in regional reference frames*. PPP-RTK Symposium & Open Standards 12-14 March 2012. Frankfurt am Main, Germany

Huisman, L., Teunissen, P., Congwei Hu, C., (2012): *GNSS precise point positioning in regional reference framesusing real-time broadcast corrections* J. Appl. Geodesy, Vol. 6 (2012), pp. 15–23. Copyright © 2012 De Gruyter. DOI 10.1515/jag-2011-0006

Huisman, L., Teunissen, P.J.G., (2013): *Analysis of the transformed clocks approach for dealing with scale-induced bias in the generation of ETRS89 clock and orbit corrections to broadcast ephemeris*. EUREF 2013 Symposium, 29-31 May 2013 , Budapest, Hungary

Hunter, J.D. (2007): *Matplotlib: A 2D graphics environment*. Computing In Science & Engineering, Volume:9, Issue: 3. Page(s):90 - 95. Publisher : IEEE COMPUTER SOC, ISSN :1521-9615.

Inaba, N., Matsumoto, A., Hase, H., Kogure, S., Sawabe, M., Terada, K. (2007): *Design Concept of Quasi Zenith Satellite System*. 58th IAC (International Astronautical Congress), International Space Expo, Hyderabad, India, Sept. 24-28, 2007, IAC-07-B2.1.03

International GNSS Service Central Bureau (2013): *IGS_Quality_of Service-131121.pdf IGS_Real_Time_Service_131031.pdf* ftp://ftp.igs.org/pub/resource/pubs, Visitado: Septiembre, 2014

ION Newsletter, (2007): *International Committee on GNSS Forms, New Providers Forum*. ION Newsletter, Fall 2007, pp.8-9

IUGG, (1991): International Union of Geodesy and Geophysics (1991) Resolution On The Conventional Terrestrial Reference System 1991, IUGG General Assembly. Buenos Aires

Ipatov, V., Shebshaevich B., (2010): *GLONASS CDMA Some Proposals on Signal Formats for Future GNSS Air Interface*. Inside GNSS JULY/AUGUST 2010. PP46-51 . ISSN 2329 -2970

IRNSS (2014): *IRNSS Signal-in-Space interface control document for Standard Positioing Service (SPS)*. Indian Space Research Organisation , *2014 www.isro.org*

Jäger R., Kälber S., (2008): *The new RTCM 3.1 transformation messages –declaration, generation from reference transformations and implementation as a server-client concept for GNSS services.* International Conference GEOS 2008.

Jianyu C., (2007): *Overview of Compass/BeiDou Navigation Satellite System*. Providers Forum, Sept. 4, 2007, Bangalore, India, URL:

http:;//www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2007/icg2/presentations/01.pdf

Juan-Zornoza, J.M., Hernández-Pajares, M., Sanz-Subirana, J., Samson, J., Tossaint, M., Aragon, A. Salazar, D., (2012): *Wide Area RTK: A Satellite Navigation System Based on Precise Real-Time Ionospheric Modelling*. Radio Science 47, pp. 1-14.

Kaplan, E.D., (1996): *Understanding GPS — Principles and Applications*. Artech House Publishers, Boston & London. 1996. ISBN : 0-
89006-793-7.

Kouba, J., Springer, S., (2001): *New IGS Station and Satellite Clock Combination*. GPS Solutions 03/2001, 4(4):31-36. DOI: 10.1007/PL000128

Kouba, J., (2009): *A guide to using international GNSS service (IGS) Products*. Geodetic Survey Division Natural Resources Canada. 10pp. http://igscb.jpl.nasa.gov/components/usage.html . Visitado: Mayo 2013

Kramer. H.J., (2002): *Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Springer Verlag. 4th edition . ISBN 978-3-642-62688-3

Lachapelle, G., Petovello, M., Gao Y., Garin, L., (2006): *Precise point positioning and its challenges, Aided-GNSS and Signal Tracking*. Inside GNSS. November December 2006. volume 1, number 8 pp 16-21. ISSN 2329 -2970

Lamolda, H., Bethencourt, A., (2012): *Obtención del TEC y sus variaciones temporales a partir de diferentes redes de estaciones GNSS permanentes de la península ibérica*. Proceedings 7ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Donostia- San Sebastian,25-29/6/ 2012. Ed. J. Zurutuza-Aranzadi, S01, pp 11-15.

Landau, H., Vollath, U., Chen X., (2002): *Virtual Reference Station Systems* Journal of Global Positioning Systems (2002) Vol. 1, No. 2: 137-143

Langley, R., (2015): *Upcoming GNSS Satellite launches*. http://gpsworld.com/resources/upcoming-gnss-satellite-launches/ , Visitado: Enero 2015.

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.P., Bijac, J. (2008): *Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK*. Proceedings of ION National Technical Meeting, the Institute of Navigation Inc., Fairfax, US, pp. 747-755, 2008. 9 PP

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.P., Broca, P. , Cerri, L., (2009): *Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination*. Navigation, Journal of the institute of Navigation, Vol. 56, N° 2, Summer 2009

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J.P. , (2010): *Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental result*. Proceedings of the ION GNSS 2010,September 2010, Portland, Oregon.

