



**Universidad Nacional de Cuyo**

**Tesis Doctoral**

**DETERMINACIÓN PRECISA DE  
VELOCIDADES EN LAS ESTACIONES GNSS  
DE MEDICIÓN CONTINUA DE AMÉRICA  
LATINA (RED SIRGAS)**

**María Laura Mateo**

**2011**

**Director: Dr. Claudio Brunini**

**Codirector: Dra. María Virginia Mackern**

***Dedico este trabajo a mis hijos,  
quienes me acompañan desde el inicio en este largo proceso***

## **Prólogo**

La presente tesis se desarrolla en cumplimiento de los requerimientos para acceder al grado académico de Doctor en Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, en Marzo de 2011. Esta tesis fue supervisada por el Dr. Claudio Brunini, director del grupo de Georreferenciación Satelitaria de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG) de la Universidad Nacional de La Plata e investigador de CONICET y por la Dra. María Virginia Mackern docente-investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo y docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Juan Agustín Maza.

La investigación fue principalmente financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), a través del otorgamiento de becas de formación Tipo I y II. Cabe destacar el importante aporte y apoyo realizado por el grupo de la Unidad de Aplicaciones Geodésicas y Gravimétricas (UAGG) del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Cs. Ambientales. A través de su grupo humano y de su director Esp. Agrim. Luis E. Lenzano.

## **Agradecimientos**

En principio quiero expresar mi agradecimiento a mis directores Dra. M. Virginia Mackern y Dr. Claudio Brunini, quienes me acompañaron y aconsejaron durante los cinco años de estudio, trabajo y elaboración de esta tesis. En ellos encontré una profunda dedicación al trabajo que es ejemplo a seguir. Agradezco también al Esp. Agrimensor Luis Lenzano, que junto a la Dra. M. Virginia Mckern me brindaron los medios que me permitieron desarrollar el trabajo necesario.

A los miembros de la Unidad de Aplicaciones Geodésicas y Gravimétricas (UAGG) del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Cs. Ambientales, Ing. Agrim. Ana María Robín, Ing. Agrim. Aldo Perinetti, Ing. Agrim. Gabriela Lenzano, Adalberto Ferlito. A mis compañeros y amigos en tantos años compartidos, Ing. Agrim. Andrea Calori, Ing. Agrim. Natalia Riveros, Ing. Agrim. Ana María Robín, Dra. M. Virginia Mackern, Ing. Agrim. Hernan Alvis Rojas, Ing. Agrim. Fernanda Camisay, Federico González, que hicieron del lugar de trabajo un sitio muy agradable.

Un agradecimiento muy especial se merecen Laura Sanches y el Dr. Hermann Drewes, que me recibieron en su instituto y realizaron un importante aporte en esta tesis.

Al servicio de Informática del CCT- Mendoza, Rubén Soria, Pablo Castorino, Liliana Bonfiglioli, Marcela Orbiscay y Javier Orbiscay, que escucharon y respondieron un sinnúmero de preguntas.

Agradezco a mi familia, mis padres, Martha y Lucas, mi esposo Daniel mis hermanas e hijos, por apoyarme incondicionalmente durante los 5 años.

A todas las universidades y organismos públicos que ofrecieron sus estaciones de operación continua GPS, en Argentina y Sudamérica. A la Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC). A los Catastros provinciales y Colegios de Agrimensura. A la Red SIRGAS, a los centros de combinación y a los centros de procesamiento asociados.

Finalmente, quiero agradecer a los jurados de este trabajo, Dr. Richard Branham, Dr. Pablo Eullades, Dr. Mauricio Gende y Dr. José Luis Vacaflor, por la revisión del trabajo sus acertados comentarios que enriquecieron la presente versión final.

## Resumen

El sistema de referencia es sumamente necesario para la medición de cualquier fenómeno físico que ocurra y afecte al sistema Tierra, en especial si se utilizan herramientas de medición provenientes de la geodesia satelital. Éste sistema de referencia permite relacionar las variables medidas por diferentes técnicas y así comprender de manera conjunta el comportamiento de los fenómenos geodinámicos del sistema Tierra.

La materialización del sistema de referencia debe responder a las precisiones con que se desea definir el mismo. Para que ello sea posible es necesario combinar diferentes técnicas de medición que permitan llevarlo a cabo, así como atenerse a un riguroso procesamiento de la información que permita incorporar los mejores modelos existentes.

La densificación del sistema de referencia Internacional se lleva a cabo casi con exclusividad por medio de estaciones GNSS de medición, siendo ésta una de las técnicas geodésicas que permiten una monumentación, mantenimiento y operación ágil y de las más sencillas dentro del área de trabajo. Además de brindar buenas observaciones que permiten obtener los resultados y precisiones necesarias y requeridas para el fin buscado.

En esta tesis se desarrolla la metodología utilizada en la densificación del sistema de referencia internacional (ITRF), a través de una de sus técnicas espaciales, el GPS. Siendo quien regula y centraliza éste aporte el IGS.

El capítulo 1 introduce al lector en las utilidades y necesidades de contar con un sistema de referencia de alta precisión, que además debe mantenerse estable a lo largo del tiempo. Se presentan cuatro ejemplos prácticos del requerimiento del sistema de referencia preciso y global, a partir de objetivos científicos y profesionales.

Como la definición del sistema de referencia es teórica se hace necesario materializarlo sobre la superficie terrestre. El capítulo 2 resume los marcos de referencia a partir de los cuales se lleva a cabo esta tarea comenzando con el desarrollo del ITRF2008 (Marco de referencia Terrestre Internacional) e ITRF2005 y los parámetros que los relacionan. Inmediatamente se describe el aporte que realizan las observaciones GNSS a través del IGS a dicha materialización. Finalmente se explica como se densifica el IGS05 regionalmente a partir de SIRGAS y sus centros de procesamiento.

El capítulo 3 describe metodológicamente el procesamiento riguroso de una red de operación continua regional, en América de Sur (SIRGAS-CON-D-Sur). Haciendo referencia

a los modelos empleados en el procesamiento y en la determinación de parámetros, especialmente las coordenadas de las estaciones que conforman la red.

Los capítulos 4 y 5 están destinados al análisis de resultados. En el primero de ellos se toman las ecuaciones normales de una red regional (SIRGAS-CON-D-Sur), se la procesa semanalmente para realizar un análisis de precisión interna. Se realiza un ajuste con las soluciones diarias para obtener una solución semanal previa introducción del datum. A modo de análisis el marco de referencia se introduce mediante dos estrategias de ajuste, con dos diferentes grupos de coordenadas fiduciales IGS actualizadas por velocidades (IGS05+vel) e IGS semanales (IGS\_Weekly), tratando de determinar que metodología es la más adecuada para la densificación regional del marco de referencia.

El capítulo 5 desarrolla la metodología empleada para la estimación de velocidades precisas. Se analizan posteriormente las variaciones estacionales que presentan muchas series de coordenadas, en especial en la altura, las cuales no se encuentran representadas por las velocidades lineales estimadas. Con el objeto de dar una respuesta a este comportamiento estacional se analiza la correlación entre la variación de la altura y la variación en la presión atmosférica presente en el lugar de observación.

Finalmente en el capítulo 6 se resumen las conclusiones surgidas de cada capítulo. En función de los avances logrados en el tema se proponen tareas a futuro y los aportes desde esta tesis al ámbito de la geodesia regional e internacional.

## **Abstract**

The reference system is quite necessary for measuring any physical phenomenon that occurs and affects the Earth system, especially if the measuring tools used proceed from the satellite geodetics. They allow relating the variables through different techniques and in such a way it is possible to jointly understand the behavior of the geodynamic phenomena of the Earth system.

Its materialization must answer to the precisions needed to define it. For this to be accomplished it is necessary to combine different measuring techniques to perform it, as well as following a rigorous processing of the information that permits the addition of the best existing models.

The densification of the international reference system is carried out almost exclusively through GNSS measuring stations, this being one of the geodetic techniques easier to

monument, maintain and operate. Plus, they contribute good observations that permit obtaining the needed and required results and precisions for the searched object.

In this thesis I develop the methodology used in the densification of the international reference system (ITRF) through one of its spatial techniques, the GPS. The IGS is what regulates and centralizes this contribution.

The first chapter introduces the reader in the uses and necessities for having a high accuracy reference system that in addition will remain stable along time. We present four practical examples of the requirement of the precise and global reference system, starting from scientific and professional goals.

Since the definition of the reference system is technical it is necessary materializing it on the terrestrial surface. The second chapter briefly describes the frames that carry out this work beginning with the development of the ITRF 2008 (International Terrestrial Reference Frame) and the ITRF 2005, plus the parameters that relate them. Afterwards follows the description of the contribution of the GNS observations through the IGS to said materialization. Finally comes how the IGS05 is regionally densified from the SIRGAS and its processing centers.

The third chapter methodologically describes the rigorous processing of a network of regional continuous operation in South America (SIRGAD-CON-D-Sur). It refers to the models used in the processing and determination of parameters, especially to the coordinates of the stations conforming the network.

The fourth and fifth chapters are destined to analyzing the results. Chapter 4th takes the normal equations of a regional network (SIRGAS-CON-D-Sur) that is weekly processed to perform an internal precision analysis. It is carried out with an adjustment of daily solutions to obtain a weekly solution previous to the introduction of the datum. As an analysis, the reference frame is introduced through two adjustment strategies, with two different types of coordinates (IGS05+vel and IGS-Weekly) trying to determine which methodology is the most adequate for the regional densification of the IGS05 reference frame.

The fifth chapter develops the methodology used to assess the precise velocities. Later on there is the analysis of the seasonal variations that present many coordinates series, especially in height, as they are not represented by the estimated lineal velocities. In order to respond to this seasonal behavior we analyze the correlation between height variation and the variation of the atmospheric pressure at the observation site.

Finally the sixth chapter summarizes the conclusions brought by each chapter. As by the advances achieved in the subject, we propose future works and the contributions from this thesis to the ambit of the regional and international geodetics.

## **Siglas utilizadas en el texto**

<b>BSW</b>	Bernese GPS Programa V4.0
<b>CDDIS</b>	The Crustal Dynamics Data Information System
<b>CIM</b>	Centro de Información Meteorológica
<b>CODE</b>	Centro Europeo de Determinación Orbital
<b>CPLAT</b>	Centro de procesamiento Universidad de La Plata
<b>DGFI</b>	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Alemania
<b>DGPS</b>	Differential GPS
<b>DORIS</b>	Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélites
<b>ECU</b>	Centro de procesamiento Instituto Geográfico Militar, Ecuador
<b>EOP</b>	Earth Orientation Parameters
<b>FAGS</b>	Federación de Servicios de Análisis de Datos Astronómicos y Geofísicos
<b>GLONASS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	GPS, Sistema de Posicionamiento Global
<b>IAU</b>	Unión Internacional de Astronomía (International Astronomical Union)
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografía e Estadística, Brasil
<b>IERS</b>	Servicio de Internacional de Rotación Terrestre Internacional Earth Rotation Service
<b>IGAC</b>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia
<b>IGM-Ec</b>	Instituto Geográfico Militar, Ecuador
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>IGS-RNAAC-SIR</b>	IGS Regional Network Associated Analysis Center – SIRGAS
<b>ILRS</b>	International LASER Ranging Service
<b>ITRF</b>	International Terrestrial Reference Frame
<b>ITRS</b>	International Terrestrial Reference System
<b>IVS</b>	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
<b>JGM3</b>	The Joint Gravity Model 3
<b>L1</b>	Frecuencia fundamental GPS
<b>L2</b>	Frecuencia fundamental GPS
<b>L3</b>	Combinación de frecuencias GPS libre de ionosfera

<b>LGFS-LUZ</b>	Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, Universidad del Zulia, Venezuela
<b>LOD</b>	Longitud del Día (Lengthof Day)
<b>LUZ</b>	Centro de procesamiento Universidad del Zulia, Venezuela
<b>MAX-OBS</b>	Máximas observaciones
<b>NEQ</b>	Ecuaciones normales
<b>NNRNUVEL1A</b>	No Net Rotation Northwestern University Velocity Model 1A
<b>NTRIP</b>	Network Transfort of RTCM via Internet Protocol
<b>NUVEL-1</b>	Northwestern University Velocity Model -1
<b>PASMA</b>	Proyecto de Asistencia al Sector Minero Argentino
<b>POSGAR</b>	Posiciones Geodésicas Argentinas
<b>QIF</b>	Quasi -Ionosphere Free
<b>RAMSAC</b>	Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo
<b>RTCM</b>	Radio Technical Commission for Maritime Application
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>SGM-Uy</b>	Servicio Geográfico Militar, Uruguay
<b>SINEX</b>	Programa Independet Exchange
<b>SIRGAS</b>	Sistema de Referencia Internacional para las Américas
<b>SIRGAS-CON</b>	Red SIRGAS de medición continua
<b>SIRGAS-CON-C</b>	Red SIRGAS de medición continua - Continental
<b>SIRGAS-CON-D</b>	Red SIRGAS de medición continua - Densificación
<b>SIRGAS-CON-D-SUR</b>	Red SIRGAS de medición continua - Densificación Sur
<b>SLR</b>	Satellite Laser Ranging (Telemetría Láser sobre satélites)
<b>SOPAC</b>	The Scripps Orbit and Permanent Array Center
<b>SUR09P01</b>	Solución multianual al 2009 de la red SIRGAS-CON-D-Sur
<b>TIGA</b>	Tide Gauge Benchmark Monitoring
<b>TRF</b>	Terrestrial Reference Frame
<b>URY</b>	Centro de procesamiento Servicio Geográfico Militar, Uruguay
<b>VEMOS</b>	Modelo de velocidades SIRGAS, Drewes 2009
<b>VLBI</b>	Very Long Baseline Interferometry
<b>VMS2009</b>	Modelo de velocidades SIRGAS, Drewes 2009
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984

## Tabla de contenidos

<b>CAPITULO I: Necesidad de un Sistema de Referencia</b> .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Demandas del sistema de referencia – aplicaciones científicas.....	3
1.2.1. En la medición de la variación del nivel del mar .....	3
1.2.2. El marco de referencia en la medición del campo de gravedad.....	6
1.2.3. En la estimación de las deformaciones corticales.....	10
1.3. Demandas del sistema de referencia – aplicaciones prácticas .....	13
1.3.1. Georreferenciación.....	13
1.4. Conclusiones del capítulo .....	18
<b>CAPITULO II: La Materialización de los Marcos de Referencia con GNSS, Internacional y Regionalmente</b> .....	20
2.1. Introducción .....	20
2.2. El Marco de referencia terrestre internacional (ITRF) .....	21
2.2.1. ITRF2008 .....	23
2.2.1.1. Datos utilizados para el cálculo .....	23
2.2.1.2. Estrategia de ajuste utilizada .....	23
2.2.1.3. Definición del Datum en ITRF2008 .....	24
2.2.1.4. Parámetros de transformación entre ITRF2005 e ITRF2008.....	24
2.2.2. ITRF2005 .....	25
2.3. Contribución del IGS .....	27
2.4. SIRGAS – El Marco de referencia en América Latina .....	29
2.5. La base de SIRGAS: Los Centros de datos y procesamiento regionales.....	31
2.5.1. Los Centros de procesamiento y el marco de referencia SIRGAS-CON.....	31
2.5.2. CIMA un Centro de Procesamiento de SIRGAS en Argentina .....	35
2.6. Conclusiones del capítulo .....	37
<b>CAPITULO III: Modelos y estrategias de procesamiento utilizadas en el cálculo de una red de Estaciones GNSS Rregional</b> .....	38
3.1. Introducción .....	38

3.2. Cálculo de una red regional, SIRGAS-CON-D-SUR .....	39
3.2.1. El programa.....	39
3.2.2. Las observaciones utilizadas.....	40
3.2.3. Las Efemérides utilizadas y los parámetros de Orientación terrestres (EOPs)42	
3.2.4. Especificaciones receptores, antenas y satélites. Correcciones. ....	44
3.3. Modelos utilizados en el procesamiento .....	45
3.3.1. Modelo de Velocidades .....	45
3.3.2. Modelo por el efecto de mareas .....	46
3.3.3. Modelo de carga oceánica.....	47
3.3.4. Modelo troposférico a priori .....	47
3.3.5. Modelos de precesión y nutación .....	48
3.4. Estimación de parámetros .....	49
3.4.1. Pre procesamiento de código - Sincronización de relojes.....	49
3.4.2 Conformación de vectores – Simples diferencias .....	50
3.4.3. Pre procesamiento de fase – Triples diferencias .....	51
3.4.4. Estimación de parámetros – Dobles diferencias de fase .....	52
3.4.5. Ajuste libre semanal – Metodología.....	54
3.4.6. Análisis de resultados y validación .....	55
3.5. Conclusiones del capítulo.....	56
<b><i>CAPITULO IV: El ajuste de redes, una herramienta utilizada para estimar precisión e introducir el Marco de Referencia que se pretende definir y/o densificar .....</i></b>	<b>58</b>
4.1. Introducción .....	58
4.2. Ajuste semanal – Introducción de un datum .....	58
4.2.1. Estrategias de ajuste.....	59
4.2.2. Puntos y coordenadas fiduciales .....	60
4.2.3. Deformación introducida por el Datum. Estrategia de análisis .....	62
4.2.4. Resultados de la comparación .....	63
4.2.4.1. Análisis de la deformación introducida por el marco, sobre los puntos fiduciales.....	63

4.2.4.2. Análisis de la deformación introducida por el marco, sobre los puntos NO fiduciales.....	68
4.2.4.3. Análisis de la deformación introducida por el marco, sobre los puntos extremos de la red.....	71
4.3. Conclusiones del capítulo.....	72
<b>CAPITULO V: Determinación Geodésica de Velocidades a partir de observaciones GNSS de medición continua a una escala continental. Su importancia para mantener en el tiempo la precisión de un Marco de Referencia.....</b>	<b>74</b>
5.1. Introducción.....	74
5.2. El mantenimiento del marco de referencia.....	75
5.3. Movimiento de Placas Global. Principal causa de la desactualización del marco... 77	
5.4. Solución acumulada.....	81
5.5. Desplazamiento de las coordenadas en el tiempo.....	82
5.6. Velocidades no lineales.....	86
5.7. Correlación entre la variación de la coordenada Up y la variación de la presión atmosférica.....	88
5.7.1. Recopilación de antecedentes.....	89
5.7.2. Datos y series meteorológicas.....	91
5.7.3. Análisis de la influencia de carga atmosférica sobre las variaciones en la coordenada “altura”.....	92
5.7.3.1. Metodología de trabajo.....	92
5.7.3.2. Resultados.....	93
5.8. Conclusiones y trabajos futuros.....	95
<b>CAPITULO VI: Conclusiones.....</b>	<b>96</b>
6.1. El objetivo de la geodesia moderna.....	96
6.2. Materialización y densificación del sistema de referencia terrestre internacional ... 97	
6.3. Modelos y estrategia de procesamiento para asegurar las precisiones que requiere un marco de referencia.....	98
6.4. El ajuste de redes, una herramienta utilizada para estimar precisión e introducir el marco de referencia.....	99
6.5. Estimación de Velocidades desde las observaciones geodésicas. Su importancia en el mantenimiento de un marco de referencia.....	100

6.6 Trabajos futuros.....	102
<b>Bibliografía Consultada .....</b>	<b>104</b>
<b><i>ANEXO I: Datos e Infraestructura de estaciones GNSS .....</i></b>	<b>108</b>
<b><i>ANEXO II: Análisis de deformación al introducir Datum .....</i></b>	<b>110</b>
Referencias estrategias de ajuste.....	110
Estaciones de fiduciales o de vinculación.....	110
RED SIRGAS-CON-SUR.....	116
Referencias.....	116
Estaciones no fiduciales.....	116
<b><i>ANEXO III: Coordenadas y velocidades solución SUR09P01 .....</i></b>	<b>154</b>
<b><i>ANEXO IV: Series de coordenadas de las estaciones de la red SIRGAS-CON-D ..</i></b>	<b>157</b>

## Lista de Figuras

Figura 1: medición del nivel de mar (Radar microonda).....	3
Figura 2: Variaciones del nivel medios del mar obtenidos a partir de las mediciones de TOPEX/Poseidón .....	4
Figura 3: Medición de la variación del nivel del mar. Mareógrafo asociado a una estación GNSS.....	5
Figura 4: Red TIGA en el Atlántico, mareógrafos en combinación con estaciones permanentes.....	6
Figura 5: Misión gravimétrica GRACE.....	7
Figura 6: Correlación de datos obtenidos a partir de la misión GRACE y series de tiempo de Observaciones GNSS .....	8
Figura 7: Deformación en la placa sudamericana a partir de velocidades SIRGAS.....	10
Figura 8: Desplazamiento co-sísmico y movimiento.....	11
Figura 9: Desplazamiento co-sísmico y movimiento post-sísmico (no lineal) derivado de las coordenadas geodésicas semanales de estación CONZ.....	12
Figura 10: Desplazamientos horizontales producidos por el sismo del 27 de febrero de 2010 en las cercanías de la ciudad de Concepción.....	13
Figura 11: diferencias obtenidas luego de georreferenciar con diferentes marcos de referencia (zona estable de la placa).....	15
Figura 12: diferencias obtenidas luego de georreferenciar con diferentes marcos de referencia (zona de deformación de la placa).....	16
Figura 13: promedio de las diferencias obtenidas luego de georreferenciar con diferentes marcos de referencia en distintas zonas de la placa .....	18
Figura 14: Sitios y técnicas empleados en la realización de ITRF 2008 .....	22
Figura 15: Sitios utilizados para la estimación de parámetros de transformación entre ITRF2008 e ITRF2005.....	25
Figura 16: Cálculo de ITRF05.....	27
Figura 17: Red SIRGAS 2000 y SIRGAS-CON .....	30
Figura 18: Esquema de procesamiento de la red SIRGAS-CON (red continental + redes de densificación).....	33
Figura 19: Red SIRGAS SIRGAS-CON. Solución multianual (SIR10P01).....	35
Figura 20: Red SIRGAS de operación continua SIRGAS-CON (febrero 2010) (www.sirgas.org).....	36

Figura 21: Red SIRGAS-CON-SUR y SIRGAS-CON-C (noviembre 2010) .....	41
Figura 22: Esquema de acceso a los productos orbitales semanales del IGS.....	43
Figura 23: configuración de la red SIRGAS-CON-Sur .....	51
Figura 24: Estaciones con coordenadas en cada marco de referencia (ITRF00, ITRF05, IGS05).....	60
Figura 25: Referencia del análisis de deformación al introducir el Datum.....	63
Figura 26_a: residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación CONZ (Concepción – Chile). Estación fiducial .....	65
Figura 26_b: residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación BRAZ (Brasilia - Brasil). Estación fiducial .....	65
Figura 27: residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación LPGS (La Plata - Argentina), Estación fiducial .....	66
Figura 28: promedio de los residuos luego de aplicar la transformación de Helmert para las estaciones fiduciales .....	68
Figura 29: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación TUCU .....	69
Figura 30: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación UNRO.....	70
Figura 31: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación UCOR.....	70
Figura 32: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación OH12 (Antártica) .....	71
Figura 33: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación CRO1 .....	72
Figura 34: Red SIRGAS Sur de operación continua SIRGAS-CON-D-Sur y Red SIRGAS de operación continua SIRGAS-CON.....	73
Figura 35: Modelos de tectónica de placas NUVEL-1.....	78
Figura 36: globales de deformación. ....	79
Figura 37_a: comparación de vectores velocidad horizontal NUVEL-1A, ITRF2000 y solución acumulada de la red SIRGAS al año 2002.....	80
Figura 37_b: comparación de vectores velocidad horizontal, ITRF2005 y solución acumulada de la red SIRGAS-CON-D-Sur al año 2009 .....	80
Figura 38: Comparación de vectores de velocidad SIRGAS-CON-D-Sur e ITRF2005 relativos a la placa sudamericana .....	81
Figura 39: Velocidades determinadas a partir de la solución acumulada SUR08P01 .....	83
Figura 40: Variación de las coordenadas en la estación LPGS (La Plata-Argentina).....	84
Figura 41: Variación de coordenadas en la estación MZAC (Mendoza-Argentina) .....	85

Figura 42: Variación de coordenadas en la estación SANT (Santiago de Chile).....	86
Figura 43: Variación de coordenadas en la estación BRAZ (Brasilia, Brasil, cuenca Amazónica) .....	87
Figura 44: Variación de coordenadas en la estación NAUS (Brasil, cuenca Amazónica). 88	
Figura 45: representación espacial de la existencia de estaciones meteorológicas y GNSS. Representadas en color azul las 1º de ellas y en color rojo las 2º.....	89
Figura 46: series temporales de presión atmosférica para 4 estaciones meteorológicas ubicadas en las ciudades de Arequipa, Basilia, Buenos Aires y Mendoza.....	91
Figura 47: Series temporales de la Altura-Estaciones AREQ, BRAZ, IGM1 y MZAC.....	93
Figura 48: Correlación entre las funciones de aproximación a la variación en la presión atmosférica y a la variación de la altura de la estación.....	94
Figura 49: Funciones de aproximación normalizadas.....	94

## Lista de Tablas

Tabla 1: Época de referencia de los marcos utilizados .....	15
Tabla 2: Diferencias obtenidas luego de aplicar distintos marcos de referencia .....	17
Tabla 3: Productos y series utilizados en la realización de ITRF 2008. ....	23
Tabla 4: Parámetros de transformación en la época 2005.0 y sus índices de ITRF2008 a ITRF2005 (ITRF2005 menos ITRF2008).....	25
Tabla 5: Centros de Análisis SIRGAS: 7 Centros de Procesamiento, 2 Centros de Combinación .....	32
Tabla 6: Requisitos mínimos establecidos en el procesamiento por el grupo de trabajo I del proyecto SIRGAS .....	40
Tabla 7: Precisión de las coordenadas IGS05.....	64
Tabla 8: promedio de los residuos luego de aplicar la transformación de Helmert.....	67
Tabla 9: comparación de datos del servicio meteorológico Nacional Argentina y Datos publicados en la página web <a href="http://www.tutiempo.net">www.tutiempo.net</a> .....	90

### **1.1. Introducción**

La evolución constante de los sistemas de posicionamiento por satélite, sumado al crecimiento también de los sistemas informáticos y de comunicación que permiten intercambiar información rápida y eficientemente, proporcionan hoy a la ciencia una herramienta fundamental. En relación a ello los sistemas de referencia y sus respectivas materializaciones han avanzado a lo largo del tiempo a medida que fue necesario determinar de forma más precisa la posición de puntos sobre la superficie terrestre, acompañando a los avances tecnológicos que permitieron realizar mediciones con mayor precisión.

La posición tridimensional sobre la superficie terrestre de cualquier punto parece una cosa sencilla y sin ningún trasfondo, ya que con el solo hecho de encender un receptor GNSS, el cual observa satélites GPS, GLONAS o GALILEO (en un futuro) obtenemos las coordenadas de dicho punto. Sin embargo para que estas coordenadas sean determinadas en forma precisa debe existir un sistema de referencia global, de forma tal que todos los punto a los cuales se le calculan sus coordenadas puedan relacionarse directamente entre si.

Este sistema de referencia tiene una definición teórica ([Mackern, 2003](#)) que se materializa a través de su respectivo marco de referencia sobre la superficie terrestre. El problema se basa en que esta superficie se encuentra en constante cambio, producto de diferentes efectos geofísicos como son los movimientos tectónicos, la carga atmosférica, hidrológica y oceánica, el rebote post-glacial, etc. Es decir que se quiere materializar un sistema de referencia único, fijo y estable en el tiempo sobre una superficie que se encuentra en permanente movimiento.

Hoy en día los avances científicos y la tecnología existente han permitido medir y modelar muchos de los fenómenos físicos mencionados que tienen fuerte influencia sobre el sistema Tierra produciendo variaciones sobre la superficie terrestre. Mediante el desarrollo de mejores modelos es posible reducir los efectos producidos por tales factores físicos, y de este modo mejorar cada vez más la materialización del sistema de

referencia. Las variaciones milimétricas en las coordenadas de diferentes épocas de observación se las llama velocidades y acompañan a las coordenadas de cada punto en un marco de referencia determinado.

Como consecuencia, un buen sistema de referencia se encuentra materializado por el marco de referencia, que consiste en marcas ubicadas en el terreno cuyas coordenadas son conocidas al igual que la precisión con que fueron determinadas. Conjuntamente debe acompañarse la época a que refieren las coordenadas y las velocidades de desplazamiento que presentan en el tiempo para asegurar el mantenimiento del marco de referencia a medida que pasan los años. Cabe destacar que solamente será posible listar velocidades si se trata de un marco de referencia activo, materializado por estaciones permanente GNSS.

En este capítulo se hace referencia a la importancia de contar con un sistema de referencia geocéntrico global preciso y estable en el tiempo desde la aplicación y utilización del sistema y marco de referencia en distintas disciplinas de la Ciencia de la Tierra y la Ingeniería.

En primer lugar se ejemplifica la utilización del sistema de referencia geocéntrico global en la determinación del nivel medio del mar mediante la implementación de dos técnicas geodésicas que utilizan satélites para la medición, ellas son “altimetría satelital” y “una red de mareógrafos asociado a una de estaciones GNSS”. Como segundo ejemplo se muestra la necesidad de contar con un marco de referencia preciso y estable para estudiar la variación de masas en el sistema tierra, utilizando satélites gravimétricos como técnica de observación. Como tercer ejemplo y utilizando observaciones GNSS se desarrolla la intervención del sistema de referencia en el estudio de las deformaciones corticales.

En la segunda parte de este primer capítulo se analiza la influencia que tiene la desactualización del marco de referencia en la georreferenciación, utilizando sistemas de observación satelital, en diferentes zonas.

Finalmente se concluye en la importancia del utilizar marcos de referencia actualizados que materialicen el sistema de referencia correspondiente en forma precisa y estable por décadas.

## 1.2. Demandas del sistema de referencia – aplicaciones científicas

### 1.2.1. En la medición de la variación del nivel del mar

Luego del desarrollo de la geodesia satelital, y su aplicación a distintas ramas de las ciencias de la tierra, vemos que los sistemas de referencia no sólo son necesarios para las actividades de la geodesia, la agrimensura y la ingeniería, sino que además son necesarios para la determinación de los cambios que se producen sobre la superficie terrestre. Un ejemplo de ello son las variaciones del nivel del mar (<http://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/topex/>), este fenómeno físico tiene fuerte incidencia en las interpretaciones del cambio global (Hernández, 2008).

En la figura 1 podemos observar un satélite de la misión Topex/Poseidon, la cual es una de las misiones de altimetría satelital que opera sobre la base de medir el tiempo de propagación de un laser que rebota sobre la superficie del mar. Mediante la

implementación de la fórmula:  $\frac{\Delta t}{2} * c = r$

Donde: “ $\Delta t$ ” es el tiempo que tarda la señal láser en recorrer la distancia desde el satélite hasta la superficie del mar y regresar al satélite; “ $c$ ” es la velocidad de la luz y “ $r$ ” es la distancia satélite-mar.

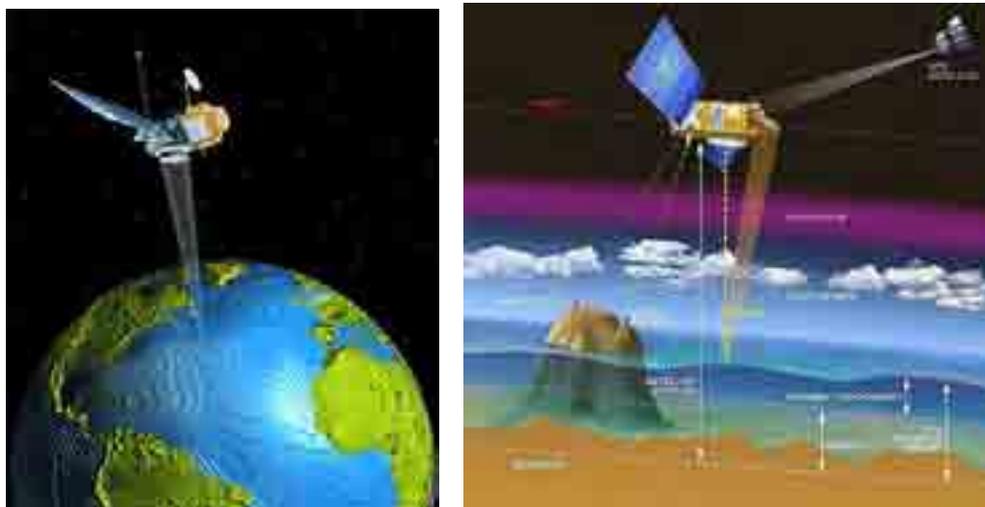


Figura 1: medición del nivel de mar (Radar microonda)  
<http://oceanmotion.org/html/gatheringdata/satellites.htm>  
[http://earth.eo.esa.int/brat/html/alti/principle/basic\\_en.html](http://earth.eo.esa.int/brat/html/alti/principle/basic_en.html)

Conocida la posición precisa del satélite que realiza la medición en un marco de referencia dado, pueden interpretarse fenómenos físicos del cambio global, como son las

variaciones del nivel del mar a escala global y regional debida, entre otros fenómenos, a la expansión termal de los océanos.

Un dato fundamental para determinar en forma precisa y coherente esta variación es la **posición del satélite**, en el momento en que se realiza la medición. Para ello es necesario contar con un sistema de referencia global que permita conocer las posiciones de los satélites y sus variaciones en el tiempo, mejorar los modelos dinámicos para asegurar la posición de sus coordenadas (Mackern, 2003) y optimizar la estimación de los parámetros de orientación terrestre (EOPs) de manera de asegurar la mejor estimación posible de las coordenadas de los satélites en el sistema de referencia terrestre internacional.

Para que las interpretaciones de las variaciones del nivel del mar sean correctas, las posiciones de los satélites deben referir al mismo marco de referencia, el cual debe mantenerse en el tiempo, ya que las variaciones encontradas son del orden de los milímetros (Dorandeu, 2002) detectándose luego de repetir reiteradamente la medición en el transcurso de los años.

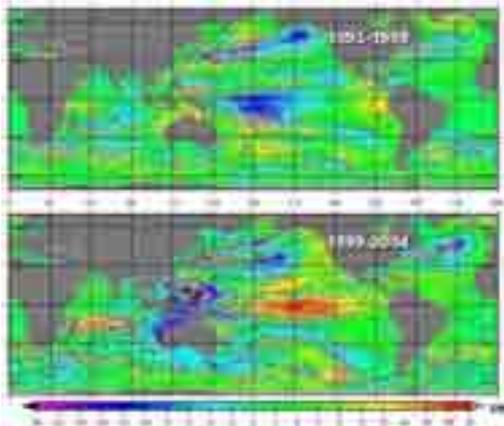


Figura 2\_a: Cambios regionales obtenidos a partir de las mediciones de TOPEX/Poseidón (Drewes, 2008)

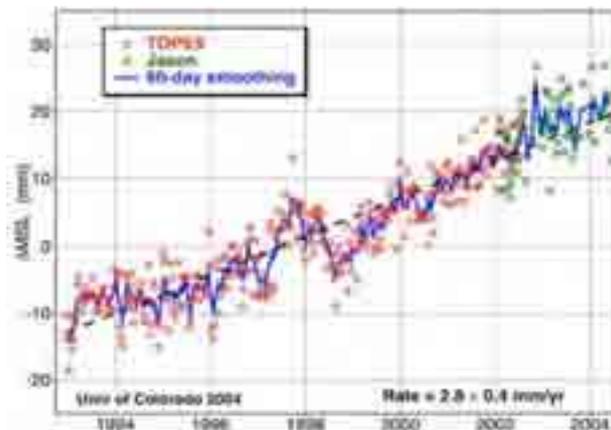


Figura 2\_b: Aumento del nivel medio del mar determinado a partir de la medición de la misión Topex/Poseidon (Drewes, 2008)

Figura 2: Variaciones del nivel medios del mar obtenidos a partir de las mediciones de TOPEX/Poseidón

Misiones actuales de este tipo de medición son:

- Geosat Follow On (GFO): <http://gfo.wff.nasa.gov/>
- TOPEX/Poseidon: <http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/mission.html>
- Jason 1: <http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/jason-1.html>

- Jason 2: <http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/ostm.html>
- ENVISAT: <http://envisat.esa.int/earth/www/area/index.cfm?fareaid=6>

Si por ejemplo se toman las mediciones del satélite TOPEX/Poseidon y su continuación Jason es posible correlacionarlas porque en ambas misiones las coordenadas de los satélites se hallan en el mismo sistema de referencia. En la figura 2\_a y 2\_b se pueden observar los resultados de estas dos misiones para un periodo de 10 años. Allí se observan variaciones del nivel del mar de 2,8 mm/año.

Independientemente la variación del nivel del mar puede ser medida también mediante el uso de mareógrafos en combinación con estaciones permanentes GNSS (Fig. 3). Se cuenta con mediciones registradas en mareógrafos distribuidos por distintas partes del continente americano, algunos ubicados en el hemisferio norte, otros en el hemisferio sur. Vinculado a

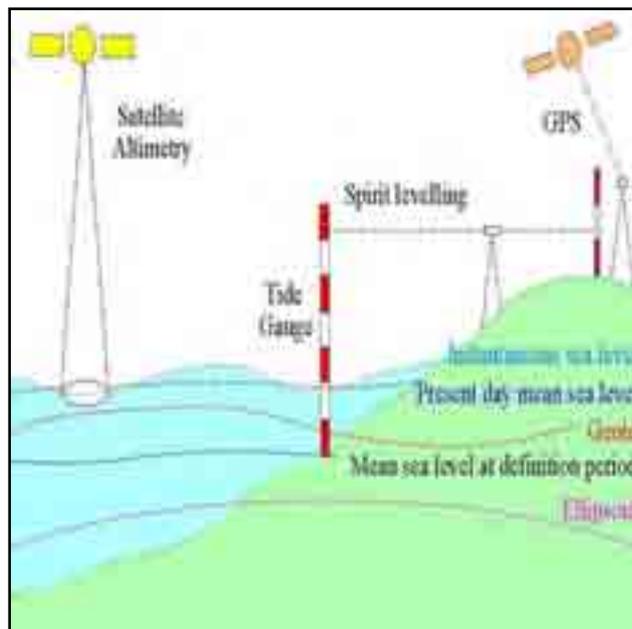
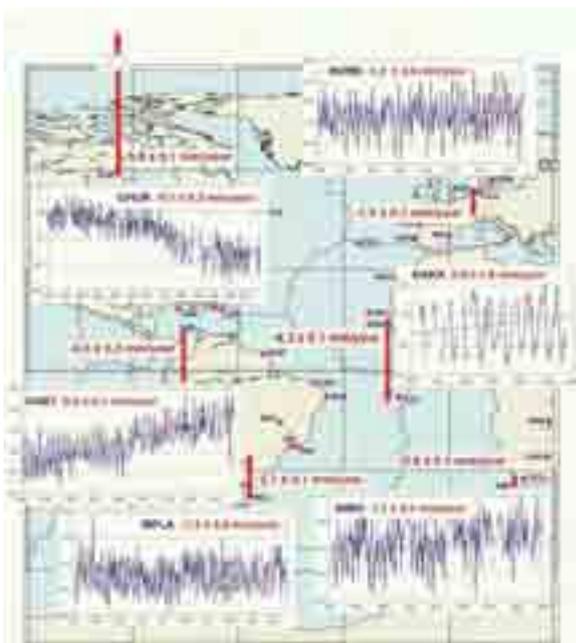


Figura 3: Medición de la variación del nivel del mar. Mareógrafo asociado a una estación GNSS (Drewes 2008)

estos mareógrafos se cuenta con mediciones GNSS que permiten registrar la posición del mareógrafo con respecto al sistema de referencia. Este sistema de mareógrafos-receptores GNSS registra los cambios del nivel del mar en las distintas épocas del año. Si se comparan sus mediciones con las realizadas por alguna de las misiones de altimetría satelital previamente mencionadas es posible encontrar variaciones similares de aumento o disminución de nivel del mar para las distintas épocas del año en distintas zonas costeras del continente.

En la figura 4, se observan resultados de la red TIGA (Tide Gauge Benchmark Monitoring) sobre mareógrafos acompañados por un receptor GNSS de medición continua ubicados en la costa atlántica (Sánchez, 2009). Los primeros son sensibles a los cambios del nivel del mar pero sus mediciones se ven afectadas por los movimientos verticales de la corteza terrestre en el sitio donde está emplazado el mareógrafo; a partir

de los datos registrados por las estaciones GNSS pueden calcularse los movimientos verticales de la corteza terrestre. La repetitividad de esta medición a lo largo de los años y luego de un post-procesamiento permiten estimar variaciones en las tres componentes o coordenadas de la corteza terrestre ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) o ( $\Delta\phi$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\Delta h$ ) (capítulo V). Los registros mareográficos se encuentran en color azul, a su vez se ha estimado por GPS las variaciones en altura (fenómenos geodinámicos) en color rojo. Esta variación en altura es utilizada para corregir las mediciones de los mareógrafos. De la relación entre ambas se calcula la variación real de nivel del mar en tales puntos (color negro).



**Red TIGA en el Atlántico**

- BORK 1.2 -1.5 = -0.3 mm/a
- CHUR -9.7 +9.8 = 0.1 mm/a
- DAKA 2.9 -4.3 = -1.4 mm/a
- CART 5.3 -2.5 = 2.8 mm/a
- SIMO 1.1 +0.5 = 1.6 mm/a
- MPLA -1.3 +2.1 = 0.8 mm/a

Figura 4: Red TIGA en el Atlántico, mareógrafos en combinación con estaciones permanentes (Drewes, 2008)

La necesidad de los sistemas de referencia, como se dijo al comienzo de este capítulo, no es necesariamente una aplicación geodésica pura, sino que se trata de una aplicación de la geodesia moderna basada en mediciones satelitales con el objeto de describir y modelar los cambios del “Sistema Tierra”.

Se evidencia en los párrafos anteriores la demanda que los estudios para el cambio global requieren del desarrollo de la geodesia y por sobre todo de un sistema de referencia preciso, global y estable en el tiempo.

**1.2.2. El marco de referencia en la medición del campo de gravedad**

Otra aplicación en que la geodesia requiere de los marcos de referencia precisos es en las mediciones gravimétricas satelitales. La misión GRACE (Knudsen, 2001) se basa en la medición de variaciones en la distribución de masas de la Tierra. A partir de su relación

con la atracción gravitatoria terrestre y la relación de los dos satélites de GRACE entre ellos y con respecto al sistema terrestre.

Los satélites de la misión GRACE se encuentran separados uno del otro a una distancia constante "D" (fig 5). Esta distancia es medida a través de un distanciómetro láser ubicado en uno de ellos. Cuando la distancia entre ellos se modifica, se considera que es debido a cambios en el campo gravitatorio terrestre como consecuencia de una variación en la distribución de las masas.

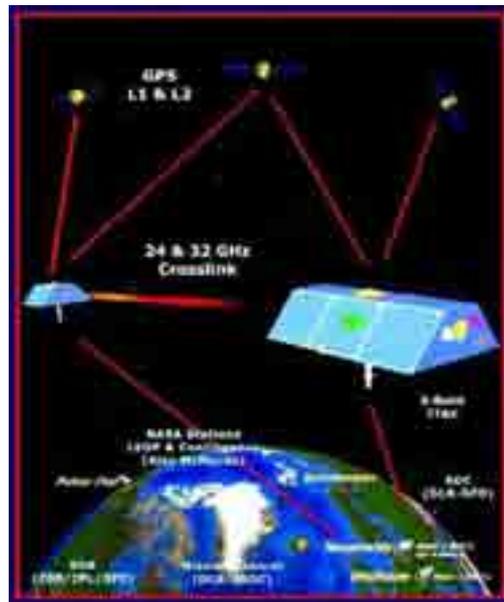


Figura 5: Misión gravimétrica GRACE  
(Drewes, 2008)

Dado que los satélites de la misión GRACE giran alrededor de la tierra cubriendo la totalidad del planeta es posible mapear la variación de la gravedad en un sitio determinado para diferentes periodos. Por medio de la repetitividad de las observaciones se puede analizar el comportamiento del campo gravitatorio en distintas épocas del año y relacionarlas con cambios del sistema Tierra como son las épocas de lluvias, de sequía, de acumulación nívea, entre otras.

Si se observan los mapas de la figura 6 que pueden obtenerse a partir de las observaciones de GRACE de abril y septiembre de 2003 en los cuales se ha representado la variación de la gravedad ( $\Delta g$ ) para la región norte de América del Sur coincidentemente con la zona de influencia de la cuenca del Río Amazonas se puede deducir la presencia de un exceso de masas en abril con respecto a septiembre. Tratando de explicar este cambio se ha observado que las épocas donde se concentra mayor cantidad de agua sobre la superficie terrestre debido a las lluvias son detectadas por los datos recogidos por el satélite GRACE (mayor variación de la gravedad por aumento de masas). A estas modificaciones se las conoce como variaciones del geoide o de la gravedad en la superficie terrestre por acumulación de masa (agua) sobre la misma.

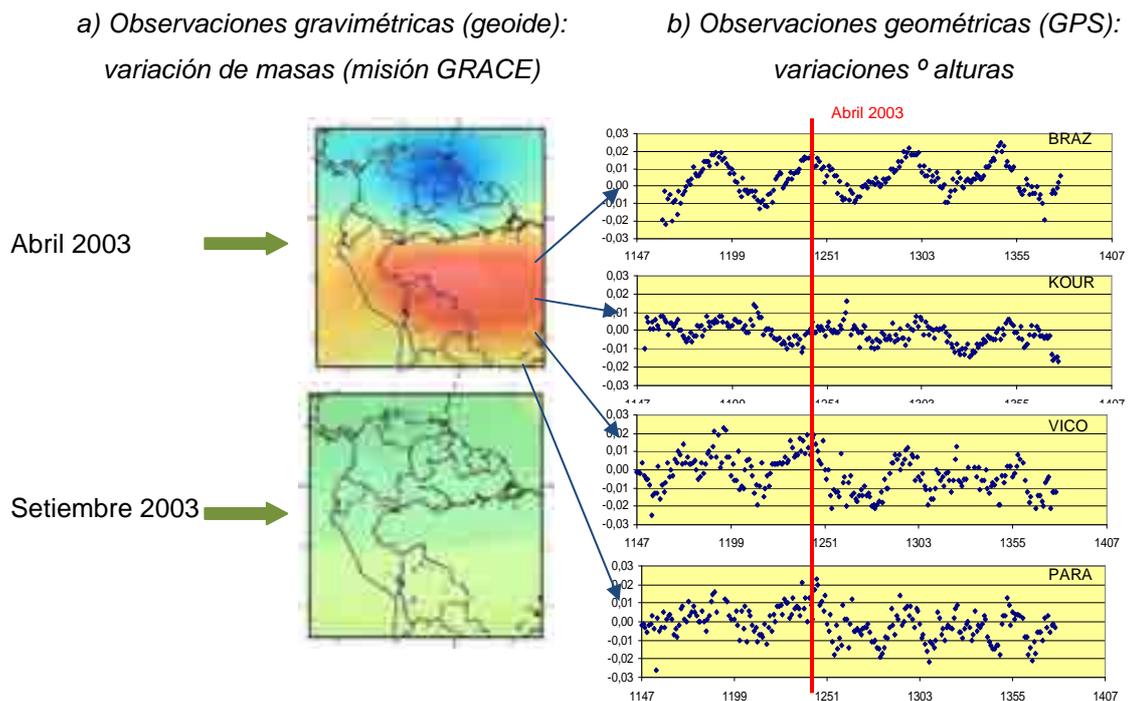


Figura 6: Correlación de datos obtenidos a partir de la misión GRACE y series de tiempo de Observaciones GNSS (Drewes, 2008)

En la figura 6\_a se puede observar este fenómeno para dos épocas diferentes de un mismo año. En la primera (abril 2003) se ve una mayor concentración de masa (color rojo), esto se debe a que en esta época del año se concentra mayor acumulación de agua por tratarse de la época de lluvias en el área especificada. La segunda imagen (setiembre del mismo año) muestra cómo la concentración de masas disminuye en la misma área de estudio. Esto ocurre ya que nos encontramos en la época seca en ese área, y el agua acumulada en el periodo de lluvias se evapora y escurre, facilitando la desconcentración de agua acumulada sobre la superficie.

La siguiente ecuación resume las variaciones de masas hidrológicas en la tierra:

$$\text{lluvia} - \text{evaporación} - \text{escurrimiento} = \text{acumulación de agua en el suelo}$$

Los dos satélites que componen la misión GRACE obtienen su posición por satélites GPS, en el sistema de referencia dado por éstos últimos (ITRS). La posición de ellos es muy importante ya que de su ubicación instantánea en el sistema de referencia global depende su ubicación relativa con respecto al cuerpo físico de la tierra y por consiguiente la respuesta esperada en el campo gravitatorio terrestre. Para poder detectar cambios en el campo gravitatorio se da por conocida su posición. Por lo tanto errores o imprecisiones

en sus coordenadas se traducen en errores en la determinación de la variación en la gravedad.

Para mejor interpretar el comportamiento del campo gravitatorio la geodesia utiliza otro tipo de observaciones, la medición de observables GPS para la determinación de posiciones geodésicas instantáneas de puntos ubicados sobre la corteza terrestre.

Pueden observarse en la figura 6\_b. las series de tiempo para un periodo de más de 4 años, de las variaciones de altura de las estaciones permanentes GNSS ubicadas en las cercanías de la cuenca del río Amazonas, en tales estaciones se observa un movimiento estacional de características similares a las expresadas en el párrafo anterior. La época en que la altura de cada estación disminuye corresponde a la época donde se concentra mayor cantidad de agua sobre la superficie circundante a la misma. Respectivamente cuando la altura de la estación aumenta se relaciona con la disminución de la concentración de agua y la disminución del efecto gravitatorio obtenido con las mediciones del satélite GRACE.

Sin la existencia de un sistema de referencia “**único, preciso y estable por décadas**”, esta correlación sería imposible de realizar, ya que los datos de las estaciones GNSS ubicadas sobre la superficie terrestre muestran esta tendencia y afirman la misma luego de repetir la medición por varios periodos. Si el sistema de referencia fuese modificándose en el tiempo no podríamos llegar a estas conclusiones ya que sería imposible comparar un periodo con otro. Lo mismo ocurre en el caso de los datos recogidos por GRACE, ya que los resultados pueden observarse luego de varias repeticiones en la medición, por varios periodos de características climáticas y físicas similares. Por último si el sistema de referencia al que se vinculan ambas mediciones fuera diferente no podrían compararse unos resultados con otros.

Por otro lado y como se expreso anteriormente, los satélites de la misión GRACE, calculan su posición a partir de observaciones GNSS, para la cual debe utilizar las mejores órbitas disponibles en el momento de calcular la posición, es decir las efemérides de los satélites a utilizar deben ser “efemérides precisas”. Estas se obtienen entre 12 y 15 días después en que se realizó la observación GNSS. Pero las orbitas para los satélites GNSS se estiman con observaciones realizadas sobre la superficie terrestre, mediante estaciones de control distribuidas homogéneamente en todo el globo. Con ello se quiere decir que deben aplicarse todas las correcciones y estimarse todos los parámetros necesarios que afectan a la señal GNSS en su trayectoria a la superficie terrestre, así como también deben ser modelados todos los efectos físicos que producen

desplazamientos y variaciones en la posición de las estaciones de control. De esta manera se podrá asegurar y confiar que las variaciones detectadas por la misión GRACE son reales y no son producto de variaciones en las órbitas de los satélites GNSS causadas por malas estimaciones desde las estaciones GNSS de control ubicadas sobre la superficie terrestre.

### 1.2.3. En la estimación de las deformaciones corticales

La Geodesia contribuye con la estimación de desplazamiento para diferentes placas tectónicas, detectar y estimar velocidades en las zonas denominadas de deformación. Esto es posible gracias a las observaciones continuas realizadas en una cantidad de puntos en forma de red ubicados en las distintas placas de la corteza terrestre. Sobre éstas se observan variaciones de la posición de los mismos a lo largo del tiempo, es decir para cada época de medición se obtiene una



Figura 7: Deformación en la placa sudamericana a partir de velocidades SIRGAS (Drewes, 2005)

coordenada distinta a la anterior. La posición de cada punto para cada época se encuentra referida al mismo sistema de referencia. El problema radica en la materialización de este sistema de referencia, la misma se realiza sobre la superficie terrestre, pero como se expresó anteriormente, ésta se encuentra en permanente movimiento, lo cual determina las velocidades de desplazamiento. Es importante entonces mantener actualizado constantemente el marco de referencia que materializa el sistema referencia de modo tal que estas variaciones no afecten a la medición realizada. De igual manera es muy importante en esta temática el conocimiento de los distintos marcos de referencia y sus relaciones por tratarse de series temporales con largos periodos.

Si se cuenta con una cantidad significativa de puntos distribuidos de manera tal que cubran un área homogéneamente y se calculan sobre ellos sus coordenadas y sus

respectivas variaciones es posible modelar la deformación del área en estudio, por medio de modelos de interpolación por ejemplo. La figura 7 muestra el modelo de deformación calculado para América del sur (Drewes, 2005), a partir de la estimación de velocidades en los puntos de la red SIRGAS (Sistema de referencia para las Américas) a los cuales se ha restado el movimiento propio de la placa sudamericana. Para llegar a estas deformaciones es necesario en primer lugar calcular las velocidades o variaciones época a época de cada punto en donde se cuenta con una estación GNSS continua y posteriormente reducir esta velocidad mediante la resta de la deformación conocida para la placa tectónica correspondiente. Esta velocidad se estima de estudios geofísicos como por ejemplo el modelo NNRNUVEL1A (De Mets et al., 1994).

El contar con datos y cálculos periódicos de las coordenadas de estaciones permanentes GNSS, permite determinar la dimensión de desplazamientos producidos por un sismo de importante magnitud. Fue el caso de la estación ubicada en la ciudad de Arequipa, Perú,

en el año 2001 donde se observó un desplazamiento cercano al metro producido por un importante sismo. La serie de tiempo de la Figura 8 muestra el desplazamiento en la componente norte, este y altura.

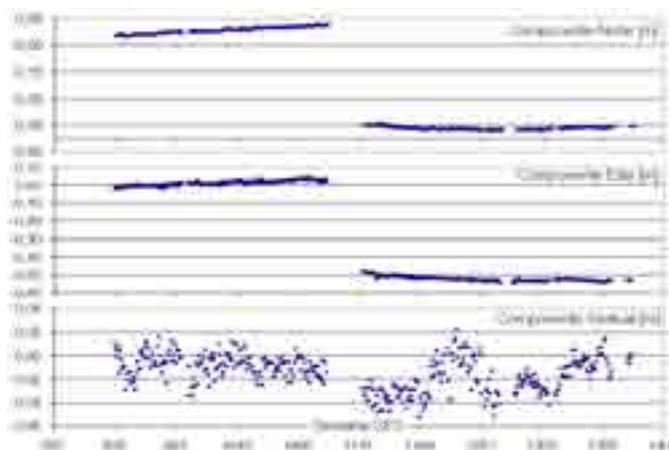


Figura 8: Desplazamiento co-sísmico y movimiento (Drewes, 2008)

En esta ocasión las coordenadas de la estación AREQ debieron ser recalculadas al igual que su velocidad. Por lo que esta estación GNSS cuenta con un juego de coordenadas y velocidades hasta la fecha del sismo y con otro de allí hasta la actualidad (Seemueller, 2004).

Este mismo ejemplo se repite en el último sismo producido en las cercanías de la ciudad de Concepción, en Chile. En esta oportunidad los desplazamientos registrados por la estación más cercana fueron mayores a 3 metros en la coordenada Este, cercanos al metro en la coordenada norte y de varios centímetros en la coordenada altura (fig 9). En esta ocasión la magnitud del sismo produjo una importante variación en las coordenadas de muchas estaciones de la red SIRGAS ubicada en la placa sudamericana. Estas

variaciones fueron mayores en las estaciones ubicadas en el área cercana al epicentro y fueron disminuyendo a medida que se aleja del mismo (fig. 10).

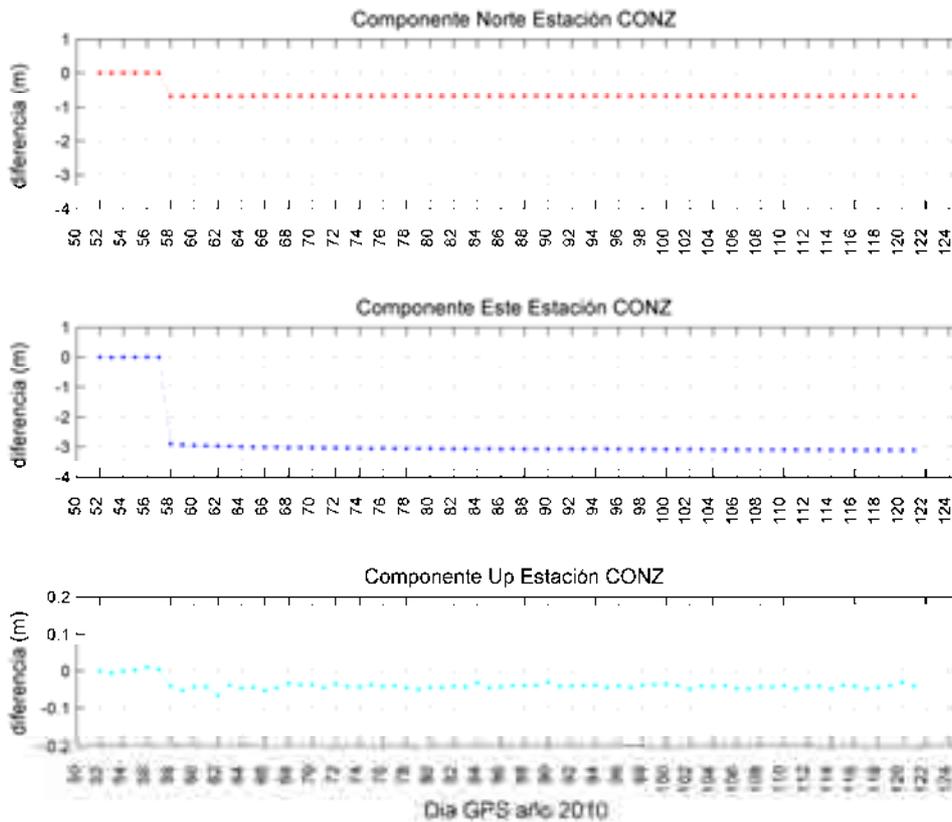


Figura 9: Desplazamiento co-sísmico y movimiento post-sísmico (no lineal) derivado de las coordenadas geodésicas semanales de estación CONZ

En las dos aplicaciones geodinámicas mencionadas, modelo de deformación y desplazamiento co-sísmico y post-sísmico, es importante recalcar la importancia del conocimiento del sistema de referencia, su materialización y su mantenimiento en el tiempo ya que se utilizan observaciones de diferentes épocas y constelaciones de satélites cuyas órbitas será necesario relacionar. En este aspecto cabe recalcar la importancia de contar con efemérides precisas en este tipo de estimaciones. Las efemérides precisas son calculadas con posterioridad al paso del satélite, a diferencia de las efemérides transmitidas en las cuales se predice el recorrido del satélite. Las efemérides precisas son calculadas por centros de cálculo del IGS y corregidas mediante observaciones obtenidas por las estaciones de rastreo y control sobre la superficie terrestre la cual se encuentra en constante cambio. Es por ello que el perfecto modelado de todas la variables intervinientes en la estimación de las órbitas de los satélites es de fundamental importancia para evitar transferir su influencia al cálculo y posición de los satélites.

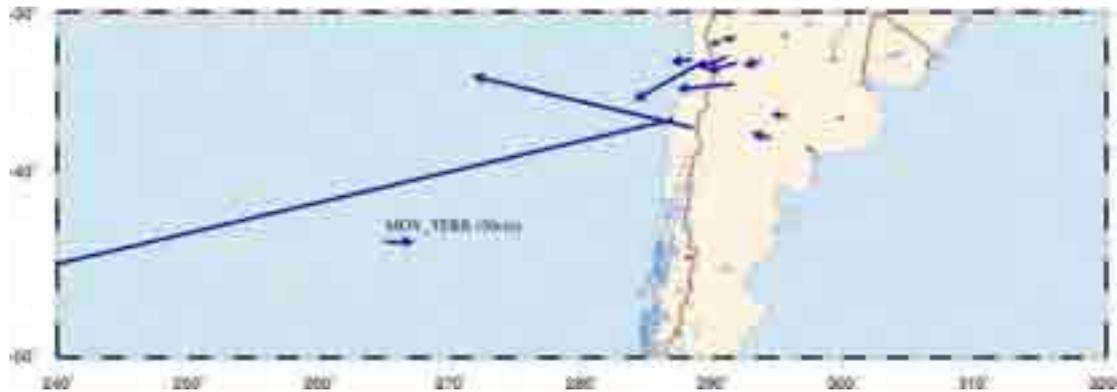


Figura 10: Desplazamientos horizontales producidos por el sismo del 27 de febrero de 2010 en las cercanías de la ciudad de Concepción

### 1.3. Demandas del sistema de referencia – aplicaciones prácticas

#### 1.3.1. Georreferenciación

La georreferenciación es la actividad por medio de la cual un profesional de la geodesia, la ingeniería o la agrimensura otorga coordenadas precisas a un determinado punto en el sistema de referencia elegido. El mismo puede ser un sistema local o global. Estos sistemas de referencia se encuentran materializados en la superficie terrestre a través de marcas colocadas y sobre las cuales se determinan sus coordenadas por mediciones muy precisas (marcos de referencia pasivos), o bien a través de estaciones permanentes GNSS (marcos de referencia activos).

La ventaja de utilizar marcos activos en relación a los pasivos es que estos últimos fueron materializados en una época determinada, medidos, calculados y ajustados para esa época. Las coordenadas de sus puntos quedaron estáticas en el tiempo, por lo que si hoy se utiliza una coordenada de 10 o 20 años de antigüedad no se refiere al mismo punto del espacio sobre el que se midió. Es decir el sistema de referencia sigue siendo el mismo pero al estar materializado sobre la superficie terrestre y al encontrarse ésta en movimiento, el marco al que se vincula, desactualizado no representa al sistema de referencia que materializó originalmente.

Ahora bien si se utiliza un marco de referencia activo, materializado por estaciones permanentes GNSS, se cuenta con la ventaja de poder calcular las coordenadas de cada una de las estaciones periódicamente, diaria, semanal, mensual o anualmente, definiendo un marco de referencia para cada época, sin permitir que se modifique el sistema de referencia. Otro punto importante de los marcos activos es que se pueden

obtener las velocidades de cada punto, pudiendo modelar el campo de velocidades para una región, país o continente (Drewes, 2005). A partir del conocimiento de las velocidades es posible comparar un relevamiento anterior con uno realizado en la actualidad. Se aplican velocidades de desplazamiento y se llevan ambos relevamientos a la misma época. Así lo que varían son las coordenadas de los puntos pero el sistema de referencia sigue sin modificarse.

A continuación se describe en detalle el problema del marco de referencia y su variabilidad en el tiempo a partir de una aplicación concreta de georreferenciación en la república Argentina.

En Argentina la materialización del sistema de referencia geocéntrico internacional se llevó a cabo a partir del año 1993 y 1994, con la medición de la red POSGAR, las coordenadas de tales puntos resultaron una densificación de WGS84 se publicaron en 1997 (Mackern, 2003). En esos mismos años se midió la red SIRGAS coincidente en 10 puntos con POSGAR, esta materializó a ITRF94 por lo cual POSGAR se recalculó vinculada a SIRGAS resultando en una segunda realización de POSGAR denominada POSGAR98 (Moirano, 2000), más precisa y exacta que su antecesora POSGAR94 (Brunini, 2000). Luego a partir de la densificación de estaciones continuas en Argentina y en el resto de América Latina ha sido posible calcular un grupo de coordenadas para la red de estaciones continuas SIRGAS-CON, como densificación del ITRF, resultando los marcos SIR09P01 y SIR10P01 los mejores marcos (coordenadas y velocidades) para los países latinoamericanos en la actualidad. En Argentina se realizó la remediación de POSGAR en los años 2007 y 2008 y se dio a conocer en 2009 el marco POSGAR2007, vinculado a SIRGAS (Cimbaro, 2009). Dentro de la comunidad de usuarios de GPS, surgen dudas sobre la necesidad y las consecuencias de aplicar los distintos marcos mencionados. A manera de ejemplo se realizaron comparaciones a partir de las coordenadas obtenidas de procesar dos vectores LPGS-UNRO y LPGS-AZUL (UNRO, ubicada en la Universidad de Rosario y AZUL, ubicada en la ciudad de Azul provincia de Buenos Aires). Se tomó como punto de referencia la estación permanente LPGS, ubicada en la ciudad de La Plata considerando las coordenadas de cinco marcos de referencia distintos (IGS05, SIR09, POSGAR2007, POSGAR98 y SIRGAS semanales). Para los primeros 4 casos se consideraron las coordenadas en la época del marco sin actualizarlas y las coordenadas actualizadas por velocidades SIRGAS, En el caso de las coordenadas SEMANALES de SIRGAS estas refieren a la semana de la observación.

En la tabla 1 se detallan las épocas de cada marco de referencia utilizado.

Marco de Referencia	Época
IGS05	2000,0
IGS05 + VEL	2009,7
SRGAS09	2005,0
SIRGAS09 + VEL	2009,7
SIRGAS SEMANALES	2009,7
POSGAR2007 (crudo)	2006,6
POSGAR2007 + VEL	2009,7
POSGAR 98 (crudo)	1995,4
POSGAR 98 (vel sirgas)	2009,7

Tabla 1: Época de referencia de los marcos utilizados

En la figura 11, se muestran los resultados de la comparación de coordenadas con respecto a las coordenadas del marco IGS05 semanales, ya que es el mejor y más actualizado marco de referencia del que se dispone a la fecha ([capítulo II](#)).

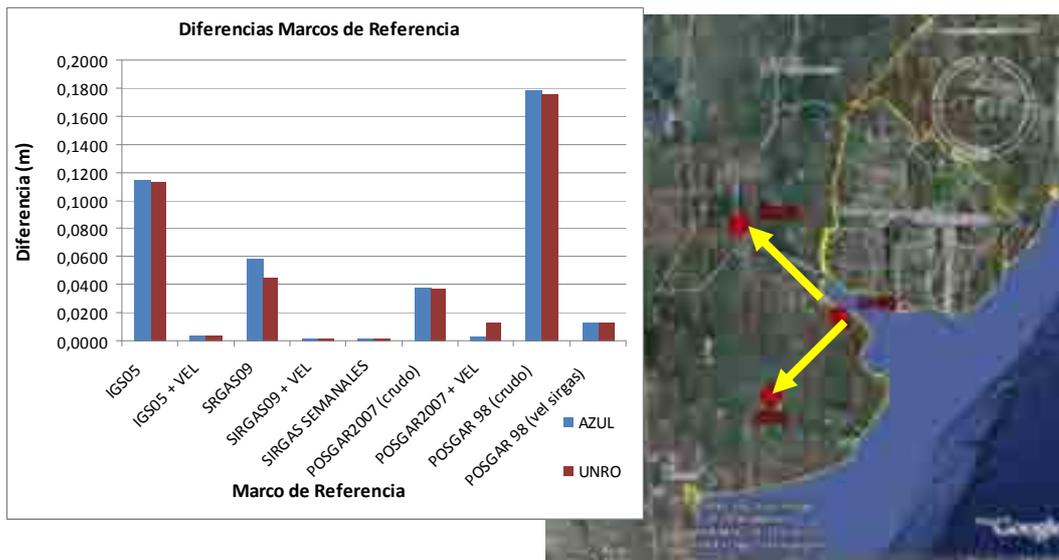


Figura 11: diferencias obtenidas luego de georreferenciar con diferentes marcos de referencia (zona estable de la placa)

Es posible ver la influencia del error cometido al utilizar los diferentes marcos de referencia mencionados.

En primer lugar se eligen las coordenadas IGS05 (época 2000.0) obteniéndose una diferencia con el marco de referencia IGS05 semanal en promedio de 0,11 m, si se aplican las velocidades correspondientes, el promedio de las diferencias disminuye a 0,004 m. Una situación similar se observa al aplicar el marco de referencia SIRGAS09

(época 2005.0) cuya diferencia promedio con IGS05 semanal es de 0,05 m en las tres estaciones elegidas, al actualizar este marco por velocidades a la época actual esta diferencia disminuye notablemente a 0,002 m en promedio. Como es de esperar la menor diferencia se observa al utilizar las coordenadas SIRGAS semanales, ya que son las calculadas para la época actual, sin utilizar velocidades que, en menor medida que al utilizar marcos desactualizados, también introducen error.

Consecuentemente si se considera el marco de referencia POSGAR2007 (época 2006,6) las diferencias promedios se encuentran en 0,037 m, pero si se aplican velocidades SIRGAS las diferencias promedio disminuyen a 0,002 m. Si bien el marco de referencia POSGAR2007 no cuenta con velocidades, al ser éste una densificación del marco de referencia SIRGAS, pueden aplicarse las velocidades de este último.

Finalmente se utilizó como marco de referencia POSGAR98, siendo de todos los utilizados el más antiguo y se obtuvieron diferencias promedio de 0.17 m. Al actualizar este marco las diferencias se redujeron a 0.013 m. Este marco de referencia tampoco tiene velocidades, por lo tanto se utilizó la misma metodología que con POSGAR 2007.

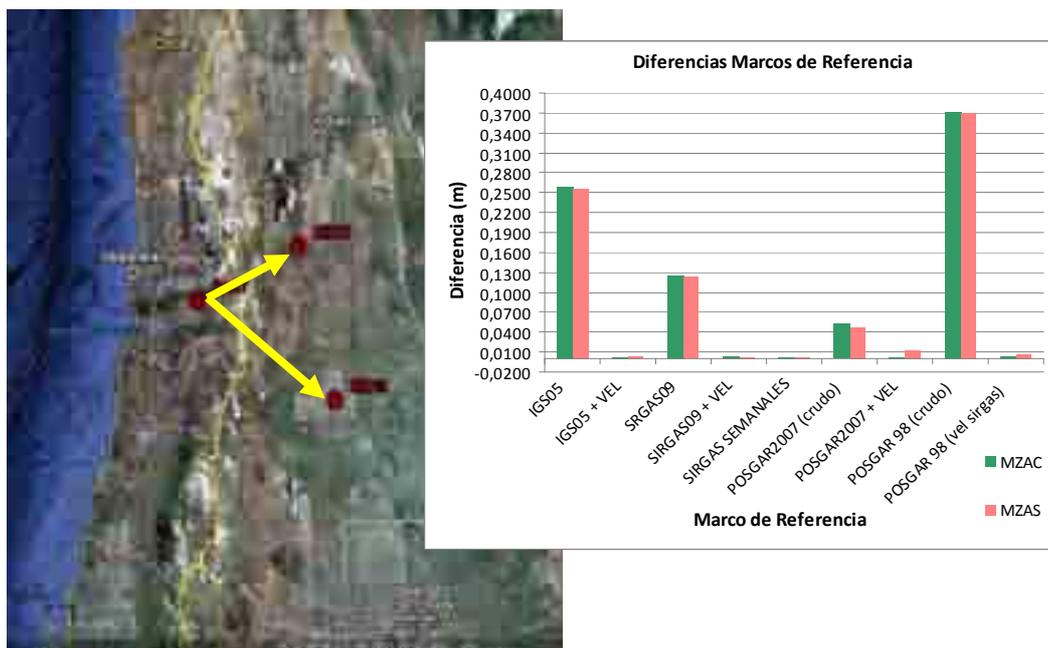


Figura 12: diferencias obtenidas luego de georreferenciar con diferentes marcos de referencia (zona de deformación de la placa)

Cabe destacar que el área estudiada corresponde a un área estable de la placa, es decir que las variaciones anuales en las coordenadas no son tan significativas. Si este mismo

ejemplo se aplica al área de deformación de la placa, las diferencias son aún mayores (figura 12).

En el ejemplo de la figura 12, el uso de marcos desactualizados en cuanto a la época de referencia influye notablemente. Las diferencias promedio se encuentran entre los 0,37 m y los 0,05 m, según la antigüedad del mismo. Si el marco utilizado se encuentra actualizado estas diferencias disminuyen notablemente. Esto puede visualizarse en los 3 marcos utilizados en la fig. 12 al aplicar velocidades de desplazamiento o bien las coordenadas calculadas para la semana en que se está trabajando.

La tabla 2 detalla numéricamente los valores graficados tanto en la figura 11 como en la 12.

Marco de Referencia	LPGS	AZUL	UNRO	Promedio	SANT	MZAC	MZAS	Promedio
IGS05	0,1139	0,1150	0,1128	0,1139	0,2578	0,2586	0,2559	0,2574
IGS05 + VEL	0,0037	0,0037	0,0040	0,0038	0,0040	0,0029	0,0040	0,0036
SRGAS09	0,0576	0,0581	0,0446	0,0534	0,1249	0,1253	0,1236	0,1246
SIRGAS09 + VEL	0,0022	0,0022	0,0023	0,0022	0,0031	0,0039	0,0031	0,0033
SIRGAS SEMANALES	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031
POSGAR2007 (crudo)	0,0377	0,0380	0,0371	0,0376	0,0500	0,0517	0,0458	0,0492
POSGAR2007 + VEL	0,0028	0,0029	0,0137	0,0064	0,0050	0,0026	0,0115	0,0064
POSGAR 98 (crudo)	0,1753	0,1788	0,1762	0,1768	0,3713	0,3726	0,3698	0,3713
POSGAR 98 (vel sirgas)	0,0131	0,0134	0,0137	0,0134	0,0060	0,0038	0,0057	0,0052

*Tabla 2: Diferencias obtenidas luego de aplicar distintos marcos de referencia*

La figura 13 resume el tema planteado. Donde puede observarse la gran diferencia que se produce en usar marcos de referencia actualizados o no a la época de medición. En el área de deformación de la placa el error de aplicar un marco desactualizado duplica al error cometido en el área estable de la placa.

Si se cuenta con un marco de referencia que además de proporcionar coordenadas de excelente calidad dan la posibilidad de actualizar las mismas a la época de medición por medio de la implementación de velocidades, el problema queda resuelto en el post-procesamiento.

Las principales dificultades se encuentran al trabajar en tiempo real, ya sea utilizando la tecnología RTK, o NTRIP DGPS. En ambos casos la posición que se obtiene se encuentra ligada directamente a la precisión de las coordenadas de la estación "BASE" que envía la corrección. Es aquí donde se debe tener principal precaución y elegir

correctamente el marco de referencia a utilizar para evitar errores. Se debe tener en cuenta que las coordenadas que se utilizan al usar este tipo de tecnología no las elige el usuario, sino que vienen montadas en el dato de corrección que se obtiene a tiempo real mediante la conexión a Internet. Con esto se quiere decir que la solución al problema debe ser provista por los responsables de enviar la corrección y por los administradores de las redes GNSS, ya que el usuario no tiene intervención en ello, a diferencia de la capacidad de elegir las coordenadas que posee quien realiza un post-procesamiento.

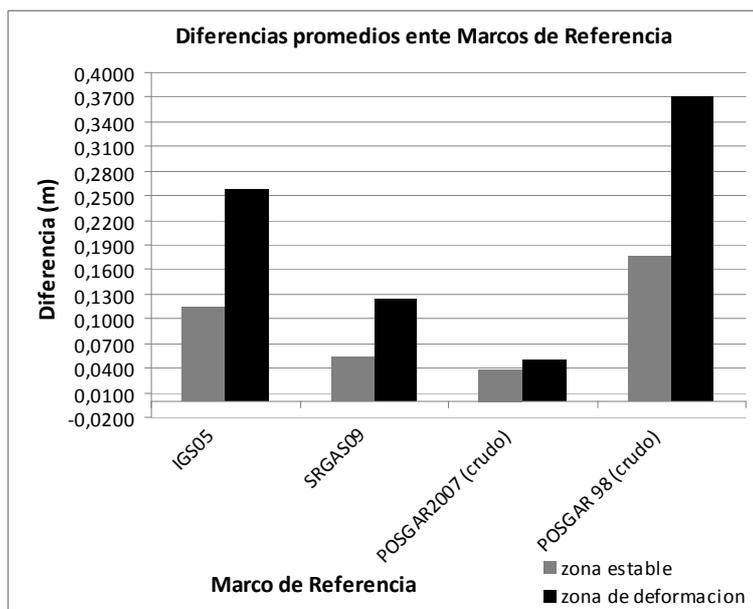


Figura 13: promedio de las diferencias obtenidas luego de georreferenciar con diferentes marcos de referencia en distintas zonas de la placa

Este problema queda resuelto al utilizar soluciones semanales, de esta forma se independiza del problema de la época de la coordenada, separando las coordenadas de un punto, del problema de la cartografía sobre la cual se plasmará un determinado relevamiento.

#### 1.4. Conclusiones del capítulo

A lo largo de este capítulo se trata de plantear la importancia y necesidad de que el sistema de referencia sea único y estable en el tiempo. Si bien existe uno y solo un sistema de referencia, esta definición es teórica y su materialización es quien debe hacer que estas condiciones se cumplan. Si la superficie terrestre no se encontrara afectada por variaciones tectónicas y demás deformaciones y las señales que se utilizan para la medición y posterior materialización del sistema no sufrieran distorsiones producidas por

la atmósfera, no existiría dificultad en la materialización del sistema de referencia. Sin embargo todas estas dificultades existen y deben a que el “Sistema Tierra” se encuentra en permanente cambio. Es decir queremos materializar un sistema de referencia “**FIJO**” y “**ESTABLE**” en el tiempo sobre una superficie afectada de incontables factores que la modifican continuamente

El modelado de los fenómenos geofísicos que modifican el sistema tierra no es un tema trivial, y es necesario tenerlos en cuenta al momento de realizar una medición y de materializar el sistema de referencia. Al mismo tiempo se debe tener presente que muchas veces son esos mismos fenómenos los que queremos medir. Es decir modelamos y estimamos para luego eliminar alguno de ellos y así poder y medir los que nos interese estudiar.

*La Materialización de los Marcos de Referencia con GNSS,  
Internacional y Regionalmente*

---

**2.1. Introducción**

La materialización de los sistemas de referencia se realiza mediante sitios en colocación, estos son sitios donde se observa en forma conjunta por dos, tres o cuatro de las principales técnicas geodésicas de observación: **VLBI, Interferometría de Bases Muy Largas; SLR, Telemetría Láser sobre satélites; GPS, Sistema de Posicionamiento Global y DORIS El Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélites** una breve descripción de cada una de ellas puede encontrarse en ([Mackern, 2003](#)). La técnica VLBI posee el mayor peso en la definición de la orientación. El origen y la escala del sistema se determinan mediante el aporte de SLR, GPS y DORIS. Todas estas técnicas implican la implementación de modelos dinámicos, ya que observan la superficie terrestre en movimiento y sus observables son afectados por variables climáticas y atmosféricas. Estas condiciones deben ser modeladas permanentemente para disminuir la influencia de los errores que introducen en la observación.

La densificación de los marcos de referencia se realiza casi con exclusividad por medio de estaciones GNSS de medición continua. Una estación GNSS está compuesta por un par antena-receptor, ubicado en un punto determinado, la misma mide en forma continua las 24 hs. del día, los 365/6 días del año ([Mateo et al, 2008](#)). A través de estas observaciones redundantes y empleando un riguroso método de procesamiento pueden obtenerse las coordenadas de tales puntos con muy buena precisión y exactitud para cualquier día o semana del año.

Si consideramos que las estaciones se encuentran sobre la corteza terrestre y a su vez la corteza está en movimiento y se deforma, es necesario determinar además de las coordenadas de los puntos las variaciones que éstas tuvieron y tienen en el tiempo. A esta variación se la denomina velocidad y acompaña a la coordenada. Si bien el punto físicamente es el mismo, su posición respecto a un sistema de referencia estable, único y preciso se modifica por el movimiento propio de la corteza terrestre y demás efectos físicos, como son la gravedad, la presión atmosférica, la carga oceánica, etc.

Es decir un sistema de referencia preciso y actualizado debe estar materializado por la marca del punto en el terreno, por las coordenadas del mismo para una fecha determinada y por sus respectivas velocidades (Drewes, 2009).

A través de las redes de estaciones GNSS de medición continua es posible realizar un cálculo diario y/o semanal de las coordenadas de estas estaciones y mediante una serie temporal de cada uno de los puntos ocupados permanentemente es posible estimar la tendencia de su velocidad de desplazamiento. Para aquellas estaciones que tienen más de 2 años de operación es posible proceder a estimar las velocidades de sus coordenadas.

En las series temporales de coordenadas de algunas estaciones se observa que el comportamiento de éstas no responde a una variación lineal sino que muestra un comportamiento con una leve tendencia temporal (Brunini, 2010).

La necesidad de contar con velocidades de las estaciones para actualizar las coordenadas de las mismas en un determinado marco de referencia y el requerimiento de describir y cuantificar el comportamiento NO LINEAL de las coordenadas de ciertas estaciones fundamenta el cálculo semanal de las redes de estaciones GNSS continuas por sobre los marcos pasivos.

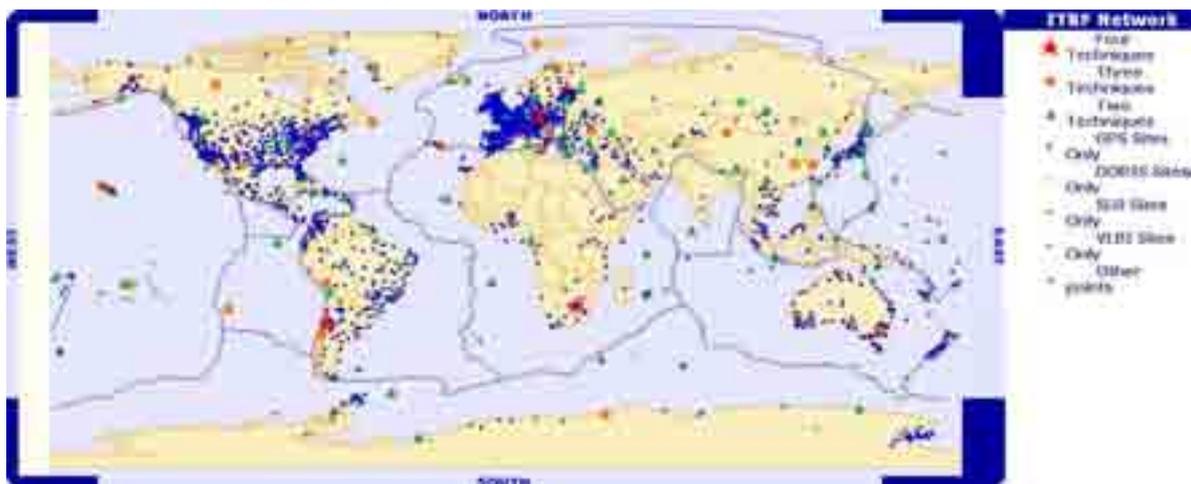
En este capítulo se describe el marco institucional internacional bajo el cual se procede al cálculo del Marco de referencia internacional (ITRF). A continuación se describe la infraestructura bajo la cual se materializa y mantiene el Marco de referencia del continente americano (SIRGAS) como una densificación del ITRF. Por último se describe en detalle la metodología de observación, cálculo y ajuste adoptada por uno de los centros oficiales de SIRGAS, CIMA (Centro de Procesamiento Ingeniería Mendoza Argentina).

## **2.2. El Marco de referencia terrestre internacional (ITRF)**

El ITRF (International Terrestrial Reference Frame) es la materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional.

A un determinado marco geodésico terrestre le corresponden un conjunto de coordenadas de estación que en este capítulo será denominado “grupo de coordenadas”. Cada grupo de coordenadas se caracteriza por:

- a) La técnica de medición utilizada para determinarlas, como VLBI, Telemetría Láser sobre la Luna (LLR) o sobre satélites (SLR), etc.
- b) El modelo de cálculo y procesamiento aplicado por el centro de análisis para el cálculo de las coordenadas.
- c) Su desviación típica.
- d) Las velocidades de desplazamiento de las estaciones y sus desviaciones típicas.
- e) La época de referencia de las coordenadas y la época de medición.
- f) Las matrices de correlación de los parámetros estimados.
- g) El conjunto de estaciones elegido para materializar el sistema y los criterios de selección.



*Figura 14: Sitios y técnicas empleados en la realización de ITRF 2008*

Las materializaciones del ITRS producidas por el IERS consisten en una lista de coordenadas y velocidades para un conjunto de estaciones distribuidas sobre toda la Tierra y válidas para una época de referencia  $t_0$ . Se llaman ITRFY<sub>YY</sub> donde YY indica el año de los datos más recientemente incorporados al cálculo. La época de referencia del marco, se agrega aparte; siendo ITRFY<sub>YY</sub> solamente el nombre del marco de referencia. Las características de cada marco terrestre producido por el IERS se indican en la serie IERS Technical Notes. Los estándares o convenciones que definen los sistemas de referencia del IERS se publican como IERS Conventions y sufren actualizaciones periódicamente (Mackern, 2003).

La última realización del ITRF recientemente publicada es “ITRF2008” (fig. 14). ([http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2008/ITRF2008.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ITRF2008.php)),

## 2.2.1. ITRF2008

### 2.2.1.1. Datos utilizados para el cálculo

Para el cálculo del ITRF2008 se utilizaron series de tiempo de soluciones semanales de los servicios internacionales de observación por satélites: IGS (GNSS), ILRS (LSR) e IDS (DORIS) y diariamente IVS (VLBI). Los periodos de tiempo incorporados en al solución ITRF2008, el tipo de soluciones incorporadas y los constreñimientos utilizados, se resumen en la tabla N° 3:

CENTRO (Observable)	Lapso de Tiempo	Tipo de solución	Constreñimiento	EOPs
IVS (VLBI)	1980.0 - 2009.0	Ecuaciones Normales	Ninguno	Polar motion, rate, LOD, UT1-UTC
ILRS (LSR)	1983.0 - 2009.0	varianza-covarianza	Libre	Polar motion, LOD
IGS (GNSS)	1997.0 - 2009.5	varianza-covarianza	Mínimo	Polar motion, rate, LOD
IDS (DORIS)	1993.0 - 2009.0	varianza-covarianza	Mínimo	Polar motion, rate, LOD

Tabla 3: Productos y series utilizados en la realización de ITRF 2008. (Altamimi, 2010)

### 2.2.1.2. Estrategia de ajuste utilizada

La estrategia adoptada para la generación del ITRF2008 es la siguiente:

- Aplicar “**solución mínimamente constreñida**” iguales a todas las soluciones libremente constreñidas sobre las soluciones SLR.
- Aplicar la condición “**No-Net-Translation and No-Net-Rotation**” a las soluciones provistas por IVS en forma de ecuaciones normales.

- Usar soluciones “**mimimante constreñidas**”: en los casos de las soluciones semanales provista por el IGS.

Los detalles de cada tipo de constreñimiento se encuentran desarrollados en el apartado 4.2. Introducción del Batum, donde se explican como trabaja cada estrategia.

- Formar combinaciones de pop-técnicas (**TRF + EOP**), realizando un riguroso análisis en las series de tiempo, solucionando posiciones de estación, velocidades, EOPs y 7 parámetros de transformación para cada solución semanal (diariamente en caso de VLBI).
- Identificar y rechazar saltos y manipular apropiadamente las discontinuidades usando como aproximación la función matemática “pequeñas piasas”.
- Combinar las soluciones acumuladas de pre-técnicas agregando “local ties” en sitios de colocación.

Este último paso constituye el resultado final de la solución compensada de **ITRF2008**, comprendiendo posiciones de estación, velocidades y EOPs. Se puede observar en la Tabla 3 como el cálculo de los EOPs comienza a principios de los años ochenta con VLBI y SLR, mientras que la contribución de DORIS comienza a partir de 1993 y el GPS desde 1997.0.

#### 2.2.1.3. Definición del Datum en ITRF2008

- **Origen:** el origen es definido de modo tal que los parámetros de traslación respecto de ITRF2005 fuesen nulos, y también los parámetros de traslación entre el ITRF2008 y las soluciones del ILRS.
- **Escala:** La definición de la escala se realizó de modo tal que el factor escala fuese nulo entre ITRF2008 y el promedio de la escala entre VLBI y SLR.
- **Orientación:** es definida de forma tal que los *parámetros* de rotación sean nulos a la época 2005.0 y nulos también entre ITRF2008 e ITRF2005. Estas dos *condiciones* son aplicadas sobre una red base.

#### 2.2.1.4. Parámetros de transformación entre ITRF2005 e ITRF2008

Se calcularon 14 parámetros de transformación (Tabla 4) entre ITRF2005 e ITRF2008, los cuales fueron estimados utilizando 171 estaciones. Simultáneamente se calcularon las posiciones de 131 sitios (Figura 15).

	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	mm	mm	mm	10-9	mas	mas	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
Indices	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 4: Parámetros de transformación en la época 2005.0 y sus índices de ITRF2008 a ITRF2005 (ITRF2005 menos ITRF2008).

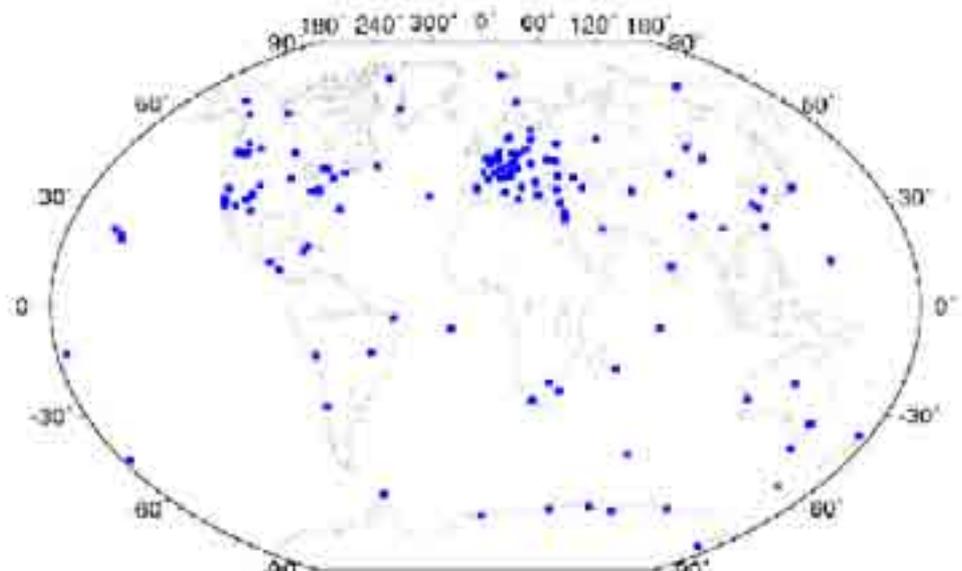


Figura 15: Sitios utilizados para la estimación de parámetros de transformación entre ITRF2008 e ITRF2005.

### 2.2.2. ITRF2005

Cabe mencionar y describir también en este capítulo la realización anterior, ITRF2005, ya que ha sido y es utilizada como marco de referencia de SIRGAS.

ITRF2005 tiene como época de referencia el año 2000,0. Está definido de modo tal que:

- **Origen:** se define de tal manera que tiene 0 (cero) traslación con respecto al centro de masas promediado de una serie temporal de SLR para un intervalo de observaciones de 13 años.
- **Escala:** es definida de tal modo que el factor de escala es nulo en la época 2000.0 y nula entre el ITRF2005 y las series de tiempo de VLBI del IVS.
- **Orientación:** (para la época 2000,0) está alineada al ITRF2000 utilizando 70 estaciones de alta calidad geodésica. Por lo tanto los parámetros de rotación entre ITRF2005 e ITRF2000 (marco antecesor) son nulos.

([http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2005/datum\\_ITRF2005.php](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/datum_ITRF2005.php))

A continuación se describe brevemente la estrategia de combinación adoptada para el cálculo del ITRF2005 según las técnicas, Figura 16.:

- Se aplicó “minimum constraints” a las soluciones provenientes de GPS, SLR y DORIS.
- Se aplicó la “condición No-Net-Traslation y No-Net-Rotation” a las soluciones enviadas por IVS (Internacional VLBI Service for Geodesy & Astrometry), en formato de ecuaciones normales.
- De la combinación de la técnica (TRF + EOP), por un riguroso seguimiento en las series de tiempo, se resolvieron: posiciones de estación, velocidades, EOPs y 7 parámetros de transformación para cada solución semanal (diario en el caso de VLBI) la solución w.r.t (with respect to) es la solución pre-acumulada.
- Se identificaron outliers (o discordancias) y se consideraron puntualmente las discontinuidades.
- Se combinaron, las soluciones de DORIS en una solución acumulada única.
- Se combinaron las soluciones por técnica para VBI, LSR, GPS y DORIS, como se explico anteriormente, agregando información a los sitios donde se realizó la medición desde más de una técnica. (<http://www.iers.org>)

Finalmente se obtuvo el ITRF2005, que contiene posiciones de estación, velocidades y EOPS. Los EOPS comienzan a principios de los años 80 con VLBI, SLR y contribuciones

de DORIS durante 1993 y el GPS sobre 1999.5. La calidad de los EOPs calculados al principio con VLBI no es tan buena como los obtenidos posteriormente a 1993.

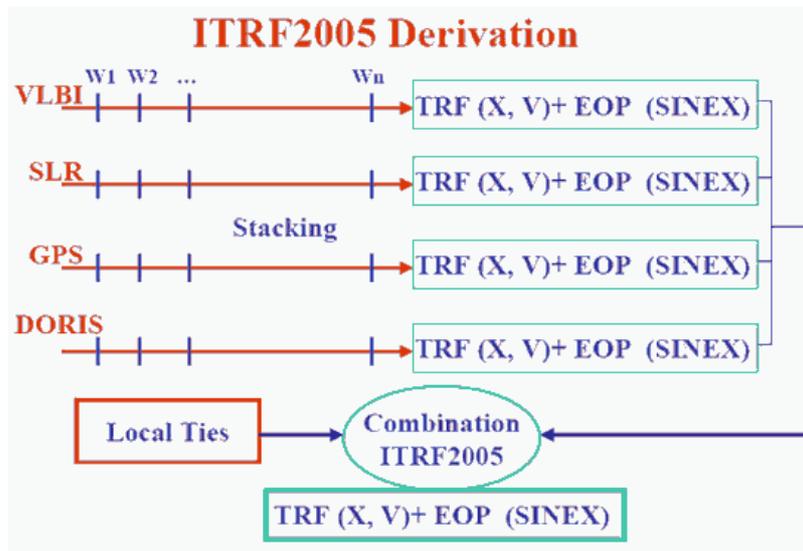


Figura 16: Cálculo de ITRF05

Resumiendo, en el cálculo del ITRF2005 participaron distintas técnicas de medición como VLBI, SLR, DORIS y GPS. Distintos centros de procesamiento procesaron cada una de estas técnicas y enviaron las soluciones semanales o diarias (VLBI) para su posterior combinación, obteniéndose como resultados un grupo de COORDENADAS y VELOCIDADES de todos los puntos medidos y PARÁMETROS DE ORIENTACIÓN TERRESTRE para el periodo calculado.

Los resultados fueron publicados en un archivo SINEX que contiene toda la información proveniente del cálculo, como datos de entrada, resultados y datos estadísticos. Además se ofrecen diferentes tablas con las coordenadas, velocidades y errores correspondientes para cada técnica de medición. (<http://www.iers.org>)

### 2.3. Contribución del IGS

El IGS (International GNSS Service) es un servicio aprobado de la Asociación Internacional de Geodesia desde 1994 y es reconocido como un miembro de la Servicios de Análisis de Datos Astronómicos y Geofísicos (FAGS) desde 1996. (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/>)

Tiene como función proveer la más alta calidad de datos (observaciones GPS, GLONASS y GALILEO) y productos (coordenadas, velocidades, parámetros troposféricos, efemérides, parámetros de orientación terrestre, etc.) provenientes de los sistemas globales de navegación por satélites, en soporte a las ciencias de la tierra, aplicaciones multidisciplinarias y educativas.

Entre sus objetivos se pueden mencionar:

- 1) Mejorar y densificar el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).
- 2) Monitorear las deformaciones de la Tierra sólida.
- 3) Monitorear la rotación de la Tierra y las variaciones en la Tierra líquida (el nivel de mar, de hielo, etc.).
- 4) Calcular las efemérides precisas, rápidas y ultra-rápidas de los satélites GNSS.
- 5) Monitorear la ionosfera y analizar su influencia sobre las señales satelitales.
- 6) Determinar el contenido de vapor de agua en la tropósfera y analizar su influencia sobre las señales.

Se concluye a partir del análisis de estos objetivos la influencia de este servicio por sobre los sistemas de referencia internacionales y su aplicación.

Para lograr su misión, el IGS cuenta con una infraestructura conformada por una red internacional de más de 350 estaciones de GNSS, más de una docena de centros de datos regionales y operacionales, tres centros de datos globales, siete centros de análisis y numerosos centros de análisis asociados o regionales.

Como ya se mencionó uno de los productos que obtiene el IGS es la solución global (coordenadas y velocidades) para la red de estaciones permanentes GNSS. Esta solución es combinada con las provenientes de otras técnicas geodésicas al realizar el cálculo de cada ITRF.

La última realización del IGS fue IGS05 ([Ferland, 2006](#)). Esta es la materialización del sistema de referencia a partir de la técnica de medición satelital GNSS, utilizando exclusivamente el sistema GPS.

EL marco ITRF2008 antes descrito incluye la solución IGS05, este solo toma observaciones GPS, mientras que ITRF08 combina las técnicas de VLBI, SLR y observaciones GPS (Altamimi, 2007).

#### **2.4. SIRGAS – El Marco de referencia en América Latina**

En América se desarrolla desde 1995 el proyecto SIRGAS (Sistema de referencia Geocéntrico para las Américas). Nace con la iniciativa de densificar el Marco de Referencia Internacional (ITRF) en América del Sur (Fortes et al. 2005), más adelante se suman América Central y el Caribe.

A continuación se adjunta una síntesis de cómo SIRGAS define el marco de referencia por excelencia para América del Sur y el Caribe extraída de (Mackern, et al, 2010).

El objetivo principal de SIRGAS es la definición, materialización (realización) y mantenimiento o actualización del sistema de referencia geocéntrico tridimensional de las Américas, incluyendo un sistema de referencia vertical asociado al campo de gravedad terrestre. Este objetivo abarca:

1. Definición de un sistema de referencia geocéntrico tridimensional;
2. Establecimiento y mantenimiento de un marco de referencia geocéntrico (conjunto de estaciones con coordenadas geocéntricas  $[X, Y, Z]$  de alta precisión y su variación a través del tiempo  $[V_x, V_y, V_z]$ );
3. Definición y materialización de un sistema de referencia vertical unificado con alturas físicas y geométricas consistentes y la determinación de los cambios del marco de referencia con respecto al tiempo, i.e.  $[h, V_h, H, V_H, N, V_N]$ .

Dentro de este contexto, SIRGAS, como sistema de referencia geocéntrico, se define idénticamente al Sistema Internacional de Referencia Terrestre ITRS (IERS 2004). Su realización es una densificación regional del Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) a través de una red continental en América Latina y El Caribe. Actualmente, SIRGAS tiene tres realizaciones: dos conformadas por estaciones pasivas o monumentos (redes SIRGAS95 y SIRGAS2000, Figura 17\_a) y una a través de estaciones GNSS de operación continua (red SIRGAS-CON). La primera realización SIRGAS95 es una red de 58 estaciones GPS distribuidas en América del Sur, cuyas posiciones finales se refieren al ITRF94, época 1995.4 (SIRGAS 1997). Esta red fue reobservada y extendida a

América Central y del Norte en mayo de 2000. Esta segunda realización (SIRGAS2000) incluye 184 estaciones GPS y sus posiciones están dadas en el ITRF2000, época 2000.4 (Drewes et al. 2005). La precisión de las coordenadas SIRGAS95 y SIRGAS2000 se estima entre  $\pm 3$  y  $\pm 6$  mm.

La tercera realización de SIRGAS es la red SIRGAS de Operación Continua (SIRGAS-CON, Figura 17\_b). Ésta está compuesta por más de 200 estaciones GNSS (GPS y GLONASS) de funcionamiento permanente, que son procesadas semanalmente para mantener sus coordenadas actualizadas y observar sus variaciones generadas por efectos tectónicos, atmosféricos, hidrográficos, etc. La operabilidad de SIRGAS-CON se fundamenta en la contribución voluntaria de más de 50 entidades latinoamericanas, que, de una parte, han instalado las estaciones y se ocupan de su operación adecuada para poner a disposición de los Centros de Análisis SIRGAS las observaciones en formato RINEX y han asumido el reto de instalar y mantener Centros de Procesamiento SIRGAS que hacen posible el cálculo semanal de la red.

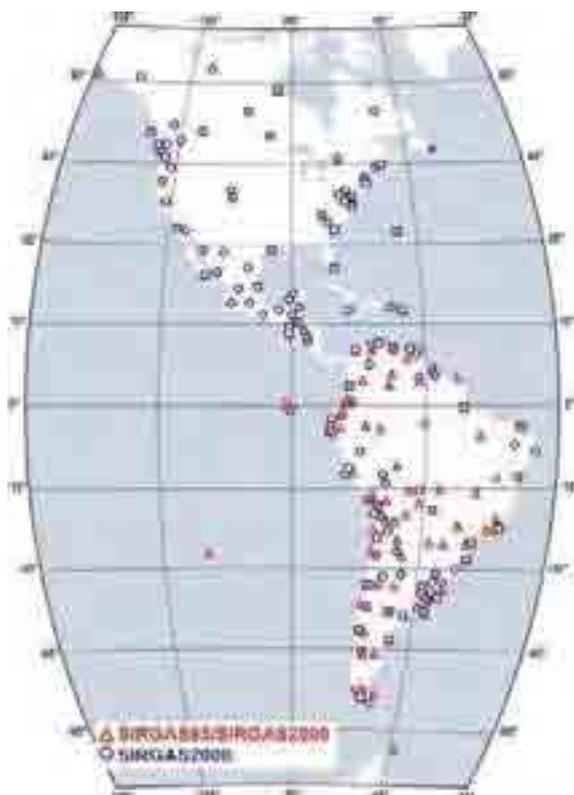


Fig. 17\_a: Realizaciones SIRGAS95 y SIRGAS2000.



Fig. 17\_b: Red SIRGAS de operación continua SIRGAS-CON (febrero 2010).

([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org))

Figura 17: Red SIRGAS 2000 y SIRGAS-CON

Dado que los países latinoamericanos están mejorando sus marcos geodésicos de referencia mediante la instalación de un número mayor de estaciones GNSS de operación continua y, teniendo presente que dichas estaciones deben ser integradas consistentemente en el marco de referencia continental, la red SIRGAS-CON comprende dos niveles de clasificación (Brunini et al. 2010):

1. Una red de cobertura continental (SIRGAS-CON-C), densificación directa del ITRF en Latinoamérica y El Caribe, con estaciones estables, de funcionamiento óptimo, que garantizan consistencia, perdurabilidad y precisión del marco de referencia a través del tiempo.
2. Redes de densificación (SIRGAS-CON-D) que mejoran la distribución geográfica de las estaciones de referencia y permiten la utilización efectiva de SIRGAS como marco de referencia a nivel nacional y local. Actualmente existen tres redes de densificación (Figura 17\_b): una norte (México, América Central, El Caribe, Colombia, Venezuela), una central (Brasil, Ecuador, Perú, Guyana, Guyana Francesa, Surinam) y una sur (Bolivia, Uruguay, Paraguay, Chile, Argentina, Antártica). El objetivo a mediano plazo es que existan tantas redes de densificación como países miembros de SIRGAS, y que las redes de densificación equivalgan a los marcos nacionales de referencia.

## **2.5. La base de SIRGAS: Los Centros de datos y procesamiento regionales**

La densificación de los marcos de referencia globales se realiza en su mayoría por medio de observaciones GNSS. Estas se obtienen a través de estaciones de medición continua distribuidas regionalmente, gracias al esfuerzo de muchas y diversas instituciones latinoamericanas e internacionales, un ejemplo de ellas son las graficadas en la figura 17\_b, donde se diferencian las distintas redes regionales, demarcadas con distintos colores. Una estación permanente se compone por una par antena receptor que registra datos GNSS las 24 horas de día lo 365 días del año, de modo que puede disponerse de las mismas en cualquier instante deseado. Los datos son enviados a un centro de datos, el cual recopila la información registrada por varias estaciones, y las coloca a disposición de quien las necesite en un formato estándar. De este modo independientemente de la marca y/o programa que cada usuario utilice puede hacer uso de la información.