Laurichesse, D.,(2011): *The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator*. Proceedings of the ION GNSS, September 19-23, 2011 - Portland, Oregon, 9pp

Laurichesse D., (2012): *Phase Biases Estimation for Undifferenced Ambiguity Resolution*. PPP-RTK & Open Standards Symposium, March 12-13, 2012, Frankfurt, 23 pp .

Laurichesse, D. , Mercier, F., (2012): *The CNES real time Integer PPP demonstrator*. IGS WORKSHOP POLAND 2012

Laurichesse, D., (2012): *PPP-Wizard Interface Control Document*. http:// www.ppp-wizard.net . Visitado: Enero 2014

Laurichesse, D., Cerri, L., Berthias, J.P., Mercier, F., (2013): *Real time precise GPS constellation and clocks estimation by means of a Kalman filter*. ION GNSS 2013, September 16-20, 2013 - Nashville, Tennessee

Laurichesse, D., (2014): *Phase biases for ambiguity resolution: from an undifferenced to an uncombined formulation*. White paper- www.pppwizard.net. Visitado: Noviembre 2014

Leandro, R., Langley, R., and Santos M., (2008): *GNSS Data Analysis in GAPS, the GPS Analysis and Positioning Software, Using IGS Products* Proceedings IGS Workshop 2008.

Leandro, R. F., (2009): *Precise Point Positioning with GPS: A New Approach for Positioning, Atmospheric Studies, and Signal Analysis*. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 267, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 232 pp.

Lezaeta R., Rodríguez-Osorio R.M. (2011): *Software Receiver Design for Galileo Signáis* . Editorial: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, Título de Revista/Publicación: IEEE Latin America Transactions, Fecha:Abril 2010 , Volumen:8 , Número: 2

Lidberg, M., Fernandes, R.M, Bastos, L., Carine, B., D'Angostino, N., Dousa,J., Ganas, A., Nocquet J.M. (2013): *Geodesy in EPOS - a status report* . Euref Symposium Budapest. May 29-31. 2013

Lim, S., Rizos, C., (2008): *A Conceptual Framework for Server-Based GNSS Operations*. Journal of Global Positioning Systems (2008) Vol.7, No.2 : 125-132

Lin Minmin (2006): *RTCM 3.0 Implementation in Network RTK and Performance Analysis*. Thesis for the Degree of master of science.Department of geomatics engineering. University of Calgary. January 2006

Loyer, S., Perosanz, F., Mercier, F., Capdeville, H., (2012): *MGEX activities at CNES-CLS Analysis Center*. CLS, Toulouse, France CNES, Toulouse, Franc. IGS ANALISYS CENTER WORKSHOP, IGS Workshop 2012 - Olsztyn, Poland - July 23-27, 2012 .

Majithiya, P., Khatri, K., Hota, J. K.(2011): *Indian Regional Navigation Satellite System*. Inside GNSS, January/February 2011, pp. 40-46, URL: http://www.insidegnss.com/auto/IGM_janfeb11-IRNSS.pdf . ISSN 2329 -2970

Marin, D., (2014): *Lanzamiento del GLONASS K1-2 (Soyuz-2-1B)*. http://danielmarin.naukas.com/2014/12/01/lanzamiento-del-glonass-k1-2-soyuz-2-1b/. Visitado: Diciembre 2014

Marquis, W., Shaw, M., (2011): *GPS III: Bringing New Capabilities to the Global Community*. INSIDE GNSS-September/October 2011. pp 34-48 . ISSN 2329 -2970

Martín, A., Anquela, A.B., **Capilla, R.**, Berné, J.L. (2011): *PPP technique analysis based on time convergence, repeatability, IGS products, different software processing and GPS+Glonass constellation: A case study*. Journal of Surveying Engineering-ASCE, 137(3), pp: 99-108. área: Civil Engineering. ISSN: 0733-9453

Martín A., Anquela A.B., Sanmartin M., **Capilla R.,** Berné J.L.(2011): *Static PPP with GPS+GLONASS.A Case Study*. Poster del Congreso European Geoscience Union EGU-2011. Viena – Austria.Fecha de celebración: 22–27 April 2011, Vienna, Austria

Martín, A., (2011): *Sistema y Marco de referencia terrestre. Sistemas de coordenadas*. Universidad Politécnica de Valencia Enero de 2011.

Melbourne, W. G., (1985): *The case for ranging in GPS based geodetic systems*. Editor, Goad, C., Proceedings of the 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, 373–386, Rockville, Maryland, 1985. US Department of Commerce.

Mervart L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi (2008): *Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time*. Proceedings of the 18th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the ION-GNSS Institute of Navigation, Savannah GA., Sept 16-19, 2008

Montenbruck, O., Hauschild, A., Hessels, U., Steigenberger, P., Hugentobler, U., (2009): *CONGO - First GPS/GIOVE Tracking Network for Science, Research;* GPS World, September 2009, 36-41 (2009).