### **2.5.1. Los Centros de procesamiento y el marco de referencia SIRGAS-CON**

Las estaciones SIRGAS-CON son procesadas semana a semana. La red continental SIRGAS-CON-C es calculada por el DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*,

Alemania) en su calidad de centro de análisis IGS-RNAAC-SIR (IGS *Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS*, Seemüller and Drewes 2008). Las redes de densificación SIRGAS-CON-D son calculadas por los Centros Locales de Procesamiento SIRGAS (Tabla 5). La distribución de las estaciones entre estos Centros garantiza que cada una de ellas esté incluida en tres soluciones individuales, de modo que se disponga de la redundancia necesaria para controlar la calidad de los resultados (Mackern et al, 2010).

<b>Id</b>	<b>Institución / País</b>	<b>Red a cargo</b>	<b>Nº Estac</b>
<b>Centros de Procesamiento</b>			
<b>CIMA</b>	Centro de Procesamiento Ingeniería-Mendoza-Argentina, Universidad Nacional del Cuyo, Argentina	Red sur y selección de estaciones de la red central	100
<b>DGFI</b>	Deutsches Geodätisches Forschungsintitut, Alemania	Red continental	110
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil	Red central y selección de estaciones de la red sur	131
<b>IGAC</b>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia	Red norte	104
<b>IGM-Ec</b>	Instituto Geográfico Militar, Ecuador	Selección de estaciones de la red norte y de la red central	68
<b>LGFS-LUZ</b>	Laboratorio de Geodesia Física y Satelital, Universidad del Zulia, Venezuela	Red norte	104
<b>SGM-Uy</b>	Servicio Geográfico Militar, Uruguay	Selección de estaciones de la red sur y de la red central	66
<b>Centros de Combinación</b>			
<b>DGFI</b>	Deutsches Geodätisches Forschungsintitut, Alemania		223
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil		223

Tabla 5: Centros de Análisis SIRGAS: 7 Centros de Procesamiento, 2 Centros de Combinación

Los siete Centros de Procesamiento aplican los mismos estándares para el cálculo de soluciones semanales de las estaciones a ellos asignadas, estos estándares se desarrollan en el capítulo 3. Entre dichos estándares se introducen como parámetros conocidos las efemérides precisas y los parámetros de orientación terrestre de las soluciones semanales del IGS (Dow et al. 2005). Igualmente, las coordenadas de todas las estaciones procesadas reciben una desviación estándar a priori de  $\pm 1$  m, de modo que las soluciones semanales sean semilibres (*loosely constrained*) (ver p. ej. Natali et al. 2009, Seemüller and Sánchez 2009). Posteriormente, las soluciones individuales son integradas

en una solución única para asegurar la compatibilidad a nivel continental de las coordenadas y velocidades de todas las estaciones SIRGAS-CON (SIRGAS-CON-C + SIRGAS-CON-D). Dicha integración es realizada por los dos Centros de Combinación SIRGAS, DGFI e IBGE. Los productos finales son puestos a disposición de los usuarios por el IGS-RNAAC-SIR (Sánchez et al. 2009). Las soluciones combinadas generadas por el IBGE sirven de control de calidad y de respaldo (Costa et al. 2009).



Figura 18: Esquema de procesamiento de la red SIRGAS-CON (red continental + redes de densificación) ([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org))

La Figura 18 presenta el diagrama de flujo de los datos y productos considerados en el análisis semanal de la red SIRGAS-CON ([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)).

Los productos finales de SIRGAS-CON que están disponibles en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org) son:

1. **Coordenadas semanales semilibres (*loosely constrained*)** utilizados para cálculos posteriores de la red, por ejemplo, para el poliedro global del IGS o soluciones multianuales. Estas soluciones son flotantes, es decir, las líneas de base y la geometría de la red se conocen con alta precisión, pero la red misma no ha sido referida a ninguna

estación de referencia sobre la superficie terrestre y por tanto las coordenadas de sus estaciones son desconocidas.

**2. Coordenadas semanales ajustadas al ITRF**, utilizadas principalmente para aplicaciones prácticas que requieran coordenadas de referencia en América Latina, especialmente en posicionamiento GPS diferencial. En estas soluciones se incluye como marco de referencia el mismo utilizado por el IGS para el cálculo de las efemérides satelitales GPS (i.e. IGS05, <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>). Esto garantiza que tanto satélites como estaciones terrestres estén asociadas al mismo sistema de referencia, asegurando la calidad de las posiciones finales de los puntos geodésicos [Sánchez et al. 2009].

**3. Soluciones multianuales (coordenadas + velocidades)** para aplicaciones prácticas y científicas que requieran de la variación de las coordenadas de referencia a través del tiempo. Estas soluciones se generan anualmente con el propósito de determinar la cinemática de la red y resultan de la combinación de todas las soluciones semanales semilibres disponibles. Su cálculo incluye la identificación de discontinuidades en la posición de las estaciones, ya sea por eventos esporádicos como desplazamientos sísmicos, o cambios en la configuración de los equipos GNSS.

Las coordenadas (asociadas a una época de referencia) y las velocidades de las estaciones son estimadas introduciendo como marco de referencia las estaciones IGS05 disponibles en la región SIRGAS (Figura 17\_b). Para aquellas estaciones con períodos de observación menores que dos años se calculan solamente coordenadas, pues las velocidades obtenidas con períodos de observación más cortos no son confiables.

La solución multianual más reciente (SIR10P01) cubre el período entre el 2 de enero del 2000 y el 5 de junio de 2010 e incluye 183 estaciones con 204 ocupaciones (Seemüller, 2010), cuyas coordenadas se refieren al marco ITRF2008, época 2005.0 (Figura 19). Su precisión en la época de referencia se estima en  $\pm 0,5$  mm para las componentes horizontales y  $\pm 0,9$  mm para la altura, así como  $\pm 0,2$  mm/año (precisión horizontal) y  $\pm 0,4$  mm/año (precisión vertical) para las velocidades lineales (Seemüller et al. 2010).

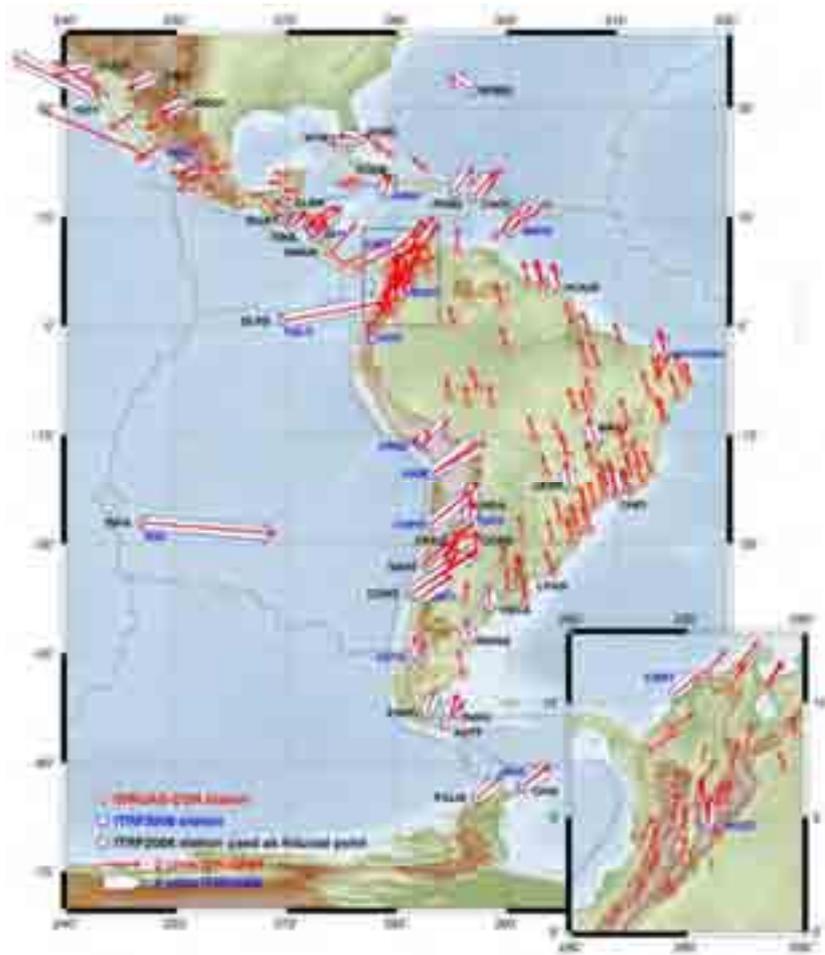


Figura 19: Red SIRGAS SIRGAS-CON. Solución multianual (SIR10P01).  
(Seemüller et al. 2010)

### 2.5.2. CIMA un Centro de Procesamiento de SIRGAS en Argentina

Argentina en el 2006 inició como centro de procesamiento experimental de la red SIRGAS, el denominado CPLAT (Centro de procesamiento Universidad de La Plata) (Natali, 2009).

A partir de noviembre de 2006 se comenzó a conformar un centro de procesamiento experimental alternativo, denominado CIMA. Parte del 2007 y 2008 el mismo procesó la misma red que CPLAT con el objeto de tener un control. Probada la etapa experimental por la puntualidad y calidad de las soluciones, CIMA fue reconocido como centro oficial a partir de agosto del 2008, desde entonces procesa semanalmente un gran número de observaciones GNSS correspondientes a la sub-red de estaciones permanentes SIRGAS-CON-D-SUR ubicadas en: Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay, Uruguay y Brasil además de aquellas que pertenecen a la red IGS (fig. 20).

Las soluciones semanales generadas en el centro de procesamiento CIMA son enviadas a los centros de combinación de SIRGAS, donde junto a las soluciones de los demás Centros de procesamiento regionales (IBGE-Brasil, IGAC-Colombia, DGFI-Alemania, LUZ-Venezuela, ECU-Ecuador y URY-Uruguay) son combinadas para conformar una única solución de la red. Esta solución combinada es enviada al IGS para formar parte de la solución global (Figura 20).

Más detalles respecto a los resultados del cálculo de dicha red se detallan en los próximos capítulos. Los resultados y aportes que esta tesis brinda a la comunidad científica se apoyan principalmente en los productos de CIMA.



Figura 20: Red SIRGAS de operación continua SIRGAS-CON (febrero 2010) ([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org))

## **2.6. Conclusiones del capítulo**

En el desarrollo del presente capítulo se han presentado las materializaciones más modernas del sistema de referencia terrestre internacional (ITRF). Como se pudo concluir estas se llevan a cabo mediante técnicas de medición satelital combinadas. Es decir existen sitios de colocación que realizan observaciones de dos, tres o cuatro de las principales técnicas geodésicas. De la combinación de ellas puede materializarse el origen, la orientación y la escala del sistema. Así la técnica VLBI posee el mayor peso en la definición de la orientación. El origen y la escala del sistema se determinan mediante el aporte de SLR, GPS y DORIS. Las realizaciones más recientes son ITRF2005 (época 2000.0) e ITRF2008 (época 2005.0).

Cada técnica de observación aporta una solución de series temporales de datos los cuales se constriñen con diferentes metodologías de modo de obtener la mejor solución posible, el detalle de esa estrategia de ajuste fue presentado en el apartado 2.2.1.2.

El aporte de la técnica de observación GPS es proporcionada por el IGS (International GNSS Service). Y consiste en una combinación de series temporales de observaciones GNSS que cubren el periodo 1997.0 - 2009.5. A su vez el IGS genera su propia solución a partir de las ecuaciones normales correspondientes al periodo, obtenidas de los diferentes centros de análisis asociados al IGS. La última realización es IGS05 (época 2000.0). Cabe destacar que la densificación de los marcos de referencia se lleva a cabo casi con exclusividad en las estaciones GNSS de medición continua, ya que es una de las técnicas más sencillas de instalar y operar, así como también la que menor recurso económico necesita.

En el DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut ) funciona uno de los centros de análisis asociados al IGS, cuya contribución es la solución IGS-RNAAC-SIR de la red GNSS continua de América Latina. Esta incluye las observaciones de más de 250 estaciones GNSS las cuales son procesadas por siete centros de procesamiento, establecidos en diferentes países de América Central y del Sur. CIMA (Centro Ingeniería Mendoza Argentina) es el centro de procesamiento con sede en Argentina y sus resultados son analizados esta tesis.

*Modelos y Estrategias de Procesamiento utilizadas en el cálculo de una Red de Estaciones GNSS Regional*

---

**3.1. Introducción**

En el capítulo anterior se describió en detalle el aporte que realizan al cálculo de los distintos marcos de referencia geodésicos globales (ITRF) las observaciones de diferentes técnicas, como lo son SLR (Telemetría Láser sobre satélites), VLBI (Interferometría de Bases Muy Largas), GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y DORIS (Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélites) (M.V.Mackern, 2003). A su vez se hizo hincapié en que la densificación del marco de referencia global se lleva a cabo principalmente por medio de estaciones de medición continua GNSS. Dado que tales marcos de referencia se materializan sobre puntos de la corteza terrestre y esta se deforma constantemente es tan importante mantener el marco de referencia en el tiempo como definirlo. Lo cual significa no solo mantener el monumento que materializa físicamente el punto sino también las coordenadas que el mismo tiene. Esto se logra a partir de un proceso de observación y cálculo continuo en el tiempo. A partir del seguimiento de estas observaciones es posible detectar variaciones milimétricas que se producen en las coordenadas de cada punto, interpretándose como desplazamientos de la corteza.

Para lograr definir marcos de referencia precisos al igual que para detectar desplazamientos milimétricos es fundamental la aplicación de modelos que permitan conocer los fenómenos físicos que afectan al sistema Tierra . De igual forma es necesario un análisis riguroso de la estrategia de procesamiento que permita en mayor o menor medida minimizar y/o eliminar la influencia de los errores que afectan a la señal GPS, Ejemplo de esto son los modelos ionosféricos y troposféricos, los modelos de mareas y carga oceánica, a adoptar, las correcciones a los centros de fase de las antenas receptoras, la consideración de períodos de maniobras de satélites, etc.

En este capítulo se describen los modelos que han sido utilizados en el cálculo de esta tesis, un detalle de la estrategia de procesamiento con el objeto de estimar coordenadas y velocidades de estaciones GNSS continuas de una red regional. Finalmente se hace una breve introducción al ajuste semanal de las observaciones, la cual se desarrolla en

detalle en los siguientes capítulos. Los resultados del procesamiento y del ajuste se muestran en los siguientes capítulos.

### **3.2. Cálculo de una red regional, SIRGAS-CON-D-SUR**

El cálculo de la red SIRGAS-CON efectuado por los diferentes centros de procesamiento oficiales de SIRGAS siguen sus lineamientos ([http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2011\\_01\\_Guia\\_para\\_los\\_Centros\\_de\\_Analisis\\_SIRGAS\\_V1\\_2.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Guias/2011_01_Guia_para_los_Centros_de_Analisis_SIRGAS_V1_2.pdf)) que a su vez reconocen las directivas del IGS.

El cálculo se basa en la estimación de coordenadas de un número considerable de estaciones GNSS de medición continua. Su precisión se evalúa a partir del análisis estadístico surgido de la sobreocupación de las mismas semanalmente. La repetibilidad de las observaciones para los diferentes días de una semana permite incluir variables que cambian con el tiempo de modo de lograr una mejor estimación de los parámetros a determinar. A dichos resultados se les denomina “soluciones semanales”, que son el producto fundamental o base de estudio en esta tesis.

Semanalmente se procesan desde CIMA las observaciones de la red SIRGAS-CON-D-SUR, que corresponden aproximadamente a 100 estaciones GNSS ubicadas en Argentina, Uruguay, Paraguay, Chile, obteniendo como resultado ecuaciones normales que se pueden luego combinar con las correspondientes a otras semanas y/o períodos.

#### **3.2.1. El programa**

El cálculo de las observaciones se realiza utilizando el programa Bernese GPS Programa V5.0 (BSW), programa científico de procesamiento de observaciones GPS. Este conjunto de subrutinas ha sido desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna, (M.Rothacher et al., 1996b). Es un producto en continuo desarrollo que incluye el estado del arte de los modelos empleados en el procesamiento de datos GNSS. El BSW es utilizado rutinariamente por el Centro Europeo de Determinación Orbital (CODE), uno de los centros de cálculo cuyas soluciones para las órbitas GPS y parámetros de orientación terrestre son utilizadas en la generación de los productos combinados que distribuye el IGS.

El procesamiento sigue los requisitos establecidos por el Grupo de trabajo I de SIRGAS (Sistemas de Referencia) en Montevideo en mayo del 2008, los cuales se detallan a continuación (tabla 6):

Órbitas	IGS final - IGS05
EOP	EOP week
Observaciones	Dobles diferencias
Intervalo de registro	30 sec
Angulo de elevación	03°
Estrategia de líneas bases	MAX-OBS (máximas observaciones)
Peso de observaciones	cos Z
Modelo troposférico a priori	Niell dry component
Estimación de parámetros troposféricos	Estimación de retardo zenital troposférico cada 2 horas (13 parámetros diarios por cada estación) aplicando paranel 1er parámetro absoluto sigma a priori +/- 5 m y relativo sigma a priori +/- 5 cm.
Ambigüedades	Estrategia QIF, aplicando modelo libre de ionosfera
Modelo carga oceánica	FES2004
Variación de centro de fases de antenas	Absoluto (IGS_05)
Coordenadas y velocidades	SIR09
Soluciones diarias	Archivos NEQ (normal ecuation), Solución de red libre (s=±1m)
Solución semanal	Archivo SINEX, Solución de red libre (s=±1m)

*Tabla 6: Requisitos mínimos establecidos en el procesamiento por el grupo de trabajo I del proyecto SIRGAS*

### **3.2.2. Las observaciones utilizadas**

Las observaciones de la red principal, SIRGAS-CON-C (21\_b), formada por las estaciones GNSS pertenecientes al IGS, se encuentran almacenadas en diferentes centros de datos, algunos de ellos son: SOPAC (The Scripps Orbit and Permanent Array

Center) (<http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/>), CDDIS (The Crustal Dynamics Data Information System) (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>).

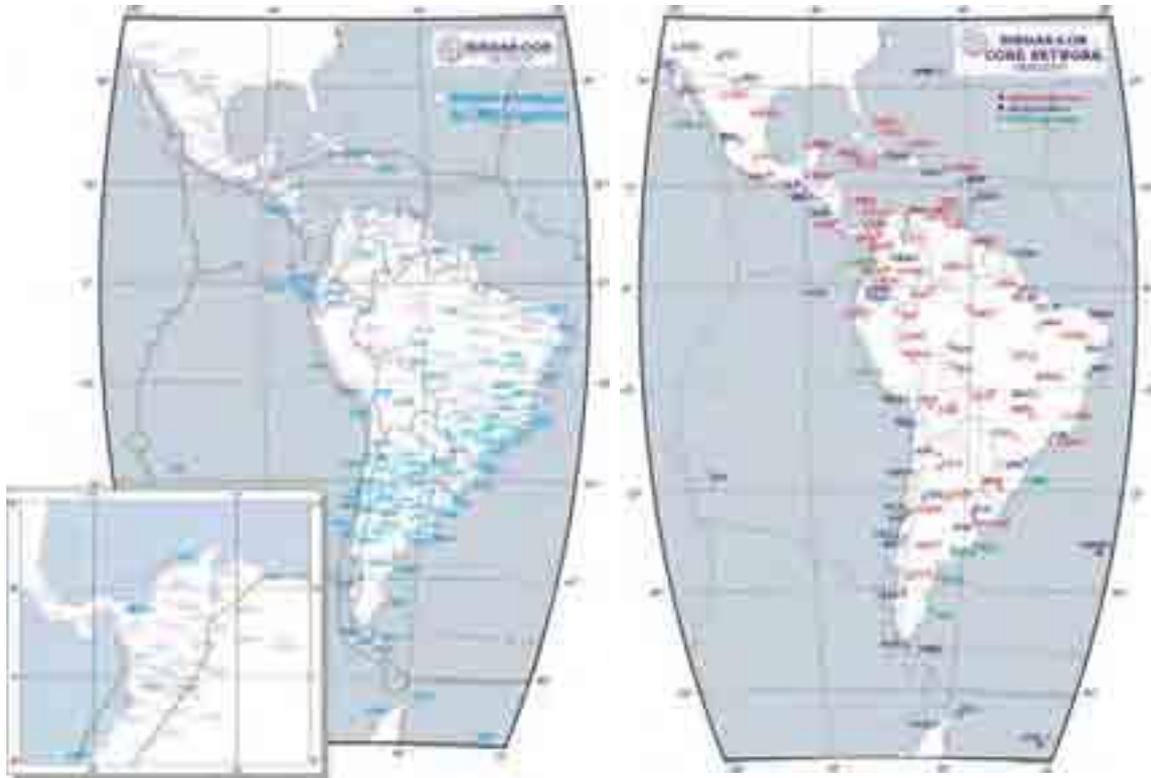


Fig. 21\_a. SIRGAS-CON-SUR (Noviembre 2010). ([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org))

Fig. 21\_b. SIRGAS-CON-C (Noviembre 2010). ([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org))

Figura 21: Red SIRGAS-CON-SUR y SIRGAS-CON-C (noviembre 2010)

Las observaciones de las estaciones GNSS de densificación, SIRGAS-CON-D (Figura 21\_a), pueden ser descargadas de centros de almacenamiento regionales, en general administrados por los diferentes países. Estos centros de datos son: RAMSAC (<http://www.ign.gob.ar/DescargaRamsac>) donde se encuentran las estaciones GNSS permanentes ubicadas en Argentina, IBGE-Basil (<ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/dados/>), para las ubicadas en territorio brasilero, para Uruguay (<http://www.ejercito.mil.uy/cal/sgm/principal1024.html>), y finalmente sitios para cuyo acceso es necesario contar con usuario y contraseña, como por ejemplo las observaciones de Colombia, Bolivia, Ecuador y Perú.

Al obtener la totalidad de las estaciones disponibles para la semana a procesar se realiza un primer filtrado de las estaciones que participarán en el procesamiento y que darán lugar a los resultados semanales. Esta selección se realiza teniendo en cuenta que la cantidad de observaciones realizadas por cada estación supere las diez horas de medición y que cada intervalo de medición sea superior a dos horas continuas. Esto se debe a que si el intervalo es menor las estimaciones de los parámetros troposféricos no se resolverán con la precisión requerida. Cabe mencionar que los parámetros troposféricos son calculados cada dos horas de observación, teniendo 13 estimaciones de retardo troposférico por día (uno absoluto y 12 relativos cada 2hs) a ser aplicados a nuestra red en cada estación.

Previo a dar comienzo la formación de vectores y al procesamiento de la red, es necesario chequear que el equipamiento de las estaciones este correctamente asignado. Es decir que el conjunto antena receptor que el encabezado del archivo de observación informa, sea el real y que la misma este incluida entre las antenas que han sido calibradas por el IGS. Esto es fundamental al aplicar la corrección por excentricidad del centro de fases de las antenas. De igual manera deben verificarse las alturas de antena correspondientes. Para realizar estos controles se consulta un archivo denominado "log\_file" el cual ha sido completado por los administradores y/o instaladores de cada una de las estaciones. El mismo proporciona la totalidad de esta información, detallando las fechas en que fueron modificadas algunas de esas variables. La precisión de las coordenadas y velocidades a estimar, dependerá en gran medida de la correcta selección de estas variables, ya que en pasos posteriores se aplican correcciones que están en función de las mismas. Cabe mencionar que para la red procesada se ha confeccionado un archivo denominado AMSUR. STA (Anexo 1) que lista toda esta información tanto actual como pasada. EL programa utiliza este archivo como indicador y el cálculo queda libre de errores que pudiesen ocasionar inconsistencias de este tipo en los archivos de observación.

### **3.2.3. Las Efemérides utilizadas y los parámetros de Orientación terrestres (EOPs)**

Para el procesamiento semanal se utilizaron las efemérides precisas de los satélites y los EOP calculados por el IGS. Los archivos correspondientes son publicados por el IGS entre 12 y 15 días posteriores a la observación. Esto se debe a que tanto las efemérides como los EOPs son calculados posteriormente a la pasada del satélite a partir de su medición desde estaciones GNSS continuas del IGS. El sistema de referencia en que se encuentran las efemérides actualmente es IGS05 ([Ferland, 2006](#)).

Los EOP (Earth Orientation Parameters) son parámetros de orientación que permiten relacionar el sistema terrestre medio con el sistema celeste medio. Estos parámetros se basan en las series de la Precesión y Nutación y Longitud de Días (LOD) y correcciones a los mismos que se estiman a partir de la combinación de soluciones de VLBI, SLR, DORIS y GNSS posibles gracias a la presencia de estaciones que en colocación poseen mas de una de estas técnicas (<http://www.iers.org>). Los mismos son calculados por el IERS (International Earth Rotation And Reference Systems Service). El IGS (International GNSS Service) proporciona soluciones de EOP como un servicio del IERS.

Al igual que las observaciones hay diferentes sitios que publican tanto las efemérides de los satélites como los EOP calculados por el IGS, algunos de esos sitios son: [http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html) (<ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/>), <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/>, <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/>.

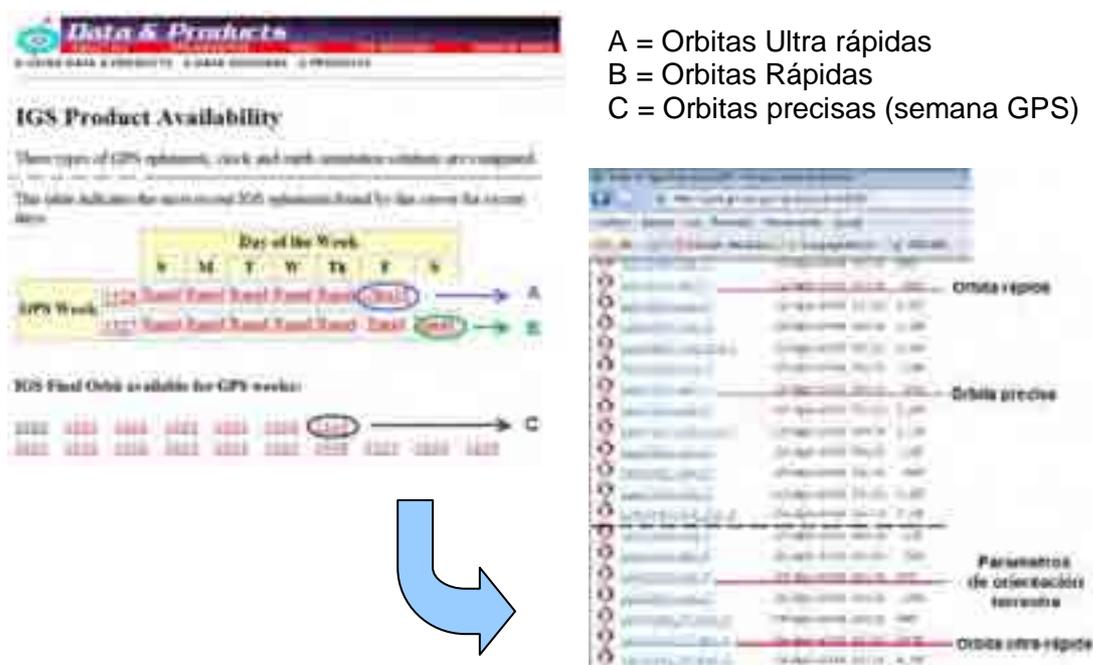


Figura 22: Esquema de acceso a los productos orbitales semanales del IGS. [http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods\\_cb.html](http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html)

En la figura 22 se puede observar uno de los sitios donde pueden obtenerse las efemérides precisas y los EOP para cada semana de trabajo.

Todos estos productos están dados en un formato estandar (ASCII) para que puedan ser utilizados por cualquier software. Por lo tanto los mismos deberán importarse desde el programa a utilizar en el procesamiento, en este caso fue Bernese 5.0.

Las órbitas provistas por el IGS proporcionan una posición para cada satélite cada 15 minutos en coordenadas cartesianas geocéntricas en el marco mas nuevo al momento de la observación calculado por el IGS (por ejemplo IGS05). En este caso se utilizaron datos con un intervalo de observación de 30 segundos, por lo cual fue necesario generar una órbita que permita interpolar una coordenada para cada instante de observación. Esta tarea se realiza en dos etapas. En un primer paso se transforman los archivos de órbita precisas, los cuales llevan el nombre de igswwwwd.sp3, (www = semana GPS, d = día dentro de la semana, 0 a 6) en órbitas tabulares. Esta transformación lleva las coordenadas de la órbita del marco fijo a la Tierra al marco inercial. Al mismo tiempo se extraen las correcciones de relojes de los satélites a aplicar luego en el procesamiento. Con ella es posible sincronizar el reloj del satélite con el tiempo GPS. En esta tarea es necesario contar también con los correspondientes EOP de la fecha de las efemérides a transformar.

Generadas las “órbitas tabulares” en la etapa anterior, pueden determinarse las denominadas “órbitas estándar”. Consiste en calcular una órbita continua aproximada mediante un polinomio de grado  $n$ , que permite luego interpolar posiciones de satélite para el instante de observación, con un intervalo de 5, 15, 30 segundos, etc., según sea necesario.

### **3.2.4. Especificaciones receptores, antenas y satélites. Correcciones.**

Con el objeto de corregir ciertos errores y/o eliminar observaciones consideradas perjudiciales se utiliza información específica mediante una serie de archivos que han sido estandarizados por el IGS. A continuación se detallan los que han sido utilizados con una breve descripción de cada uno:

**SAT\_YYYY.CRX:** denominado archivo de maniobras de satélites, donde yyyy generaliza el año correspondiente a la observación (en este caso se utilizaron SAT\_2007.CRX, SAT\_2008.CRX, SAT\_2009.CRX y SAT\_2010.CRX,). Este archivo lista los satélites con problemas, especificando el período de su incapacidad. El programa lo utiliza para omitir tales satélites en el período correspondiente a su incapacidad.

**SATELLIT.I05:** contiene la información específica del offset de las antenas de los satélites, la cual debe ser consistente con el archivo de correcciones a los centros de fases de las mismas. La extensión I05 de los archivos indica que las correcciones refieren al archivo de calibración de antenas absoluto igs05\_www.atx.

**RECEIVER:** contiene la información de los distintos tipos de receptores GNSS del mercado.

**STAINFO\_D.STA:** Es necesario especificar mediante este archivo el tipo de receptor y antena disponible en cada una de las estaciones continuas que se procesa, y mantener un registro actualizado de los cambios y/o reemplazos que pudiesen efectuarse.

**PHAS\_COD.I05:** contiene la información correspondiente a la corrección a los centros de fases de las antenas calibradas tanto de los satélites como de los receptores. Las correcciones utilizadas han sido las calculadas por CODE.

Cabe mencionar que el tipo de antenas y sus correspondientes domos listadas por estación en el archivo STAINFO\_D.STA debe estar incluida con designación idéntica en el archivo PHAS\_COD.I05, si esto no se presenta, no se realizará la corrección por excentricidad del centro de fase de la antena correspondiente.

### **3.3. Modelos utilizados en el procesamiento**

#### **3.3.1. Modelo de Velocidades**

Todo marco de referencia es calculado para una fecha determinada en el tiempo, es decir que las coordenadas de los puntos son válidas para ese momento. Como se ha expresado a lo largo del capítulo I, debe mantenerse en el tiempo por lo tanto las coordenadas de los puntos deben estar acompañadas de sus correspondientes velocidades de desplazamiento. Estas permitirán llevar las mismas a la época en la cual se desee trabajar.

Dado que la estimación de parámetros se realiza mediante un proceso diferencial es necesario contar con las mejores coordenadas posibles de cada punto. Los marcos existentes refieren a una determinada época, por ejemplo ITRF2005 refiere a la época 2000,0 por lo tanto es necesario actualizarlas por velocidades a la época de medición que se desea procesar. Mientras mejores sean las coordenadas que se ingresen como valores a-priori en el cálculo diferencial mejores serán las estimaciones de las nuevas coordenadas en cada semana de trabajo. Ya que al realizar el ajuste por mínimos

cuadrados la matriz diseño quedará mejor conformada y permitirán una mejor estimación de las ambigüedades.

Para un número considerable de estaciones GNSS de SIRGAS-CON que ya poseen velocidades calculadas a partir de una serie temporal de más de dos años, se utilizaron tales velocidades, para las demás estaciones (más recientes) se utilizaron las velocidades calculadas mediante el modelo de velocidades de SIRGAS, VELMOS (<http://www.sirgas.org/index.php?id=54>)

Las velocidades  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  de las estaciones de referencia deben obtenerse preferiblemente del análisis de posicionamientos GNSS repetitivos que cubran un intervalo mínimo de tiempo de dos años. Si las velocidades de la estación de referencia no son conocidas, puede utilizarse el modelo VEMOS2009. Este modelo corresponde a una cuadrícula de  $1^\circ \times 1^\circ$  con velocidades horizontales, las cuales pueden interpolarse con el programa VMS2009. Debe tenerse presente que la precisión promedio de VEMOS es cercana a 1,5 mm/a. Si VEMOS2009 es utilizado (Drewes, H. and O. Heidbach, 2009),

En esta tesis se utilizaron para 45 puntos Velocidades SIRGAS09 y 66 puntos velocidades de VEMOS."

### **3.3.2. Modelo por el efecto de mareas**

Los efectos producidos por la atracción gravitatoria de la luna y el sol deben ser modelados de manera que pueda disminuirse su influencia, estas provocan variaciones periódicas en la posición de las estaciones ubicada en la superficie terrestre. La amplitud y período de estas variaciones y la ubicación de la estación determinarán el efecto sobre la posición de la misma. Por ello es necesario que el modelo de mareas terrestres sea parte de la materialización de un sistema de referencia terrestre.

La deformación de mareas terrestres está dada por las conocidas mareas de la tierra sólida, donde se expresa la respuesta de la Tierra al potencial luni-solar mediante los coeficientes de Love y de Shida. El potencial luni-solar varía naturalmente en función del tiempo ya que la posición de la Luna y el Sol varían en el tiempo.

Con el objeto de considerar el potencial terrestre se han utilizado los coeficientes del modelo geopotencial JGM3 (The Joint Gravity Model 3) (Tapley, 1996)

Para considerar la influencia sobre el potencial gravitatorio terrestre debido a las mareas oceánicas se ha utilizado en modelo OT\_CSRC.

Por último se ha considerado la influencia de los demás planetas a través de las efemérides planetarias DE200.

Todos estos modelos han sido considerados en el desarrollo de las orbitas satelitales a través del modelo orbital tipo "B" el cual considera potencial JGM3, mareas terrestres, oceánicas y efemérides planetarias. Los cuales pueden encontrarse en el boletín B publicado por el IERS (International Earth Rotation And Reference Systems Service) ([www.iers.org](http://www.iers.org)).

### **3.3.3. Modelo de carga oceánica**

La corteza presenta una respuesta elástica frente a las variaciones de las mareas oceánicas. Esta respuesta es de mayor magnitud para estaciones cercanas a los bordes continentales y de mucha menor influencia en las estaciones ubicadas en el interior del continente. Este fenómeno físico debe ser tenido en cuenta en la materialización del sistema de referencia incorporando modelos matemáticos que disminuyan la influencia del mismo.

Existen gran cantidad de modelos que permiten corregir la influencia de la carga oceánica. En esta tesis se utilizó "FES2004", recomendado por las guías de SIRGAS por otorgar una mejor respuesta al fin buscado.

### **3.3.4. Modelo troposférico a priori**

Otro de los fenómenos físicos que deben ser modelados a fin de disminuir su influencia y llegar a obtener los productos finales (coordenadas y velocidades para nuestro caso) con las precisiones buscadas es la troposfera, la cual se extiende hasta aproximadamente 50 Km de altura, abarcando la troposfera y estratosfera. Tiene gran influencia sobre la señal GPS produciendo un retardo de la misma, ya que al atravesarla su velocidad de propagación se reduce con respecto a su valor en el vacío, produciendo un retardo en la llegada al receptor GNSS, a este se lo denomina "retardo troposférico" y debe modelarse.

El 90% del total del retardo es generado por la componente hidrostática (Dry) de la troposfera. Dicho retardo se encuentra modelado y es ingresado en el cálculo como dato.

En esta tesis se utilizó el modelo de “DRY\_NIELL” (Niell, 1996) para calcularlo. El 10% restante del retardo troposférico es influenciado por la componente húmeda (Wet). Este efecto es altamente variable y su modelado a priori es muy complejo (Langley, 1996), por lo que es necesario estimarlo y se tratará en detalle en el apartado 3.4.4, destinado a la estimación de parámetros. Ambas componentes sumadas pueden producir un retardo de entre 2 y 6 metros aproximadamente, dependiendo del ángulo de elevación del satélite observado y de las condiciones atmosféricas en el sitio y en el momento de la observación.

El modelo consiste en calcular el retardo cenital que sufre una señal hipotética que llega al receptor con un ángulo de  $90^\circ$  y convertirlo en el “retardo oblicuo” que experimenta la señal verdadera, que llega al receptor con un ángulo de elevación determinado (Herring et al., 1992). Ambos retardos se relacionan mediante una “función de mapeo”. Entre las funciones de mapeo más utilizadas por la comunidad GNSS se halla la denominada de Niell (Niell, 2000; Niell, 2003): que es la que se utiliza en esta tesis.

### **3.3.5. Modelos de precesión y nutación**

Uno de los ejes fundamentales del Sistema de Referencia Terrestre Internacional está dado por el eje de rotación terrestre. Este no se encuentra fijo en el espacio, es por ello que sus movimientos deben ser modelados para poder transformar su posición instantánea a media. Los movimientos del eje pueden ser descritos como una superposición de varios movimientos, definiendo un eje de rotación o polo medio fijo a la corteza terrestre. Los movimientos de este eje respecto del sistema inercial se agrupan bajo los términos de Precesión y Nutación. Por otra parte, las variaciones del eje de rotación instantáneo respecto del convencional se denominan Movimiento del Polo. A estos movimientos se agrega la rotación terrestre propiamente dicha, compuesta por una velocidad de rotación media e irregularidades de esta. Una descripción detallada puede encontrarse en (Mackern, 2003).

Es necesario conocer estas variaciones ya que son las que permiten relacionar el ICRS con el ITRS.

Los modelos utilizados dentro del procesamiento para aplicar los parámetros de orientación terrestre son los recomendados por la 24th Asamblea General de la Unión Internacional de Astronomía (IAU2000):

El nuevo modelo Precesión-nutación IAU2000 introducido por la Resolución IAU B1.6. Este modelo contiene los parámetros del movimiento de nutación del polo terrestre. Es usado en todos las transformaciones de orbitas del sistema celeste medio al terrestre medio. Está basado en un modelo de Tierra no rígida e incluye 678 términos lunisolar y 687 términos planetarios. Los cambios entre este modelo y sus antecesores son presentados en ([Rothacher, 2000](#)).

Expresiones completas y tablas están descriptas en el Capítulo V de las Convenciones del IERS 2000 ([McCarthy, 2003](#)).

El movimiento del polo contiene términos diarios y subdiarios, debidos a mareas oceánicas y términos de alta frecuencia de la nutación. Estos no están publicados por el IERS en los intervalos diarios; están representados por el modelo IERS2000 (IERS Conventions 2000, Chapter 5 and 8) y deben ser considerados también, son compatible con las convenciones IERS 2003 ([McCarthy y Petit, 2004](#)).

### **3.4. Estimación de parámetros**

#### **3.4.1. Pre procesamiento de código - Sincronización de relojes**

En la observación GPS es fundamental la precisión y sincronización de los osciladores tanto de los receptores instalados en las estaciones continuas como en los satélites.

Al trabajar con efemérides precisas se extraen de las mismas las correcciones a los relojes de los satélites (apartado 3.2.3).

Para poder trabajar en el posicionamiento diferencial con fase es necesario asegurar que el reloj del receptor cuente con una precisión de 1 microsegundo al momento de realizar el procesamiento de fase. Dado que el error del reloj de algunos receptores puede llegar a un milisegundo es necesario por lo tanto definirlo y corregirlo antes de iniciar el procesamiento con fase. Además se utilizó la combinación de códigos libre del efecto de ionosfera (L3) para la detección temprana de observaciones discordantes (outliers) de código en los archivos de observación. La detección temprana de estos errores permite solucionarlos antes de trabajar con simples diferencias.

### 3.4.2 Conformación de vectores – Simple diferencias

Con el objeto de optimizar la estimación de parámetros (coordenadas de las estaciones continuas) eliminando la influencia de una cierta cantidad de sesgamientos que afectan la señal GPS, se procesa en modo relativo es decir generando vectores entre pares de estaciones que tienen observaciones simultáneas. Estas combinaciones entre las mediciones de fase y código realizadas en cada estación son las denominadas simples diferencias. En una red de estaciones (más de dos estaciones de observación simultáneas) es posible realizar distintas combinaciones entre ellas tomando de dos en dos. Las estrategias más utilizadas para realizar estas combinaciones son:

-Máximas observaciones: se realizan todas las combinaciones posibles y sobre ellas se contabiliza la cantidad de observaciones utilizadas, seleccionando aquellas combinaciones linealmente independientes que aprovechan la mayor cantidad de observaciones. En este caso es posible especificar un máximo y/o mínimo en la longitud del vector a seleccionar.

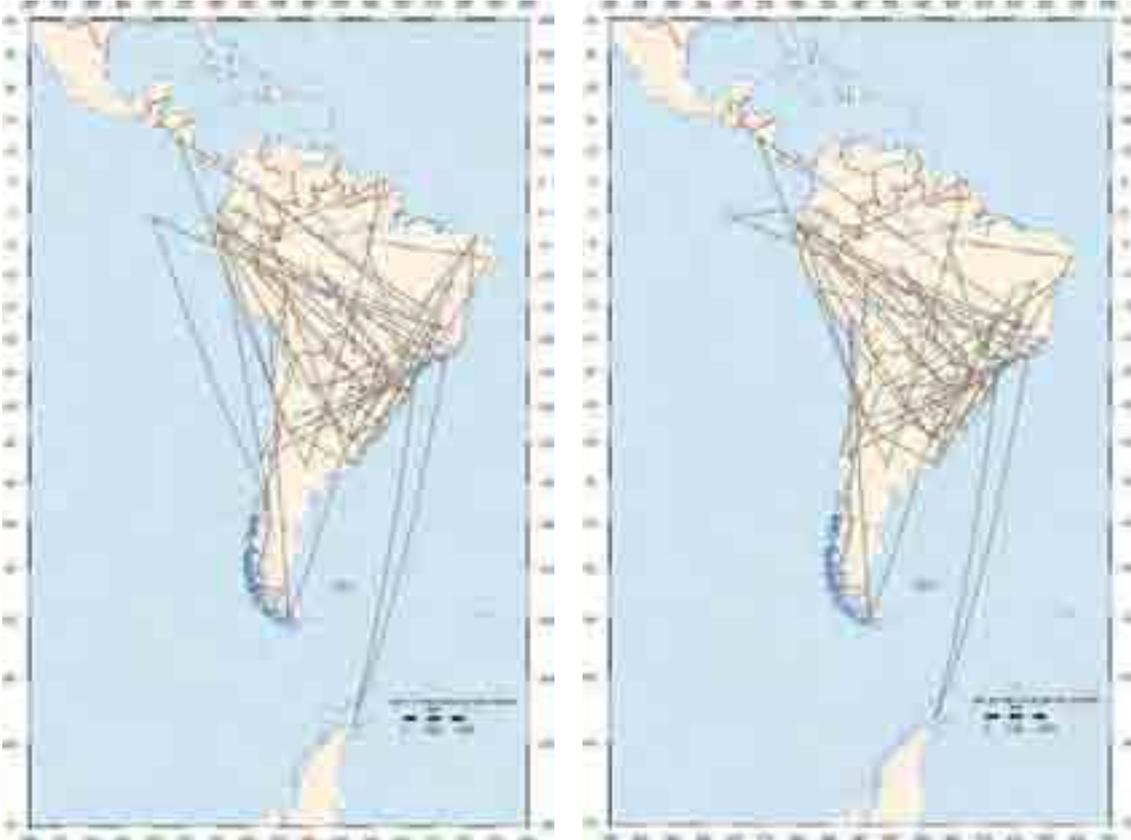
-Shortest: selecciona los vectores más cortos posibles, siempre que las observaciones de todas las estaciones cubran el mismo intervalo de tiempo.

-Star: todos los vectores a seleccionar parten de un mismo punto de referencia definido por el usuario.

-Definido: el vector debe ser definido completamente por el usuario, eligiendo el vector a crear, es decir debe elegirse las simples diferencias a generar.

-Manual: el vector debe ser definido seleccionando el comienzo y fin por el usuario, es decir deben elegirse las cero diferencias corregidas en el paso anterior.

Para esta tesis se utilizó como estrategia para la conformación de vectores “Máximas observaciones”, siendo la que mejor resultados proporciona para el fin buscado. A partir de la combinación de simples diferencias se trabajó sólo con observaciones de fase . La figura 23\_a y 23\_b esquematiza los vectores formados para dos días de una misma red. Se observa que aunque las estaciones utilizadas sean las mismas, con la estrategia seleccionada la configuración de la red queda conformada de manera diferente.



*Figura 23\_a: configuración de la red SIRGAS-CON-Sur para el día 171 año*

*Figura 23\_b: configuración de la red SIRGAS-CON-Sur para el día 191 año*

*Figura 23: configuración de la red SIRGAS-CON-Sur*

### **3.4.3. Pre procesamiento de fase – Triples diferencias**

Sobre los vectores conformados de simples diferencias de fase se realiza el denominado pre-procesamiento de fase. En el mismo se trata de detectar los ciclos perdidos o bien la necesidad de resolver una nueva ambigüedad que serán luego estimadas como parámetros en el siguiente paso. En esta etapa se sigue trabajando sobre la combinación lineal de frecuencias libre de ionósfera (L3), y la resolución de ciclos perdidos se plantea en una solución de triples diferencias de fase de la combinación L3. Los parámetros establecidos en esta etapa fueron los siguientes:

- Error a priori para cada observación de fase: **2 mm**, para ambas frecuencias.
- Máscara de elevación: **3°**.
- Series de observaciones continuas: **301 segundos**.
- Máximo espacio aceptado con observaciones continuas: **61 segundos**.

- Resolución de una nueva ambigüedad para espacios sin datos: **después de 301 segundos.**

Esta etapa es fundamental en el procesamiento y marca una de las diferencias sustanciales que distinguen al procesamiento científico del que no lo es. En los procesamientos que habitualmente se realizan con programas comerciales, el profesional no tiene participación en esta etapa y el programa trabaja en forma cerrada resolviendo los problemas, en algunos casos desfavorablemente o eliminando gran cantidad de datos (extraído de Mackern 2003).

#### **3.4.4. Estimación de parámetros – Dobles diferencias de fase**

La estimación de parámetros se basa en el ajuste por mínimos cuadrados, utilizando para la estimación, simples y dobles diferencias de fase. En esta etapa se pre-eliminan algunos parámetros para disminuir el número de incógnitas en el sistema de ecuaciones normales.

Este proceso de estimación de parámetros se aplica tres veces. A continuación se detallan cada una de ellas:

##### **Etapa I – Estimación de parámetros de posicionamiento y troposféricos**

La primera de las etapas consiste en estimar los valores de los parámetros troposféricos sin resolver ambigüedades ya que las mismas en la frecuencia L3 (combinación de las frecuencias fundamentales L1 y L2) son reales y no variables enteras. Según lo detallado en el apartado 3.3.4, se adopta como modelo troposférico a priori Dry Niell y sobre el mismo se estiman parámetros troposféricos que permitirían modelar la influencia sobre la señal debida a la parte húmeda de la tropósfera. Esta estimación se realiza a partir de las observaciones, calculando un parámetro cada 2 horas por cada estación. Estos parámetros se estiman en la primera y segunda etapa vector por vector y en la tercera para toda la red, los mismos son grabados como dato antes de generar las ecuaciones normales que serán luego combinadas con las de los demás días de la semana.

Al mismo tiempo se estiman los parámetros de posicionamiento, los cuales son correcciones a las coordenadas a priori de cada estación. Se toman como coordenadas de entrada las mejores existentes para cada una de las estaciones. En este caso se tomaron coordenadas SIRGAS de la última realización existente actualizada a la época de la semana a procesar.

En esta etapa los parámetros son estimados para cada vector independientemente.

El procesamiento se realizó con una máscara de elevación de  $3^{\circ}$ , el error a priori de cada observación se tomó en 2 milímetros y se utilizó la combinación de L1 y L2 libre de efecto ionosférico, pesando las observaciones en función de la elevación del satélite. Como ya fue expresado el modelo troposférico para la estimación de la parte seca de la tropósfera fue Dry\_Niell, con la función de mapeo de Niell, estimando parámetros cada 2 horas de observación, es decir 13 parámetros diarios, 12 parámetros relativos y 1 absoluto.

## **Etapa II – Resolución de ambigüedades**

Uno de los parámetros de mayor importancia a ser estimado son las ambigüedades en cada estación. Al igual que la etapa anterior, la estimación de parámetros se realizó vector por vector. Se trabajó sobre ambas frecuencias (L1&L2) ya que es el recomendado cuando se pretenden resolver las ambigüedades.

Esta etapa consiste en calcular y grabar las ambigüedades mediante alguna de las estrategias de procesamiento propuestas. En este caso se utilizó la estrategia QIF, (cuasilibre de ionosfera). La cual permite resolver ambigüedades en ambas frecuencias (L1 y L2) aún sobre líneas de grandes longitudes (hasta 1000/2000 Km.), sin usar el código como observable.

Se tuvo principal cuidado en que el “rms” final de cada vector no superase 1 mm, que el sigma a posteriori fuese menor que los 5 mm y que las diferencia de las coordenadas nuevas con las a priori no fuesen demasiado grandes. En caso contrario se repite todo el procesamiento incorporando las nuevas coordenadas. Esto sucede generalmente en casos extremos cuando una estación modifica su posición por factores exógenos como lo es luego de un terremoto cercano a su ubicación, o bien esto fue necesario cuando se incorporaron estaciones nuevas en el procesamiento.

## **Etapa III – Ajuste Libre diario**

La tercera y ultima de las etapas de procesamiento consiste en estimar las correcciones a las coordenadas y parámetros troposféricos a partir de las observaciones de una sesión completa, o día completo de observación, combinando la totalidad de los vectores que conforman la red en esa sesión.

Se calculan las ecuaciones normales correspondiente a la red de vectores total de la sesión (día) y se estiman las coordenadas de los puntos de la misma. Estas coordenadas se estiman con una estrategia de ajuste cuasi-libre, es decir se aplica como estrategia

para introducción del Datum “Coordenadas constreñidas”, con un sigma a priori de 1 metro para todas las coordenadas. De esta forma se le da la libertad necesaria para que las coordenadas de la red de puntos varíen lo suficiente conforme a las observaciones y órbitas sin producir deformación en la red causada por marco de referencia alguno.

Cabe mencionar que en esta etapa se graban las ambigüedades resueltas y los parámetros troposféricos antes de grabar las ecuaciones normales con el objeto de minimizar la cantidad de incógnitas a determinar en el ajuste semanal posterior.

A los archivos generados en esta rutina se los designa de la siguiente forma:

CIM + Semana GPS + día de la semana (0-6) + .NQ0 (ecuación normal)

CIM + Semana GPS + día de la semana (0-6) + .CRD (coordenadas)

Ejemplo:	CIMA16003.NQ0	Ecuación normal correspondiente al día miércoles de la semana GPS 1600
	CIMA16003.CRD	Coordenadas correspondiente a la red del día miércoles de la semana GPS 1600

### 3.4.5. Ajuste libre semanal – Metodología

El procesamiento diario de las observaciones ha permitido estimar todos los parámetros necesarios para eliminar la influencia de los fenómenos externos presentes en el momento de la observación, como por ejemplo los retardos inosféricos y troposféricos. La troposfera y ionosfera afecta a las señales en forma aleatoria, es decir que influye de formas diferentes en distintos intervalos o días de observación. Si bien la precisión de la red obtenida en cada ajuste diario es muy buena, la influencia de estos fenómenos presentes en un lugar particular puede estar afectando al resto de la red diaria, y no sería fácil de detectar, para evitarlo se realiza un ajuste libre semanal, en el cual se analizan tanto los residuos semanales como los diarios, comparándolos con los restantes. De este modo se detectan residuos altos o fuera de tolerancia.

En este ajuste se combinan las ecuaciones normales obtenidas para cada uno de los siete días de la semana, en un único sistema de ecuaciones. De manera similar que en el ajuste diario se aplica como estrategia “Coordenadas constreñidas”, con un sigma a priori de 1 metro para todas las coordenadas. De modo tal que la red no se deforme y solo quede atada al marco establecido por las órbitas al momento de medición.