Montenbruck, O, Hauschild, A (2013): *Code biases in multi-GNSS point positioning*. Proceedings of ION ITM 2013, Institute of Navigation, pp 616–628.

Montenbruck, O., Steigenberger, P., Khachikyan, R., Weber, G., Langley, R.B., Mervart, L., Hugentobler U., (2014): *IGS-MGEX: Preparing the Ground for Multi-Constellation GNSS Science.* InsideGNSS 9(1):42-49 (2014).

Navarro-Reyes, D., (2014): *Galileo satellite set for new orbit*. Notificado en: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_satellite_set_for_new_orbit. Visitado: Diciembre, 2014.

Niell, A. E., (1996): *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101(B2):3227–3246, 1996. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/95JB03048.

Niell, A. E., (2000): *Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS*. Earth, Planets, and Space, 52:699–702,2000

Noll, C. E., (2010): *The Crustal Dynamics Data Information System: A resource to support scientific analysis using space geodesy*. Advances in Space Research, Volume 45, Issue 12, 15 June 2010, Pages 1421-1440, ISSN 0273-1177, http:;//dx.doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.018.

Nylen, T., White, S. (2007): *Online Precise Point Positioning Using the Natural Resources Canada Canadian Spatial Reference System (CSRS-PPP)*. UNAVCO.October 2007

Paziewski, J., Wielgosz, P., KrypiakGregorczyk, A., Stępniak, K., Krukowska, M., Kapłon,J, Hadaś,T., Jarosław, B., (2012): *Fast-Static GPS Positioning with external tropospheric corrections derived in near real-time*. IGS WORKSHOP 2012, Olsztyn Poland , July 23-27, 2012

Peñafiel J, Calzada, G,(2014): *Las nuevas constelaciones y señales GNSS II. El avance del Posicionamiento*. Revista Mapping Vol. 23, 158, 36-47, marzo-abril 2013,ISSN: 1131-9100-Pág. 04 , Revis ta 163, 04-14,Enero-Febrero 2014

Pérez, J., Agrotis, L., Fernández, J., García, C., Dow, J., (2006): *Esa/Esoc Real Time Data Processing*. IGS WORKSHOP 2006, Darmstadt, Germany Proceedings, 8-12 May 2006

Petit, G., Luzum, B. (2010): *IERS conventions (2010)*. Technical Report 36, Frankfurt am Main, 2010. Verlag des Bundesamts für und Kartographie Geodäsie, 2010. 179 págs, ISBN 3-89888-989-6.

Priego E., (2012): *Análisis y predicción de lluvias intensas en la Comunidad Valenciana basados en la estimación del contenido de vapor de agua atmosférico obtenido con técnicas GNSS*. Tesis Doctoral del programa de doctorado en Geodesia Cartografia y Sistemas de Informacion Geografica. Departamento de Ingeniería Cartográfica Universidad Politécnica de Valencia.

Priego, E., Seco, A., Ferragud, D., Serna F., González-Matesanz, F.J., (2014): *GNSS estimated tropospheric water vapour m onitoring during the 27 to 29 September 2012 storm in the southeast of the Iberian Peninsula*. International Symposium on Data Assimilation 2014 (24-28 February 2014, Ludwing Maximilians University, Munich, Germany) .

Pullen, S. (2007): *Worldwide Trends in GNSS Development and their Implications for Civil User Performance and Safety*. URL: http://waas.stanford.edu/~wwu/papers/gps/PDF/PullenJapanGNSS07.pdf . Visitado: Julio 2014

QZSS Project Team, (2009): *Current status of Quasi-Zenith Satellite System*. 4th International Committee on GNSS, Saint Petersburg, Russia, Sept. 14-18, 2009, URL: http://www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2009/icg-4/05-1.pdf. Visitado: Junio 2014

Ray, J., (2010): *[IGSMAIL-6053]: status of IGS orbit products*. International GNSS SERVICE-MAIL LIST - Thu, 07 Jan 2010

Rebischung, P (2012): *IGSMAIL 6663*

Rothacher, M., Schaer, S., Mervart, L., Beutler, G. (1996): *Determination of antenna phase center variations using GPS data*. Editores: Gendt G., Dick, G., Proceedings of the IGS Workshop Special Topics and New Directions , 205–220. GeoForschungsZentrum Potsdam.

RTCM Special Committee SC-104 (2006): *RTCM Standard 10403.1 for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3*.
Radio Technical Commission for Maritime Services.

RTCM Special Committee SC-104 (2007): *Amendment 1 to RTCM Standard 10403.1 for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3*.
Radio Technical Commission for Maritime Services.

RTCM State Space Working Group (2007): *RTCM Paper 075-2007-SC104-470*. Mission Statement, 2007.

RTCM Special Comitte SC-104 (2010): *RTCM Paper-2010 055-2010-SC104-582*. Special Comitte-104_v04

RTCM Special Comittee SC-104 (2013): *Proposal of new RTCM SSR Messages SSR Stage 2: Satellite Phase Biases for RTCM STANDARD 10403.2 DIFFERENTIAL GNSS*. (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3. Revisión: 2014- 04-17 v05 -ssr_2_phase_bias_v05

Sakai, T. , Fukushima, S. , Ito, K. (2009): *Development of QZSS L1-SAIF augmentation signal* . ICCAS-SICE, 2009 .18-21 Aug. 2009 ,4462 - 4467 pp,E-ISBN : 978-4-907764-33-3 ,Print ISBN: 978-4-907764-34-0 ,Fukuoka, 2009, Editorial: Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE

Salazar D., Hernandez-Pajares M., Juan J.M. and Sanz J. (2008): *Open source Precise Point Positioning with GNSS Data Structures and the GPSTk*. Proceedings EGU 2008, Vienna

Sánchez-Alzola, A ., Borque,Mª J., Martín-Rojas, I., García-Tortosa, F.J, Alfaro, P., Estévez, A., Molina, S., Rodríguez-Caderot G., de Lacy, C., García-Armenteros, J.A., Avilés, M., Herrera-Olmo, A., Rosa, S., Gil, A.J., (2014): *Tasas de deformación GPS en la cuenca del Bajo Segura (Cordillera Bética oriental)*. GEOGACETA, 56, 2014. Neotectónica y Paleosismología. ISSN (versión impresa): 0213-683X, ISSN (Internet): 2173-6545. http://hdl.handle.net/10045/43222.

Sanz-Subirana, J., Juan-Zornoza, J.M., Hernández-Pajares, M., (2011): *Detector based in code and carrier phase data: The Melbourne-Wübbena combination*. Technical University of Catalonia, Spain. 2011 . http://www.navipedia.net . Visitado: Junio 2014

Sanz- Subirana, J., Juan –Zornoza- J.M., Hernández-Pajares, M., (2013): *GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms*. ESA TM-23/1, May 2013. ISBN 978-92-9221-886-7 . ISSN 1013-7076. 2013 European Space Agency

Schaer, S., (1999): *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*. French Studies of the Eighteenth and Nineteenth Centuries. Schweizerische Geodätische Kommission, 1999. ISBN 9783908440017.

Schaer , S., (2012): *Overview of Relevant GNSS Biases*. Kolloquium Satellitennavigation, TU München, 21. Mai 102 pp,

Schmid, R., Steigenberger, P., Gendt, G., Ge, M., and Rothacher, M., (2007): *Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas*. Journal of Geodesy, 81(12):781–798, 2007. ISSN 0949-7714. doi: 0.1007/s00190-007-0148-y.

Schmitz, M., (2012): *RTCM State Space Representation Messages, Status and Plans*. PPP-RTK & Open Standards Symposium,March 12-13, 2012, Frankfurt, Germany. 30 pp

Schönemann E., Dilssner F., Svehla D., Springer T., Becker M., Dow J., Zandbergen R. (2008): *GIOVE - A and B - Precursors of anew era: Signal and clock quality and the achievable orbit accuracy*. Presentation at the 2nd International Colloquium -Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, (14 October 2009, University of Padova, Padua, IT)

Schönemann E., Becker M, Springer T., (2011): *A new Approach for GNSS Analysis in a Multi-GNSS and Multi-Signal Environment* . Journal of Geodetic Science . 1(3) , 2011 , 204-214 DOI: 10.2478/v10156-010-0023-2. pp 204-214

Schönemann, E., (2014): *Analysis of GNSS raw observations in PPP solutions*. Darmstadt, April 2014. Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie Bau- und Umweltingenieurwissenschaften Dissertation, Technische Universität Darmstadt ,ISBN 978-3-935631-31-0

Schupler, B. R. , Clark, T. A., (1991): *How different antennas affect the GPS observable*. GPS World, 32–36, 1991

Seeber. G., (1993): *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Berlin New York, 1993. ISBN 3-11-012753-9
Shen, X., Gao, Y. (2006): *Analyzing the impacts of GALILEO and modernized GPS on Precise Point Positioning*. Proceedings of ION NTM, 22-24 de Enero, Monterey, California: 837-546.

Söhne, W., Mervart,L., Stöcker,D., Weber, G., (2013) *RealTime applications of the International GNSS Service (IGS) MultiGNSS Experiment (MGEX) -initial Galileo results*. Euref symposium 2013 BUDAPEST, Mayo 2013

Soler, T, Marshall, J., (2003): *A note on frame transformations with applications to geodetic datums* GPS Solutions, 7(2), 148-149. 204-214

Souto, S., **Capilla, R.M**., Berné, J.L., (2010): *Establishment of GN SS active networks for scientific and professional purposes: case study in Cordoba (Argentina) and contrast with precise Point Positioning Technique*. Bulletin of Science and Technology of the Faculty of Mathematics, Chemistry and Environmental Studies.National University of Misiones (UnaM), ARGENTINA. Año 2010 Vol 13 Nº 13.ISSN: 1851-7587 (print version).ISSN**:** 0329–8922 (electronic version)
PP: 20-25

Spilker, Jr. J. J., (1996): *GPS navigation data. Global Positioning System: theory and applications volume I*. Editores: Parkinson, Spilker , Enge y Axelrad., 121–217. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington DC 1996. Vol 1, pp.245-328.