Además de la estrategia de ajuste “Coordenadas constreñidas” el programa propone otras tres estrategias. Dada la influencia que este tema tiene en la materialización del marco de referencia las estrategias de ajuste se describirán en detalle en el capítulo IV.

La solución semanal obtenida puede ser utilizada para:

- Calcular un marco de referencia a partir de la introducción posterior del Datum. Este tema será tratado en el capítulo IV.

- Calcular una solución multianual a partir de la combinación de una cantidad considerable de soluciones semanales para un período no menor a 2 años. Esta combinación permite estimar coordenadas y velocidades medias para el período considerado. Este tema será tratado en el capítulo V.

- Unificar en un solo marco de referencia redes que han sido calculadas en forma separada, como es el caso de la red SIRGAS-CON. En este caso las soluciones de las distintas subredes cuasi libres son combinadas para obtener una única solución para la red. Dicha solución combinada continental forma parte de la solución global de IGS a través de la solución del IGS-RNAAC-SIR (IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS),

#### **3.4.6. Análisis de resultados y validación**

Una vez realizado el ajuste semanal cuasi-libre se procede a analizar la precisión de la red a partir de los puntos con sobreocupación, es decir sobre aquellas estaciones que presentan observaciones para dos días o más. Para ello se aplica una transformación de similitud entre cada solución individual y la combinación semanal. Se calculan los residuos luego de la transformación y se verifica que los mismos se encuentren dentro de las tolerancias pre-establecidas. En base a la precisión de la red se consideró que los residuos en la coordenada norte y este no superasen los 15 mm y en la altura no superasen los 30 mm.

Este análisis puede resumirse en los siguientes pasos:

- Se calculan 7 parámetros (3 rotaciones, 3 traslaciones y 1 escala) entre cada solución individual y la solución semanal combinada.
- Se toma cada solución individual y se le aplican los parámetros calculados obteniendo nuevas coordenadas de la red semanal combinada.

- Se comparan las nuevas coordenadas con las coordenadas semanales combinadas (marco de referencia libre).

- Se analiza si los residuos anteriormente generados se encuentran dentro de las tolerancias preestablecidas.

En los casos en los cuales ciertas estaciones presentan residuos mayores que las tolerancias se analizan las causas que pudieron producir ciertas inconsistencias. Las principales causas suelen ser: pocas observaciones (menores a 10 horas), offset de reloj del receptor muy alto, demasiados outliers.

En estos casos es necesario reducir o extraer para algún día o totalmente las estaciones que se encuentran fuera de tolerancia.

Cabe mencionar que este análisis en oportunidades se repite entre soluciones semanales anteriores y/o posteriores bajo el mismo criterio de combinar la red medida bajo condiciones atmosféricas variadas con el objeto de detectar errores que en una solución diaria y/o semanal pudiesen no detectarse.

### **3.5. Conclusiones del capítulo**

Como se ha demostrado el procesamiento de las observaciones es una tarea laboriosa que demanda tiempo, conocimiento y cuidado.

Esta comienza con la recolección de las observaciones en los centros de almacenamiento, las cuales deben estar disponibles entre los diez y quince días pasada la observación, Debido a que ese es el lapso de tiempo en que se encuentran disponibles las efemérides precisas de los satélites, las cuales son calculadas con posterioridad al paso del mismo. Este es otro de los productos que se requiere al iniciar el procesamiento de un periodo de observación, que generalmente comprende una semana GPS (comenzando el domingo y finalizando el sábado siguiente). Conjuntamente a las efemérides de los satélites se obtienen los parámetros de orientación terrestres (EOPs), ambos proporcionados por el IGS (International GNSS Service).

Otros productos y/o variables a tener en cuenta en el procesamiento, y sin los cuales pueden cometerse errores u omitirse correcciones, son por ejemplo las maniobras de satélites, las correcciones a los centros de fase de las antenas utilizadas en la observación, consistente con la información específica del offset de las antenas de los satélites, la infraestructura específica de cada estación de medición continua GNSS como son tipo de receptor y antena. altura de la misma, coordenadas y velocidades a priori, etc.

Considerando todos estos elementos comienza la preparación y chequeo de los datos, para posteriormente realizar un pre-procesamiento de la información, detectando outliers e inconsistencias en los datos. Muchas veces es necesario reducir o cortar datos que no cumplen con los criterios de calidad requeridos para ser tenidos en cuenta como observables en la estimación de parámetros.

Seleccionadas las observaciones que cumplen con los criterios de calidad se conforma la red de vectores y se procede a la estimación de parámetros. Si bien es posible estimar parámetros inosféricos y troposféricos, las influencias de la carga oceánica, movimientos del polo, los efectos producidos por la atracción gravitatoria de la luna, el sol y los planetas, las ambigüedades de cada observación, etc., en este procesamiento se consideraron modelos de carga oceánica, de atracción gravitatoria, de nutación y precesión mejorados por EOPs calculados por el IGS y sólo se estimaron parámetros troposféricos, ambigüedades y correcciones a las coordenadas a priori.

Las ecuaciones normales diarias generadas luego de la estimación de parámetros son sometidas a un nuevo ajuste por diferentes metodologías, dependiendo también del objetivo, para obtener una única solución semanal con la cual se pretende analizar la calidad de cada red diaria en relación a los demás días interviniente y a la solución general combinada.

### *El Ajuste de Redes, una herramienta utilizada para estimar precisión e introducir el Marco de Referencia que se pretende definir y/o densifica*

---

#### **4.1. Introducción**

Como se puede concluir de los capítulos anteriores la estimación de coordenadas con la precisión que la geodesia requiere, no se obtienen en forma directa a partir de las observaciones GPS sino que surge de un proceso complejo que comienza con la observación, continúa con la preparación del dato, luego su procesamiento y finalmente el ajuste. Si a su vez el período observado que se procesa es lo suficientemente largo como para detectar desplazamientos en las coordenadas pueden estimarse también las velocidades respectivas.

En el capítulo III se concluyó con la obtención de una solución libre semanal, la cual tiene como objetivo combinarse con otras soluciones regionales, a fin de calcular una única solución continental cuyas coordenadas se encuentren referidas al marco de referencia internacional. Para ello fue necesario analizar las precisiones obtenidas en cada solución individual que se ven claramente reflejadas en la solución combinada.

En este capítulo se describirán las estrategias utilizadas para introducir el marco de referencia en la red vinculada, un análisis comparativo de las mismas y los criterios utilizados para seleccionar las coordenadas fiduciales que materializan el sistema que se pretende densificar.

#### **4.2. Ajuste semanal – Introducción de un datum**

Las estrategias para introducir el datum se basan principalmente en la adhesión o no, al sistema de ecuaciones normales, de ecuaciones de coordenadas para los puntos fiduciales. Anexando a las mismas un peso apropiado para vincular en mayor o menor medida los vectores de la red a tales posiciones determinadas por los valores de dichas coordenadas.

El programa Bernese 5.0, propone para realizar el ajuste las siguientes cuatro estrategias:

- **Free Network solution:** la red es ajustada en forma libre. Esta opción permite estimar coordenadas de sitio sin aplicar ningún tipo de constreñimiento. No se introduce Datum alguno.
- **Minimum constraint solution:** este tipo de solución ajusta la red realizando una roto-traslación de la red medida y procesada hacia el marco de referencia que se desea utilizar como control o Datum, materializado en el grupo de coordenadas de CONTROL. Es decir intenta hacer coincidir la red a ajustar con el sistema de referencia al cual se desea vincular. En este caso es conveniente adoptar un sigma a priori para las coordenadas utilizadas como fiduciales.
- **Coordinates constrained:** esta opción permite constreñir las coordenadas de un grupo seleccionado de puntos a sus coordenadas a priori para definir el Datum geodésico. Puede especificarse un sigma a priori, que dependerá de la precisión que tenga la coordenada fiducial.
- **Coordinates Fixed:** con esta opción se pueden fijar (se admite que no tienen error alguno) las coordenadas de las estaciones seleccionadas como fiduciales a los valores especificados como a priori en el archivo de coordenadas de entrada. Estas coordenadas son fijadas totalmente sin darles ningún grado de libertad.

#### **4.2.1. Estrategias de ajuste**

En el capítulo III se explicó cómo se utiliza el método de Coordinates constrained con un sigma a priori de 1 metro resultando un ajuste cuasi libre. El objeto de este ajuste es analizar la precisión interna de la red ajustada en base a la repetitividad de las observaciones por tratarse de una red medida los 7 días de la semana, resultando en un ajuste de 7 soluciones independientes. Luego de superada esta etapa de análisis se observó que la red ajustada conserva una precisión interna del orden de 2 mm en la componente horizontal y 4 mm en altura.

Para obtener coordenadas y velocidades precisas se debe introducir el datum, ya que el objetivo buscado es densificar el marco de referencia global en la red a ajustar, en este caso una red de América del Sur. Para analizar cual de los métodos propuestos por el programa es el que mejor se adapta al objetivo perseguido se eligen como estrategias de

ajuste aquellas que nos permiten dar valores conocidos de coordenadas a puntos seleccionados, quedando descartado el primer método. El cuarto método, Coordinates Fixed, también se descarta por tratarse de una red muy precisa como se expresó en el párrafo anterior, no contando hasta la fecha con coordenadas fiduciales que presenten un orden de precisión mejor que el mencionado. En caso de utilizar este método influiría negativamente deformando la precisión interna de la red.

Por todo lo expuesto se procedió a introducir el marco de referencia utilizando como método de ajuste: "Coordinates constrained" y "Minimum constraint solution"

#### 4.2.2. Puntos y coordenadas fiduciales

Es necesario también definir cual es el mejor marco de referencia para introducir el datum (grupo de coordenadas fiduciales). Para este estudio se analizaron que puntos de la red procesada eran parte de marcos de referencia de órdenes superiores. Se analizaron también las épocas a que refieren tales marcos ya que sería necesario actualizar las coordenadas a la fecha de las observaciones. Esto llevo a seleccionar aquellos marcos mas recientes. En la Figura 24 Puede observarse los puntos de la red SIRGAS-CON-D-SUR que materializan a ITRF2000, ITRF2005, IGS05 en la región. Se observa una mayor cantidad de puntos fiduciales posibles en los marcos IGS05 e ITRF2005.



Figura 24: Estaciones con coordenadas en cada marco de referencia (ITRF00, ITRF05, IGS05)

Con el objeto de no introducir errores por velocidades se investigó respecto de utilizar las denominadas coordenadas semanales del IGS. Estas últimas refieren al marco IGS05,

siendo la época de referencia de cada solución la semana de observación de la misma. Dado que muchas estaciones no tienen una variación lineal de las coordenadas y bajo la hipótesis de introducir un error significativo al aplicar la expresión.

$X = X_0 + V \cdot T$  (actualización de época desde la época del marco época de observación)

Se estudiaron las diferencias entre estos marcos teniendo principal atención que la solución ITRF2005 no incorpora correcciones absolutas a los centros de fase de las antenas (recomendada para el cálculo de marcos de referencia precisos en la actualidad). Mientras que la solución IGS05 incluye tal corrección.

Se decidió por evaluar la posibilidad de introducir estas coordenadas semanales como fiduciales y compararlas con las del marco IGS05 con sus correspondientes velocidades como segunda alternativa. Con cualquiera de las dos se aseguraba la vinculación al marco global actualizado a la fecha de medición.

Sintetizando lo expresado en este ítem, se realizaron cuatro ajustes diferentes para cada una de las semanas seleccionadas:

- 1) Método de ajuste “Coordinates constrained” con un sigma a priori de  $1e-05$  m ( $0.00001$  m). Utilizando como coordenadas fiduciales el marco IGS05 con sus correspondientes velocidades.
- 2) Como segunda estrategia de ajuste se utilizaron las mismas coordenadas fiduciales de la estrategia 1) y la estrategia “Minimum constraint solution” aplicando Not-Net-Rot y Not-Net-Tras, ambos con un sigma a priori de  $1e-7$  m ( $0.0000001$  m) sin aplicar factor de escala.
- 3) Seguidamente se ajustó mediante “Coordinates constrained”, con un sigma a priori de  $1e-05$  m ( $0.00001$  m), utilizando como coordenadas fiduciales las publicadas como soluciones semanales del IGS. Estas pueden obtenerse con una demora de tres semanas en el siguiente sitio: <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/>
- 4) Finalmente se estableció como estrategia de ajuste “Minimum constraint solution” con las coordenadas especificadas en el punto anterior.

#### **4.2.3. Deformación introducida por el Datum. Estrategia de análisis**

Con el objetivo de identificar cual de las dos estrategias de ajuste utilizadas y que grupo de coordenadas factible de ser utilizada para introducir el datum resulta ser la más adecuada para ajustar la red objeto de este trabajo, se procedió a realizar la comparación de los resultados. Se tomó como universo de análisis 127 semanas (desde la semana 1400 hasta la semana 1527 (noviembre de 2006 a marzo de 2009), 2,5 años de observación.

El análisis se realizó sobre las deformaciones introducidas a la red cuasi-libre (loosely constrained) por la introducción del datum. Las deformaciones fueron calculadas tomando como patrón la red cuasi-libre correspondiente a cada semana de observación cuyo ajuste fue desarrollado ampliamente en el capítulo 3. Se considera que dada la precisión de esta red es el mejor patrón de referencia que se tiene para analizar posteriores deformaciones introducidas por el datum, ya que se encuentra libre de los efectos sistemáticos de rotación y traslación introducidos por el marco de referencia.

Para calcular las deformaciones cada una de las 4 soluciones obtenidas de aplicar las distintas estrategias de ajuste se comparó mediante una transformación de Helmert con la solución cuasi libre. Es decir:

- 1) Se tomaron ambos grupos de coordenadas, la denominada loosely constrained con cada una de las soluciones vinculadas por los distintos métodos (4).
- 2) Se calcularon 6 parámetros entre ambas soluciones (libre vs. cada ajuste). 3 parámetros de traslación y 3 de rotación. La escala no se tuvo en cuenta ya que se trataba siempre del mismo observable, por lo que si se acepta la influencia de una roto-traslación pero no una diferencia de escala.
- 3) Estos parámetros se aplicaron a las coordenadas de la solución vinculada para asemejarla a la libre de modo que se eliminaran los efectos sistemáticos propios del datum.
- 4) Finalmente se obtuvieron los residuos al comparar las coordenadas obtenidas luego de la transformación con las que surgieron del ajuste cuasi-libre. Los residuos resultantes, expresados en las coordenadas norte, este y altura permiten apreciar el grado de deformación ocasionado por la introducción del datum.

Los residuos resultantes de la totalidad de las comparaciones se han graficado para cada una de las estaciones y se adjuntan en el anexo 2.

Cabe mencionar que los parámetros se calcularon sólo con los grupos de coordenadas de las estaciones utilizadas como fiduciales, y luego fueron aplicados a la totalidad de la red para cada semana de cálculo.

#### 4.2.4. Resultados de la comparación

Del análisis de las deformaciones se observan marcadas diferencias en el comportamiento de los puntos fiduciales y en aquellos puntos que se encuentran en los extremos de la red, por lo cual se resolvió dividir el análisis en tres partes.

El primero se realizó sobre los puntos fiduciales, siendo estos los utilizados para introducir el Datum a la red., El segundo se realizó sobre el resto de los puntos de la red y finalmente el tercero sobre los puntos extremos de la misma que presentan mayor deformación que los anteriores por presentar menos vínculos.

Para estimar la deformación introducida por el Datum, se analizaron los residuos obtenidos luego de la transformación de Helmert para cada semana de cálculo y para cada una de las 4 estrategias aplicadas (representadas en cuatro colores, fig. 25). Estos residuos se graficaron estación por estación, según las tres componentes, norte, este y altura. Las cuatro estrategias se representaron según los siguientes cuatro colores.

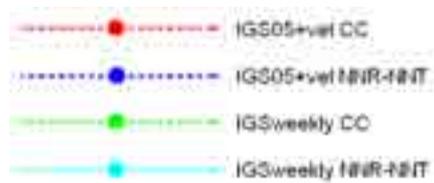


Figura 25: Referencia del análisis de deformación al introducir el Datum

##### 4.2.4.1. Análisis de la deformación introducida por el marco, sobre los puntos fiduciales

De los 99 puntos de la red se consideraron como fiduciales 11 puntos, que presentan coordenadas en el marco de referencia IGS05. La deformación sobre ellos varía de 1 mm a 10 mm. Cabe mencionar que tales deformaciones no deberían superar la precisión de sus coordenadas (Tabla nº 7).

Con el objeto de mostrar la influencia de las cuatro estrategias se adjuntan los residuos de dos estaciones CONZ y BRAZ (Figuras 26\_a y 26\_b) de las 11 estaciones que se usaron como fiduciales. En ambos gráficos puede observarse que la estrategia que menor deformación produce a la red es: **Minimum constraint solution** (Not-Net-Rot y Not-Net-Tras), tanto con coordenadas IGS05+vel, como para IGS Weekly (gráficos en color azul y celeste respectivamente).

Estación	Lat	Lon	Hei	VLat	VLon	VHei
BRAZ	0,60	1,00	1,70	0,70	-0,10	-0,40
CHPI	0,00	1,00	4,60	0,60	0,10	1,10
CONZ	0,90	0,30	0,20	1,50	-0,40	-1,10
CRO1	-0,50	-0,50	0,80	0,40	-0,10	-0,10
GLPS	1,30	1,60	-6,20	1,30	0,60	-3,50
GOLD	-1,70	0,90	3,20	-0,20	0,70	1,40
ISPA	-1,30	1,30	-8,30	0,20	0,50	-6,20
LPGS	0,60	-0,40	0,00	0,70	-0,40	-1,00
MANA	9,20	4,30	0,70	10,40	4,10	1,40
MDO1	0,20	0,80	-1,30	1,00	0,60	-1,10
PIE1	-1,30	0,90	0,20	0,40	0,40	-0,20
SANT	0,50	0,30	-1,20	0,80	-0,20	-1,40
SCUB	-1,60	-1,40	-0,40	0,00	-0,40	-0,50
UNSA	0,60	0,40	-0,70	0,90	-0,20	-1,10

Tabla 7: Precisión de las coordenadas IGS05 (Ferland, 2006)

De igual manera puede observarse que la estrategia que mayor deformación ofrece es **Coordinates constrained** con coordenadas IGS05+velocidades, que aparece en color rojo. Esta respuesta se observa principalmente en aquellas estaciones donde su comportamiento temporal no responde a una **velocidad lineal**. Por ejemplo la estación BRAZ se encuentra afectada por variaciones estacionales principalmente en su coordenada Up, al establecer el IGS una velocidad lineal ésta diferencia queda claramente marcada y puede observarse al comparar la coordenada obtenida al utilizar coordenadas IGS05+VEL o IGS weekly. Mientras que las dos estrategias que utilizaron coordenadas weekly se asemejan y van a la par (color verde y celeste).

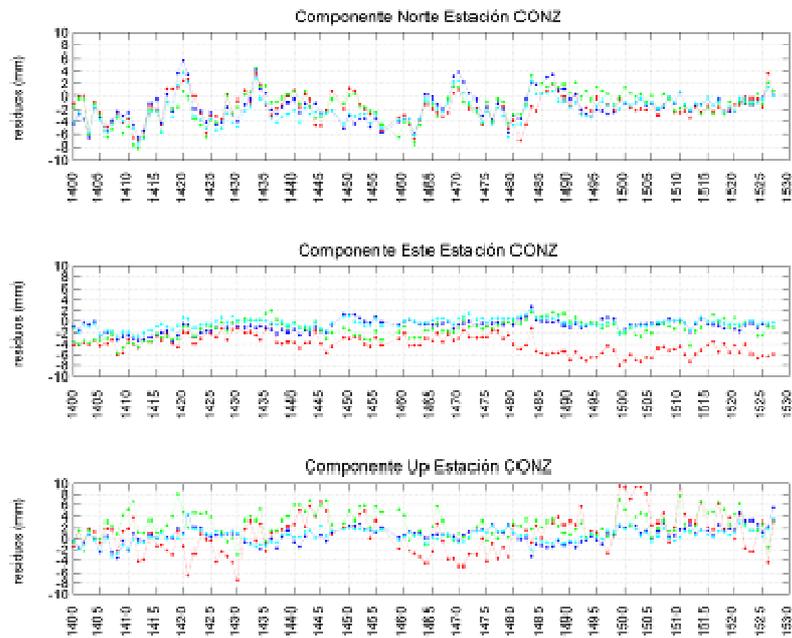


Figura 26\_a: residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación CONZ (Concepción – Chile). Estación fiducial

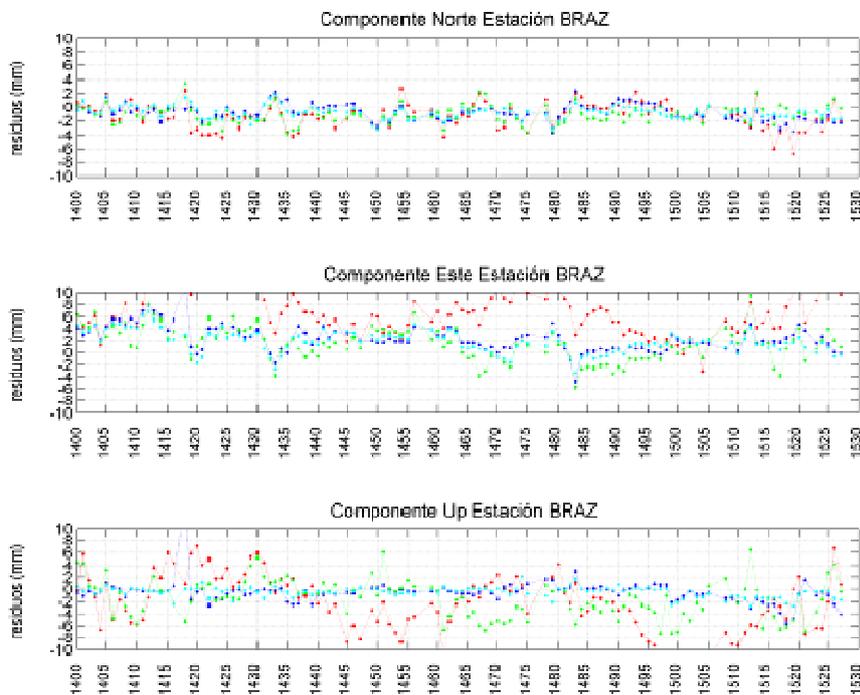
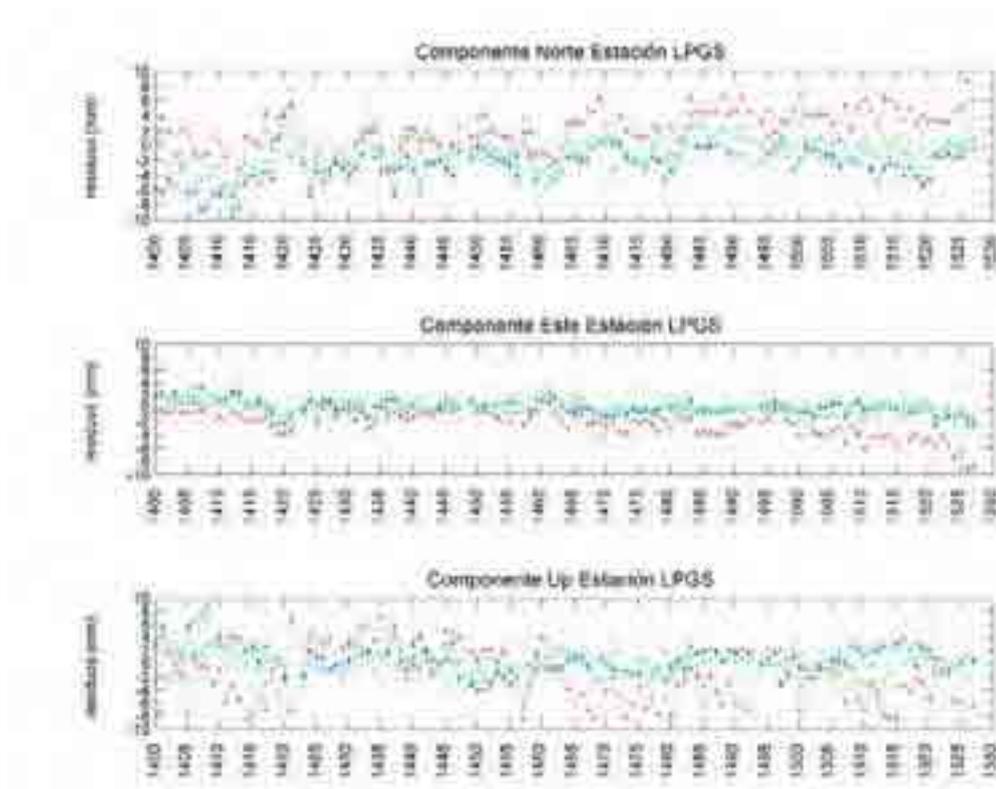


Figura 26\_b: residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación BRAZ (Brasilia - Brasil). Estación fiducial

Otra estación que muestra grandes deformaciones al utilizar coordenadas IGS actualizadas por velocidades lineales es CONZ, donde puede verse que el residuo en su coordenada **Este** se va alejando de cero (0) a medida que transcurre el tiempo. Este mismo efecto puede verse también en la estación LPGS tanto en el residuo de la coordenada **Norte** como en la **Este**, figura 27.



*Figura 27: residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación LPGS (La Plata - Argentina), Estación fiducial*

En los ejemplos se observa el comportamiento NO LINEAL de la variación de coordenadas y la necesidad de contar con velocidades determinadas en forma precisa y que acompañen al verdadero movimiento de las coordenadas. Esto puede mejorarse aplicando velocidades no lineales que respondan a un modelo definido con mejor precisión.

En el anexo 2 se encuentran los gráficos correspondientes a la totalidad de las estaciones fiduciales. Puede observarse que situaciones similares a la expuesta se producen en todas las estaciones fiduciales utilizadas. Concluimos como era de esperar que la estrategia que menor deformación produce es **Minimum constraint solution** ya que este tipo de ajuste intenta mantener la red cuasi-libre original sin deformarla y sólo la

roto-traslada tratándola de acomodar al marco de referencia, produciendo los mínimos residuos (mínima deformación).

Con el objeto de realizar un análisis cuantitativo se han calculado los valores promedios de estos residuos por cada estación para las 127 semanas analizadas para cada una de las cuatro estrategias (tabla 8) y el valor promedio de estos residuos para toda la red con su correspondiente desvío estándar (tabla 7 y Figura 28). Cabe mencionar que los residuos en las componentes norte y este se han combinado en un residuo denominado “Horizontal”.

RMS TOTAL (rms N + rmsE + rmsUP)								
Estación	IGS05+vel CC (mm)		IGS05+vel NNR-NNT		IGSweekly CC		IGSweekly NNR-NNT	
	Horizont al	Up	Horizont al	Up	Horizont al	Up	Horizontal	Up
BRAZ	7,916	5,686	3,487	1,930	3,569	3,438	2,878	0,999
CHPI	7,470	5,531	3,862	1,757	3,704	2,711	3,402	1,054
CONZ	5,179	3,692	3,133	1,685	3,461	3,543	3,142	1,379
CRO1	5,795	4,980	5,314	2,429	4,224	3,894	4,620	1,886
GLPS	4,388	7,013	4,012	2,491	4,589	3,664	4,163	1,375
ISPA	7,694	7,064	3,643	1,848	5,105	3,904	2,696	1,344
LPGS	4,561	4,639	3,670	2,560	2,708	2,281	3,515	2,366
MANA	15,239	9,955	4,515	4,485	4,680	3,636	4,391	2,365
SANT	3,660	4,787	2,545	1,229	3,298	3,631	2,634	1,046
SCUB	6,892	4,318	4,495	1,893	3,503	3,450	4,341	1,387
UNSA	4,169	4,302	1,621	0,891	2,315	3,018	1,712	0,818
Valor medio	6,633	5,633	3,663	2,109	3,741	3,379	3,408	1,456
Desviación Estándar	3,235	1,790	1,002	0,938	0,846	0,507	0,907	0,530

Tabla 8: promedio de los residuos luego de aplicar la transformación de Helmert para las estaciones fiduciales

Se observa la menor deformación (menores residuos) en la segunda y última columna bajo el título NNR-NNT (estrategia **Minimum constraint**). Siendo de las dos opciones la que menos residuos arroja en promedio la que utiliza como coordenadas fiduciales

coordenadas semanales del IGS (última columna). Con un residuo promedio de 3.40 mm en horizontal y 1.45 mm en altura.

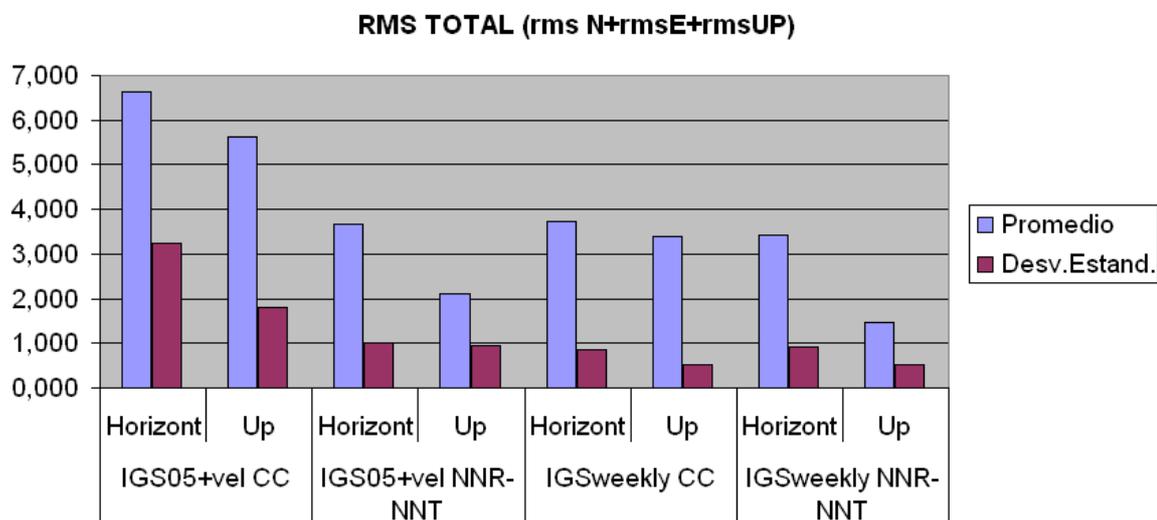


Figura 28: promedio de los residuos luego de aplicar la transformación de Helmert para las estaciones fiduciales

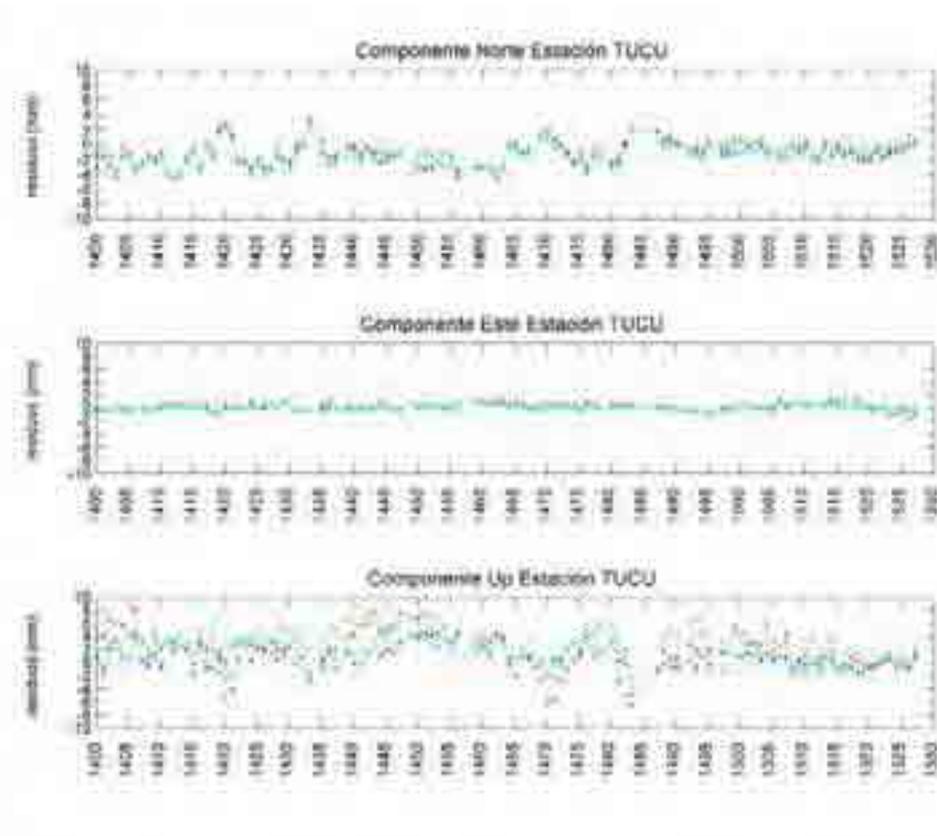
#### 4.2.4.2. Análisis de la deformación introducida por el marco, sobre los puntos NO fiduciales

Analizando las estaciones que no son de vinculación, se observan deformaciones que si bien son menores que las determinadas en los puntos fiduciales resultan significativas, principalmente si se considera la estrategia de **Coordinates constrained**, tanto con coordenadas IGS+VEL (color rojo) como con IGSWeekly (color verde).

Tomando algunos gráficos para su análisis se puede observar por ejemplo para la estación TUCU, Figura. 29, como los residuos provenientes de la estrategia, **Coordinates constrained** son mayores llegando a valores de 8 mm, lo que indica una mayor deformación a la red en el punto. Lo mismo observamos en las estaciones UNRO y UCOR en las Figuras 30 y 31 respectivamente, ambas ubicadas en la zona central de la red ajustada.

Es posible observar como la estrategia **Minimum constraint solution** es la que menor deformación produce a la red calculada, en las tres coordenadas estudiadas (norte, este y altura).

De igual manera que en el ítem anterior los residuos de todas las estaciones pueden observarse en el Anexo N° 2.



*Figura 29: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación TUCU (Tucuman - Argentina)*

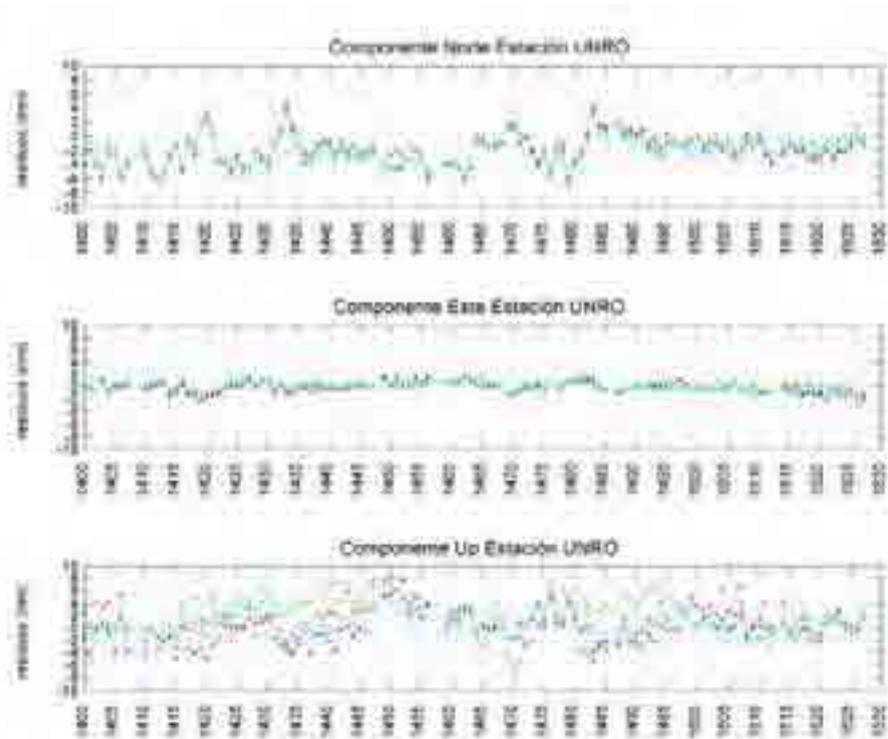


Figura 30: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación UNRO (Rosario - Argentina)

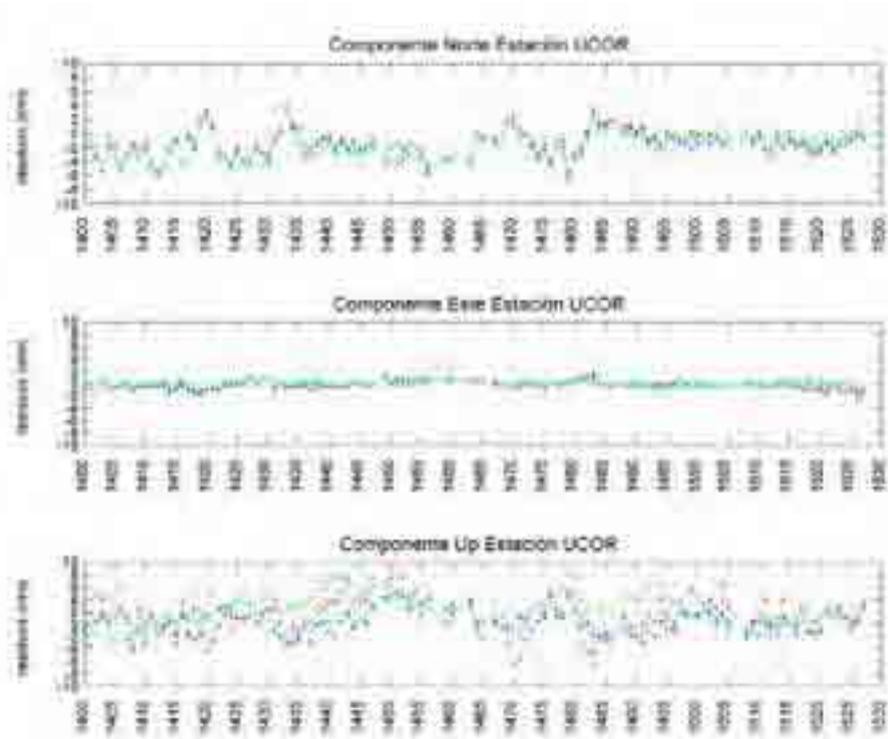


Figura 31: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación UCOR (Córdoba - Argentina)

#### 4.2.4.3. Análisis de la deformación introducida por el marco, sobre los puntos extremos de la red

En el caso de las estaciones que se encuentran en los bordes de la red es notable observar una considerable variabilidad en su coordenada, es decir sus residuos son grandes y muy irregulares. Esto se debe a que las estaciones extremas presentan menos vínculos en la red. Esto denota la importancia de contar con estaciones fiduciales en los bordes de la red que se esta ajustando para evitar o disminuir las imprecisiones que se producen en los extremos de la misma. La figura 32 y 33 muestra las estaciones OHI2 y CRO1 ubicadas en los extremos sur y norte respectivamente de la red compensada. La ubicación de ambas estaciones puede ser observada en la figura 34.

Si se analizan los residuos también para las estaciones mas extremas de la red la estrategia que menor deformación introduce es **Minimum constraint solution** con coordenadas **IGS Weekly**.

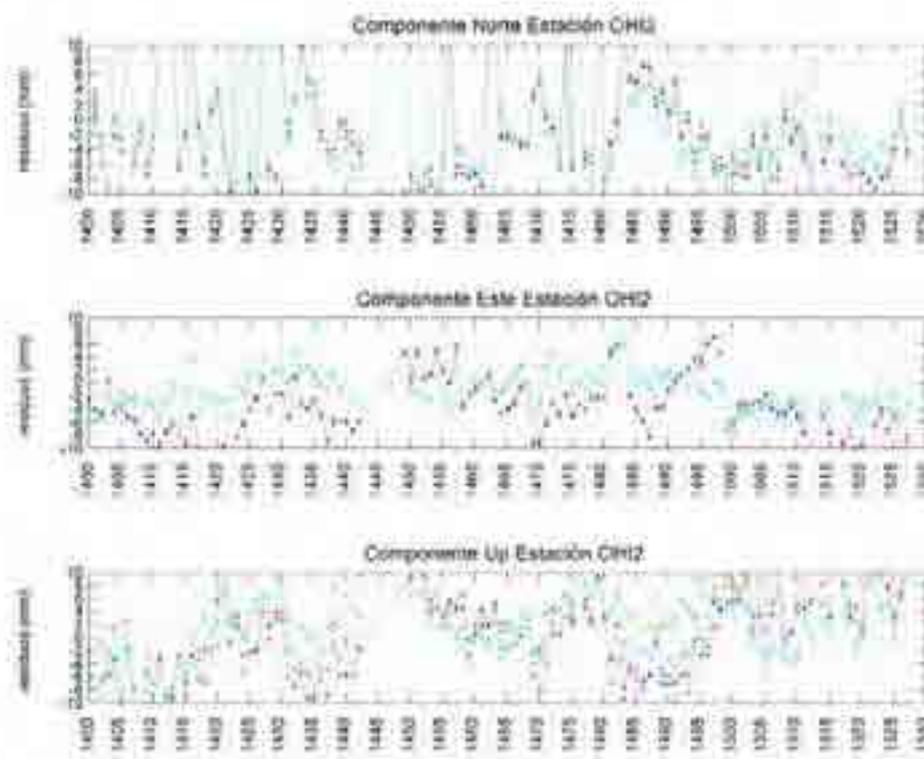


Figura 32: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación OHI2 (Antártica)

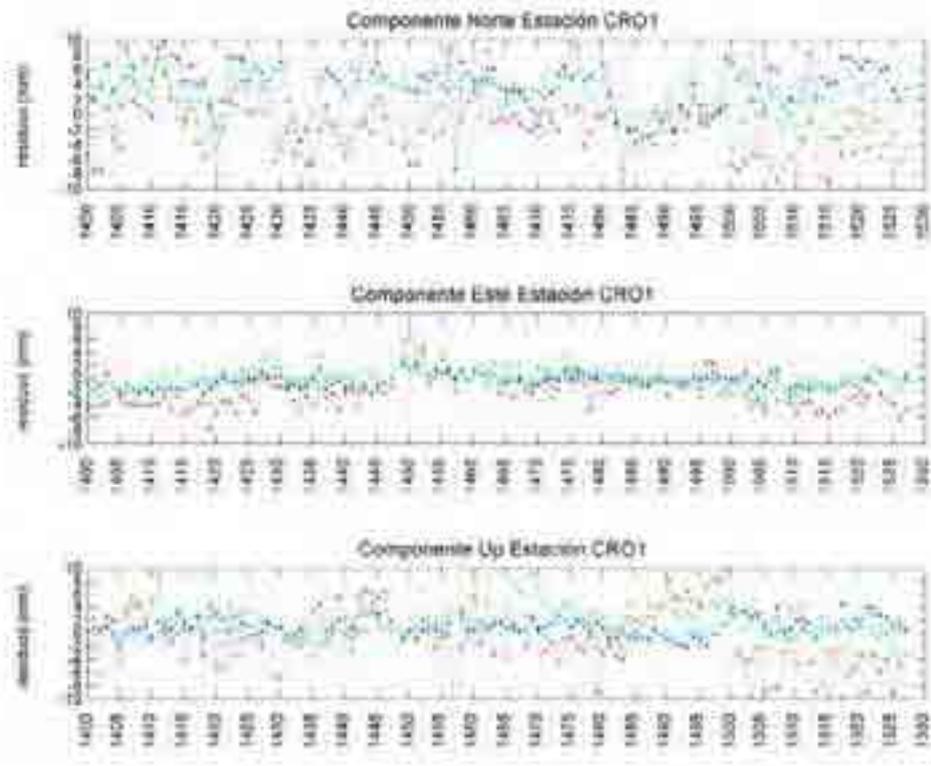


Figura 33: Residuos luego de aplicar la transformación de Helmert estación CRO1 (Santa Cruz - Estados Unidos)

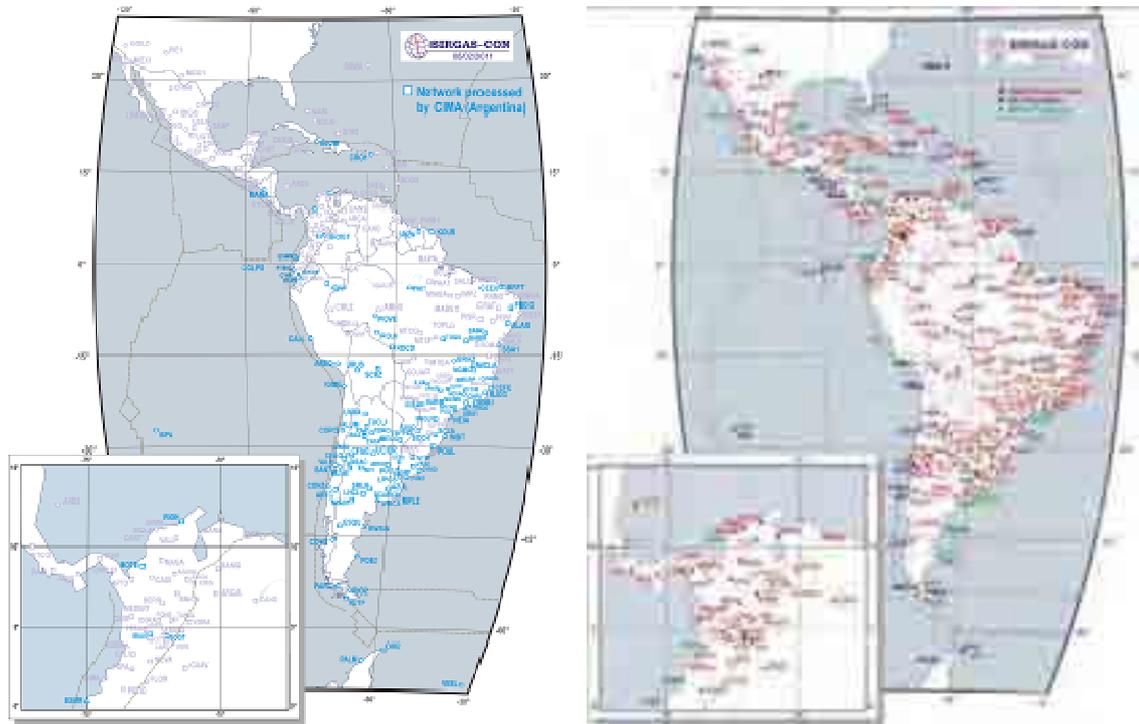
#### 4.3. Conclusiones del capítulo

De todo lo antes expuesto se concluye que para una red regional de características similares a la de esta tesis, SIRGAS-CON-D-Sur (4 países) (Figura 34\_a) la estrategia que optimiza la introducción del datum es **Minimum constraint solution considerando como coordenadas fiduciales la solución semanal del IGS, por ser estas las que mejor acompañan la variación de las coordenadas en el tiempo**. Las conclusiones se encuentran en un todo de acuerdo con las adoptadas para la red continental SIRGAS-CON (Mackern, 2009).

Dada la conveniencia de aplicar este método de ajuste tanto para la subred regional como para la red continental SIRGAS, se continuó trabajando con la totalidad de la red SIRGAS-CON (Figura 34\_b) para la estimación de velocidades.

Se utilizaron para el análisis de una serie temporal de coordenadas las provenientes de las soluciones semanales de SIRGAS vinculadas al IGSweekly para un período de 10 años. De este modo se extiende el área de estudio a la totalidad de América del Sur y

Central. Cabe recordar que esta solución integra parte de la solución acumulada de la red global del IGS.



(a) (febrero 2010)

(b) (febrero 2010)

([www.sirgas.org](http://www.sirgas.org))

Figura 34: Red SIRGAS Sur de operación continua SIRGAS-CON-D-Sur y Red SIRGAS de operación continua SIRGAS-CON

## CAPITULO V

### *Determinación Geodésica de Velocidades a partir de observaciones GNSS de medición continua a una escala continental. Su importancia para mantener en el tiempo la precisión de un Marco de Referencia*

---

#### 5.1. Introducción

Con el fin de conocer más sobre el comportamiento del sistema tierra y desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas la Geodesia tiene entre sus objetivos estimar coordenadas y velocidades en cada una de las estaciones de observación. Estas coordenadas y velocidades junto con la materialización física de dichos puntos definen un determinado marco de referencia.

Si recordamos, por definición la velocidad es la magnitud física de carácter vectorial que expresa el desplazamiento de un objeto por unidad de tiempo.

El conocimiento de la velocidad en un determinado punto asegura el mantenimiento matemático del mismo ya que las coordenadas del mismo se pueden mantener actualizadas aplicando la expresión:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0 \cdot (t - t_0) \quad (5.1)$$

Donde el "0" (cero) indica la época de definición del marco de referencia, "V" indica la velocidad del punto y "t" la época a la cual se la desea actualizar.

La transformación de época implica el conocimiento del comportamiento dinámico del área de la estación cuyas coordenadas se desean transformar. Esta información está contenida en primera aproximación en algún modelo geofísico. El modelo más utilizado es el modelo NNR-NUVEL1A (De Mets et al., 1994), adoptado en 1996 por el IERS como estándar, que divide a la superficie terrestre en 16 placas rígidas de rotación uniforme alrededor de sus polos de Euler. Este modelo representa un promedio de los movimientos de la corteza durante los últimos millones de años y es aproximadamente coincidente con los resultados de las observaciones actuales. En particular, no predice bien los movimientos de los puntos cercanos a los bordes activos de las placas, donde se

han observado deformaciones del orden de varios centímetros por año. Por lo anterior, en general la velocidad de un punto debe considerarse como se indica en (5.2), donde el primer término del segundo miembro es la velocidad horizontal de la placa según el modelo NNR-NUVEL1A y el segundo es una velocidad residual que puede ser estimada junto con la posición si se cuenta con observaciones durante al menos dos años en un determinado sitio.

$$\widehat{v}_0 = \widehat{v}_{placa} + \widehat{v}_r \quad (5.2)$$

Existen en la actualidad modelos de placas que tienen en cuenta la información geodésica y consideran zonas de la corteza en que las placas son rígidas y otras en que hay deformaciones como por ejemplo el modelo VEMOS ([Drewes and Heidbach 2009](#)).

En los capítulos 3 y 4 se detalló la metodología seguida para estimar coordenadas a las estaciones de la red SIRGAS-CON. La introducción del marco de referencia a través del ajuste semanal para 127 Semanas permitió el seguimiento de la variación de las coordenadas para una serie temporal (dos años) de cada una de las estaciones de la red

En este capítulo se detalla la metodología seguida para estimar las velocidades (en milímetros por año) y se analiza el comportamiento que ha experimentado el desplazamiento que cada coordenada en el período estudiado.

Se detectan en una cantidad significativa de estaciones que los desplazamientos no responden a una ley de variación lineal como la utilizada habitualmente para actualizar una coordenada.

Partiendo de la hipótesis que la presión atmosférica influye sobre la variación en la altura, finalmente se procedió a estudiar la correlación entre estas dos variables.

## **5.2. El mantenimiento del marco de referencia**

Las deformaciones que se producen en el planeta y que afectan el posicionamiento de las estaciones en un determinado sistema de referencia, se pueden clasificar en dos tipos:

- Globales: debido a fenómenos globales, son comunes a todas las estaciones de una red. Los principales fenómenos que provocan las deformaciones globales son las mareas terrestres y oceánicas y los movimientos de placas tectónicas.
- Locales: debidas a fenómenos locales, dependen de las condiciones geológicas y geofísicas de cada estación.

El sistema de referencia terrestre convencional debe incluir también la manera de modelar estos efectos que modifican la posición de las estaciones de observación. Debido a que las coordenadas de cualquier sitio específico evolucionan en el tiempo, el marco de coordenadas debe mantenerse. Cada año las agencias que calculan soluciones globales, presentan un grupo de coordenadas de las estaciones al International Earth Rotation Service, IERS, quien combina las soluciones para calcular dos productos: la realización anual del ITRF y su campo de velocidades asociado, en una época específica.

Estas soluciones anuales de ITRF son desarrolladas y publicadas en reportes anuales y notas técnicas. Con el objeto de asegurar el mantenimiento del marco de referencia, deben cumplirse dos condiciones:

- 1) Que se mantenga la monumentación física del punto en el terreno.
- 2) Que las coordenadas del punto representen su posición en el Sistema de Referencia Terrestre. Siendo que los puntos no son fijos sino que sufren movimientos relativos y absolutos, el marco de referencia debe irse actualizando con mediciones periódicas y recálculo de las coordenadas, de manera que el marco represente posiciones reales de puntos en el ITRS.