Springer, T. (1999): *Modelling and validating orbits and clocks using the Global Positioning System*. Phd thesis,Universität Bern, November 1999.

Springer, T., (2010): *[IGSMAIL-6107]: ESA/ESOC Ultra-Rapid and Rapid GNSS Solutions* International GNSS SERVICE-MAIL LIST. Wed, 17 Mar 2010

Staller, A., Martínez-Díaz, J. J., Benito, B., Hernández, D., Díaz, M., Pullinger, C., DeMets, C., Canora, C., Álvarez-Gómez, J. A., Béjar, M. (2008): *Red Gps "ZFEZNET" para el estudio de la evolución del ciclo sísmico de deformaciones y esfuerzos asociado a la Zona de Falla de El Salvador*. Geotemas. Volumen: 10. Fecha: 2008

Steigenberger, P. Hugentobler, U., Montenbruck, O., Hauschild, A. (2011): *Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network* **.** Journal of Geodesy, Vol. 85, Nr. 6, pp 357-365, Springer, ISSN 0949-7714, DOI:10.1007/s00190-011-0443-5, 2011.

Steigenberger, P., Hugentobler U., Loyer S., Perosanz F., Prange L., Dach R., Uhlemann M., Gendt G., Montenbruck O. (2014): *Galileo Orbit and Clock Quality of the IGS Multi-GNSS Experiment*. Advances in Space Research, doi: 10.1016/j.asr.2014.06.030

Stürze, A., Liu, S., Söhne, W., (2014): *Real-Time Tropospheric Delay Estimation using IGS Products*. European Geoscience Union General Assembly 2014, held 27 April - 2 May, 2014 in Vienna, Austria, id.5201

Svehla, D., (2008) : *A novel design for the navigation system and proposal to unify the timing and the positioning system using GIOVE Follow-on* ACES and future GNSS-based Earth observation and navigation, 26-27 May 2008, Munich, Germany Extended Abstracts. IAPG/FESG-Schriftenreihe, Nr. 28, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, ISBN (Print) 978-3-934205-27-7, ISSN 1437-8280, 2009

Svehla, D., Heinze, M., Rothacher, M., Steigenberger, P., Daehnn, M., Kirchner, M. (2008): *Combined processing of GIOVE-A and GPS measurements using zero- and double-differences*. Proceedings European Geosciences Union -2008

Teunissen, P.J.G. (1994): *A new method for fast carrier phase ambiguity estimation*. Proceedings of IEEE Position, Location and Navigation Symposium, IEEE Inc., New York, US, pp. 562-573, 1994.

Thaler, G., Weber, R., (2010): *Contribution of the Technical University of Vienna to the RTIGS-Pilot-Project*. IGS-Workshop 2010, Newcastle, UK, 28.06. – 02.07.2010 Vienna University of Technology, Institute of Geodesy and Geophysics (IGG), Research Group Advanced Geodesy, Vienna, AUSTRIA

Thayer, G. D. (1974): *An Improved equation for the Radio Refractive Index of Air*. Radio Science, vol. 9 (10), pp 803-807

Thornton, C.L,. Bierman, G.J (1977): *Gram-SchmidtAlgorithms for Covariance Propagation*. International Journal of Control, Volume 25, Issue 2, 1977

Uhlemann, M. , Ramatschi, M., Gendt, G. (2012): *GFZ's Global Multi-GNSS Network And First Data Processing Results*. IGS Workshop 2012 - Olsztyn, Poland - July 23-27, 2012

USNO (2008): *United States naval observatory. GPS operational satellites (Block II/IIA/IIR/IIR-M)*. ftp://tycho. usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt Visitado : Julio 2014

Valdés , M., Cano, M.A., Sánchez, J.A., Gonzalo P. (2012): *Determination of the tropospheric delay with near real-time GNSS by the IGN in the European project E-GVAP*. 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa De Geodesia Y Geofísica Donostia – San Sebastián 23-28 de junio de 2012, pp 353 -357

Ventura-Traveset, J., Flament, D., (2006): *EGNOS: The European Geostationary Navigation Overlay System: A Cornerstone of Galileo*. ESA Publications Division, ESTEC, 2006. Series ESA SP 1303., Noordwijk, the Netherlands

Waller P., Gonzalez F., Hahn J., Binda S., Piriz R., Hidalgo,I., Tobias, G., Sesia, I., Tavella, P.,Cerretto, G., (2008): *In-Orbit Performance Assessment of Giove Clocks*. Proceedings of 40th Annual Precise Time and Time Interval. (PTTI) Meeting (1-4 December 2008, Reston, Virginia, USA), 69-82

Wang, Q., (2013): *Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico* . Journal of Geodetic Science, 2013 - 22-31 DOI: 10.2478/jogs-2013-0001

Weber , G., Söhne, W. (2011): *Real time GNSS Issues* . TWG Meeting minutes, 25 May 2011,Chisinau,Moldova

Weber, G., Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C., Dousa, J. (2007): *Real-Time Clock and orbit corrections for improved Point Positioning via NTRIP*. Proceedings of the ION GNSS 2007, San Diego, California.