En la densificación de marcos de referencia mediante redes tradicionales denominados “marcos de referencia pasivos”, en las cuales se utilizan marcas que permanecen en el terreno y a las cuales se les otorgan coordenadas en un determinado Datum los puntos son protegidos físicamente y requieren de un programa permanente de visitas para verificar la existencia y estado de los monumentos, en casos de ser necesario su reposición y/o reparación. Para asegurar el mantenimiento matemático se deberían realizar campañas de medición periódicas que permitan conocer su movimiento dentro del sistema, lo cual por lo general por su alto costo, no se lleva a la práctica (Mackern, 2003). Son los casos en Argentina de la red POSGAR (Posiciones Geodésicas Argentinas), medida por primera vez en el año 1993 y 1994 y remediada en el 2007, PASMA (Programa de Apoyo al Sector Minero Argentino), sin remediación y las redes catastrales provinciales, sin remediación.

Por otro lado los marcos activos en cambio son aquellas redes de puntos que no sólo sirven de arranque o control por tener coordenadas conocidas sino que poseen una Estación Permanente GNSS que realiza observaciones los 365 días del año, las 24 horas del día. Tales observaciones pueden ser luego, por diversas formas, adquiridas por un usuario de GNSS cualquiera que pretenda utilizarla como punto de referencia en su procesamiento. Los Marcos Activos, o redes de EP GPS, están respaldadas por ciertas instituciones locales que actúan como responsables de su mantenimiento físico, que en este caso no sólo constituye en la materialización física del mismo sino en asegurar el correcto funcionamiento del receptor GPS, de su correspondiente antena y del sistema de bajada y transferencia de datos a una red pública. En cuanto al mantenimiento matemático del marco se realiza a partir del cálculo periódico de coordenadas y velocidades, lo cual manteniendo la estructura de un centro de cálculo regional resulta como productos del mismo. De este modo es claro apreciar las razones que nos llevan a reemplazar los marcos clásicos por este tipo de marcos Activos.

### **5.3. Movimiento de Placas Global. Principal causa de la desactualización del marco**

El movimiento de las placas tectónicas es el principal efecto que produce desplazamiento en los sitios de observación. Si bien ya se comentó respecto a su influencia sobre los sistemas de referencia terrestres en los ítems **1.2.3** y **3.3.1** se procede a continuación a describir los modelos más utilizados y la tendencia actual al respecto. La teoría de placas tectónicas supone la división de la corteza terrestre en varias placas, 11 placas principales y otras de dimensiones reducidas. Se están realizando una gran cantidad de investigaciones con el objeto de estudiar los movimientos relativos, comprender los mecanismos y delimitar sus contornos en forma más exacta. El origen de estos movimientos es atribuido a procesos de convección térmica en la astenósfera. Los desplazamientos relativos entre placas alcanzan en algunos casos velocidades de 10 cm/año (comúnmente es de algunos pocos centímetros por año).

Las variaciones de coordenadas de estaciones debido a estos movimientos, pueden estimarse si se dispone de observaciones sobre un largo período o también se calculan por modelos ([Mackern, 2003](#)). Un modelo muy aceptado fue el de ([Minster and Jordan, 1978](#)), llamado RM2, basado en un conjunto de datos geológicos y geofísicos que describen los movimientos tectónicos durante decenas de millones de años. Estos datos derivados de perfiles de anomalías magnéticas, de la dirección de fallas y de datos sísmicos, contienen las velocidades de expansión a partir de dorsales oceánicas. El modelo RM2 describe de una manera global los movimientos relativos de las placas. Un

modelo de la misma naturaleza, pero mejorado se denominó NUVEL-1 (Figura 35). Una modificación de este se denominó NNR-NUVEL 1. Describe las velocidades angulares de las 14 principales placas tectónicas definidas por una condición de no rotación de la red. Fijando una placa (se elige usualmente la placa Pacífica) a velocidad cero, se pueden obtener velocidades en el modelo de movimiento de placas relativo NUVEL-1, el cual se deriva de datos paleomagnéticos, de acimutes de fallas y vectores desplazamiento ocasionados por los terremotos.

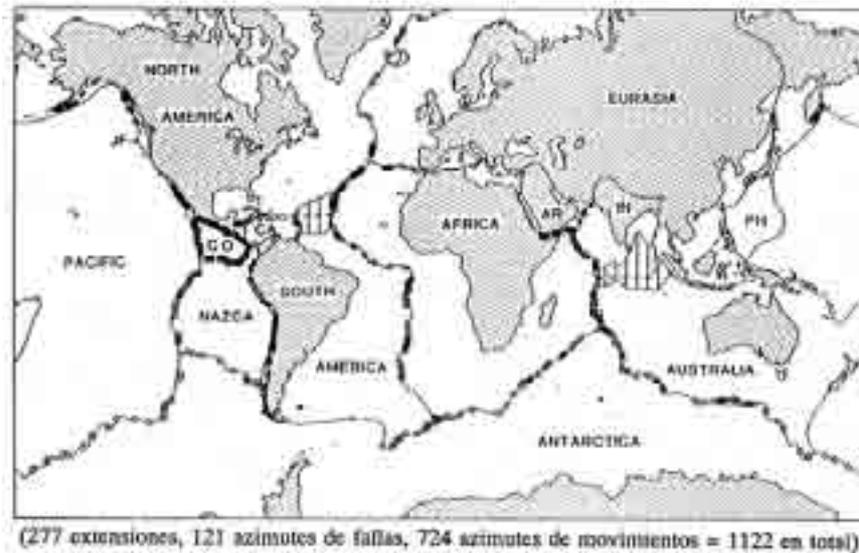


Figura 35: Modelos de tectónica de placas NUVEL-1 (DeMets et al., 1994)

Una revisión reciente de la escala de tiempo paleomagnético ha conducido a reescalar los valores angulares por un factor de 0,9562 definiendo el nuevo modelo NUVEL-1A y NNR-NUVEL-1A. Es conveniente señalar que las variaciones de coordenadas de las estaciones, estimadas por este modelo consideran únicamente las componentes horizontales. Las deformaciones verticales también son un elemento importante a tener en cuenta. Estas deformaciones seculares pueden ser muy significativas y son debidas a otros efectos. Las variaciones de coordenadas de estaciones debidas a estas deformaciones no están previstas por los modelos existentes, por lo tanto deben ser estimadas en el ajuste de las observaciones para el cálculo de la posición. Los modelos globales de movimiento de placas, están en general basados en datos geológicos a escala de millones de años, suministrando una estimación global de las deformaciones de las placas de grandes dimensiones. Ciertas deformaciones, relativas por ejemplo a los bordes de las placas y a zonas complejas o más activas, no son consideradas en estos modelos (Figura 36). Se pueden realizar mejoramientos locales de los modelos de placas, con las nuevas técnicas de geodesia espacial.

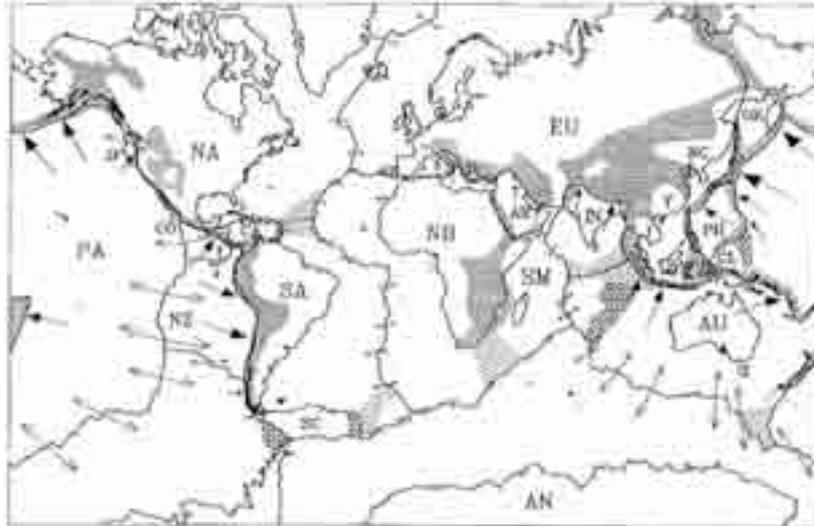


Figura 36: globales de deformación. (Gordon, 1995)

Actualmente los movimientos relativos entre placas son observados por las técnicas espaciales, confirmando cuantitativamente las predicciones del modelo (Figura36).

En la figura 36\_a se muestran comparativamente los vectores velocidad horizontal obtenidos de NUVEL-1A, los estimados en la solución ITRF2000 a partir de la red global de estaciones GNSS y los surgidos de la solución acumulada de la red SIRGAS al año 2002. Puede observarse acuerdo en aquellas zonas consideradas de placa rígida, pero se observan marcadas diferencias en aquellas zonas denominadas de deformación (Ejemplo estación SANT, AREQ, entre otras).

La principal causa de estas diferencias es la cantidad de estaciones que han sido consideradas para el cálculo, el período de observación considerado y el nivel de análisis al momento de considerar los períodos de observación dada la existencia de terremotos en la región de estudio.

La figura 37\_b muestra una comparación realizada a partir de la estimación de velocidades para un periodo de observación de 2,5 años (2006,8 - 2009,3) mediante la combinación de soluciones de la red SIRGAS-CON-D-Sur respecto a las velocidades ITRF2005. Para ambos ejemplos representados en el mapa los vectores son coincidentes en dirección y sentido, esto se debe a que la solución SIRGAS-CON-D-Sur es densificación del IGS05, la cual es parte de ITRF.



*Figura 37\_a: comparación de vectores velocidad horizontal NUVEL-1A, ITRF2000 y solución acumulada de la red SIRGAS al año 2002*



*Figura 37\_b: comparación de vectores velocidad horizontal, ITRF2005 y solución acumulada de la red SIRGAS-CON-D-Sur al año 2009 (Mackern 2009)*

Por otro lado la figura 38 muestra una comparación de de vectores de velocidad SIRGAS-CON-D-Sur e ITRF2005 relativos al placa sudamericana. Es decir a la velocidad obtenida a partir de observaciones GPS, se le elimina el movimiento descrito por alguno de los modelos mencionados, para este caso se utilizó NUVEL-1A, consiguiendo como resultado las deformaciones de la placa.

Se necesita sin embargo, esperar algunos años todavía para que la geodesia espacial aporte mejoramientos significativos a los modelos existentes a nivel global ya que si bien hay zonas de gran densidad de estaciones donde se conocen muy bien las velocidades, habrá que densificar suficientemente las redes de estaciones VLBI, SLR y GPS para poder realizar un control global de tales movimientos. Por otra parte las deformaciones internas en cada placa son de muy largo período y de pequeña amplitud, por lo tanto a fin de detectar este tipo de deformaciones, deben realizarse mediciones geodésicas de vectores sobre una misma placa con una precisión mejor que 1 mm /año. Por todo lo expuesto en los párrafos precedentes es muy importante conocer la época a que están referidas las coordenadas de estaciones de un determinado marco de referencia para llevarlas mediante este tipo de transformación a la época de interés, ya sea para comparación o bien para su utilización como punto de apoyo en un determinado

relevamiento. A continuación se muestra un ejemplo de tales velocidades. Se trata de las velocidades de las estaciones permanentes en América del Sur del Regional Network Associate Analysis Center del IGS (RNAAC-SIRGAS)



*Figura 38: Comparación de vectores de velocidad SIRGAS-CON-D-Sur e ITRF2005 relativos a la placa sudamericana (Mackern et al., 2009b).*

#### **5.4. Solución acumulada**

Una solución acumulada nos define un marco de referencia a partir del seguimiento de las estaciones para un periodo de al menos 2 años. Consiste en la combinación de semanas mediante el formato de ecuaciones normales, es decir es una “acumulación” de ecuaciones normales semanales. Otro tipo de solución que define marco de referencia es la solución multianual, que comprende una periodo mayor a dos años. Esta no necesariamente comprende el seguimiento semanal de los puntos, sin embargo puede ser utilizada como sinónimos de la anterior, si cumple con ambos requisitos.

Una vez elegida la estrategia de ajuste se está en condiciones de generar una única solución multianual, o solución acumulada. Esta se hace como combinación de NQ0 (ecuaciones normales) cuasi libres, es decir aquellas ecuaciones a las que aún no se ha introducido datum y que fueron generadas mediante la estrategia de ajuste “Coordenadas constreñidas” explicada en el capítulo II aplicando un sigma a priori de 1 m. La solución aquí presente combina la totalidad de las soluciones semanales libres que comprende al

periodo en estudio calculando una única solución, es decir cada estación contará con un único juego de coordenadas (x, y, z) conjuntamente con las velocidades asociadas a las mismas y sus precisiones. Ambos productos son referidos a la época media del periodo estudiado, En este trabajo se realizó una combinación de 127 semanas (2.5 años) correspondientes al período entre octubre de 2006 (2006.8) y abril de 2009 (2009.3) obteniendo la solución SUR08P01, por tratarse de ecuaciones normales correspondientes a la sub red sur de SIRGAS (SIRGAS-CON-D-Sur). Contiene coordenadas de 98 sitios referidas a IGS05 a la época 2008.0. El anexo 3 contiene las coordenadas y velocidades con las precisiones correspondientes. Es importante recalcar que la estimación de velocidades es posible en una combinación que al menos incluya 2 años de observación y estén referidas a un determinado marco. Es decir la velocidad de un punto se estima a partir del comportamiento del mismo a lo largo del tiempo, con su variación en la posición. Es por ello que es necesario un lapso mayor a dos años para que la velocidad sea confiable y represente el verdadero movimiento de éste. A su vez si la combinación no es referida a un marco de referencia no tenemos contra que contrastar el movimiento (sistema de referencia) ya que las coordenadas del punto quedan libres en el espacio para cada época de observación.

La figura 39 muestra las velocidades estimadas a partir de la solución acumulada SUR08P01, que se explicó en los párrafos anteriores. Los vectores representan el desplazamiento horizontal lineal de cada punto de la red con un periodo de observación mayor a 2 años. Las estaciones que no cumplen con este último requisito no se encuentran graficadas, ya que no fue posible estimar su velocidad.

### **5.5. Desplazamiento de las coordenadas en el tiempo**

Cuando el sistema de referencia se encuentra materializado por medio de estaciones permanentes, como es el caso de esta tesis, es posible estudiar la variación en el tiempo que tienen las coordenadas ya definidas. Es decir con qué magnitud y sentido se desplazan los puntos de referencia sobre la corteza terrestre. Gracias a la gran densificación con la cual se cuenta hoy en América de estaciones GNSS de medición continua es posible el desarrollo de modelos de velocidades regionales.

Como se mencionó en el capítulo 3, bajo la estructura del IGS y a nivel regional de SIRGAS, las estaciones de referencia son procesadas obteniendo una solución diaria, la que se combina semanalmente en cada centro de procesamiento. Posteriormente se realiza la combinación semanal de todos los centros de procesamiento de la red SIRGAS

vinculándola a la solución semanal del IGS. Así se tiene acceso a las coordenadas de cada estación en la época de medición y en el marco de referencia global. De esta forma se cuenta con coordenadas para cada estación referidas a la época del día medio de la semana. Cada una de estas coordenadas es comparada con la correspondiente a la primer época del período y su diferencia es graficada en función del tiempo. Es posible es estos gráficos observar el comportamiento del desplazamiento de cada una de ellas, tanto en magnitud como en sentido.



*Figura 39: Velocidades determinadas a partir de la solución acumulada SUR08P01*

A continuación se comentan algunos de estos gráficos a modo de ejemplo. La totalidad de las estaciones analizadas se encuentran en el anexo 4.

En la figura 40 se observa la serie temporal (10 años de observación) de las coordenadas de la estación LPGS, ubicada en la ciudad de La Plata, Argentina. Puede observarse como las tres componentes (Norte, Este y Altura), tienen una variación, es decir no se

mantienen constantes en el tiempo, sino que mueven en diferentes direcciones y con distintas magnitudes. Esto se debe fundamentalmente a la tectónica de placas que deforma la superficie terrestre según la elasticidad de la zona en que se encuentra cada estación y las fuerzas que se ejercen en cada una de ellas (DeMets et al., 1994; Gordon, 1995; Drewes and Heidbach 2009).

Si analizamos en detalle la estación LPGS de la figura 40 vemos que la coordenada Norte presenta una tendencia ascendente, es decir un aumento de la coordenada norte, lo que indica que la estación se desplaza hacia el norte. A su vez la coordenada este manifiesta una tendencia muy levemente en descenso, indicándonos que el punto se desplaza a muy pequeña velocidad hacia el este. Por su parte la altura muestra una leve variación que aparenta seguir un período más pequeño, el cual merece un estudio mas a escala, pero analizando sus valores medios deja como remanente un leve ascenso. Si observamos hacia el final de la serie (epoca 2010,2) se ve un importante salto en la coordenada este, ello se debe al movimiento sísmico ocurrido el 27 de febrero de 2010 en la ciudad de Concepción, Chile. La magnitud de este evento tuvo incidencia sobre gran parte del continente, se trato de un movimiento sísmico de 8.8 en la escala de Richter (Sanchez et all, 2010).

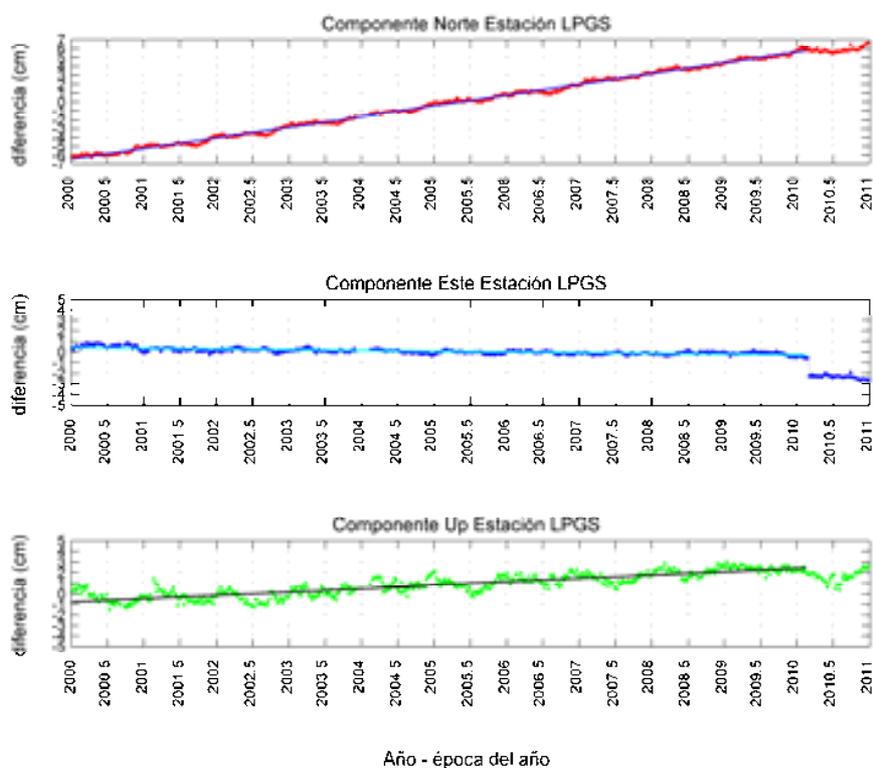


Figura 40: Variación de las coordenadas en la estación LPGS (La Plata-Argentina)

El mismo análisis se puede realizar con la serie temporal de la estación MZAC, ubicada en la ciudad de Mendoza, Argentina (Figura 41) Se observa un desplazamiento hacia el norte y hacia el este, lo cual era de esperar porque ambas estaciones se encuentran sobre la placa sudamericana. Cabe recalcar que en este caso se observa una mayor pendiente o sea una mayor velocidad que para LPGS, esto es parte de lo que se expresó en el ítem 5.2 sobre zonas de deformación. MZAC se encuentra en una de estas zonas a diferencia de LPGS que podría decirse se encuentra sobre la zona de la placa considerada rígida., Deformaciones mayores como la de MZAC se ven en las estaciones ubicadas al oeste de la placa por ejemplo en San Juan, Argentina, Arequipa en Perú o las ubicadas en Chile, SANT (figuras 42), VALP, CONC. Tanto en la figura 40 como 41 se observa hacia el final de la serie el desplazamiento instantáneo producido por sismo mencionado, el cual produjo importantes variaciones en las 3 coordenadas. Estos casos deben ser tenidos en cuenta al calcular una solución acumulada, ya que tanto las coordenadas del punto como la velocidad del mismo se modifican significativamente. La soluciones entonces proporcionan dos o más juegos de coordenadas, según corresponda, aclarando la época de inicio y fin para la cual tienen validez. Lo mismo sucede con las velocidades.

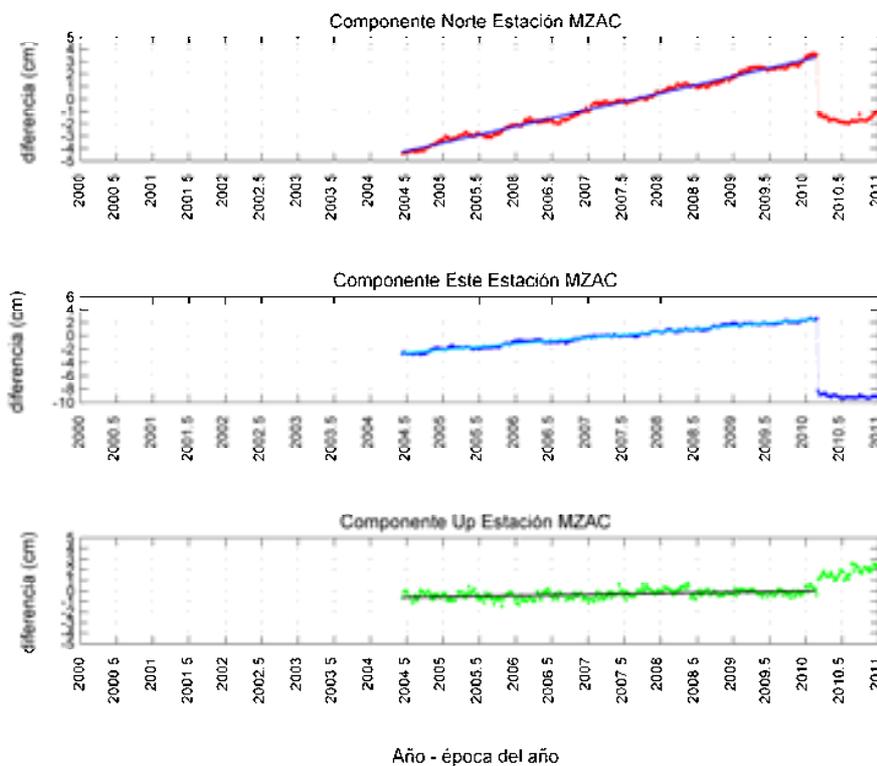


Figura 41: Variación de coordenadas en la estación MZAC (Mendoza-Argentina)

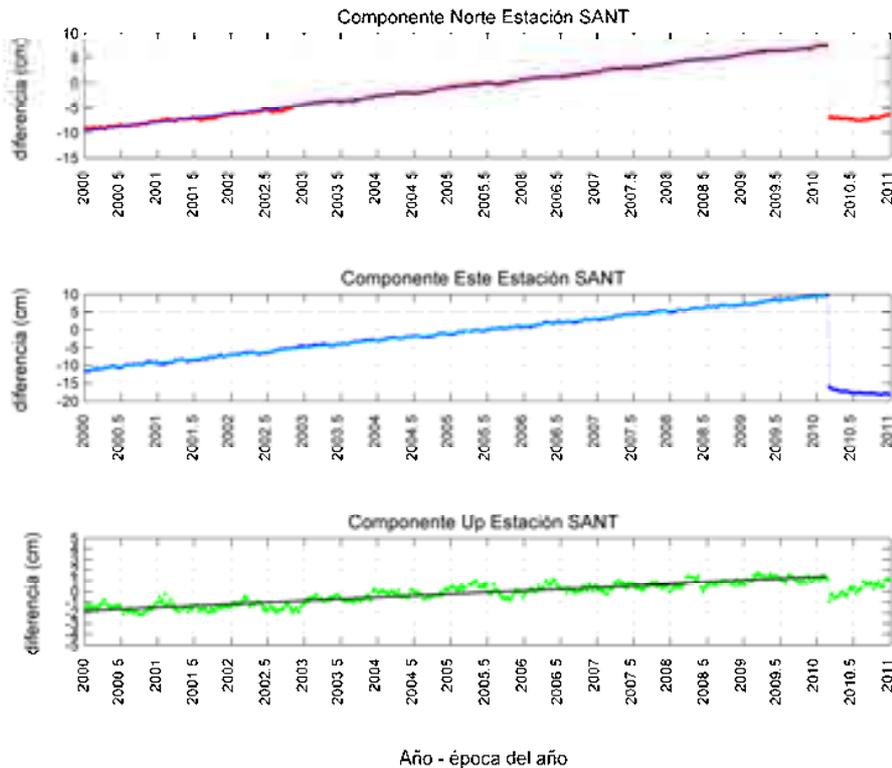


Figura 42: Variación de coordenadas en la estación SANT (Santiago de Chile)

## 5.6. Velocidades no lineales

En los gráficos anteriores se muestra la tendencia de la coordenada por medio de una línea que indica la velocidad media para el período considerado. Esta línea representaría el valor de la coordenada si en vez de obtenerla del cálculo semanal de sus observaciones se calcularía utilizando una coordenada referida a una época la cual se actualizase a partir de una velocidad lineal según el período indicado.

En algunos casos, principalmente en las coordenadas horizontales (norte y este) esta aproximación se ajusta bastante a la realidad, como se observa en los dos ejemplos mencionados. En otros caso y prestando principal importancia a la coordenadas Up, es difícil aproximar por una velocidad lineal.

Analizando las estaciones ubicadas en la cuenca del Amazonas esta diferencia se ve de forma más marcada, presentando variaciones temporales que deben ser modeladas.

Si se analiza la serie temporal de las estaciones BRAZ y NAUS ubicadas en Brasil, se observa una marcada variación que responde a un patrón temporal. Dicho patrón o intervalo tiene máximos y mínimos dentro del año por lo cual se lo considera estacional.

Esta variabilidad se marca principalmente en su coordenada altura (up). Analizando la diferencia presente entre la posición real y la estimada con una velocidad lineal, existe una diferencia, según la época del año, de hasta en 2 mm para la estación BRAZ y hasta 4,5 mm en la estación NAUS. (fig. 43 y 44).

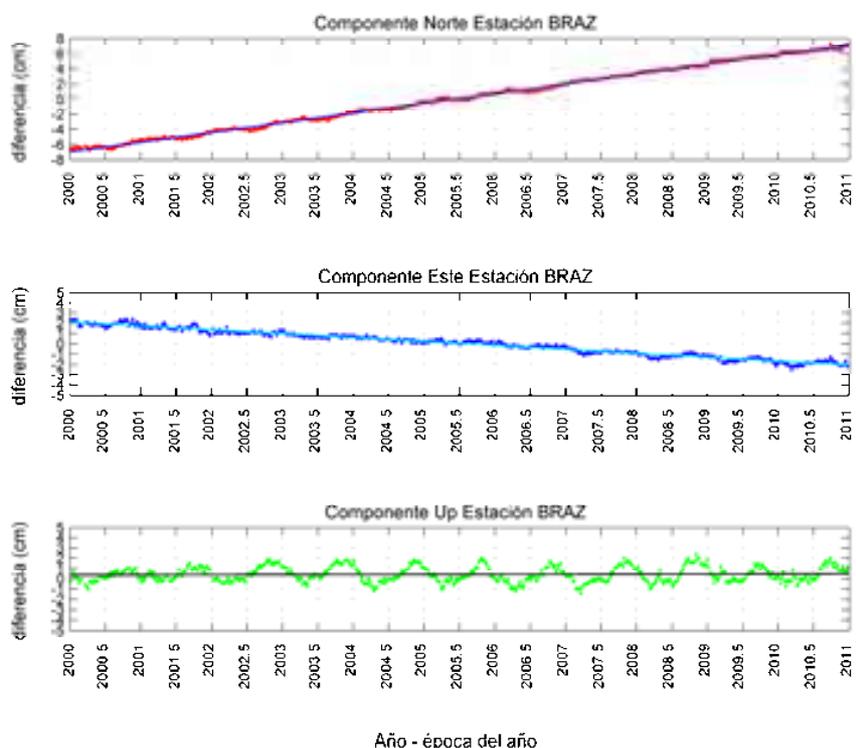


Figura 43: Variación de coordenadas en la estación BRAZ (Brasilia, Brasil, cuenca Amazónica)

La causa de estas variaciones estacionales se debe fundamentalmente las variaciones de los caudales de aguas fluviales y subterráneas y a las variaciones en presión atmosférica que ejerce carga sobre la corteza terrestre, viéndose reflejado en las coordenadas.

Con el objeto de estimar velocidades precisas este fenómeno debe ser investigado y modelado en función de las propiedades físicas de la corteza y de la presión atmosférica del lugar, así como también la producida por carga de caudales de aguas fluviales, siendo esta más difícil de modelar ya que las variables a tener en cuenta no son medibles en el lugar específico a donde se encuentra la estación, y la correlación entre los dos efectos se torna complicado.

En el anexo 4 pueden verse los gráficos que representan las series temporales de coordenadas de la totalidad de estaciones de la red SIRGAS-CON.

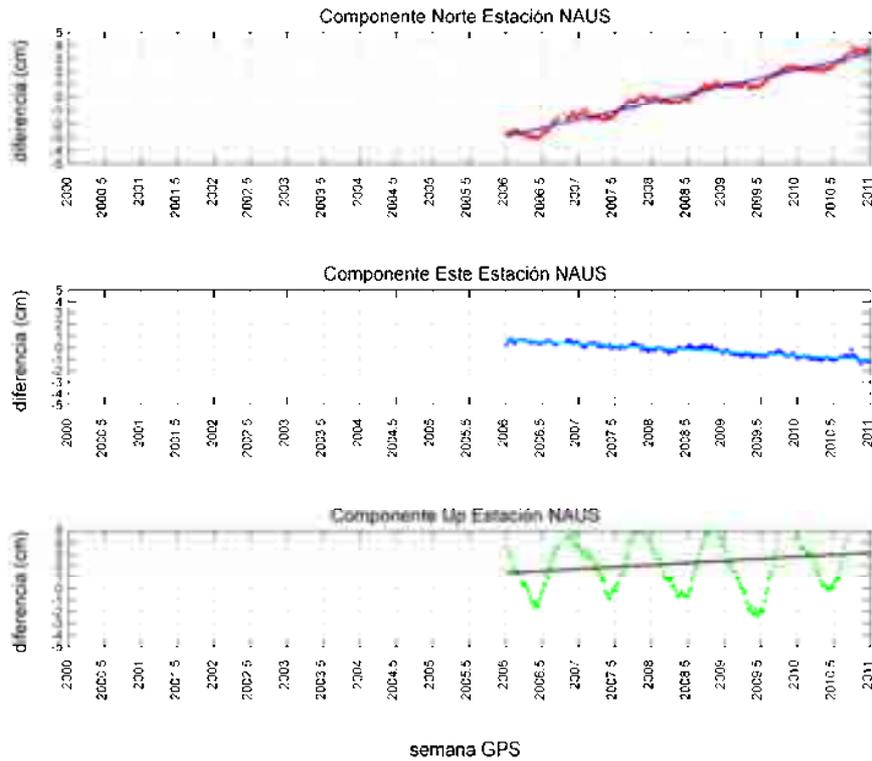


Figura 44: Variación de coordenadas en la estación NAUS (Brasil, cuenca Amazónica)

### 5.7. Correlación entre la variación de la coordenada Up y la variación de la presión atmosférica

Vimos en el apartado anterior que las coordenadas Up varían en muchos casos varios centímetros en un corto lapso de tiempo (6 meses). Esta variabilidad responde a algún fenómeno físico que modifica las condiciones de la corteza terrestre. El mismo debe ser estudiado y analizado para poder disminuir su efecto y modelarlo.

La presión atmosférica se define como una columna vertical de que se extiende desde un punto hasta el límite superior de la atmósfera y coincide numéricamente con el peso de ésta. Esto nos lleva a pensar que el peso de la misma puede ejercer algún tipo de deformación sobre la superficie terrestre provocando que esta se mueva en forma vertical modificando la posición de las puntos que se encuentren sobre ella.

Un análisis en relación a este tema nos orientará para conocer esta relación y así poder modelar las variaciones estacionales que se observan en las series temporales de coordenadas.

### 5.7.1. Recopilación de antecedentes

Teniendo como antecedentes las series temporales con un periodo mayor a 5 años de cada una de las estaciones, donde se observa una marcada variación temporal de sus coordenadas. Se procedió a recopilar datos de estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de cada una de ellas. Se prestó principal importancia a los datos de presión atmosférica, que serían los fundamentales para el estudio. Esta fue una tarea compleja ya que las áreas a estudiar se encuentran ubicadas en diferentes países y corresponden a instituciones de lo más diversas, entre ellas servicios meteorológicos nacionales.



Figura 45: representación espacial de la existencia de estaciones meteorológicas y GNSS. Representadas en color azul las 1º de ellas y en color rojo las 2º.

Se tuvo accesos a los datos de presión atmosférica y precipitación del servicio meteorológico nacional de Argentina - centro de información meteorológica ([cim-cim@smn.gov.ar](mailto:cim-cim@smn.gov.ar)). Para el resto de las estaciones la información fue obtenida desde la siguiente página web (<http://www.tutiempo.net/>), donde se encuentran una base de datos meteorológicos de estaciones distribuidas por distintas partes del mundo.

En la Figura 45 se encuentran mapeadas las estaciones que contaban con datos meteorológicos y las estaciones GNSS. Es posible observar la gran disponibilidad de datos de presión.

Para analizar la confiabilidad de los datos allí publicados se correlacionaron los obtenidos en el servicio meteorológico nacional de Argentina y los publicados en la página web anteriormente mencionada para los sitios comunes.

Nom. Estación (Mendoza)	Fecha	PRESIÓN ATMOSFÉRICA		DIFF (mb)	Nom. Estación (La Plata)	Fecha	PRESIÓN ATMOSFÉRICA		DIFF. (mb)
		CIM	Tu Tiempo				CIM	Tu Tiempo	
87418	01/01/06	929,1	929,3	0,2	87593	01/01/06	1008,1	1008,3	0,2
87418	02/01/06	933,4	931,7	-1,7	87593	02/01/06	1008,5	1008,2	-0,3
87418	03/01/06	932,5	933,4	0,9	87593	03/01/06	1010,8	1010,2	-0,6
87418	04/01/06	927,5	928,1	0,6	87593	04/01/06	1009,5	1009,8	0,3
87418	05/01/06	926,2	926,3	0,1	87593	05/01/06	1007,1	1007,7	0,6
87418	06/01/06	927,5	927,6	0,1	87593	06/01/06	1005,3	1005,2	-0,1
87418	07/01/06	924,2	924,6	0,4	87593	07/01/06	1006,7	1006,3	-0,4
87418	08/01/06	927,1	926,5	-0,6	87593	08/01/06	1004,4	1005	0,6
87418	09/01/06	920	923,5	3,5	87593	09/01/06	1003	1007,1	4,1
87418	10/01/06	933,2	928,6	-4,6	87593	10/01/06	1008,1	1003,4	-4,7
87418	11/01/06	927,9	929,2	1,3	87593	11/01/06	1012,9	1013,6	0,7
87418	12/01/06	932,8	929,7	-3,1	87593	12/01/06	1008,7	1008,6	-0,1
87418	13/01/06	931,5	932,8	1,3	87593	13/01/06	1015,3	1014,8	-0,5
87418	14/01/06	925,7	926,6	0,9	87593	14/01/06	1010	1011,8	1,8
87418	15/01/06	927,4	926,5	-0,9	87593	15/01/06	1004,4	1004,7	0,3
87418	16/01/06	939,6	937,7	-1,9	87593	16/01/06	1013,9	1009,4	-4,5
87418	17/01/06	937,2	937,8	0,6	87593	17/01/06	1021	1020,7	-0,3
87418	18/01/06	930	932,1	2,1	87593	18/01/06	1017,4	1019,2	1,8
87418	19/01/06	925,5	925,8	0,3	87593	19/01/06	1009,1	1010,2	1,1
87418	20/01/06	931,1	929,5	-1,6	87593	20/01/06	1007,3	1007,2	-0,1
87418	21/01/06	934,6	934,2	-0,4	87593	21/01/06	1011,7	1010,8	-0,9
87418	22/01/06	931,8	931,6	-0,2	87593	22/01/06	1013,5	1013,7	0,2
87418	23/01/06	928,6	928,9	0,3	87593	23/01/06	1010	1010,8	0,8
87418	24/01/06	928,7	928,5	-0,2	87593	24/01/06	1006,1	1006,4	0,3
87418	25/01/06	934,4	933,6	-0,8	87593	25/01/06	1008,7	1007,2	-1,5
87418	26/01/06	930,5	931,2	0,7	87593	26/01/06	1014,3	1014,5	0,2
87418	27/01/06	929,5	929,5	0	87593	27/01/06	1011	1011,6	0,6
87418	28/01/06	929,7	929,9	0,2	87593	28/01/06	1009,4	1009,7	0,3
87418	29/01/06	928,4	928,1	-0,3	87593	29/01/06	1005,6	1005,3	-0,3

Tabla 9: comparación de datos del servicio meteorológico Nacional Argentina y Datos publicados en la página web [www.tutiempo.net](http://www.tutiempo.net)

Se llegó a la conclusión que las estaciones meteorológicas publicadas en este sitio corresponden y son denominadas con la misma nomenclatura que las provenientes del servicio meteorológico nacional Argentino. Al igual que las nomenclaturas se encontró que los datos son muy similares en ambos sitios, presentando una diferencia mínima entre ellos. La tabla nº 9 muestra a modo de ejemplo un periodo de comparación para las ciudades de Mendoza y La Plata.

## 5.7.2. Datos y series meteorológicas

Cada estación meteorológica consultada en la web, cuenta con los datos climáticos históricos, entre los cuales se encuentra la presión atmosférica, y las coordenadas aproximadas, esto permitió relacionar estos datos con la estación mas cercana. Se tomo como tolerancia una distancia máxima de 30 km. entre las estaciones (meteorológicas y GPS), de modo que el efecto de la carga atmosférica tuviese relación directa con las variaciones en la coordenada altura de cada estación GPS. Además se condicionó que las series temporales de coordenadas no fuesen menores a 2 años.

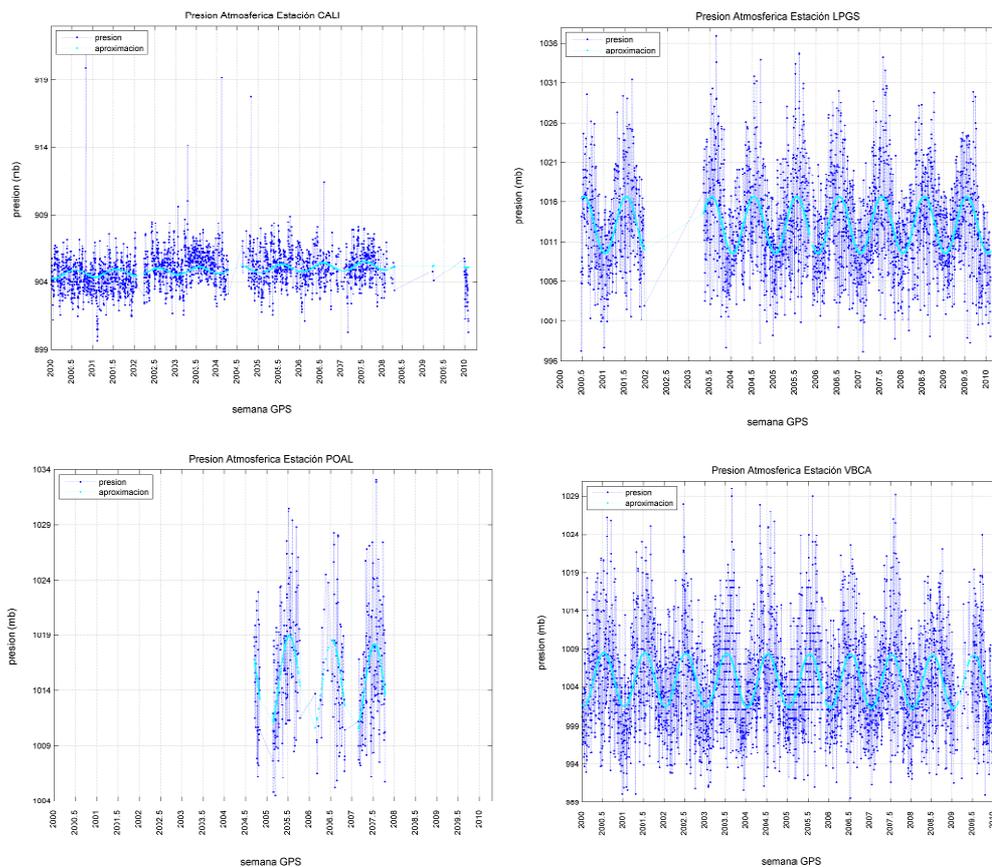


Figura 46: series temporales de presión atmosférica para 4 estaciones meteorológicas ubicadas en las ciudades de Arequipa, Basilia, Buenos Aires y Mendoza.

Posterior a la obtención de las series de datos se procedió graficarlas encontrando variaciones temporales también en las series de presión atmosférica. La figura 46 ejemplifica 4 casos. Aquí encontramos, en color azul los datos de presión atmosférica para estaciones meteorológicas ubicadas en las ciudades de Arequipa (Perú), Basilia (Brasil), Buenos Aires y Mendoza (Argentina), las

cuales pueden relacionarse con las estaciones CALI, LPGS, POAL y VBCA respectivamente.

Con las series temporales de presión medida en cada estación puede aproximarse una función utilizando series de senos y cosenos que representes lo mejor posible la variación estacional que presenta cada serie. La figura 46 muestra en color celeste esta aproximación, más adelante se utilizaran las aproximaciones para analizar la si existe relación ente la carga ejercida por este fenómeno meteorológico y la variación estacional de la coordenadas Up.

### **5.7.3. Análisis de la influencia de carga atmosférica sobre las variaciones en la coordenada “altura”**

#### **5.7.3.1. Metodología de trabajo**

Con el fin de correlacionar las series temporales de las estaciones de coordenadas y presión atmosférica se implementó una metodología de trabajo rutinaria, para ello se desarrollaron herramientas informáticas que permitiesen un análisis completo y seguro de la información.

- 1) Se analizaron las series temporales tanto de la presión atmosférica (Fig.46) como de la coordenada “altura” (Fig.47), correspondiente al mismo sitio (en un entorno de 30 km).
- 2) Se aproximó a cada una de las series temporales de la coordenada altura y de la presión atmosférica, con una función (Fig. 46 y Fig.47). Esto se realizó para las 23 estaciones seleccionadas.
- 3) Con ambas aproximaciones se procedió a realizar la correlación. Cabe destacar que para las aproximaciones a las coordenadas solamente se utilizó la amplitud y fase de la misma, descartando en el análisis la tendencia ascendente o decente que proviene del movimiento por tectónica y que se encuentra muy bien modelado, como se explicó en el capítulo IV.

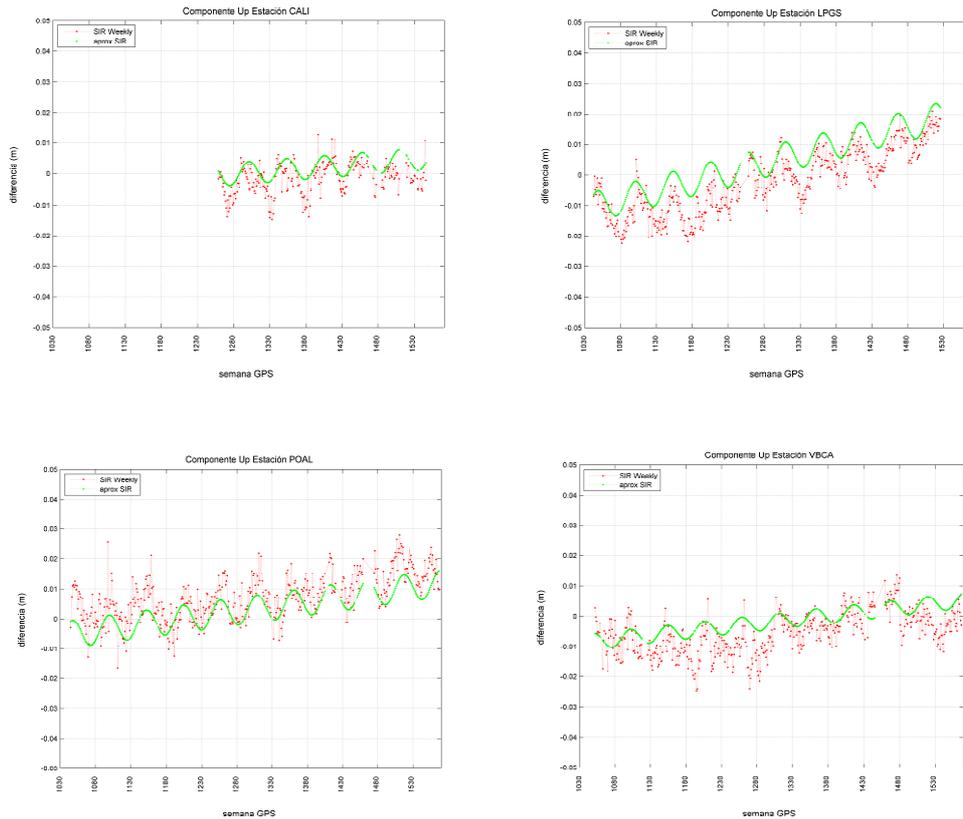


Figura 47: Series temporales de la Altura-Estaciones AREQ, BRAZ, IGM1 y MZAC.

### 5.7.3.2. Resultados

Obtenidas las funciones de aproximación para ambos grupos de datos (altura y presión atmosférica), se intentó cuantificar la relación que existe entre ellos.

Con las funciones de aproximación se analizó la correlación entre ambas series para cada estación estudiada y se encontró que en el 78% de los casos la correlación es muy fuerte e inversa, lo cual comienza a demostrar la hipótesis planteada que “a mayor presión atmosférica la variación en la altura es menor” (Figura 48).

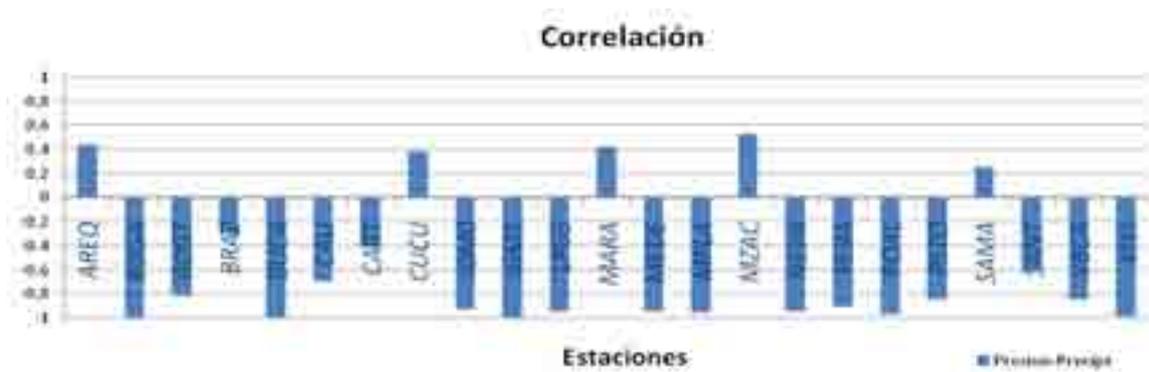


Figura 48: Correlación entre las funciones de aproximación a la variación en la presión atmosférica y a la variación de la altura de la estación.

En el gráfico 49 se grafican ambas variables a la par visualizando más sencillamente la correlación determinada con anterioridad. Para ello las variables debieron ser normalizadas ya que se trata de valores numéricos muy. Es notable la correlación existente entre ambas, lo que demuestra las ya obtenidas.

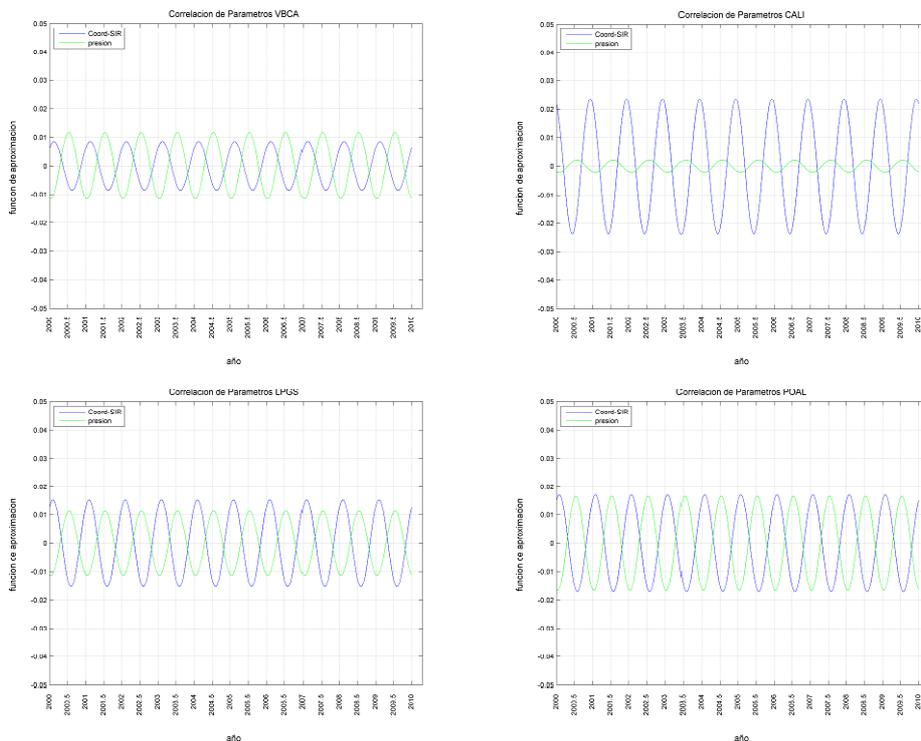


Figura 49: Funciones de aproximación normalizadas (Variación de la presión atmosférica y de la altura).

## 5.8. Conclusiones y trabajos futuros

Los modelos de velocidades conocidos y utilizados, tienen ingerencia en las variaciones lineales del movimiento, es decir, ante un desplazamiento producido por factores tectónicos, la velocidad puede quedar muy bien definida. Si en cambio la estación se encuentra en zonas más estables, desde el punto de vista tectónico, pero afectada por otros factores geodinámicos que producen variaciones diferentes a la expuesta, la velocidad de los modelos puede no representar el movimiento del punto. Con esto se quiere decir que la tendencia del desplazamiento se encuentra bien definida pero no así las variaciones temporales que muchos sitios poseen.

Estas variaciones suelen producir desde pocos milímetros de diferencia entre la máxima y mínima amplitud, hasta varios centímetros, casi 8 cm en la zonas del Amazonas (ver por ejemplo la estación NAUS), tomando el máximo y mínimo de la variación. Generalmente se presentan en la coordenada altura. Al no existir un modelo de velocidades que contemple éste inconveniente se comenten errores en la posición de hasta 5 cm cuando se utilizan coordinas de una época determinada actualizada por su correspondiente velocidad. Esto no sucede cuando se usan coordenadas provenientes de cálculos semanales, ya que ellas son las mejor representación de la posición en el instante de medición

De aquí surge la necesidad de estudiar que fenómeno esta influenciando este cambio, querer estudiarlo y finalmente modelarlo.

Con el análisis realizado se ha observado una alta correlación entre la variación temporal de la coordenada altura y la variación temporal en la presión atmosférica lo cual nos permite afirmar que la carga de presión atmosférica juega un papel importante en la variación de la altura de las estaciones.

Como trabajos a futuro se pretende analizar la influencia de la presión atmosférica en la totalidad de la red SIRGAS-CON, implementando modelos atmosféricos para el cálculo de la presión en aquellas estaciones en las cuales no se cuenta con datos medidos. Al mismo tiempo se propondrá un método de interpolación con los datos existentes y así poder obtener las variables necesarias en aquellos sitios que se requiera.

## *CAPITULO VI*

### *CONCLUSIONES*

---

#### **6.1. El objetivo de la geodesia moderna**

Debido al constante interés de científicos por conocer los fenómenos físicos que afectan a nuestro planeta y la interrelación que existe entre ellos es que la geodesia se ha propuesto investigar la mayor cantidad posible de ellos. Con este fin ha sabido aprovechar los desarrollos tecnológicos y las comunicaciones. Es ejemplo de esto la diversidad de aplicaciones que han sido abordadas por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Esta tecnología es utilizada, por ejemplo, para medir y modelar las deformaciones de la corteza terrestre producidas por la tectónica de placas, para detectar y medir la magnitud y sentido de un movimiento sísmico, para estimar la posición en el tiempo de un determinado punto. A su vez la geodesia ha desarrollado otras técnicas de observación que le permiten medir diferentes variables del sistema Tierra, por ejemplo, la altimetría o la gravimetría satelital, a través de las misiones TOPEX/Poseidon y GRACE, respectivamente. La primera de ellas permite conocer las variaciones del nivel del mar a partir de la medición constante y repetitiva de la distancia que existe entre el satélite y los océanos. La misión GRACE, por su parte, es destinada a medir las variaciones de gravedad, con la repetitividad de estas observaciones puede conocerse la variación de masas de la Tierra. Por otro lado, y al mismo tiempo, el estudio del comportamiento de las señales de cada una de estas técnicas, analizadas en forma individual o combinada, permiten conocer, por ejemplo, el comportamiento de la atmósfera, por sus componentes la troposfera y la ionosfera, ya que ambas producen un retardo en las señales observadas desde la Tierra a los satélites que pueden ser medidos. Cabe destacar que lo expuesto son sólo algunos ejemplos de muchas técnicas de observación que permiten medir, conocer y modelar los fenómenos geodinámicos que afectan a nuestro planeta.

Para conocer y estudiar el comportamiento del sistema Tierra, las mediciones realizadas por las diferentes técnicas deben ser relacionadas. Para ello se necesita contar con un sistema de referencia que se encuentre fijo respecto a los movimientos de la Tierra y que se mantenga estable por décadas. Sin ello no podrían correlacionarse mediciones provenientes de diferentes metodologías y series de datos extensas en el tiempo. La dificultad se encuentra en que la definición del sistema de referencia es teórica y para

llevarlo a la práctica o hacer uso de él es necesario materializarlo sobre la superficie terrestre. Por último ha quedado claro que la corteza terrestre sobre la cual se materializan los puntos se encuentra en constante cambio por lo cual es objetivo de la geodesia no sólo definir el sistema y materializarlo sino también mantenerlo a través del cálculo de sus coordenadas en el tiempo.

## **6.2. Materialización y densificación del sistema de referencia terrestre internacional**

Como se mostró en los capítulos II y III la materialización y densificación del “Sistema de Referencia Terrestre Internacional” (ITRS - International Terrestrial Reference System) se lleva a cabo gracias a la colaboración de numerosas instituciones de diferentes partes del mundo que ponen a disposición los datos de observación de distintas técnicas de medición como son VLBI (Interferometría de Bases Muy Largas), SLR (Telemetría Láser sobre satélites), GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y DORIS (Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélites). Cada técnica de observación aporta una solución de series temporales de datos, los cuales se constriñen con diferentes metodologías de modo de obtener la mejor solución posible. La combinación de todas ellas proporcionan las mejores posiciones de puntos sobre la superficie terrestre que materializan el sistema de referencia terrestre internacional. Entre las realizaciones más recientes se encuentran ITRF2000 (época 2000.4), ITRF2005 (época 2000.0) e ITRF2008 (época 2005.0).

La densificación del ITRF se lleva a cabo casi con exclusividad por medio de la técnica de medición GNSS a partir de la instalación de estaciones de medición continua, ya que es una de las técnicas más sencillas de instalar y de operar, así como también la que menor recurso económico necesita. Éstas se encuentran formadas por un par antena-receptor GNSS que observa en forma permanente los satélites de cada constelación. Las observaciones colectadas deben ser procesadas y combinadas en forma de red para obtener los mejores resultados y así densificar el marco de referencia deseado. Este aporte realizado al ITRF es llevado a cabo por el IGS (International GNSS Service). La última realización del ITRF (ITRF2008) contiene la solución más reciente de IGS (IGS05). Ésta es una combinación de series temporales de observaciones GNSS que cubren el periodo 1997.0 - 2009.5.

De manera similar en que se lleva a cabo la materialización de ITRS, el IGS surge de la combinación de muchas soluciones regionales ofrecidas por diferentes centros de procesamiento, análisis y combinación locales, quienes observan y procesan sus propias

redes. Una de las redes continentales es la red de América Central y América del Sur, a partir de la solución IGS-RNAAC-SIR. Ésta es producto del ajuste realizado por el DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut), quien combina las diferentes soluciones calculadas por los centros locales de procesamiento y análisis operantes en los países miembros del proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). Cada centro de procesamiento estima y modela los parámetros necesarios para eliminar y disminuir la influencia de los fenómenos físicos que afectan a la observación en cada sitio, aplicando los mejores modelos globales conocidos.

### **6.3. Modelos y estrategia de procesamiento para asegurar las precisiones que requiere un marco de referencia**

Como se ha demostrado el procesamiento de las observaciones es una tarea laboriosa que demanda tiempo, conocimiento y cuidado.

Ésta comienza con la recolección de las observaciones en los centros de almacenamiento, las cuales deben estar disponibles entre los diez y quince días pasada la observación. Debido a que ese es el lapso de tiempo en que se encuentran disponibles las efemérides precisas de los satélites, las cuales son calculadas con posterioridad al paso del mismo. Este es otro de los productos que se requiere al iniciar el procesamiento de un periodo de observación, que generalmente comprende una semana GPS (comenzando el domingo y finalizando el sábado siguiente). Conjuntamente a las efemérides de los satélites se obtienen los parámetros de orientación terrestres (EOPs), ambos proporcionados por el IGS (International GNSS Service).

Otros productos y/o variables a tener en cuenta en el procesamiento, y sin los cuales pueden cometerse errores u omitirse correcciones, son por ejemplo las maniobras de satélites, las correcciones a los centros de fase de las antenas utilizadas en la observación, consistente con la información específica del offset de las antenas de los satélites, la infraestructura específica de cada estación de medición continua GNSS como son tipo de receptor y antena, altura de la misma, coordenadas y velocidades a priori, etc.

Considerando todos estos elementos comienza la preparación y chequeo de los datos, para posteriormente realizar un pre-procesamiento de la información, detectando outliers e inconsistencias en los datos. Muchas veces es necesario reducir o cortar datos que no cumplen con los criterios de calidad requeridos para ser tenidos en cuenta como observables en la estimación de parámetros.

Seleccionadas las observaciones que cumplen con los criterios de calidad se conforma la red de vectores y se procede a la estimación de parámetros. Si bien es posible estimar parámetros ionosféricos y troposféricos, las influencias de la carga oceánica, movimientos del polo, los efectos producidos por la atracción gravitatoria de la luna, el sol y los planetas, las ambigüedades de cada observación, etc., en este procesamiento se consideraron modelos de carga oceánica, de atracción gravitatoria, de nutación y precesión mejorados por EOPs calculados por el IGS y sólo se estimaron parámetros troposféricos, ambigüedades y correcciones a las coordenadas a priori.

Las ecuaciones normales diarias generadas luego de la estimación de parámetros son sometidas a un nuevo ajuste por diferentes metodologías, dependiendo también del objetivo, para obtener una única solución semanal con la cual se pretende analizar la calidad de cada red diaria en relación a los demás días intervinientes y a la solución general combinada. En esta etapa es fundamental contar con la sobreocupación de estaciones, es decir contar con más de un día de observación por cada estación interviniente para tener un contralor.

#### **6.4. El ajuste de redes, una herramienta utilizada para estimar precisión e introducir el marco de referencia**

En el capítulo IV se ha desarrollado una experiencia que ejemplifica una de las formas en que puede densificarse el marco de referencia a partir de observaciones GNSS. El análisis de los resultados a partir de diferentes métodos de ajuste demostraron que para una red regional que se extiende por casi medio continente, más de 4 países, la estrategia que optimiza la introducción del datum es "Minimum constraint solution", aplicando la metodología Not-Net-Rotation, Not-Net-Translation, esta permite rototrasladar la red de densificación deformándola lo menor posible para lograr que materialice el marco de referencia al cual refieren las coordenadas fiduciales.

De igual manera quedó demostrado que es recomendable adoptar como coordenadas fiduciales aquellas provenientes de la solución semanal del IGS, por ser estas las que mejor acompañan la variación de las coordenadas en el tiempo. Las conclusiones respecto a la metodología de cálculo y ajuste se encuentran en un todo de acuerdo con las adoptadas para la red continental SIRGAS-CON ([Mackern, 2009](#)).

Es importante destacar que los programas utilizados para el procesamiento de datos científicos no cuentan con herramientas de análisis de este tipo, debiendo desarrollar cada usuario, según las características de la red de densificación, sus propias

metodologías y herramientas para llevar a cabo un análisis de deformación como el presentado en este caso.

### **6.5. Estimación de Velocidades desde las observaciones geodésicas. Su importancia en el mantenimiento de un marco de referencia**

El conocimiento del desplazamiento de un punto en el tiempo es un dato importante de conocer y que lleva a realizar interpretaciones geodésicas y geológicas en el campo de la geodinámica y del cambio global. Estos valores son muy pequeños, se trata de movimientos de algunos milímetros por año hasta pocos centímetros, y para poder determinarlos en forma eficiente, es necesario contar con la tecnología que permita medirlos, realizando un laborioso procedimiento en el tratamiento de la información y el modelado de los factores que afectan a la medición. Es por ello que para determinar variaciones del orden regional, nacional, continental y hasta global se deben sumar esfuerzos y recursos humanos y económicos que nos permitan llegar a obtener resultados que representen fehacientemente la realidad y sean útiles para la interpretación de las variaciones del cambio global.

Para poder estimar los pequeños valores de velocidad que se requieren es necesario la medición de un sitio en reiteradas oportunidades, la remediación constante de un mismo valor permite obtener mejores resultados, ya que estadísticamente pueden detectarse valores discordantes, analizarse saltos o discontinuidades producidas por factores exógenos a la medición. Además, es necesario contar con todas las herramientas que permitan modelar los fenómenos físicos que afectan a la medición y referir los valores de coordenadas a marcos de referencia bien determinados y con el mismo grado de precisión requerida o mejor aún. Esto involucra también las efemérides de satélites, los EOPs y por sobre todo sus precisiones, ya que las herramientas utilizadas provienen de la geodesia satelital.

La estimación de velocidades tal como se realiza hoy sólo contempla la obtención de velocidades lineales. Es decir, a partir del seguimiento de la coordenada en el tiempo puede obtenerse una tendencia de desplazamiento representada por un vector del cual se conoce su magnitud, dirección y sentido, y cuyo valor simboliza el movimiento del punto a lo largo de 1 año. Así por ejemplo tenemos que la estación MZAC (Argentina) tiene una velocidad anual de 0,015 m/año en sentido noreste o que la velocidad de BRAZ (Brasil) es de 0,013 m/año en sentido noroeste. Lo que no se puede conocer a partir de estos valores es el comportamiento durante ese periodo, es decir, si una estación está

afectada por variaciones temporales que se repiten periódicamente, con un periodo de 6 meses por ejemplo. Las velocidades lineales dan un valor medio del desplazamiento en el tiempo, no informan sobre su comportamiento no lineal.

Gracias a la medición continua de un mismo punto pueden generarse series temporales de varios años de observación. En muchos casos se observan variaciones temporales que se repiten en las estaciones de una misma región. Como se explicó en el párrafo anterior y en el capítulo V, estas variaciones no son representadas en las velocidades lineales, especialmente en la variable altura. Es necesario conocer las variaciones temporales y estudiar el porqué son producidas, así podrán modelarse y su efecto podrá ser tenido en cuenta en la determinación de otras variables del sistema, como por ejemplo la determinación de las órbitas precisas que son tan utilizadas en muchas otras técnicas de medición.

Se estima que los factores que mayor influencia tienen sobre estas variaciones son la carga de aguas fluviales y subterráneas presentes en la corteza terrestre y que varían temporalmente, y la carga de presión atmosférica presente en toda la superficie y que también presenta una variación temporal.

La primera de ellas es difícil de medir, aunque sí existen modelos de carga de aguas fluviales y subterráneas ([Rodell et al., 2004](#)). La segunda de las variables es medible e inclusive hay largas series de tiempo que cubren gran parte del globo, además de existir modelos que permiten obtener los valores necesarios ([Seitz, 2009](#)).

Se dispuso para este trabajo de datos de presión atmosférica diarios de estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de las estaciones de medición continua de la red SIRGAS-CON, estos datos sumados a las series temporales de coordenadas permitieron estudiar la correlación de los mismos llegando a datos muy satisfactorios.

Se determinó que del total de estaciones analizadas más del 75 % presentan correlaciones altas (entre -0,8 y -1), lo que indica que a mayor presión atmosférica la coordenada altura disminuye. Para llegar a esta conclusión debieron desarrollarse herramientas de análisis y obtención de la información que permitieron modelar las series temporales de ambas variables, calcular funciones de aproximación, relacionar la información de las estaciones meteorológicas con la de las estaciones GNSS y finalmente correlacionar los datos.

## 6.6 Trabajos futuros

Se intentará modelar la variación de las coordenadas con una función matemática empírica dependiente de la presión atmosférica y de las coordenadas geodésicas, y se utilizará esa función para reducir la variación de las coordenadas en la materialización del marco de referencia SIRGAS. Se espera lograr con ello una materialización más consistente y estable a lo largo del tiempo y, también, una mejora del acuerdo interno de las soluciones semanales de la red SIRGAS-CON.

Se propondrá reemplazar el modelo empírico por otro de naturaleza geofísica, que permita una mejor reducción del fenómeno de carga atmosférica y, al mismo tiempo, una comprensión más profunda del proceso. Los modelos utilizados para convertir la carga superficial en deformación geométrica de la Tierra sólida se basan en una teoría sencilla (Heiskanen and Moritz, 1967; Farrell, 1972; Guo ,2004), que utiliza a los números de Love para caracterizar la respuesta de la Tierra sólida frente a la carga y una función de Green para ponderar el efecto de la carga ejercida en la región aledaña al sitio donde se calcula la deformación. Se investigará la posibilidad de utilizar una función de Green aproximada, parametrizada por coeficientes dependientes de la región donde se calcula la deformación, lo que permitiría tomar en cuenta los cambios de densidad de la materia que compone la corteza terrestre. Matemáticamente expresado, se propondrá una función del tipo

$$F(\psi_{PQ}) = 10^{-17} \cdot a \cdot \exp(-b \cdot \psi_{PQ}) \quad (1)$$

En la que  $\psi_{PQ}$  es la distancia esférica entre el punto P en el que se calcula la deformación y el punto Q donde se ejerce la carga; mientras que a y b son los parámetros que representan la densidad de la materia que compone la corteza terrestre en la región de estudio. El parámetro a, cuya unidad es m/kg, cuantifica el desplazamiento vertical con que respondería una celda vertical de la corteza terrestre, de un metro cuadrado de superficie, localizada en el punto P, bajo una carga de 1 kg. El parámetro b, adimensional, cuantifica la rapidez con que decae la influencia que ejercen las celdas aledañas a aquella en que se calcula la deformación a medida que el punto Q se aleja del P, y está asociado con la densidad promedio de las masas corticales en la región que se estudia.

Mediante las series de desplazamientos verticales ya generadas a partir de las coordenadas SIRGAS se intentará estimar los parámetros a y b de la ecuación (1), usando por ejemplo el método de Mínimos Cuadrados. Discretizando apropiadamente el

problema (por ejemplo, con celdas de  $2^0 \times 2^0$  de longitud y latitud), la ecuación de observación toma la forma:

$$d(P_i) = 10^{-17} \cdot \sum_{k / \psi_{P_i, Q_k} < R} q_{Q_k} \cdot A_{Q_k} \cdot \left[ a_{i,k} \cdot \exp(-b_{i,k} \cdot \psi_{P_i, Q_k}) \right] \quad (2)$$

en la que  $d(P_i)$  es el desplazamiento vertical observado por SIRGAS en el punto  $P_i$ ;  $q_{Q_k}$  es la presión ejercida sobre el punto  $Q_k$ , cuyo valor se calculará recurriendo a modelos globales de presión atmosférica calibrados con datos medidos en superficie; y  $A_{Q_k}$  es la superficie de la celda que contiene al punto  $Q_k$ . La sumatoria en la ecuación (2) debe extenderse a todas las celdas ubicadas dentro de un determinado radio,  $R$ , en torno al punto  $P_i$ , más allá del cual podría aceptarse que la carga no ejerce ninguna influencia sobre el punto  $P_i$ .

A partir de los resultados ya encontrados y de los que surjan de los trabajos mencionados a futuro, se realizará un aporte en primer lugar al cálculo y mantenimiento del marco de referencia latinoamericano SIRGAS y en segundo lugar a la Geodesia Internacional aportando el conocimiento de un fenómeno detectado pero poco estudiado hasta el momento como lo es "la variación en las coordenadas por influencia de la carga atmosférica del sitio y sus alrededores".

## Bibliografía Consultada

- 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, 112, B09401, 2007. doi:10.1029/2007JB004949.
- Altamimi, Z., (2010) *ITRF2008 and the IGS Contribution*. IGS Workshop 2010 – Newcastle, UK.
- Brunini C., Drewes, H., Sánchez, L., Mackern, V., Mateo, L. (2010) *Seasonal effects in the weekly realization of the SIRGAS reference frame*. European Geosciences Union, General Assembly 2010 (EGU 2010). Viena, Austria. 02 - 07 de mayo de 2010.
- Brunini C., (2009) *SIRGAS: Base para las geociencias, la geoinformación y la navegación - AAGG - 24 Reunión Científica*, Mendoza, Argentina. 14 al 17 de abril de 2009.
- Brunini C., Moirano, J.F., Mackern M.V., (2000) *Comparación entre los marcos de referencia POSGAR'94 y POSGAR'98*. 20º Reunión Científica de Geofísica y Geodesia, Mendoza, Argentina, 25 – 29 de setiembre de 2000.
- Cimbaro, S. (2008) *POSGAR 07. Nuevo marco de referencia geodésico para la Argentina*. XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. Mendoza, Argentina. 14 - 17 de Abril de 2009.
- Costa, S.M.A, A.L. da Silva, J.A. Vaz: Report of IBGE (2009) Combination Centre. Period of SIRGAS-CON solutions: from week 1495 to 1531. Presented at the SIRGAS 2009 General Meeting. Buenos Aires, Argentina, 2009. September. Disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org).
- De Mets, C., Gordon, R., Argus, D. F., and Stein, S. (1994): *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*, Geophys. Res. Lett., 21, 2191–2194.
- Dorandeu, J., Ablain, M., Faugère, Y., Soussi, B., Stum, J., Vincent, P., Picot, N. SSALTO/CALVAL first Jason-1 (2002) *Performance assessment Jason-1 / TOPEX/Poseidon cross-calibration*. JASON-1 Science Working Team Meeting. Biarritz 2002.
- Dow, J. M., Neilan, R., Gendt, G.: *The International GPS Service (IGS), Celebrating the 10<sup>th</sup> Anniversary and Looking to the Next Decade*, Adv. Space Res., 36(3), 320-326, 2005.
- Drewes, H. and O. Heidbach (2009). *The 2009 horizontal velocity model for South America and the Caribbean*. Submitted to C. Pacino et al. (Eds.). IAG Scientific Assembly "Geodesy for Planet Earth". Buenos Aires, August 31 to September 4, 2009. IAG Symposia.
- Drewes, Hermann (2009). *Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum – basic considerations*. Sideris, M.G. (Ed.): Observing our Changing Earth, IAG Symposia, Vol. 133, 3-9, Springer 2009.
- Drewes H., (2008). *Future Objectives of SIRGAS from Scientific Point of View*, SIRGAS General Assembly - Montevideo, Uruguay. 28-29 May 2008

- Drewes H. (2008). *El Sistema de Observación Geodésica Global (GGOS) – componente de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) para el futuro*. Celebración de los cien años de Geodesia en el Uruguay Montevideo, 30 de mayo de 2008.
- Drewes, Hermann (2005). *Deformation of the South American Crust Estimated from Finite Element and Collocation Methods*. Springer Berlin Heidelberg, Volume 128, pag. 544-549. 2005
- Ferland, R. (2006). [IGSMail-5447]: *Proposed IGS05 Realization*. <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00170.html>.
- Fortes, P., Lauría, E., Brunini, C., Amaya, W., Sánchez, L, Drewes, H., (2005). *SIRGAS - a geodetic enterprise. Coordinates*. <http://www.mycoordinates.org/sirgas-may-06.php>
- GORDON, R.G., (1995). *Plate motions, crustal and lithospheric mobility, and paleomagnetism: prospective viewpoint*. Journal of Geophysical Research, v. 100, p. 24367-24392.
- Herring, T. A. (1992). *Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data*; en: De Munk, J., Spoelstra, T. A. (eds.), Symposium on refraction of trans-atmospheric signals in Geodesy, 157-164, Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1992.
- Hernández, Juan Gabriel León, Domínguez Calle, Efraín Antonio y Duque Nivia, Guillermo. (2008): *Avances más recientes sobre la aplicación de la altimetría radar por satélite en hidrología*. Caso de la cuenca amazónica. Revista Ingeniería E Investigación Vol. 28 No. 3, Diciembre De 2008 (126-131)
- Knudsen, Ole Andersen, Shfaqat Abbas Khan, and Jacob Hoyer (2001): *Ocean tide effects on GRACE gravimetry*. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 13, Sideris (ed), Gravity, Geoid, and Geodynamics 2000, © Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2001.
- Langley, R. B. (1996), *Propagation of the GPS Signals, in Lecture Notes International School "GPS for Geodesy"*, Springer-Verlag, Delft, The Netherlands.
- McCarthy D.D. (ed.), (2003): *IERS Conventions 2000*, IERS Technical Note No. 31, Frankfurt am Main, in print. Disponible em: Website: <http://maia.usno.navy.mil/conv2000.html>
- McCarthy, D.D., and G. Petit (2004), *IERS Conventions (2003)*, IERS Technical Note 32, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Mackern, María Virginia (2003). *Materialización de un Sistema de Referencia Geocéntrico de alta precisión mediante observaciones GPS*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Catamarca (Mayo 2003).
- Mackern, M. V.; Mateo, M. L.; Robin, A. M. and Calori, A. V. (2009a): *A Terrestrial Reference Frame (TRF), coordinates and velocities for South American stations: contributions to Central Andes geodynamics*. Adv. Geosci., 22, 181–184, 2009. [www.adv-geosci.net/22/181/2009/](http://www.adv-geosci.net/22/181/2009/)

- Mackern, M.V. (2009b). *Acerca de la introducción del datum geodésico en las soluciones semanales fijas de la red SIRGAS-CON*. Reporte al Comité ejecutivo de SIRGAS. Julio, 2009. Documento disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)
- Mackern, M.V. , Brunini, C., Sánchez, L., Drewes, H. (2010). *La cooperación SIRGAS: su aporte a las geociencias y a la geoinformación en América Latina y El Caribe*. En: *II Convención de las ingenierías de las geociencias y química - V Congreso de agrimensura*. La Habana, Cuba. Marzo de 2010.
- Mateo, María Laura; Mackern, María Virginia; Robin, Ana María; Calori, Andrea (2008). Un Marco de Referencia Nacional basado en la red de estaciones permanentes GNSS. II Encuentro Científico del Internacional Center por Herat Sciences - E-ICES-2". noviembre de 2008, Comisión Nacional de Emergía Atómica. Malargüe. Argentina.
- Minster, B. and Jordan, T.H (1978)., *Present day plate motions*, Journ. Geophys. Res. (83) 5331, 1978.
- Natali, P., Müller, M., Fernández, L., Brunini, C. (2009): *CPLat: the Pilot Processing Center for SIRGAS in Argentina*. In: Drewes, H. (ed.): Geodetic Reference Frames, IAG Symposia, Vol. 134: 179-184, Springer, 2009.
- Niell, A. E (1996). *Global mapping function for the atmosphere delay at radio wavelengths*, Journal of Geophysical Research, 101 (B2), 3227-3246, 1996.
- Niell, A. E. (2003) *The IMF zapping function*, GPSMet Workshops, Tsukuba, Japón, 2003. [http://www.web.haystack.edu/geo/pubs/the\\_imf\\_mapping\\_functions\\_rev2.pdf](http://www.web.haystack.edu/geo/pubs/the_imf_mapping_functions_rev2.pdf)
- Niell, A. E. (2000). *Improved atmospheric mapping function for VLBI and GPS*, *Earth, Planet and Space*, 52, 699-672, 2000.
- Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll, (2004). *The Global Land Data Assimilation System*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (3), 381–394, 2004.
- Rothacher M., (2002): *Future IERS products, Implementation of the IAU 2000 resolutions*, in: Capitaine et al. (eds.), IERS Technical Note No. 29, 77-84.
- Sánchez, L., Seemüller, W., Drewes, H. (2010). *SIRGAS and the earthquake of February 27th, 2010 in Chile*. Analysis Report. SIRGAS Analysis Centre at DGFI.
- Sánchez, L. (2009a): *Strategy to establish a global vertical reference system*. In: Drewes, H. (ed.), Geodetic Reference Frames. IAG Symposia, Vol. 134: 273-278, Springer, 2009a.
- Sánchez, L., Bosch, W., (2009b). *The Role of the TIGA Project in the Unification of Classical Height Systems*. Springer; IAG Symposia; Vol. 134:285-290.
- Sánchez, L., Brunini, C. (2009c): *Achievements and Challenges of SIRGAS*. In: Drewes, H. (ed.): Geodetic Reference Frames, IAG Symposia, Vol. 134: 161-166, Springer, 2009c.

- Sánchez, L., W. Seemüller, M. Seitz (2009d). *Report of the SIRGAS Combination Centre at DGFI. Presented at the SIRGAS 2009 General Meeting*. Buenos Aires, Argentina. September. Disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)
- Seemüller, W., K. Kaniuth, H. Drewes (2002). *Velocity estimates of IGS RNAAC SIRGAS stations*. In: Drewes, H., A. Dodson, L.P. Fortes, L. Sánchez, P. Sandoval (eds): *Vertical Reference Systems, IAG Symposia*, Springer Verlag, Vol. 124: 7-10.
- Seemueller, W.; K. Kaniuth; H. Drewes (2004). *Station positions and velocities of the IGS regional network for SIRGAS*, DGFI Report No. 76.
- Seemüller, W., Sánchez, L. (2009): *SIRGAS Processing Centre at DGFI: report for the SIRGAS 2009 General Meeting*. Presented at the SIRGAS 2009 General Meeting, Buenos Aires, Argentina, 2009. Disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)
- Seemüller, W., Seitz, M., Sánchez, L., Drewes, H. (2010): *The position and velocity solution SIR09P01 of the IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR)*. DGFI Report No. 85, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München, 2009. Disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)
- Seemüller, W., Sánchez, L., Seitz, M.; Drewes, H.: *The positions and velocity solutions SIR10P01 of the IGS regional network associate analysis centre for SIRGAS (IGS RNAAC SIR)*. DGFI Report No. 86, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München, 2009. Disponible en [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)
- Seitz, F.; Krügel, M. (2009): *Inverse model approach for vertical load deformations in consideration of crustal inhomogeneities*; in: Drewes, H. (eds.) *Geodetic Reference Frames, IAG Symposia*, Vol. 134, pp 23-29, Springer, 2009
- Tapley, B. D.; Watkins, M. M.; Ries, J. C. ; Davis, G. W.; Eanes, R. J.; Poole, S. R.; Rim, H. J.; Schutz, B. E.; Shum, C. K.; Lerch, F. J.; Marshall, J. A.; Klosko, S. M.; Pavlis, N. K.; Williamson, R. G. (1996). *The Joint Gravity Model 3*. *Journal of Geophysical Research*. Accepted for publication, 1996

**ANEXO I:**  
**Datos e Infraestructura de estaciones GNSS**

16-Dec-10 20:30

---

SIRGAS-COM NETWORK

TYPE (01): RENAMING OF STATIONS

STATION NAME	FLG	YYYY	MM	DD	HH	MM	SS	FROM	TO	OLD STATION NAME	REMARK			
*****	----	----	----	----	----	----	----	----	----	*****	*****			
ABCC	001	2008	11	28	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ABCC*
ABPD	001	2008	11	25	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ABPD*
ABPW	001	2008	12	16	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ABPW*
AGUA	001	2010	03	15	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AGUA*
ALAR	001	2007	08	16	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ALAR*
ALUM	001	2008	10	16	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ALUM*
AMHU	001	2007	10	15	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AMHU*
ANDS	001	2007	05	01	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ANDS*
AMTC	001	2002	01	01	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AMTC*
AGML	001	1997	11	20	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AGML*
APTO	001	2007	11	01	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	APTO*
ARCA	001	2008	08	04	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ARCA*
ARE2	001	2006	05	21	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ARE2*
ARE0	001	1994	02	01	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ARE0*
ASCL	001	1996	04	20	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	ASCL*
AUTP	001	1999	01	01	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AUTP*
AZUE	001	2007	10	10	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AZUE*
AZUL	001	2007	08	29	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	AZUL*
BABR	001	2008	08	02	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BABR*
BATR	001	2008	07	28	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BATR*
BANS	001	2006	01	09	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BANS*
BARB	001	1997	11	29	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BARB*
BATF	001	2008	05	26	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BATF*
BAVC	001	2008	05	29	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BAVC*
BCAR	001	2009	07	14	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BCAR*
BDOS	001	2004	06	07	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BDOS*
BELE	001	2003	11	19	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BELE*
BEER	001	2007	05	25	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BEER*
BNGA	001	2010	03	11	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BNGA*
BOAV	001	2007	05	31	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BOAV*
BOGA	001	2000	02	01	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BOGA*
BOGT	001	1994	11	04	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BOGT*
BOMJ	001	1999	08	21	00	00	00	2099	12	31	00	00	00	BOMJ*

TYPE 0021 STATION INFORMATION

STATION NAME	FILE	FROM	TO	MM	SS	MM	SS	MM	SS	RECEIVER TYPE	ANTENNA TYPE	REC #	ANT #	NORTH	EAST	UP	DESCRIPTION
ARCC 41839M001	001	2008	11	28	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	LEICA GRX1200
ARPD 41941M001	001	2008	11	25	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	LEICA GRX1200
ARPN 41940M001	001	2008	11	16	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	LEICA GRX1200
AGLA 419015001	001	2010	03	11	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TPS CB-1080
ALBA 41653M001	001	2007	08	16	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ALIM 41535M001	001	2008	10	18	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
AHUI 41546M001	001	2007	10	15	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ANDS 419085001	001	2007	05	01	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	LEICA GRX1200
ANTC 417155001	001	2008	02	07	00	5A	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 417155001	001	2004	04	29	00	00	00	2006	02	06	23	58	00	00	00	00	ASRTECH 2-XIII
ARCC 417155001	001	2002	01	01	00	00	00	2004	04	28	00	00	00	00	00	00	ASRTECH 2-XIII
ARCC 417155001	001	2000	08	15	34	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 4198145001	001	2000	07	25	18	43	00	2000	08	16	15	13	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 409145001	001	2000	01	13	18	40	00	2000	07	15	18	43	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 409145001	001	1999	08	10	15	44	00	2000	01	11	38	40	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 409145001	001	1994	03	24	00	00	00	1999	08	10	15	35	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 409145001	001	1998	05	03	19	20	00	1998	03	21	15	14	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 409145001	001	1998	04	16	18	41	00	1998	05	04	24	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 409145001	001	1997	11	20	00	00	00	1998	04	15	11	12	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 419315001	001	2007	11	01	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	ASRTECH U2-12
ARCC 419093001	001	2008	08	04	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TPS CB-1080
ARCC 42202M005	001	2006	05	21	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 42202M005	001	2007	12	04	18	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	ASRTECH U2-12
ARCC 42202M005	001	2006	05	21	00	00	00	2007	11	04	20	00	00	00	00	00	ASRTECH U2-12
ARCC 42202M005	001	2002	08	13	00	45	00	2006	02	16	27	00	00	00	00	00	ASRTECH U2-12
ARCC 42202M005	001	2002	03	05	13	00	00	2002	08	13	20	45	00	00	00	00	AGA SXR-8000
ARCC 42202M005	001	2000	01	28	00	00	00	2002	03	05	13	00	00	00	00	00	AGA SXR-8000
ARCC 42202M005	001	1999	07	16	00	00	00	2000	01	28	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 42202M005	001	1995	05	12	00	00	00	1999	07	16	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 42202M005	001	1995	03	05	00	00	00	1995	05	12	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 42202M005	001	1994	02	01	00	00	00	1995	03	05	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 30602M001	001	2007	08	19	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	AGA BENCHMARK
ARCC 30602M001	001	1994	08	27	00	00	00	2007	08	19	00	00	00	00	00	00	AGA SXR-8000
ARCC 415155001	001	1996	04	10	00	00	00	1999	08	11	00	00	00	00	00	00	ROGUE SXR-8000
ARCC 415155001	001	2006	03	30	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 415155001	001	1999	03	25	00	00	00	2006	03	30	15	00	00	00	00	00	ASRTECH 2-XIII
ARCC 415155001	001	1999	04	01	00	00	00	1999	03	24	00	00	00	00	00	00	ASRTECH 2-XIII
ARCC 41301M001	001	2007	10	10	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TPS NETG3
ARCC 41329M001	001	2007	08	29	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 41664M001	001	2008	08	02	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 41664M001	001	2008	05	28	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 41535M001	001	2008	05	29	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 41535M001	001	2009	07	14	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS
ARCC 43401M001	001	2010	11	08	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	LEICA GRX1200
ARCC 43401M001	001	2004	08	07	00	00	00	2010	10	06	00	00	00	00	00	00	ASRTECH U2-12
ARCC 41622M001	001	2008	03	06	00	00	00	2009	12	31	00	00	00	00	00	00	TRIMBLE NETRS

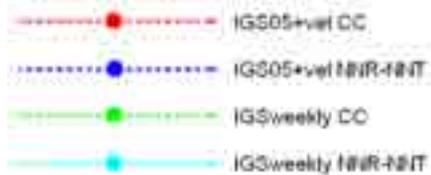
## ANEXO II

### *Análisis de deformación al introducir Datum*

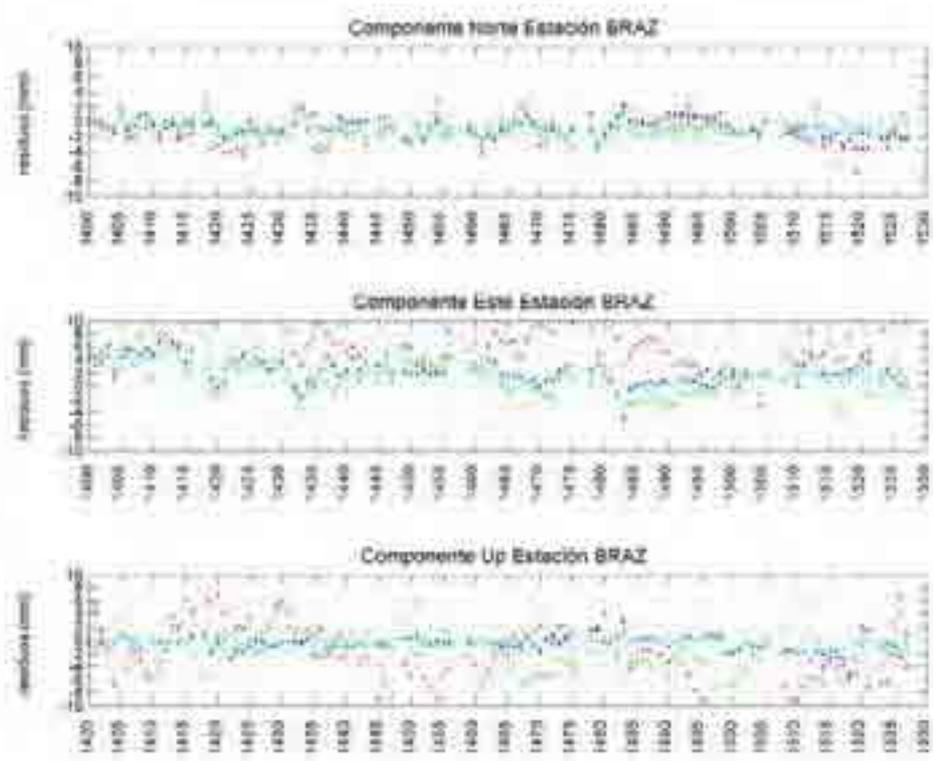
---

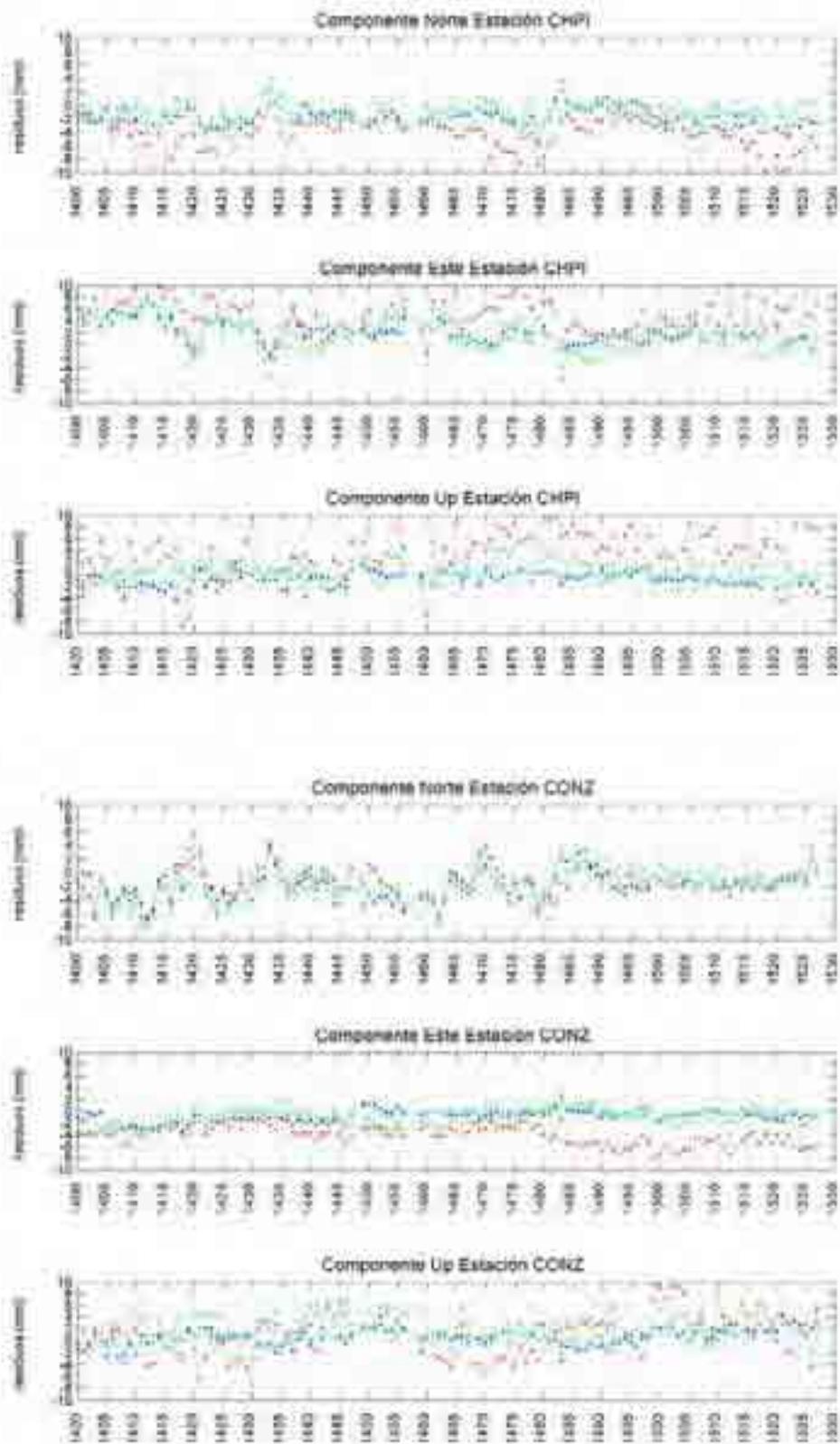
A continuación se grafican los residuos obtenidos luego de realizar la transformación de helmert.

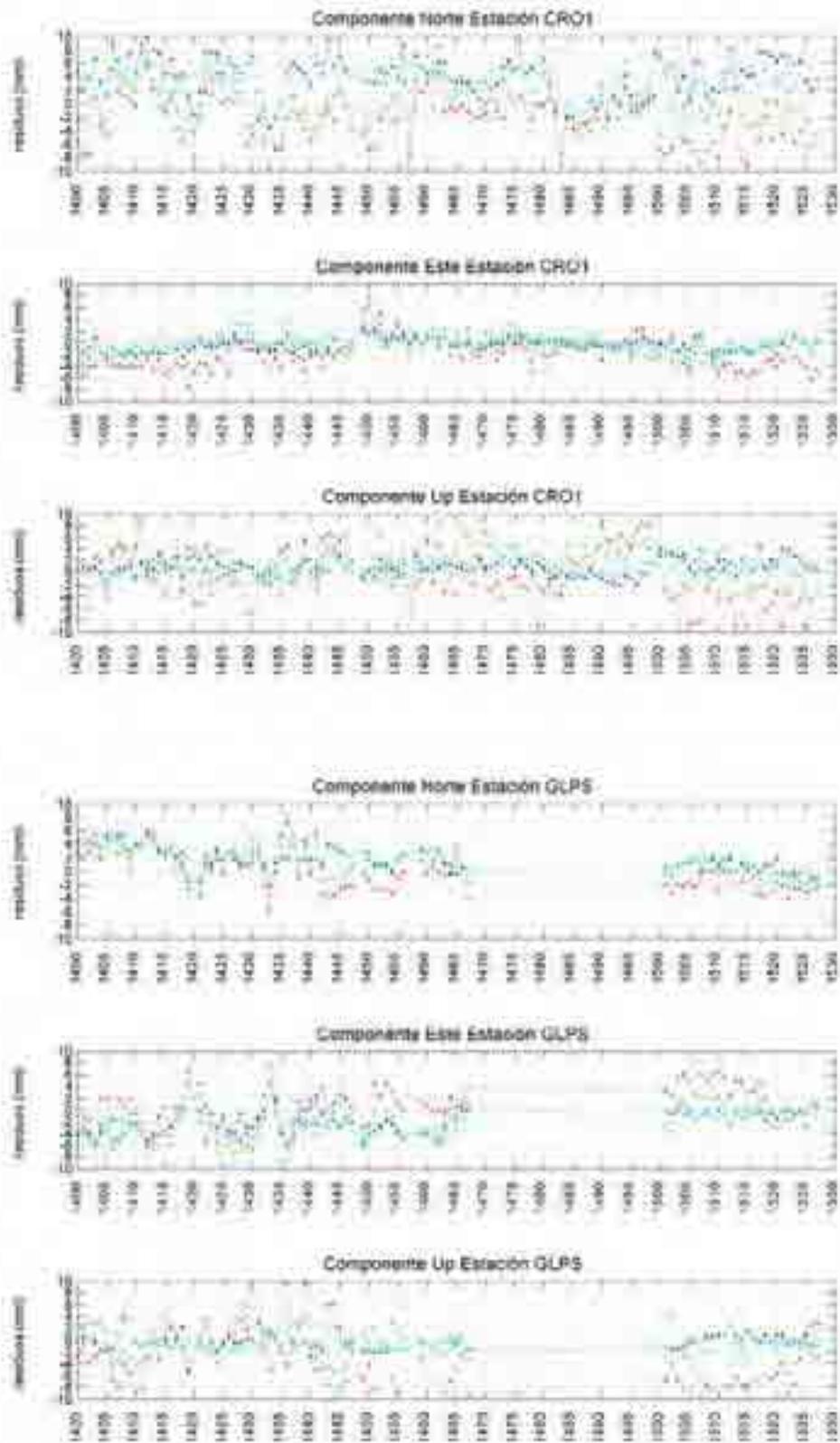
#### Referencias estrategias de ajuste

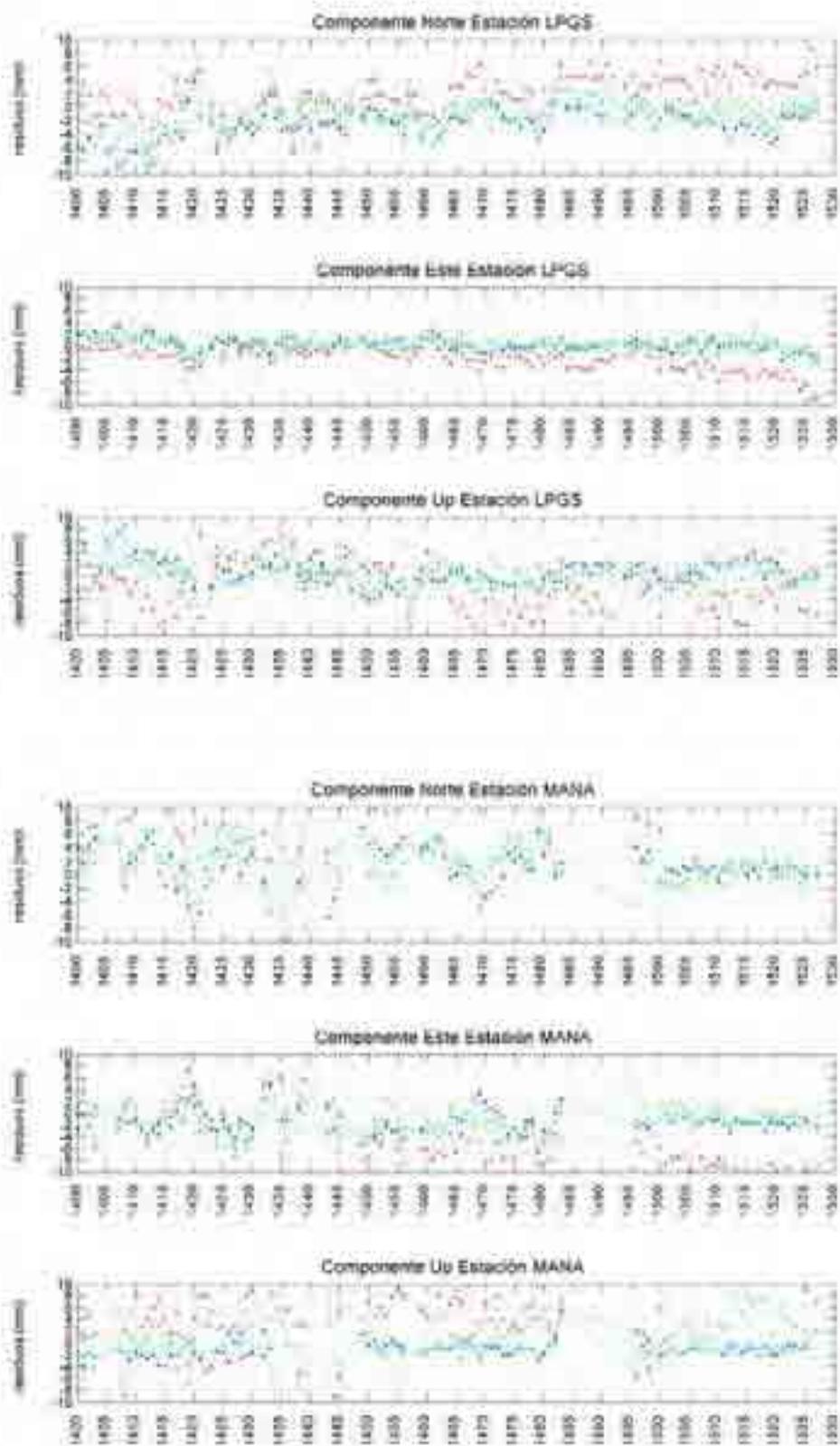


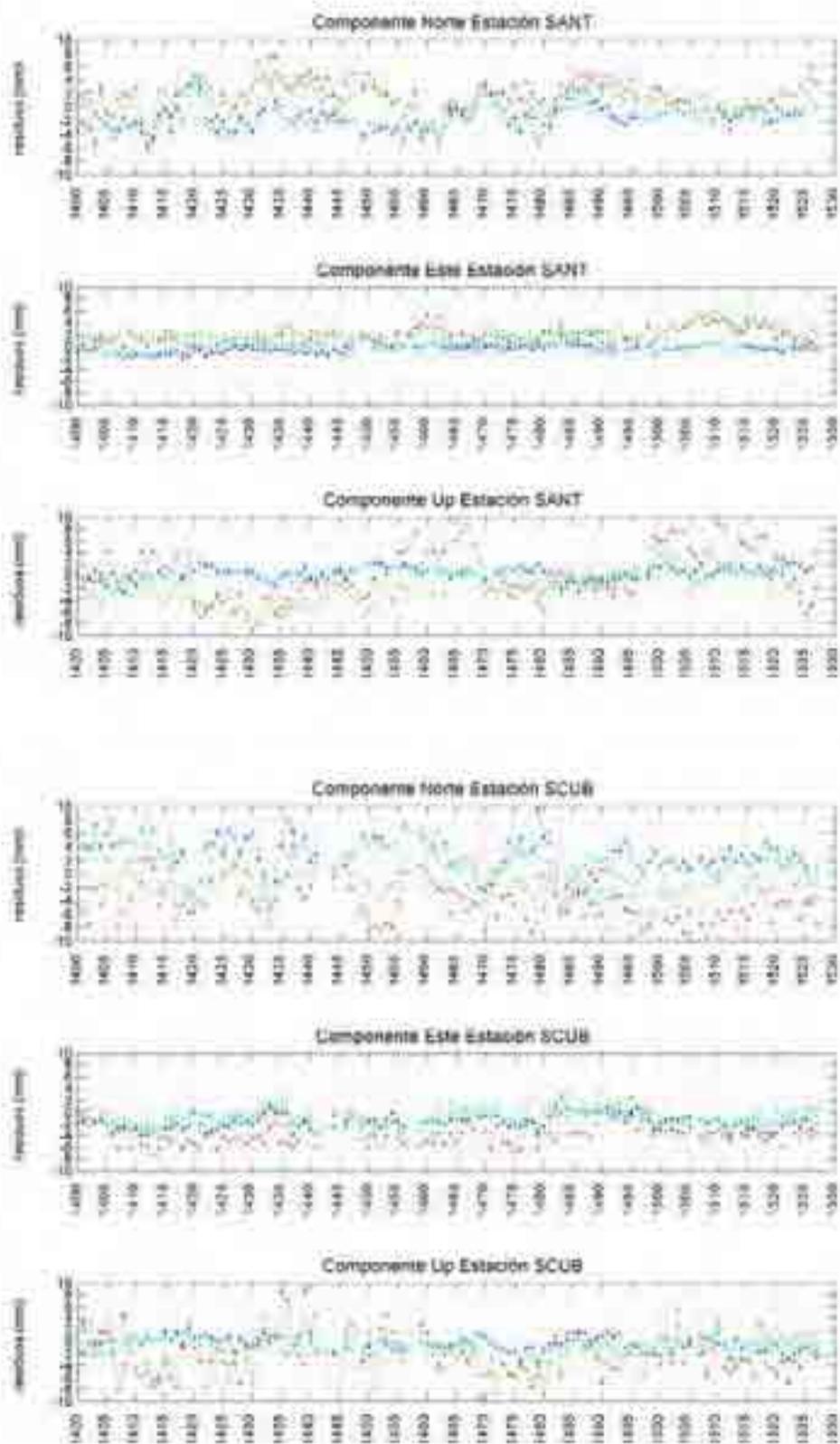
#### Estaciones de fiduciales o de vinculación