Weber, G., Söhne, W., Stürze, A., Mervart, L., (2008): *Towards a EUREF Service Providing Real-time GNSS Clock and Orbit Corrections*. EUPOS Symposium, November 11-14, 2008, Berlin.

Weber, G., Mervart, L. (2010): *[IGSMAIL-6081]: Real-time PPP, BNC v2.0* International GNSS SERVICE-MAIL LIST- Sun, 21 Feb 2010

Weber, G., Hauschild, A., Stöcker D., Mervart L., Montenbruck, O., Steigenberger, P., (2011): *Real-Time PPP based on CONGO and RTCM's Multiple Signal Messages*. EGU General Assembly, Vienna, Austria 3-8 April, 2011

Wei, E., Chai, H., An, Z., Liu, J. (2006): *VRS Virtual Observations Generation Algorithm*. Journal of Global Positioning Systems (2006) Vol. 5, No. 1-2:76-81

Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E.J., Lachapelle, G., Langley, R.B., Nakiboglu, M., Schwarz, K.P., Tranquilla, J.M., Vanicek, P., (1987): *Guide to GPS positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canada.1987

William, C., Hammond A., Brooks B. (2011): Scientific Value of Real-Time Global Positioning System Data. Eos, Transactions American Geophysical Union. Vol. 92, pages 125–126. 15, 12 April 2011.

Wu, J.T., Hajj, G. A., Wu, S.-C., Bertiger, W. I., Lichten, S. M. (1993): *Effects of antenna orientation on GPS carrier phase*. Manuscripta Geodaetica, 18(2):91–98, 1993.

Wübbena, G., Goad, C. C. (1985): *Software developments for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements*. Proceedings of First Int Symposium on Precise Position with GPS Rockville Maryland, 403–412. U.S. Department of Commerce, 1985.

Wübbena, G., Menge, F., Schmitz, M., Seeber, G.,Völksen, C. (1996): *A new approach for field calibration of absolute antenna phase center variations*. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS-96, 1205–1214, Kansas City, Missouri,

Wübbena, G., Schmitz,M., Bagg, A. (2005): *PPP-RTK: Precise Point Positioning using state-space representation in RTK networks*. Proceedings of ION GNSS 2005, 13-16 de Septiembre, Long Beach, California: 2584-2594.

Wübbena, G., (2008): *GNSS Network-RTK Today and in the Future Concepts and RTCM Standards*. International Symposium on GNSS, Space-based augmentation systems and applications. Berlín, Alemania, 11-14 de Noviembre 2008.

Wübbena, G., (2012): *RTCM State Space Representation (SSR) Overall Concepts Towards PPP-RTK*. PPP-RTK & Open Standards Symposium, March 12-13, 2012, Frankfurt, Germany. 41 pp.

Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge., A., (2014): *PPP with Ambiguity Resolution (AR) using RTCM-SSR*. IGS Workshop, 23.-27.06.2014, Pasadena, CA, USA

Ziebaert, M., Battharai, S., (2011): *Orbit and Clock Transformation Modeling* http://www.insight-gnss.org/WP3.html .Visitado : Julio 2014

Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H. (1997): *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks*. Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No B3: 5005-5018.

Portales de internet de referencia:

Agencia estatal de seguridad aérea:
http://www.seguridadaerea.gob.es Vistado: Septiembre, 2014

Asociación de Astronomia. Meteorologia: La Atmósfera terrestre:
http://astroentrerios.com.ar Visitado: Noviembre, 2014

COoperative Network for GIOVE Observation (CONGO)-Technical University Munich:
http://www.iapg.bgu.tum.de/190749--~iapg~forschung~gnss~congo.html Visitado: Abril, 2014

COoperative Network for GIOVE Observation (CONGO)-DLR:
http://www.dlr.de/rb/desktopdefault.aspx/tabid-4736/10536_read-25879/ .Visitado: Julio, 2014

Diccionario de Informática y Tecnología:
http://www.alegsa.com.ar/Dic/python.php Visitado: Junio, 2013

E-GVAP: The EUMETNET GNSS water vapour programme:
http://www.knmi.nl/samenw/egvap/validation/ Visitado: Abril, 2013

ESA - European Space Agency:
http://www.esa.int Visitado: Junio 2014

ESA-European Space Operations Centre:
http://www.esa.int/SPECIALS/ESOC/ Visitado: Abril, 2014

ESA-Sharing Earth Observation Resources Directory:
https://directory.eoportal.org Visitado: Noviembre , 2014

EUPOS: European Position Determination System:
http://www.eupos.org/ Visitado: Abril, 2013

EUREF IAG SUBCOMISSION HOMEPAGE:
http://www.euref-iag.net/ Visitado: Abril, 2013

EUREF IAG SUBCOMISSION PERMANENT NETWORK Central Bureau:
http://www.epncb.oma.be Visitado: Octubre, 2014

European Combined Geodetic Network:
http://www.bkg.bund.de/geodIS/ECGN/ Visitado: Junio, 2014