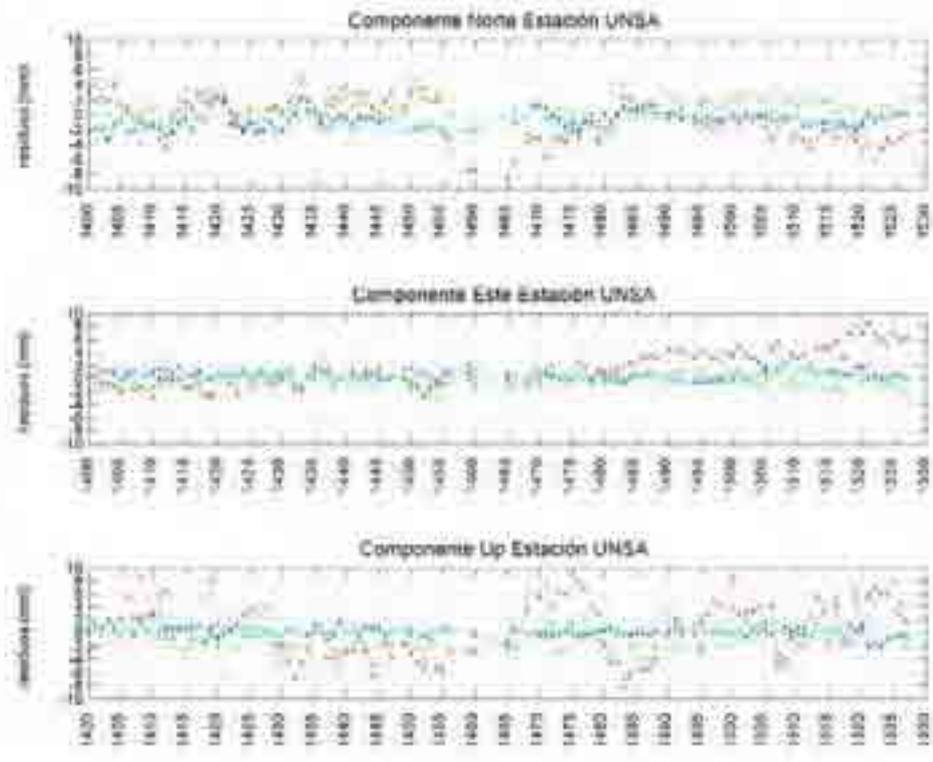




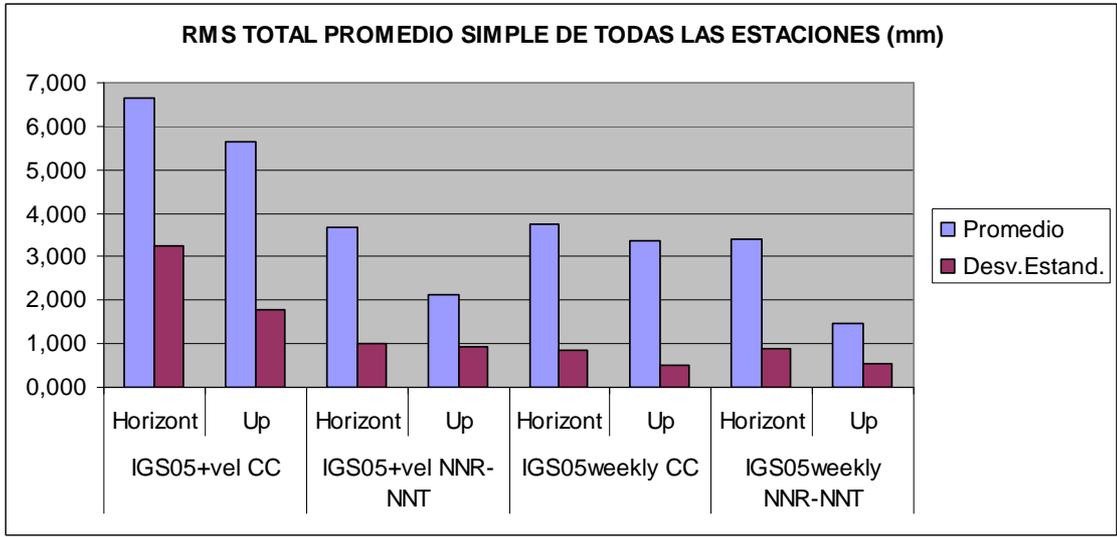








Promedio de los residuos luego de aplicar la transformación de Helmert para las estaciones fiduciales



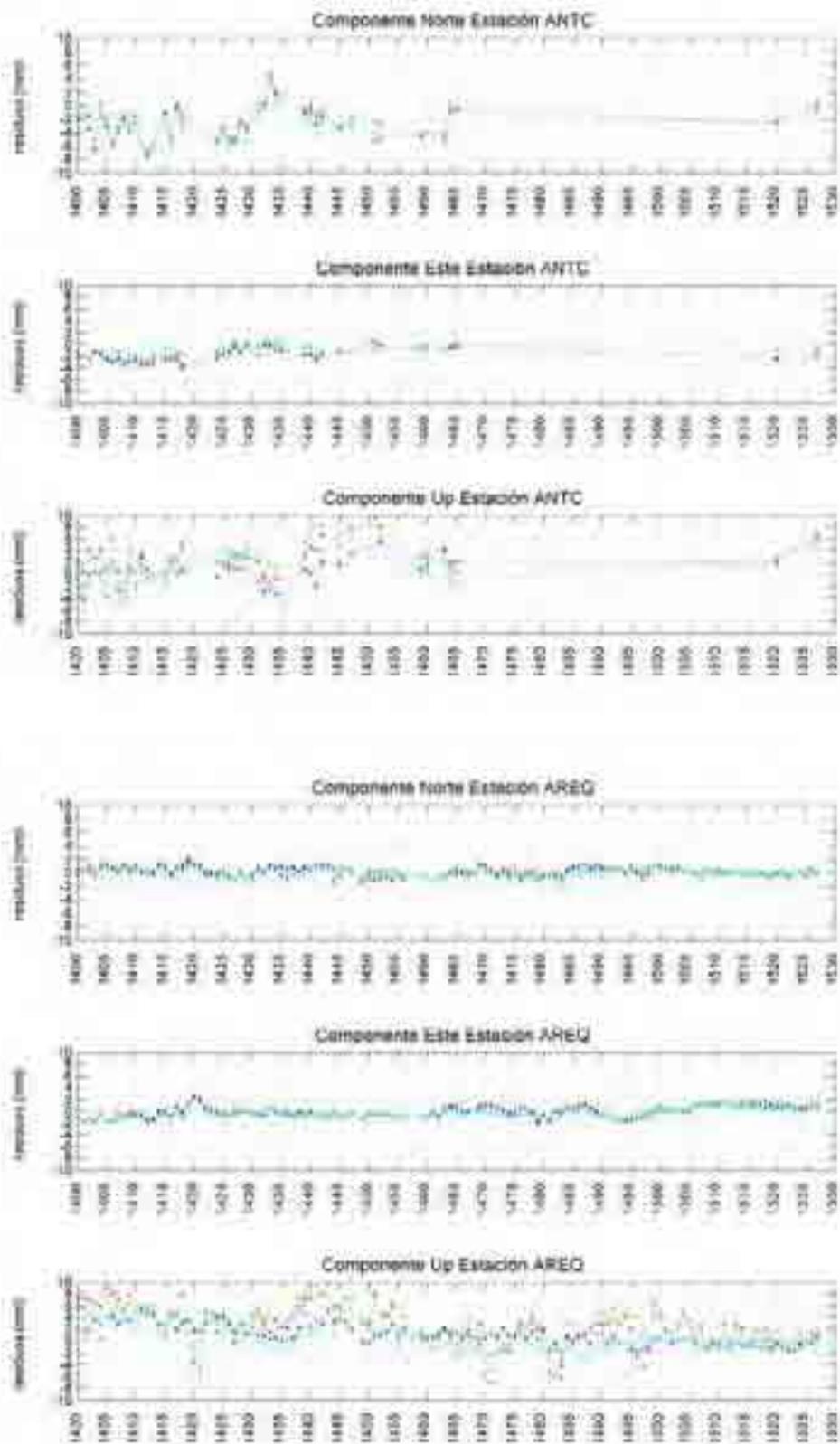
RMS TOTAL (rms N + rmsE + rmsUP)								
Estación	IGS05+vel CC (mm)		IGS05+vel NNR-NNT		IGS05weekly CC		IGS05weekly NNR-NNT	
	Horizont	Up	Horizont	Up	Horizont	Up	Horizont	Up
BRAZ	7,916	5,686	3,487	1,930	3,569	3,438	2,878	0,999
CHPI	7,470	5,531	3,862	1,757	3,704	2,711	3,402	1,054
CONZ	5,179	3,692	3,133	1,685	3,461	3,543	3,142	1,379
CRO1	5,795	4,980	5,314	2,429	4,224	3,894	4,620	1,886
GLPS	4,388	7,013	4,012	2,491	4,589	3,664	4,163	1,375
ISPA	7,694	7,064	3,643	1,848	5,105	3,904	2,696	1,344
LPGS	4,561	4,639	3,670	2,560	2,708	2,281	3,515	2,366
MANA	15,239	9,955	4,515	4,485	4,680	3,636	4,391	2,365
SANT	3,660	4,787	2,545	1,229	3,298	3,631	2,634	1,046
SCUB	6,892	4,318	4,495	1,893	3,503	3,450	4,341	1,387
UNSA	4,169	4,302	1,621	0,891	2,315	3,018	1,712	0,818
Promedio	6,633	5,633	3,663	2,109	3,741	3,379	3,408	1,456
Desviación Estándar	3,235	1,790	1,002	0,938	0,846	0,507	0,907	0,530

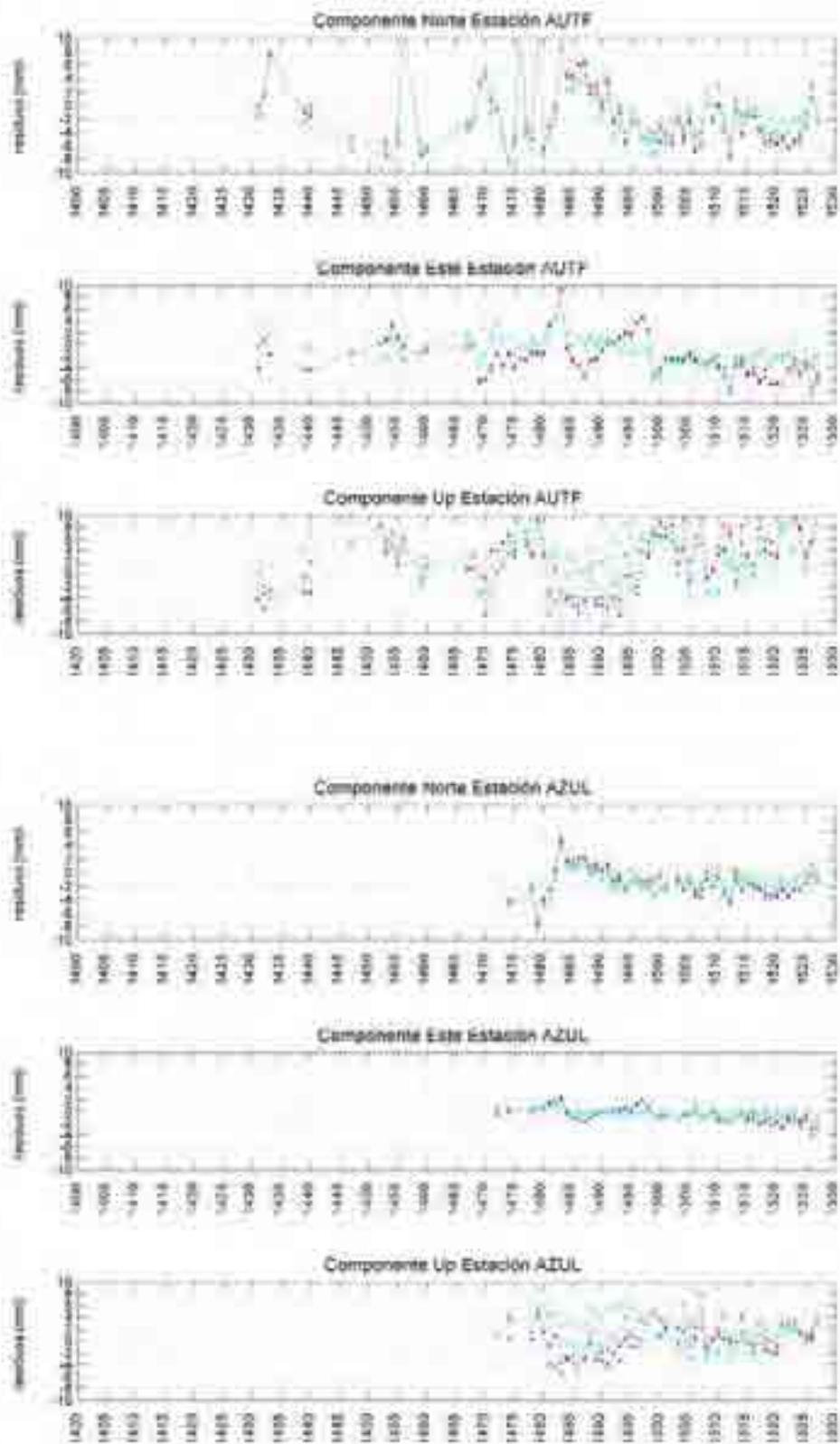
## RED SIRGAS-CON-SUR

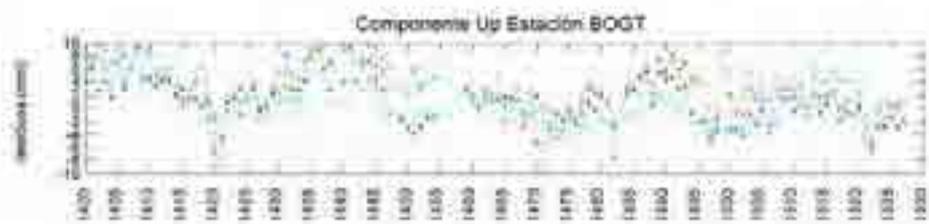
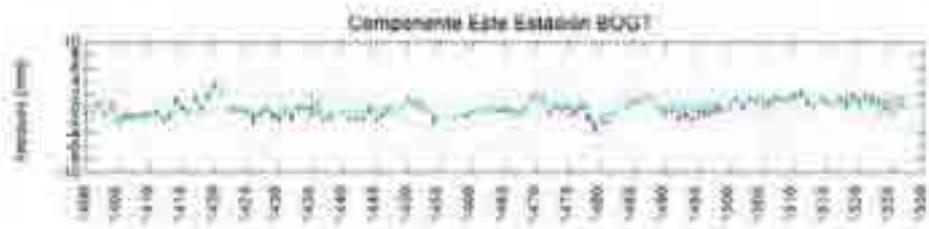
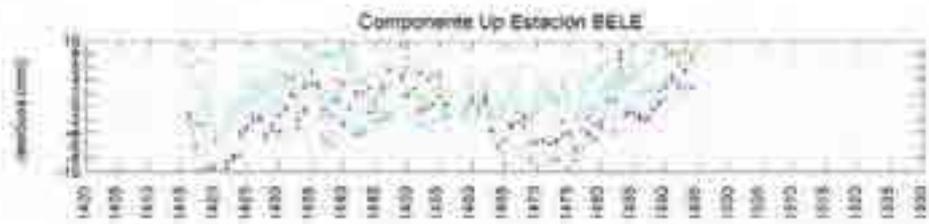
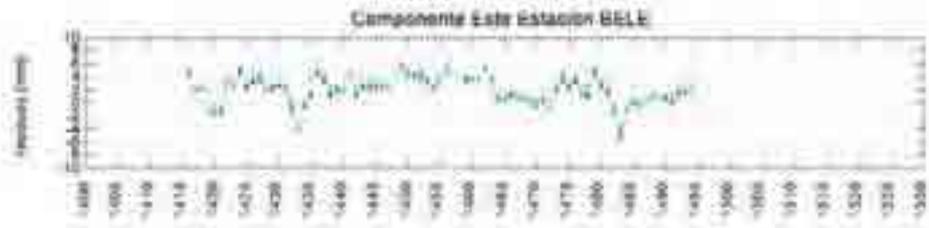
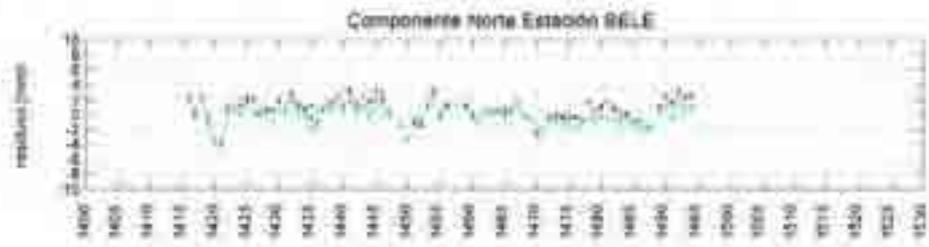
### Referencias

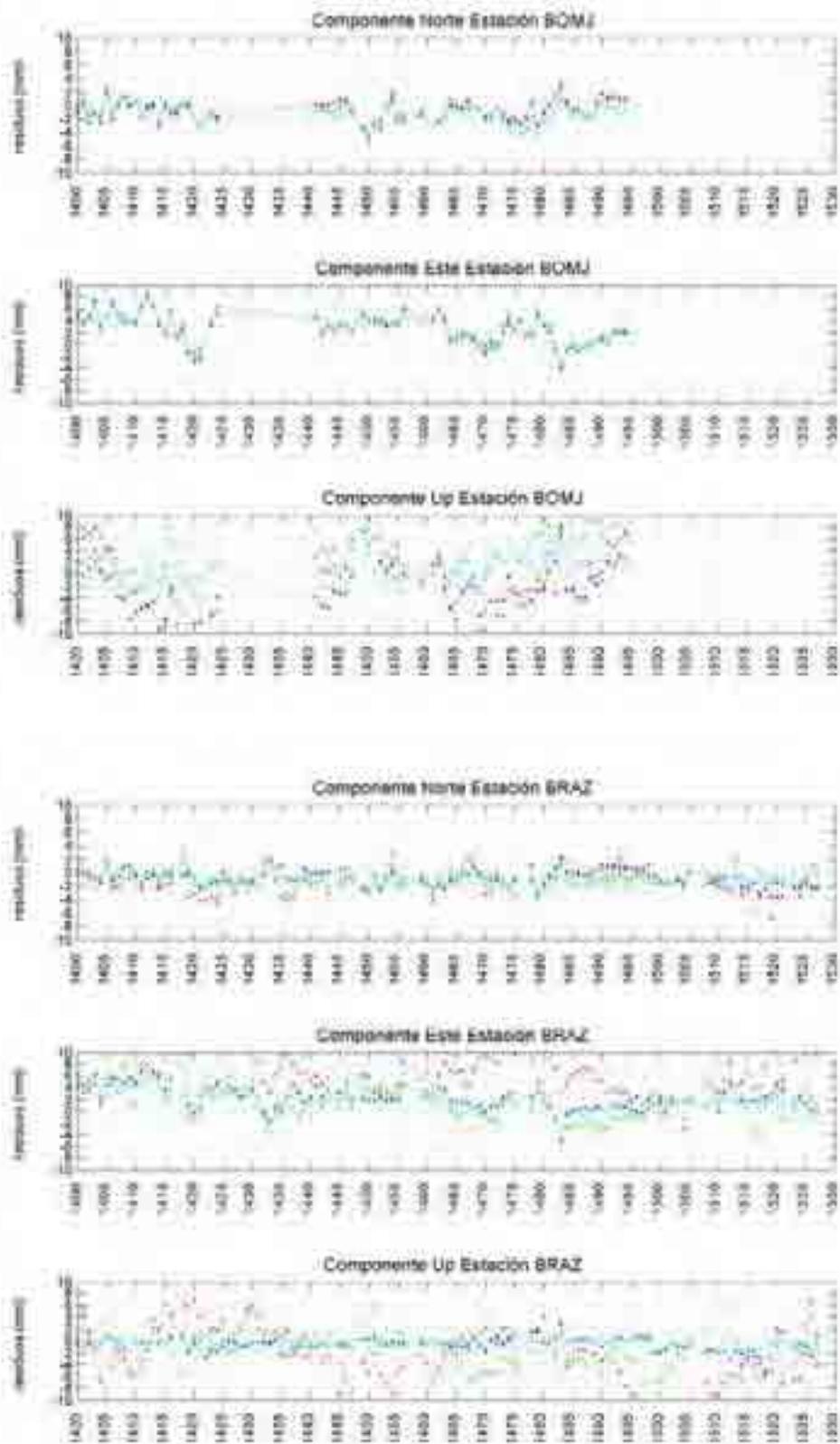
- - - - - IGS05+vel CC
- - - - - IGS05+vel NNR-NNT
- - - - - IGS05weekly CC
- - - - - IGS05weekly NNR-NNT

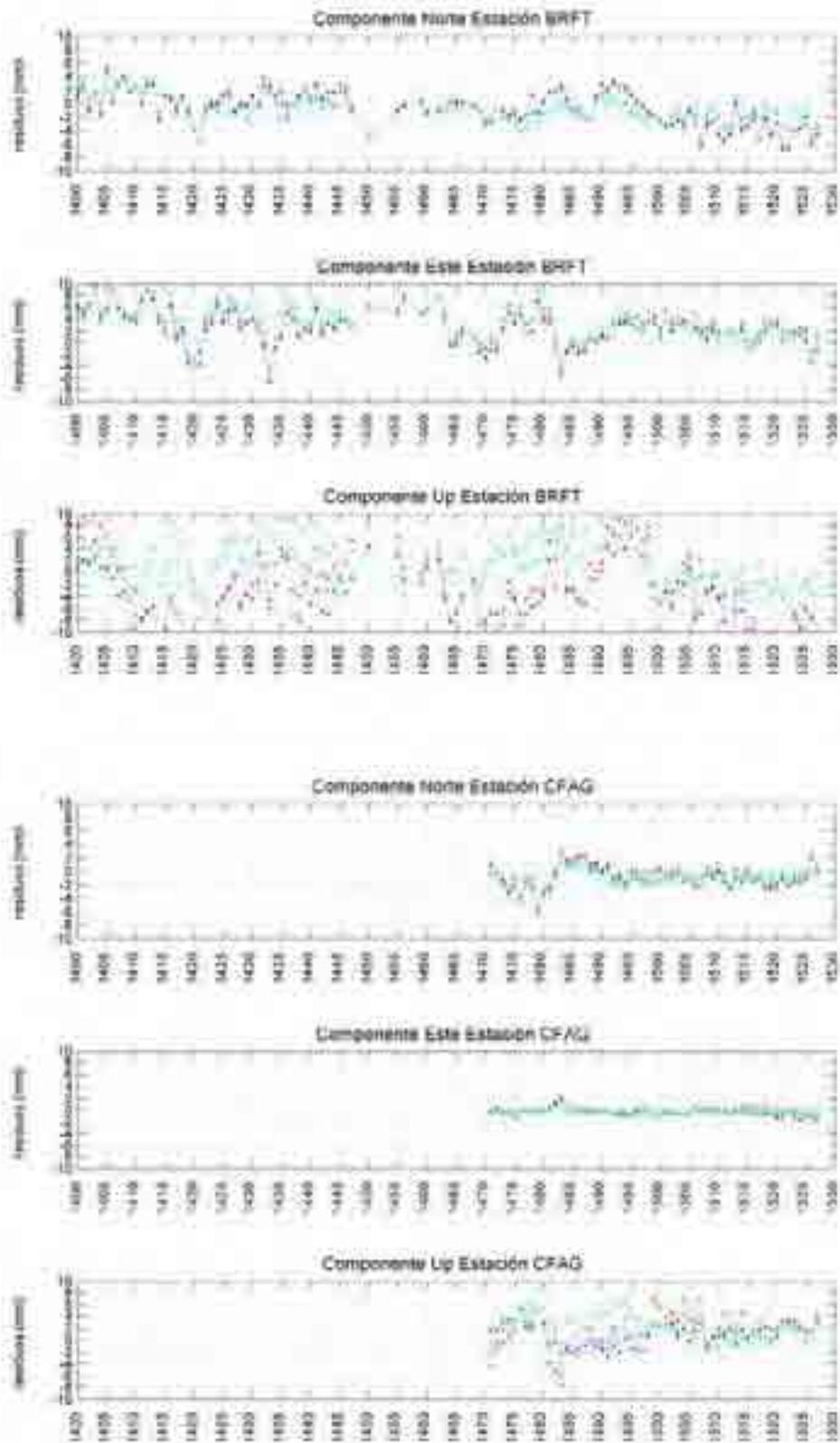
### Estaciones no fiduciales

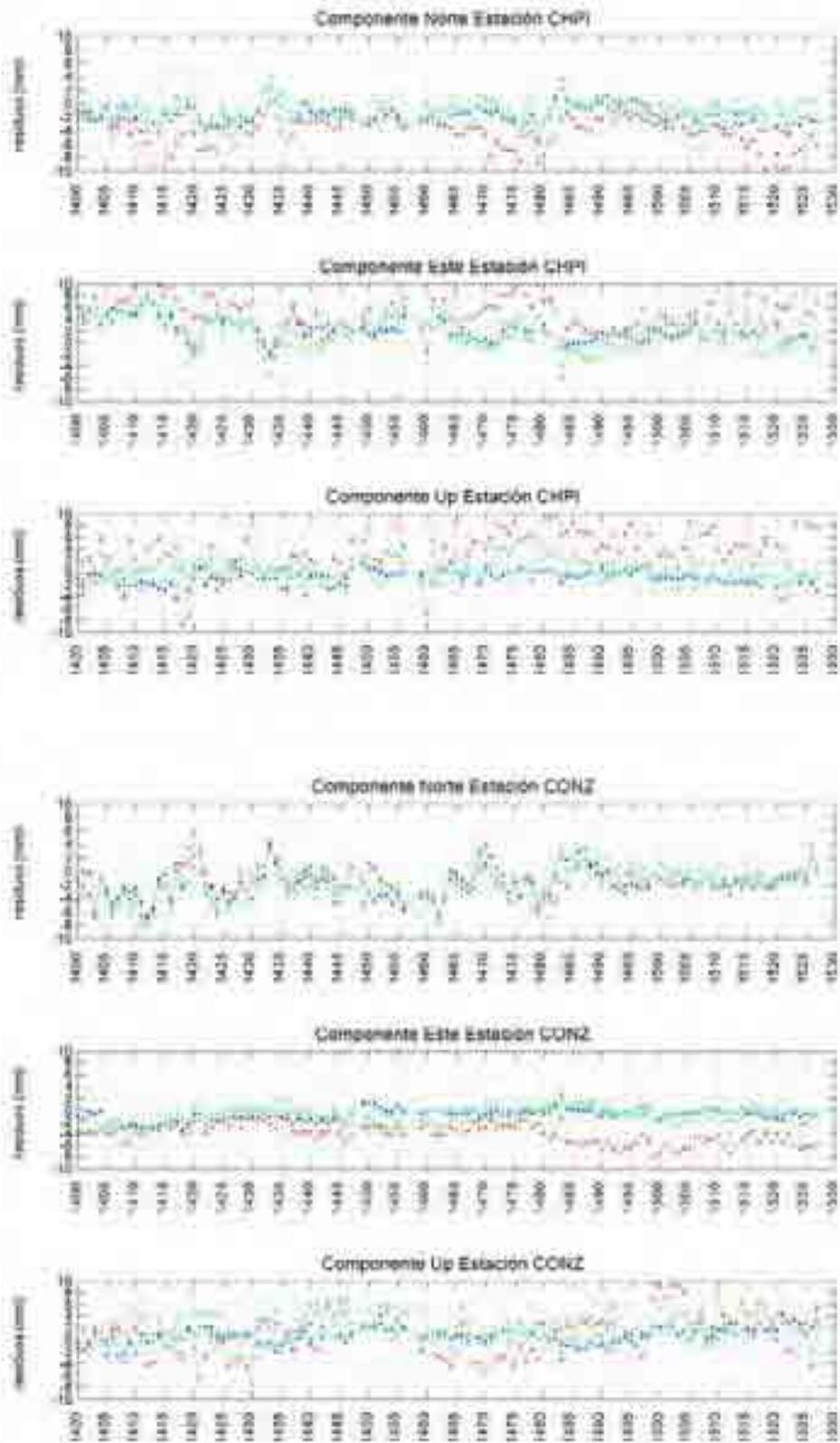


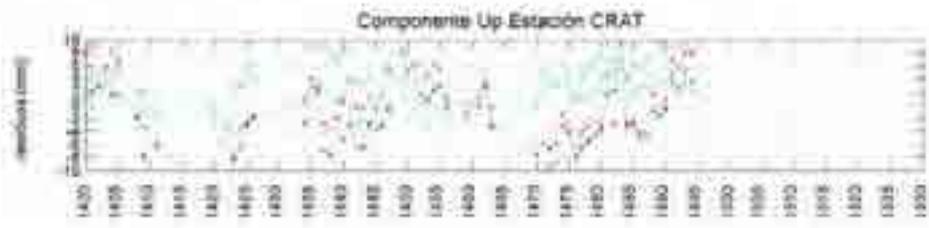
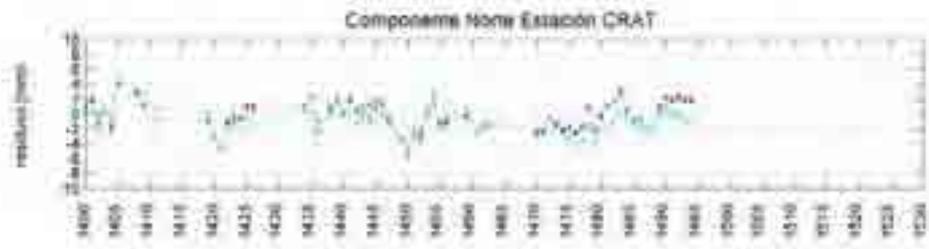
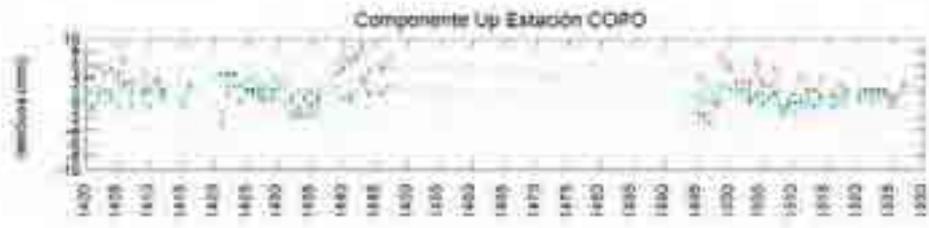
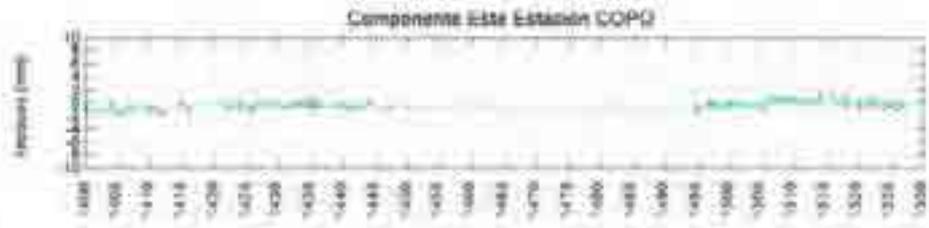


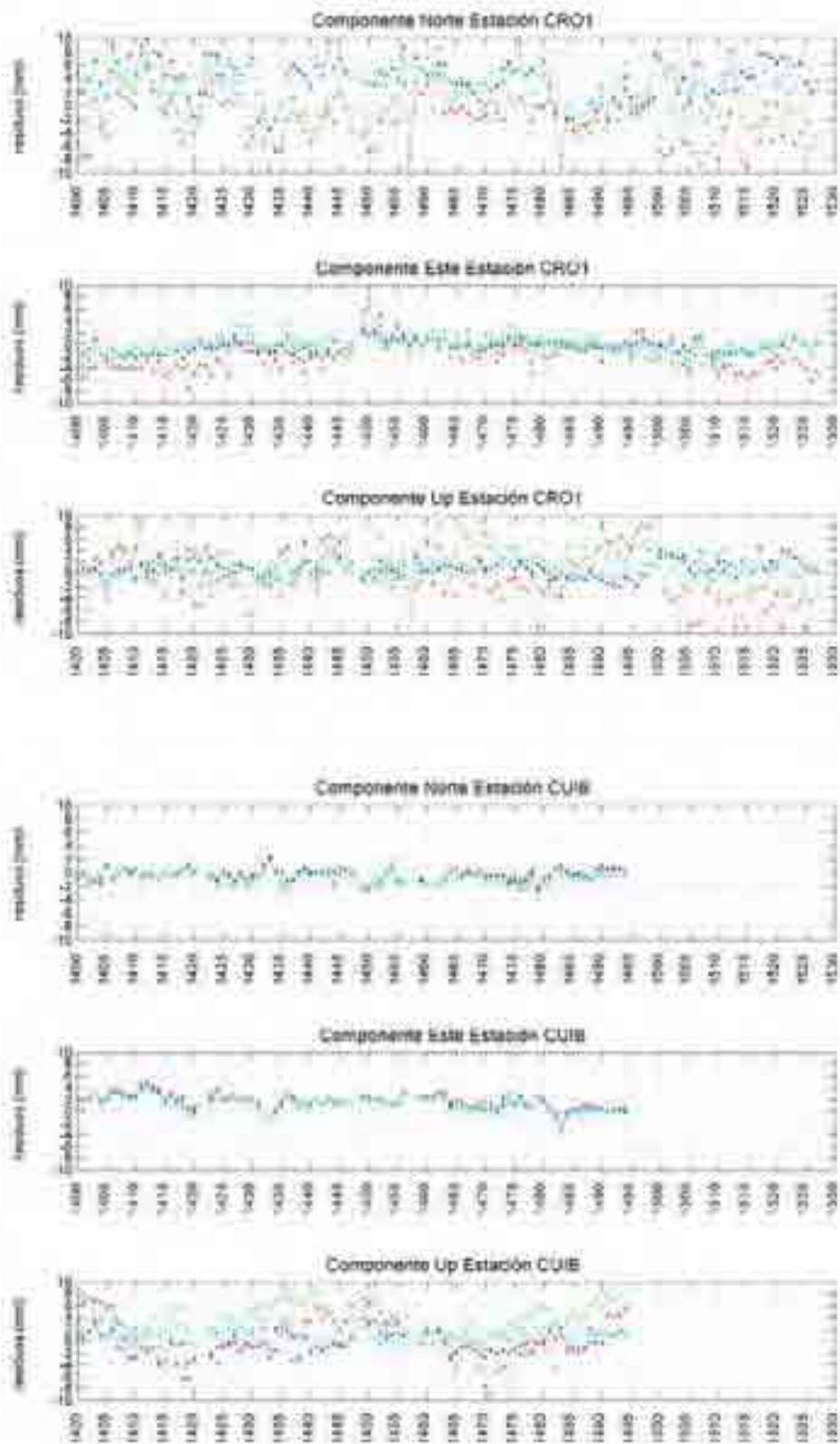


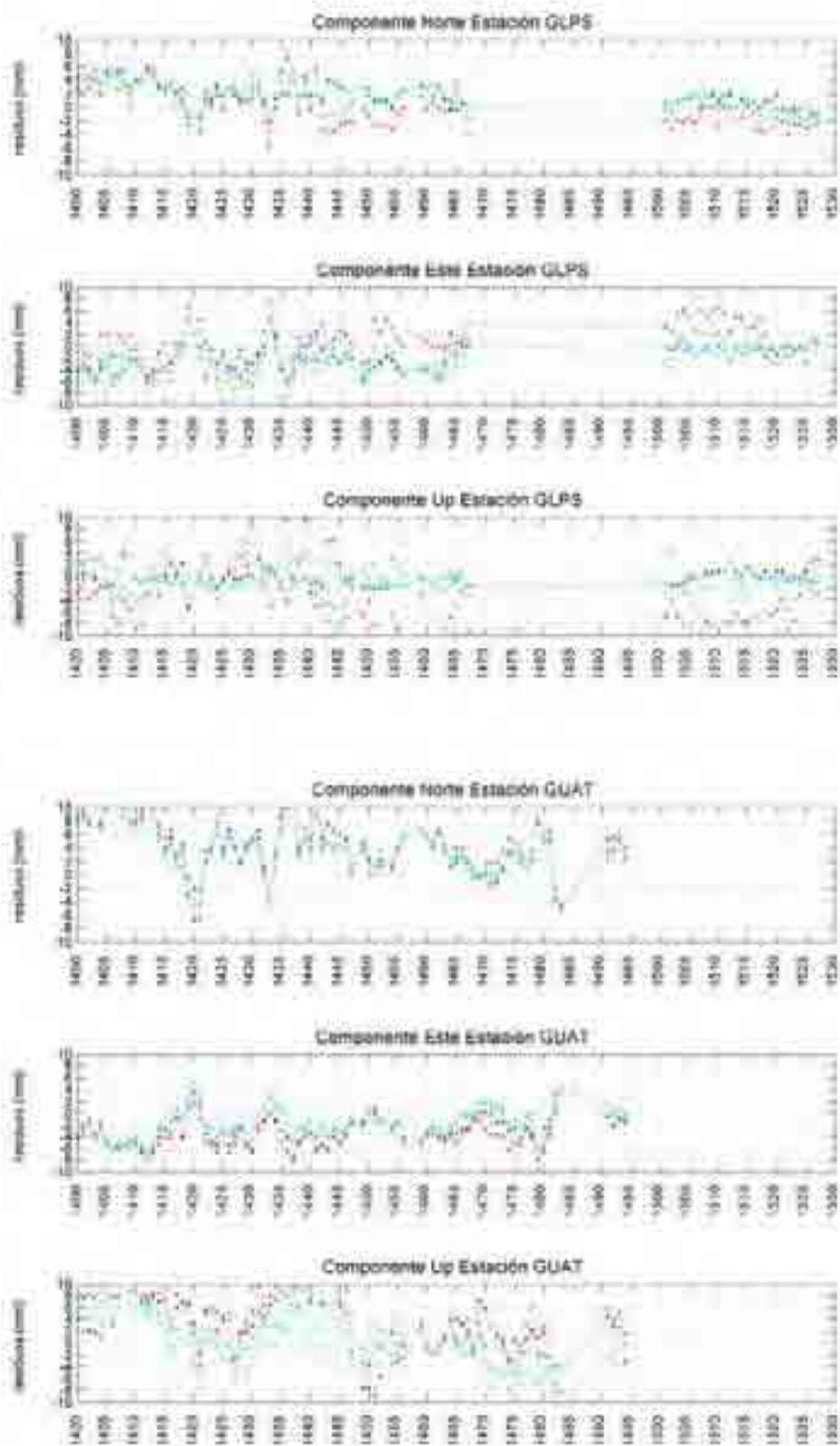


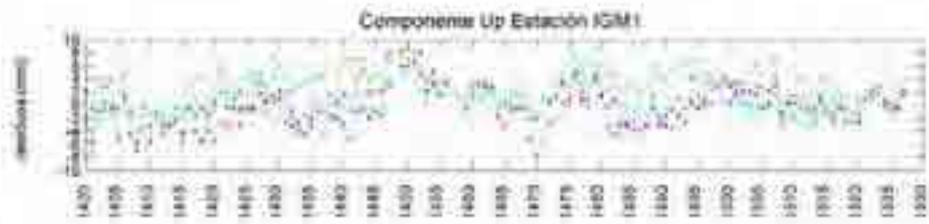
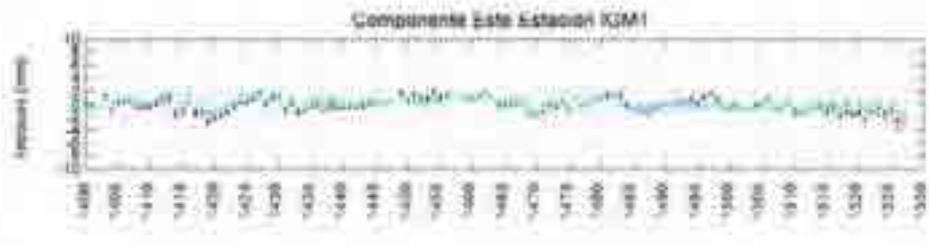
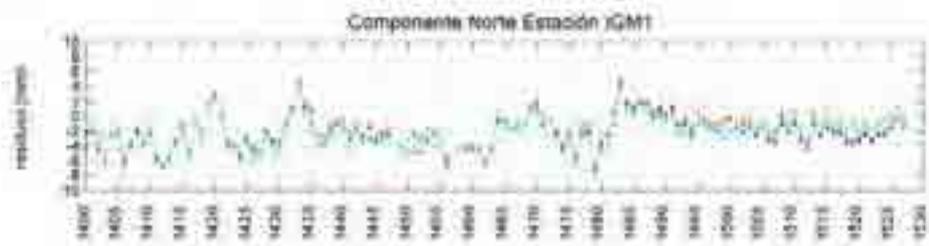
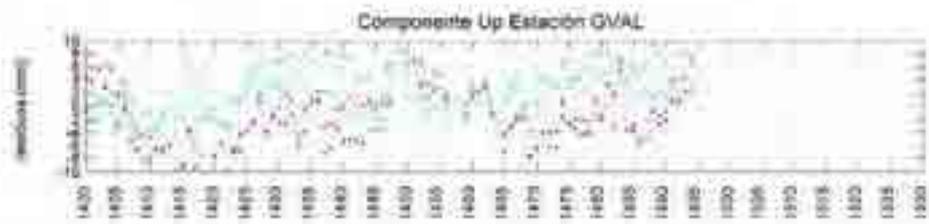


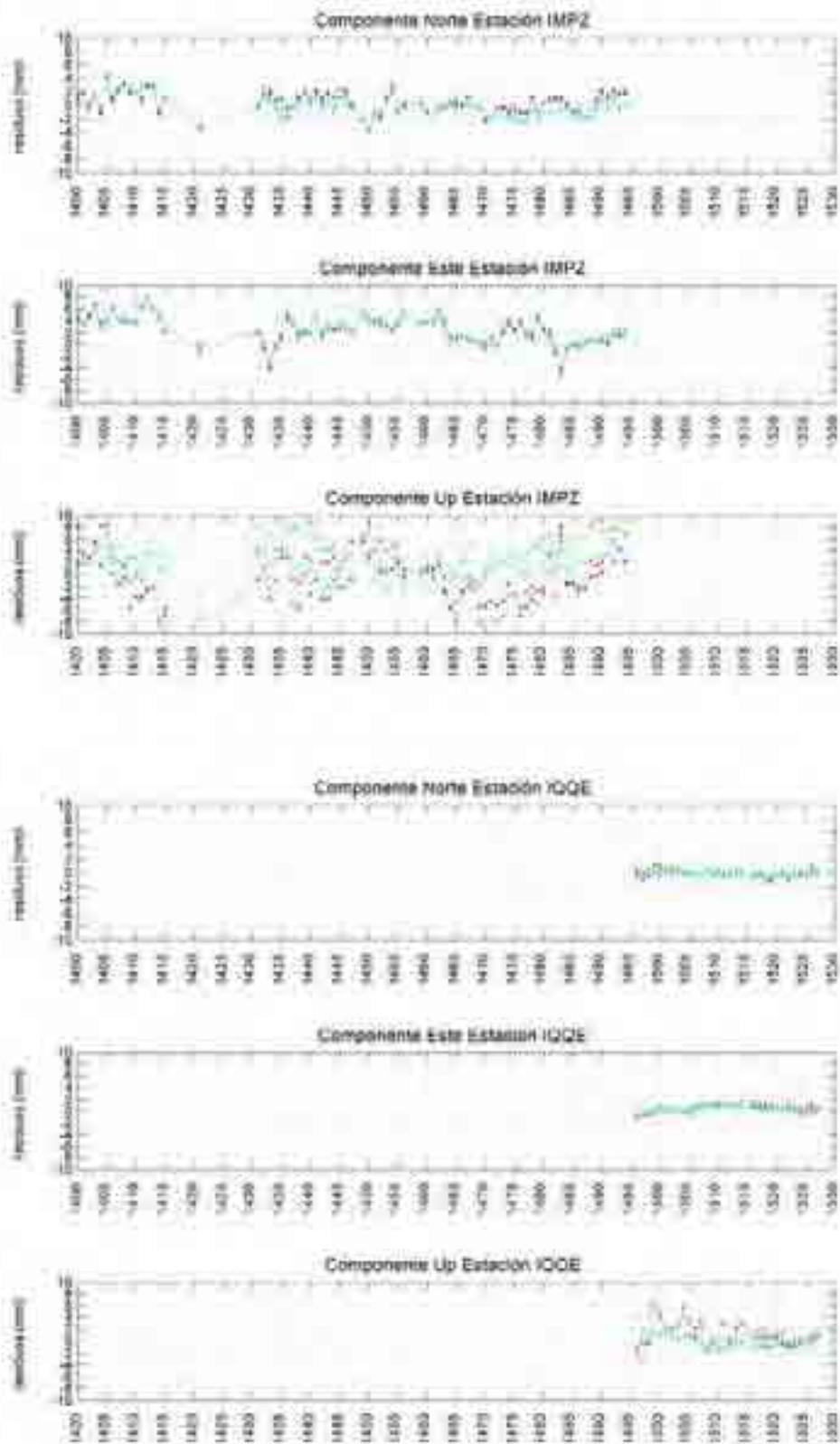


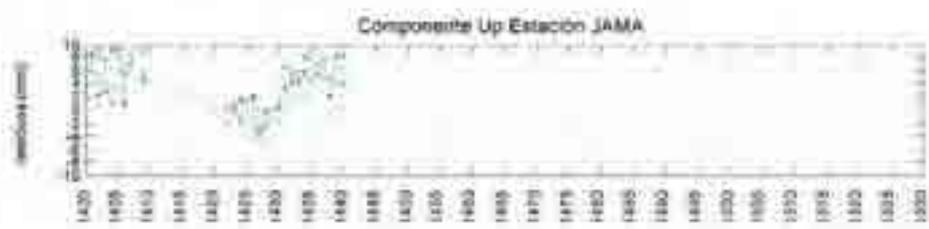


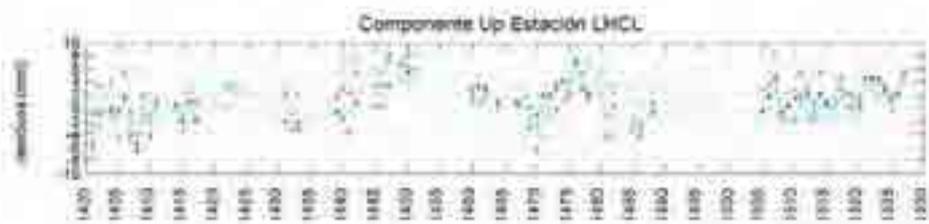
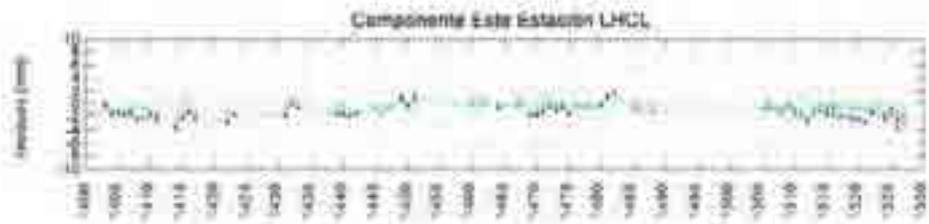
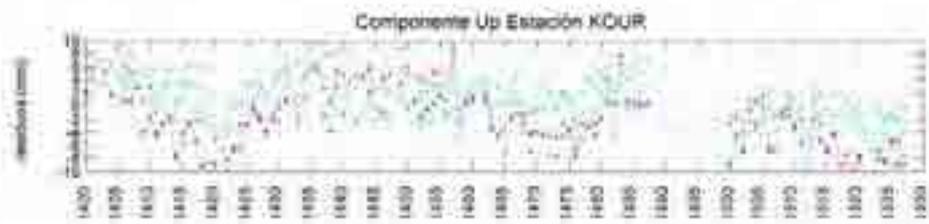
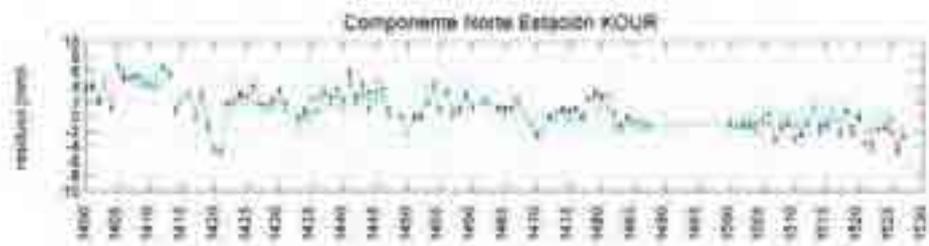


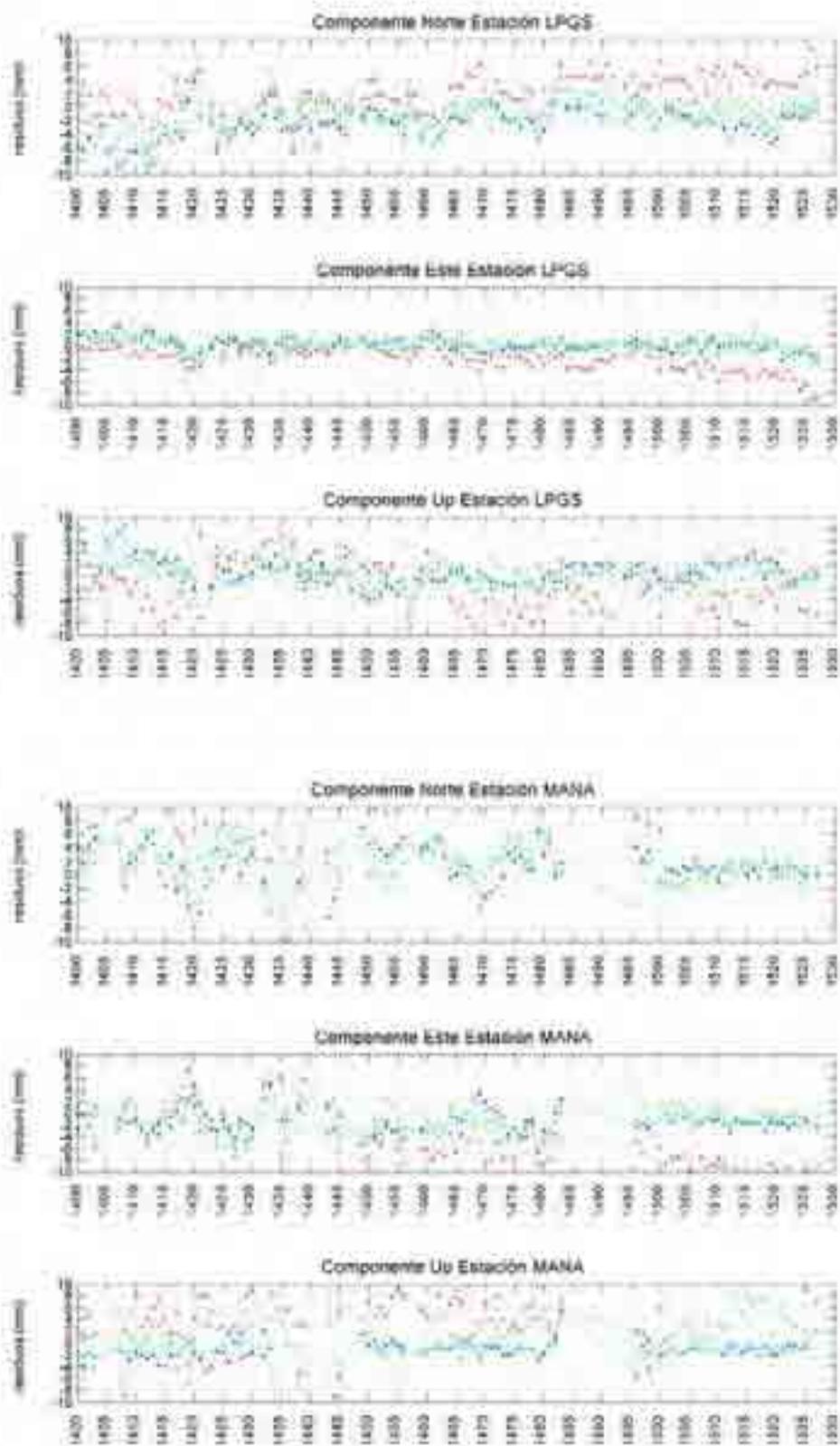


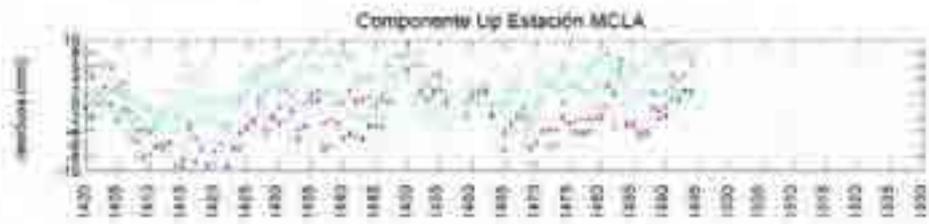
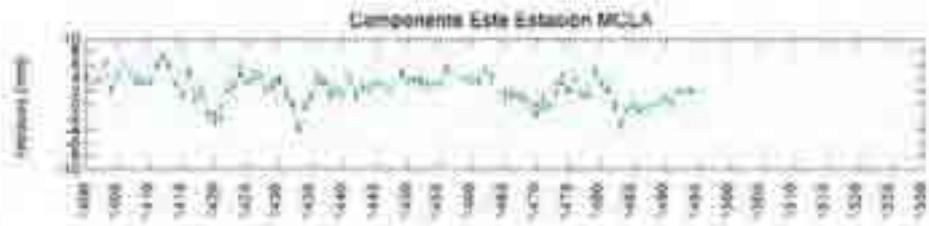
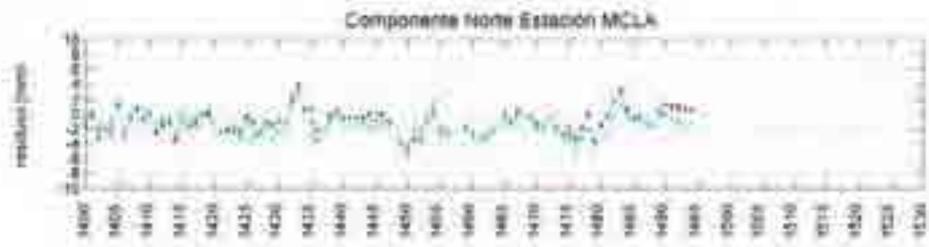
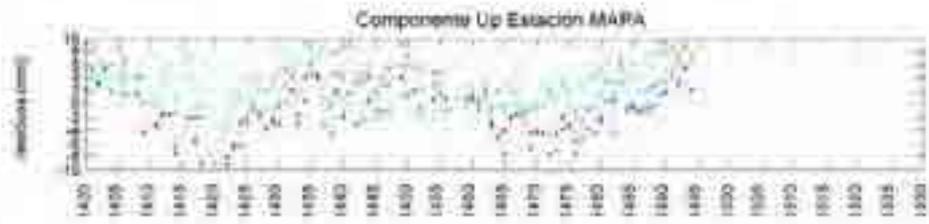
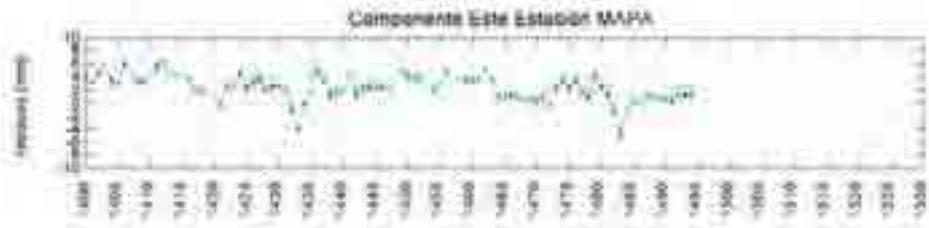