European GNSS Supervisory Authority -GALILEO:
http://www.gsa.europa.eu/ Visitado: Junio, 2014

Geodetic Information and Observation Services Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG):
http://gibs.bkg.bund.de/ Visitado: Junio, 2014

German Space Operations Center (GSOC)-DLR:
http://www.gsoc.dlr.de/ Visitado: Noviembre, 2014

GNSS Data Center- BKG :
http://igs.bkg.bund.de/ Visitado: Noviembre, 2014

Incorporated Research Institutions for Seismology:
http://ds.iris.edu/ds/ Visitado: Octubre 2014

Indian Space Research Organization:
http://www.isro.gov.in/ Visitado: Octubre 2014

Instituto Cartográfico Valenciano –Red GNSS ERVA:
http://icverva.icv.gva.es:8080

Instituto Geográfico Nacional de España:
http://www.ign.es, ftp://ftp.geodesia.ign.es

International Association of Geodesy:
http://www.iag-aig.org/ Visitado: Junio, 2014

International Earth Rotation and Reference Systems Service:
http://www.iers.org Visitado: Junio, 2014

International GNSS Service (IGS):
http://igscb.jpl.nasa.gov/ Visitado: Junio, 2014

International Terrestrial Reference Frame website:
http://itrf.ensg.ign.fr/ Visitado: Junio, 2014

Japan Aerospace Exploration Agency:
http://jda.jaxa.jp/ Visitado: Noviembre 2014

Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology, Gipsy-Oasis II.:
http://gipsy.jpl.nasa.gov/ Visitado: Noviembre, 2014

NASA Gallery :
http://history.nasa.gov/ Visitado: Noviembre 2014

National Geodetic Survey:
http://www.ngs.noaa.gov/ Visitado: Noviembre, 2014

Ntrip casters webpage:
http://www.ntrip.org/ Visitado: Junio, 2014

Other Satellite Navigation Systems:
http://what-when-how.com/gps/other-satellite-navigation-systems-gps/ .Visitado: Enero 2014

Projecto PPP-WIZARD:
www.ppp-wizard.net Visitado: Noviembre, 2014

Proyecto Multi –GNSS Experiment -MGEX:
http://igs.org/mgex/ Visitado: Octubre 2014

Python Software Foundation:
https://docs.python.org/3/ Visitado: Junio 2014

Radio Technical Comision for Maritime Services –SC-104:
http://www.rtcm.org Visitado: Junio, 2014

Receptores GNSS Novatel:
http://www.novatel.com

Russian Space Agency-GLONASS :
http://www.glonass-ianc.rsa.ru/ Visitado: Noviembre, 2014

Technical University Munich:
http://www.iapg.bv.tum.de/mgex Visitado: Junio 2014

Terrastar Services:
http://www.terrastar.net Visitado: Diciembre, 2014

The Precise Point Positioning Software Centre:
http://gge.unb.ca/Resources/PPP/ Visitado: Junio, 2014

Trimble RTX:
http://www.trimble.com/positioning-services/centerPoint-RTX.aspx Visitado: Diciembre, 2014

U.S. Government information about GPS:
http://www.gps.gov/ Visitado: Noviembre 2014

Otras aportaciones relacionadas a revistas, congresos y workshops.

Revista Internacional no indexada

Título: **"Transporte NTRIP de transformaciones geodésicas y ondulaciones del geoide a través de mensajes RTCM 3.1 en redes GNSS locales y regionales"**

Autores (por orden de firma): **Capilla, R.**, Martín, A., Anquela, A.B., Berné, J.L., Zaragoza, M

Revista: **MAPPING INTERACTIVO .** Revista Internacional de Ciencias de la Tierra
Ref. revista/libro (ISBN, ISSN…): 1.131-9.100

Volumen: 136 Páginas: 52-58 Año: SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2009.

Revista Internacional no indexada

Título: **"Establishment of GNSS active networks for scientific and professional purposes: case study in Cordoba (Argentina) and contrast with precise Point Positioning Technique"**

Autores (por orden de firma): Souto S., **R.M. Capilla**, J.L. Berné

Revista: **Bulletin of Science and Technology of the Faculty of Mathematics, Chemistry and Environmental Studies.National University of Misiones (UnaM), ARGENTINA**
Ref. revista/libro (ISBN, ISSN…): . ISSN: 1851-7587

Volumen: 13-13 Páginas: 20-25 Año:2010

Revista Internacional Indexada

Título: **" PPP TECHNIQUE ANALYSIS BASED ON TIME CONVERGENCE SOLUTION, REPEATABILITY, IGS PRODUCTS, DIFFERENT SOFTWARE PROCESSING AND GPS+GLONASS CONSTELLATION"**

Autores (por orden de firma): Martín, A. B. Anquela, **R. Capilla**, J. L. Berné

Revista: **Journal of Surveying Engineering.** American Society of Civil Engineers
Ref. revista/libro (ISBN, ISSN…): 0733-9453 ; DOI : 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000047.

Volumen: 137(3) Páginas: 99-108 Año: 2011

Revista Internacional No indexada

Título: ***"High precision altimetric ties between GNSS stations of Valencia and high precision levelling network"***

Autores (por orden de firma): Rodrigo R., Bermejo A ,**Capilla, R.**

Revista: **Mapping Interactivo**
Ref. revista/libro (ISBN, ISSN…): 1.131- 9.100 . DEP LEGAL: B-4.987-92

Volumen: 155 Año: SEPTIEMBRE - OCTUBRE 2012

Revista Internacional Indexada

Título: **"Frame Transformation and Geoid Undulation Transfer to GNSS Real -Time Positions through the new RTCM 3.1 Transformation Messages"**

Autores (por orden de firma): **Capilla, R.**, Martín, A., Anquela, A.B., Berné, J.L

Revista, Editorial: **SURVEY REVIEW.** Maney publishing
Ref. revista/libro (ISBN, ISSN…): 0039-6265, Online ISSN: 1752-2706
DOI 10.1179/1752270611Y.0000000010

Año: 2012

Volumen: 44(324) Páginas: 30-36

Congreso Internacional

Título: **"Diseño , Aplicaciones integradas y Rendimiento de la red Activa GPS/GNSS de Valencia"**

Autores: **Capilla R.**, Die J, Esteso E., Saa JM

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Póster
Congreso: **Séptima Setmana Geomatica Internacional.** Deposito Legal : B 9432-2007. Proceedings

Fecha de celebración: Barcelona (España) 2007

Symposium Internacional

Título: **"Determination of ETRS89 coordinates for the GNSS Reference Station Network of Valencian Community (Spain)"**

Autores: Garcia-Asenjo L., **Capilla Roma RM**, Baselga S. Garrigues Talens P,

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Ponencia
Congreso: **EUREF 2007 .** Proceedings EUREF 2007
http://www.euref.eu/symposia/2007London/Symposium2007-London.html

Fecha de celebración: LONDRES 2007

Congreso Internacional

Título: **"The Active Geodetic Network of Valencian Community: E.R.V.A"**

Autores (por orden de firma): **Capilla Roma RM,** Esteso E, , Saa J.M., Palau A.

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Ponencia
Congreso : **I International congress on Geomatic and Surveying Engineering.** PONENCIA-PAPERS in CD

Fecha de celebración: 18–2–2008 VALENCIA (SPAIN)

Congreso Internacional

Título**: "Analysis of dynamic generation and real-time transmission of RTCM 3.1 geodetic transformation messages "**

Autores (por orden de firma): **Capilla, R.**, Martín, A., Anquela, A.B..,Zaragoza, M.

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Ponencia Congreso : **8 International Geomatic Week.** Ponencia. PROCEEDINGS 2009 -8 International Geomatic Week

Fecha de celebración: Barcelona. (SPAIN) 3–2009

Congreso Nacional

Título: "**Rendimiento y demanda de servicios GNSS autonómicos en el campo de la Geomática. Investigación y requisitos del Sistema Galileo"**

Autores (por orden de firma): **Raquel M. Capilla**

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Ponencia Congreso: **JORNADA GALILEO-ITACA –IV JORNADA SOBRE SERVICIOS DE MOVILIDAD.**

Fecha de celebración: 22-23 de abril de 2009. Valencia (SPAIN)

Congreso Nacional

Título: **"Trabajos para el diseño de redes GNSS con fines científicos y profesionales: el caso del posicionamiento diferencial para Córdoba (Argentina) y contraste con la técnica Precise Point Positioning"**

Autores (por orden de firma): Souto S., **Capilla R.**, Berné J.L.

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Poster Congreso **: XXV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas & Taller de Aplicaciones Profesionales de Estaciones Permanentes y Redes Provinciales. Poster**

Fecha de celebración: 2–11–2010 .Córdoba, Argentina.

Symposium Internacional

Título: **"Subsidence determination in the city of Valencia and its sourrondings using RADAR interferometry"**

Autores (por orden de firma): J. M. Delgado, F. Cian, A. B. Ruescas, M. Datcu, F. Sarti, **Capilla R.M.**

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Poster
Congreso: **3rd International Symposium on the Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. Poster.**

Fecha de celebración: 27–9–2010, Torrent-SPAIN .

Organizado por: Universidad de Valencia –Global Change Unit
ISSN-ISBN : 978-84-370-79

Congreso Internacional

Título: **"*STATIC PPP WITH GPS+GLONASS. A CASE STUDY*"**

Autores (por orden de firma): Martín A., Anquela A.B., Sanmartin M., **Capilla R.**, Berné J.L.

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Poster
Congreso: **European Geoscience Union, EGU-2011.**

Fecha de celebración: 22–27 April 2011, Vienna, Austria

Congreso Internacional

Título: **"A Research Infrastructure W.G.4: The GNSS Network of Valencia"**

Autores (por orden de firma): **Capilla, R.**, Hermosilla A.

Tipo de participación (ponencia, póster, conferencia invitada, presidencia de sesión, etc.): Poster
Congreso: **3rd EPOS PP Regional conference**

Fecha de celebración: Barcelona (Spain), 27, 28 & 29 November 2013