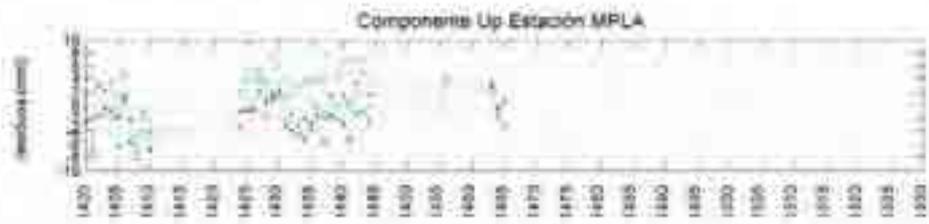
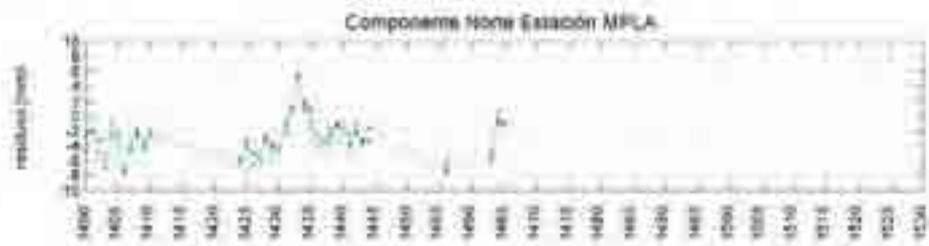
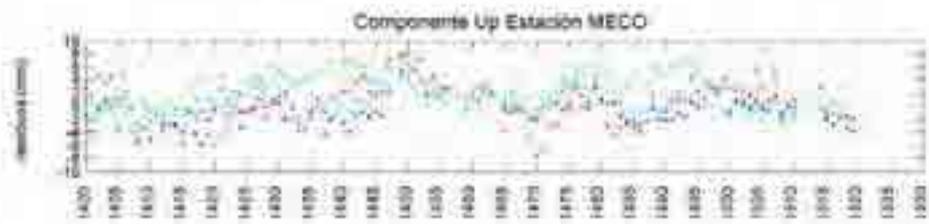
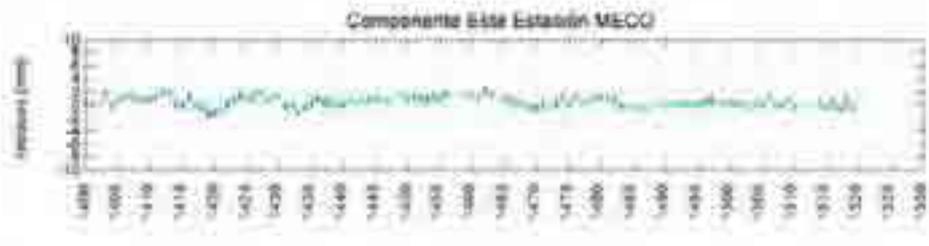


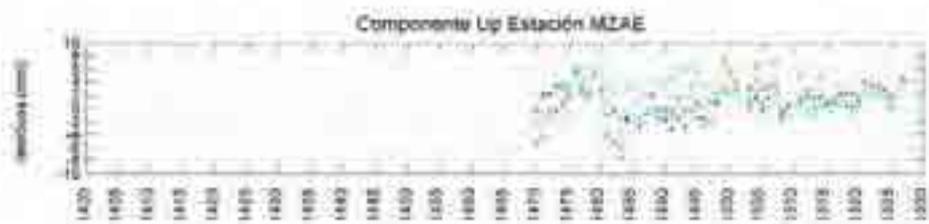
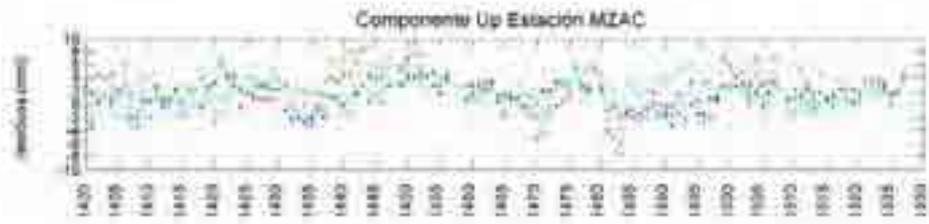
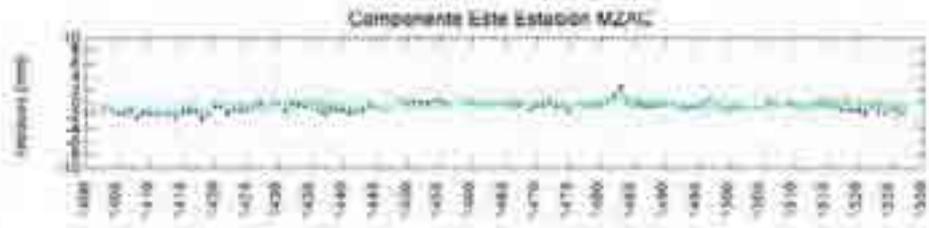
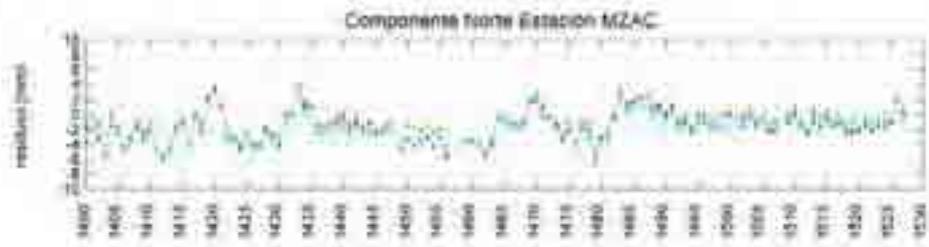


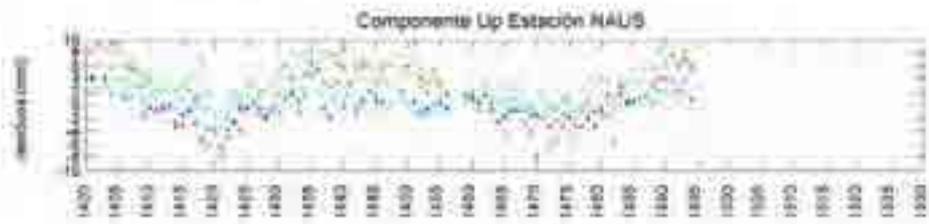
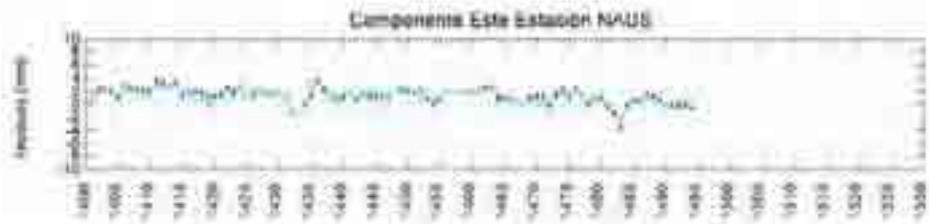
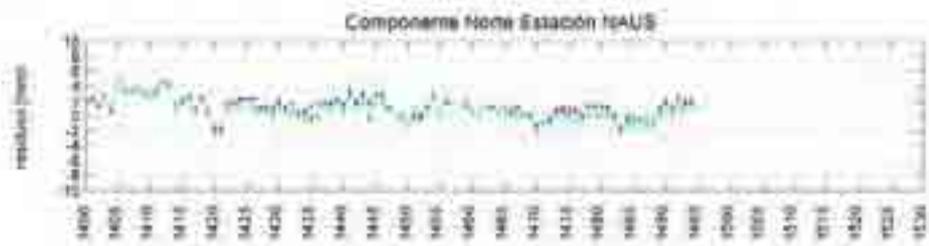
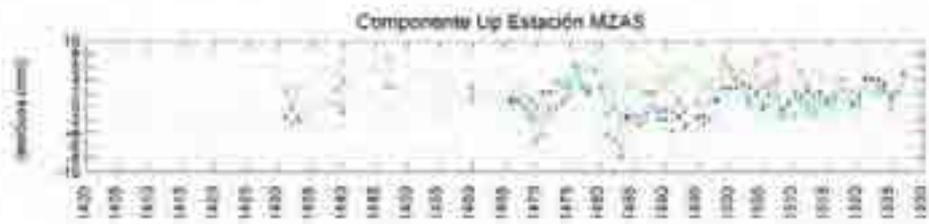
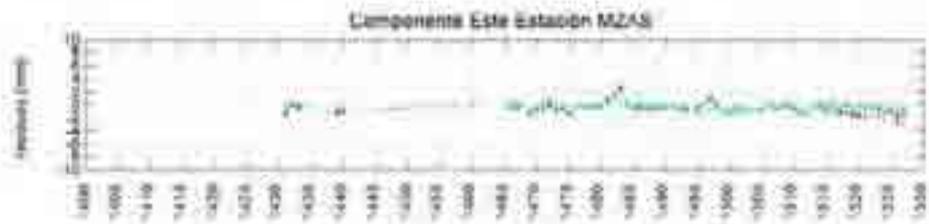


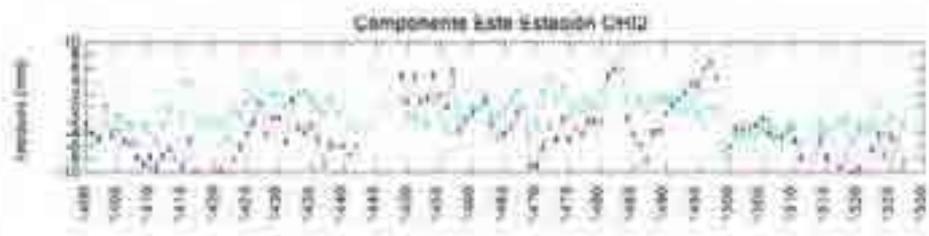
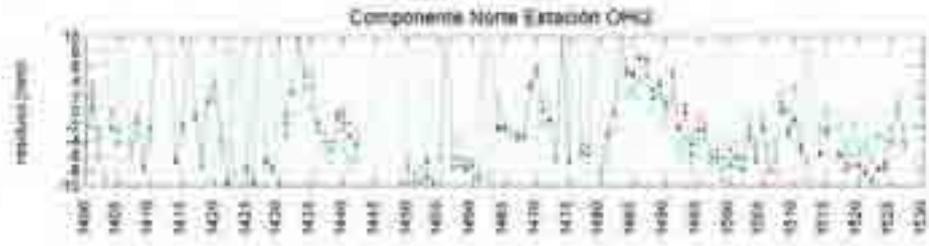
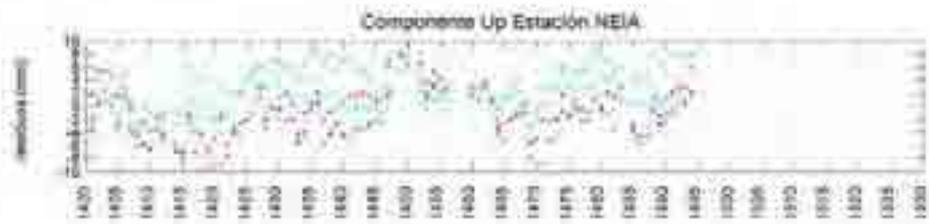
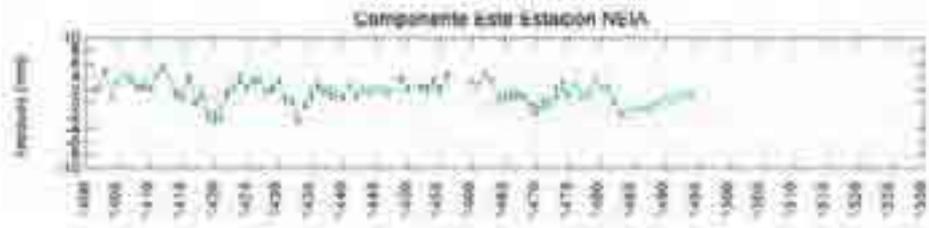
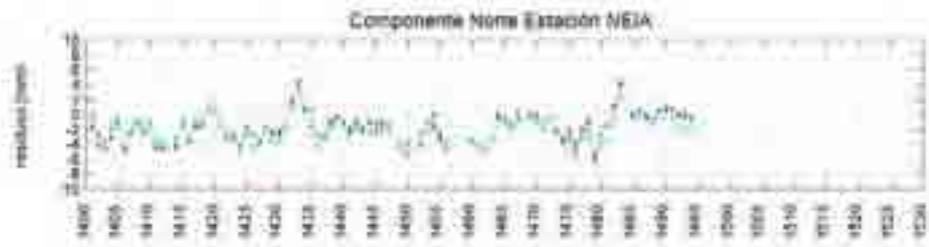


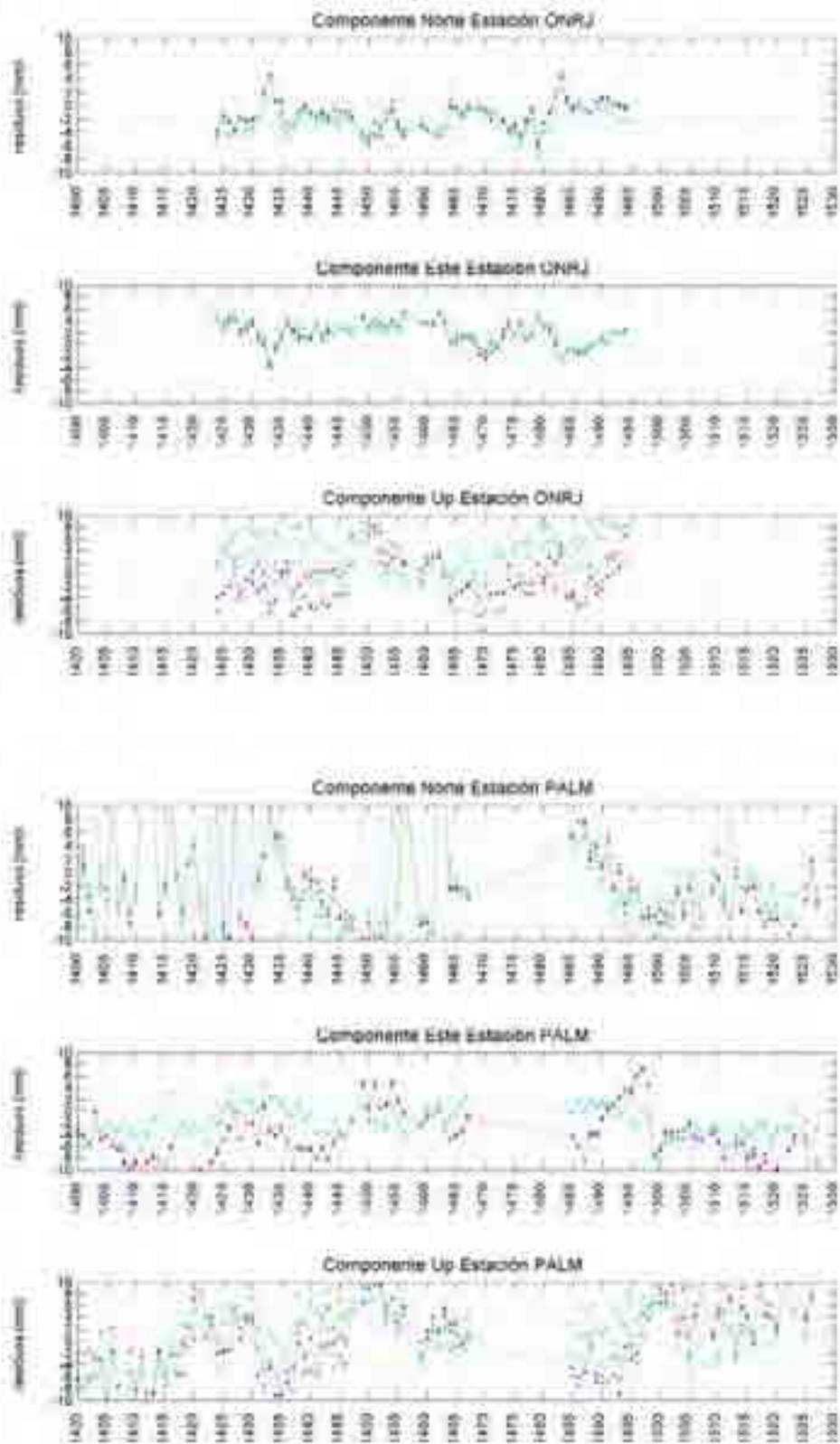


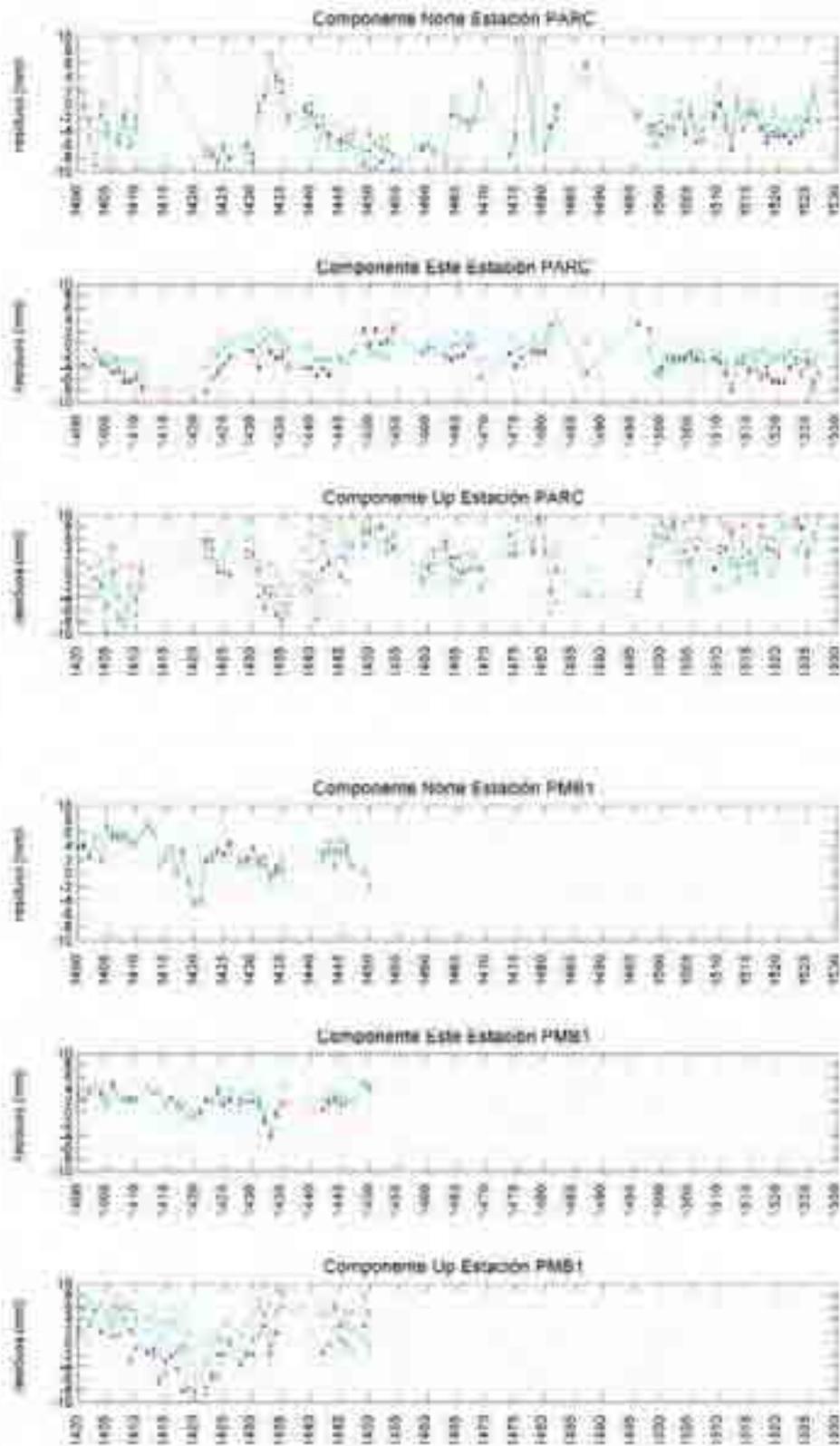


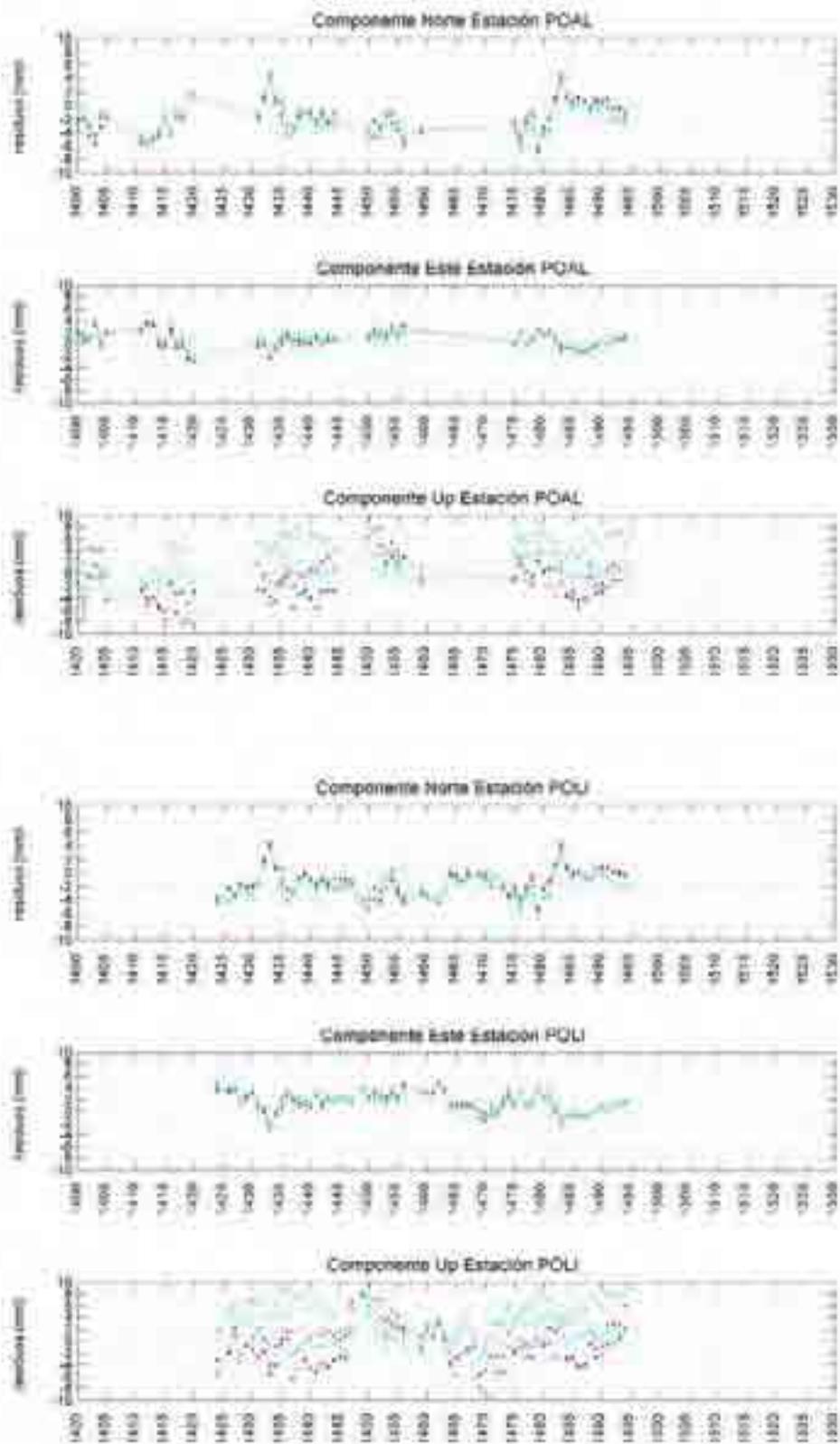


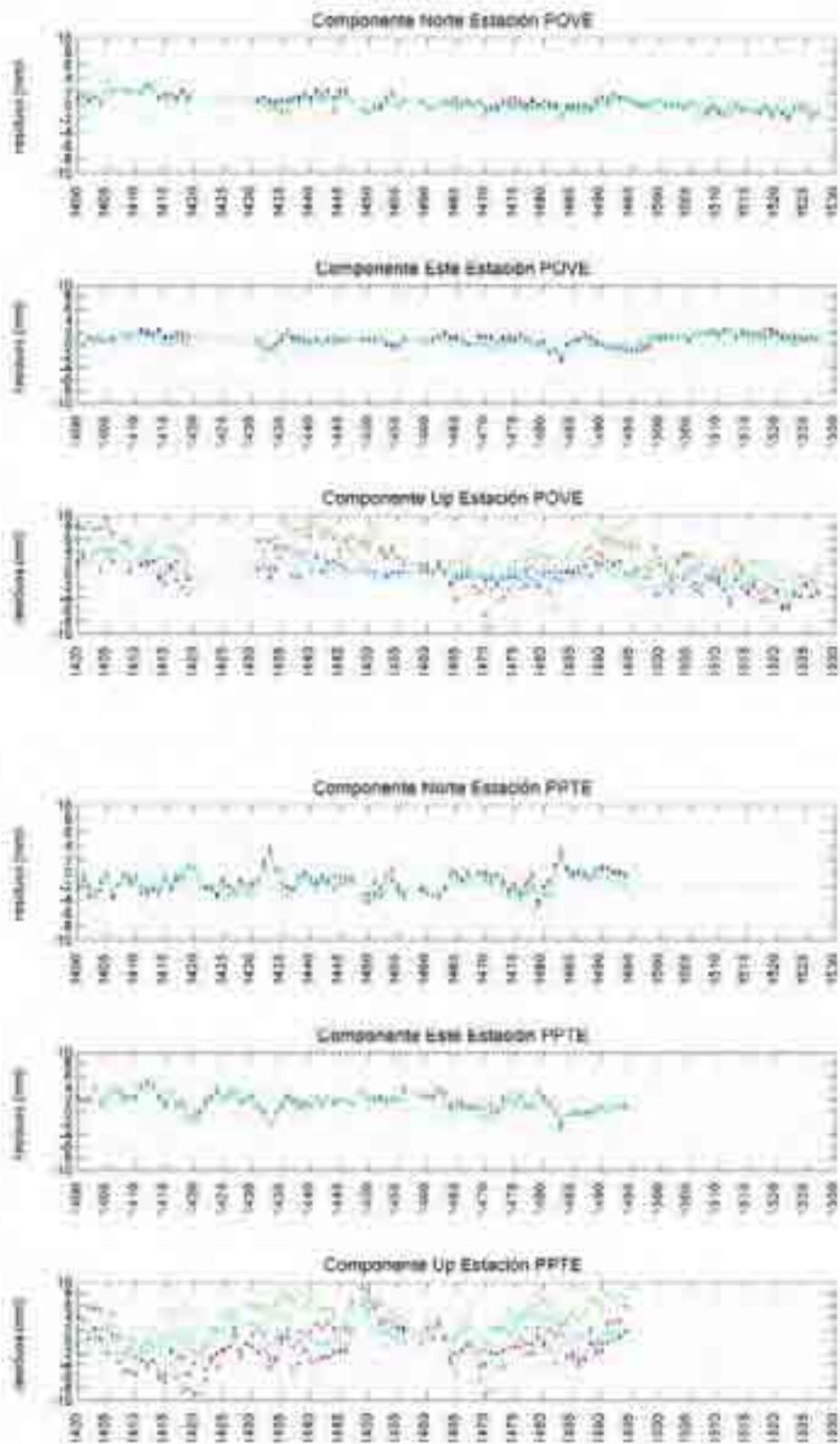


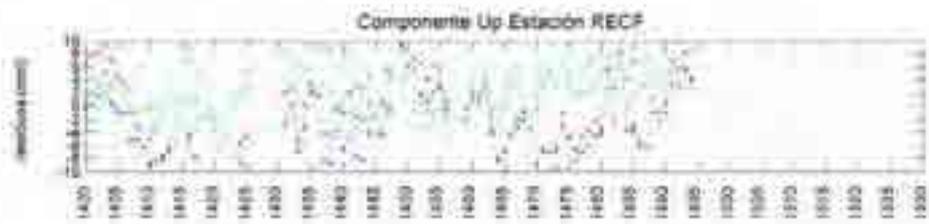


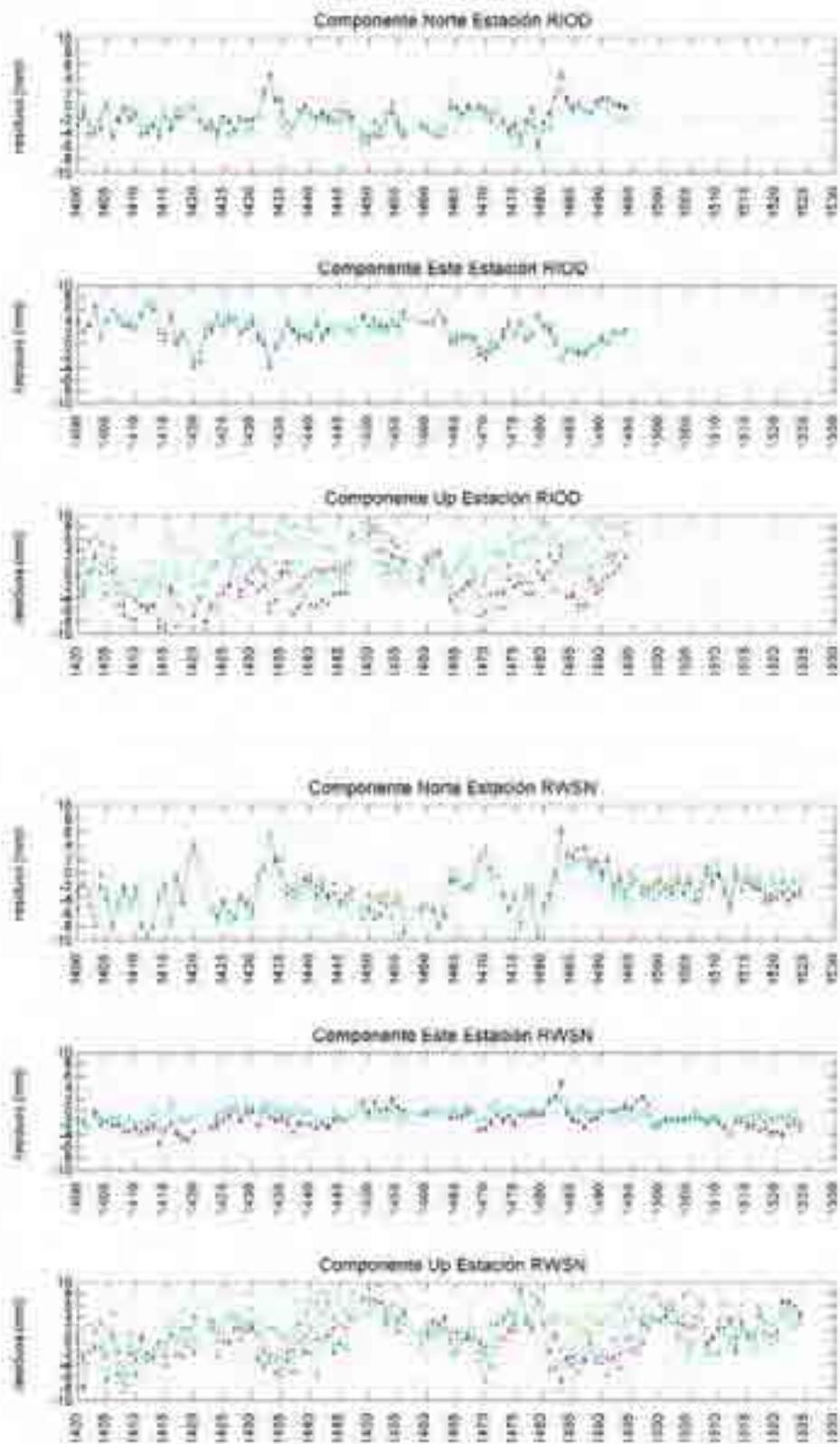


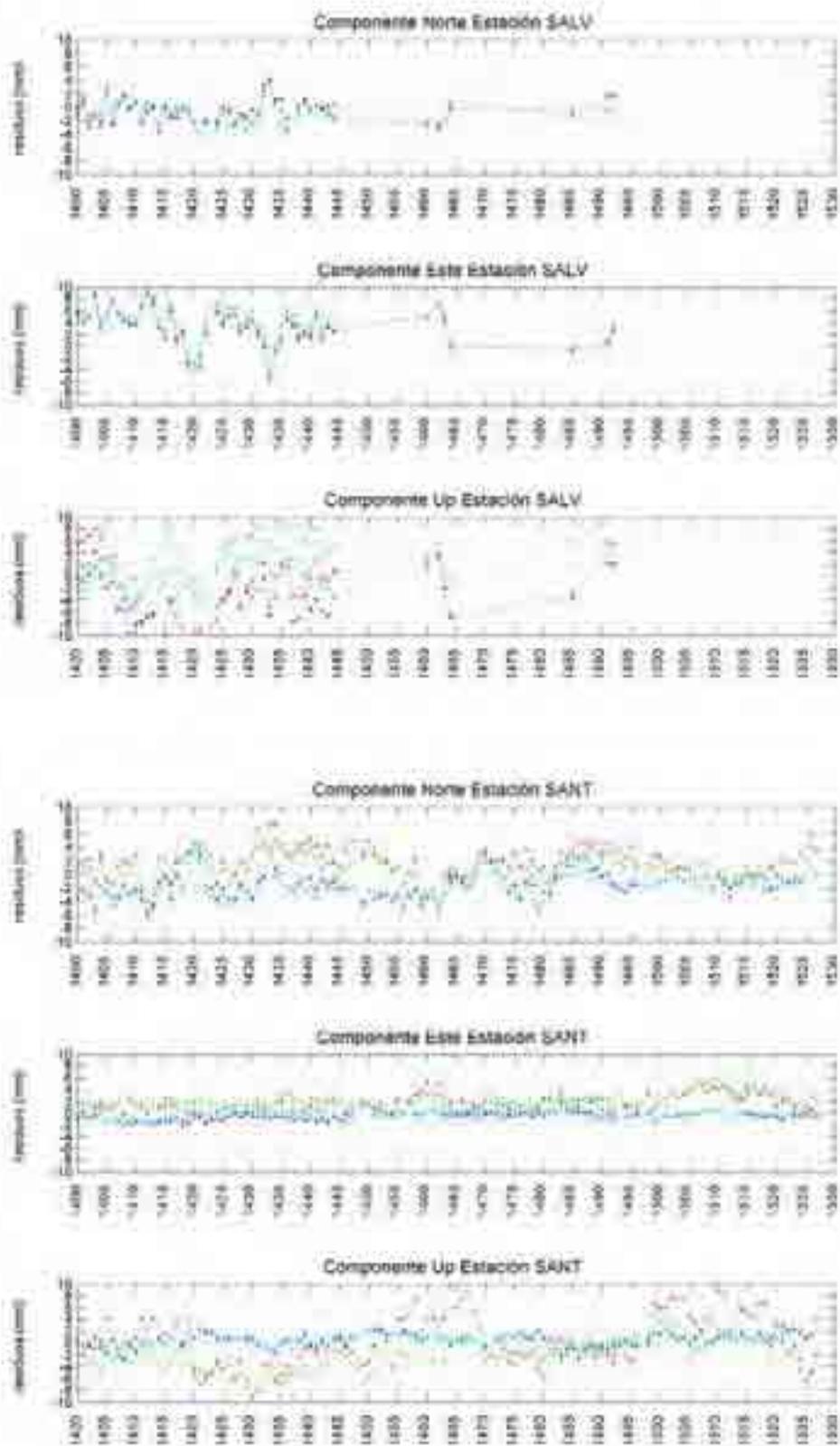


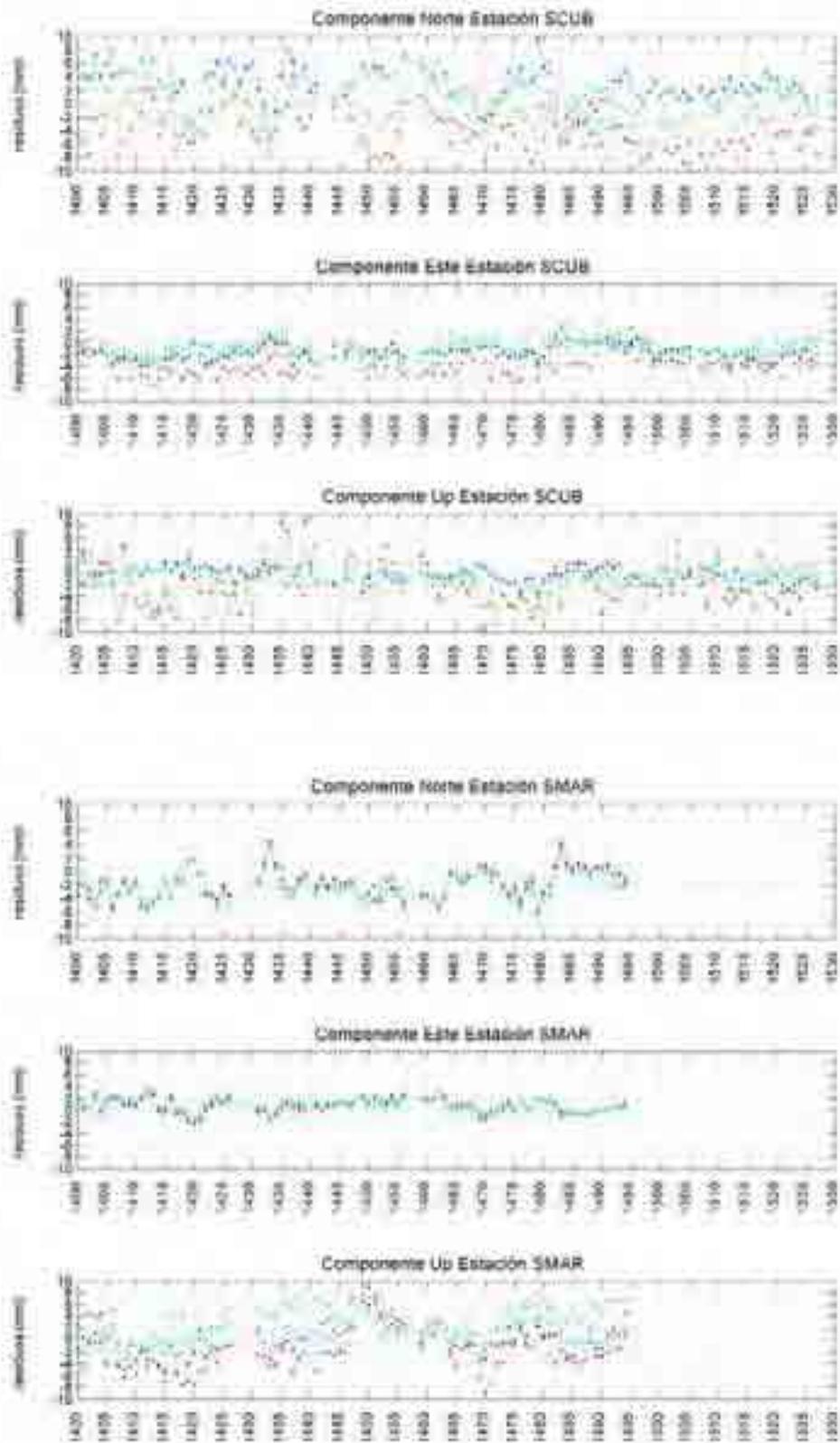


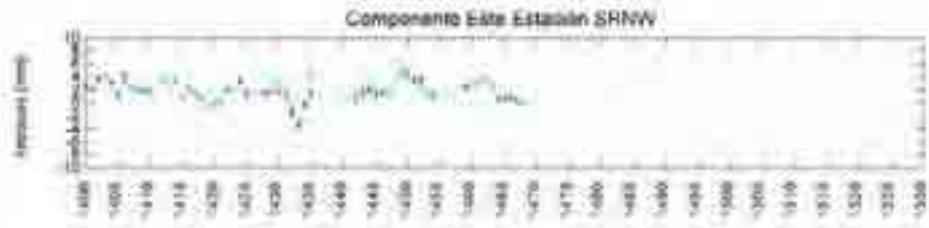


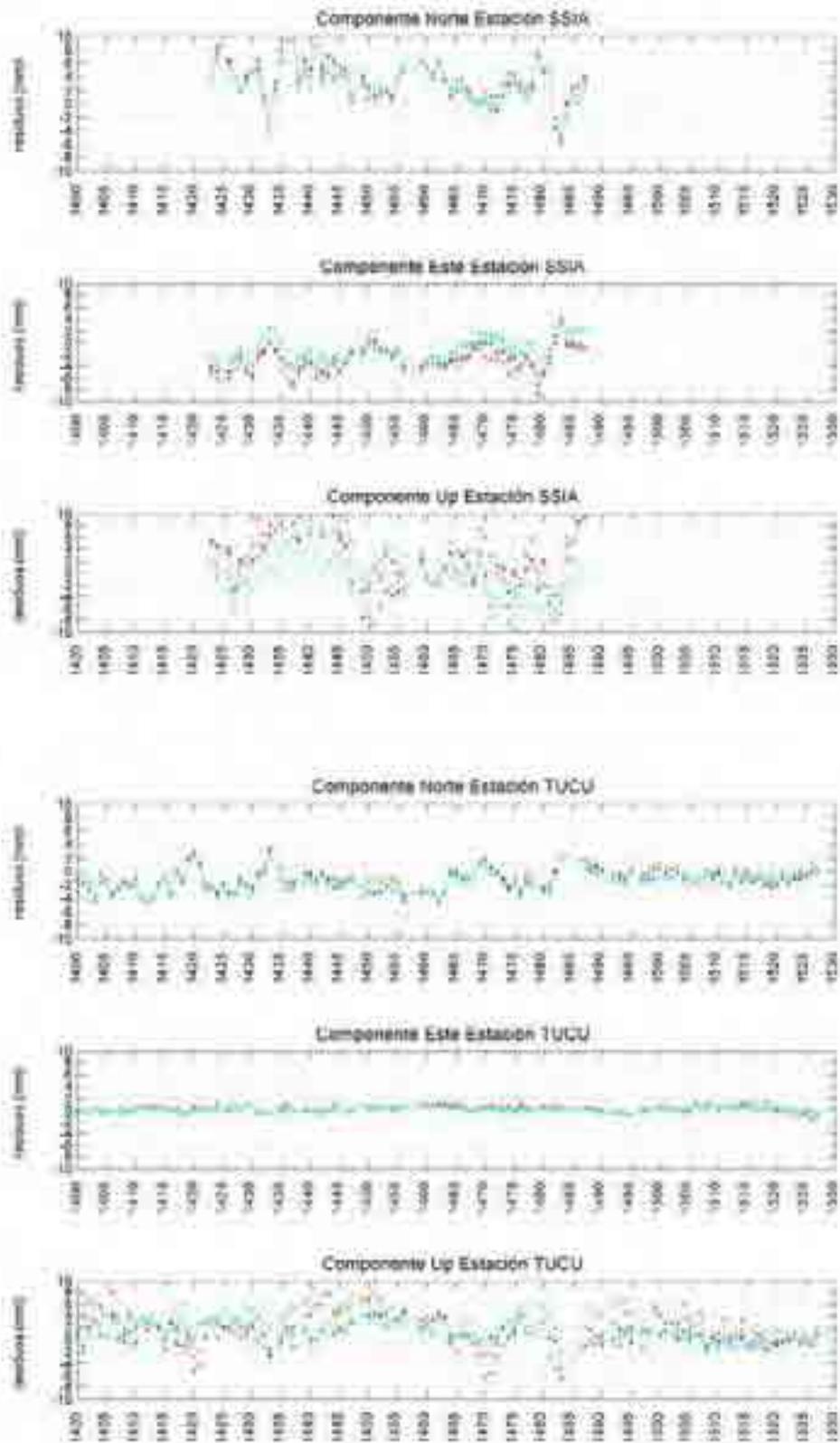


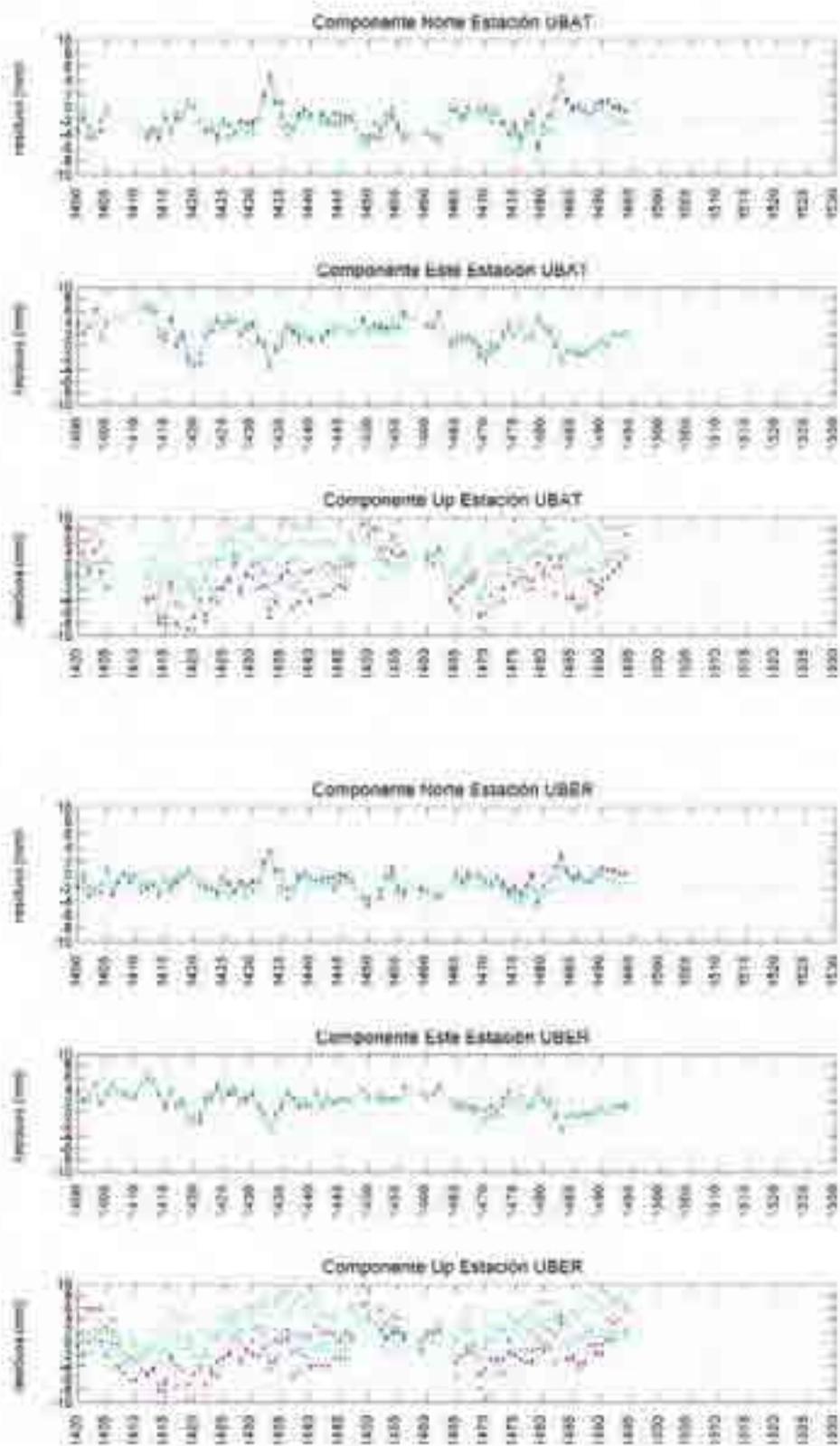


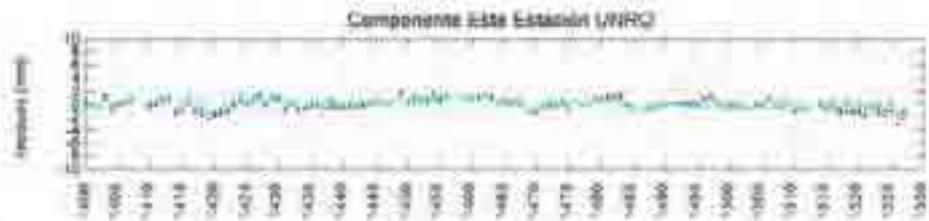
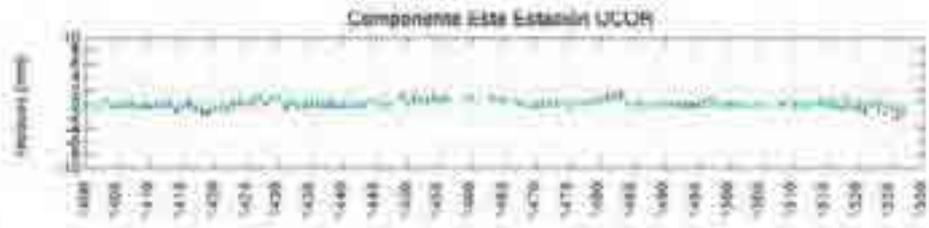


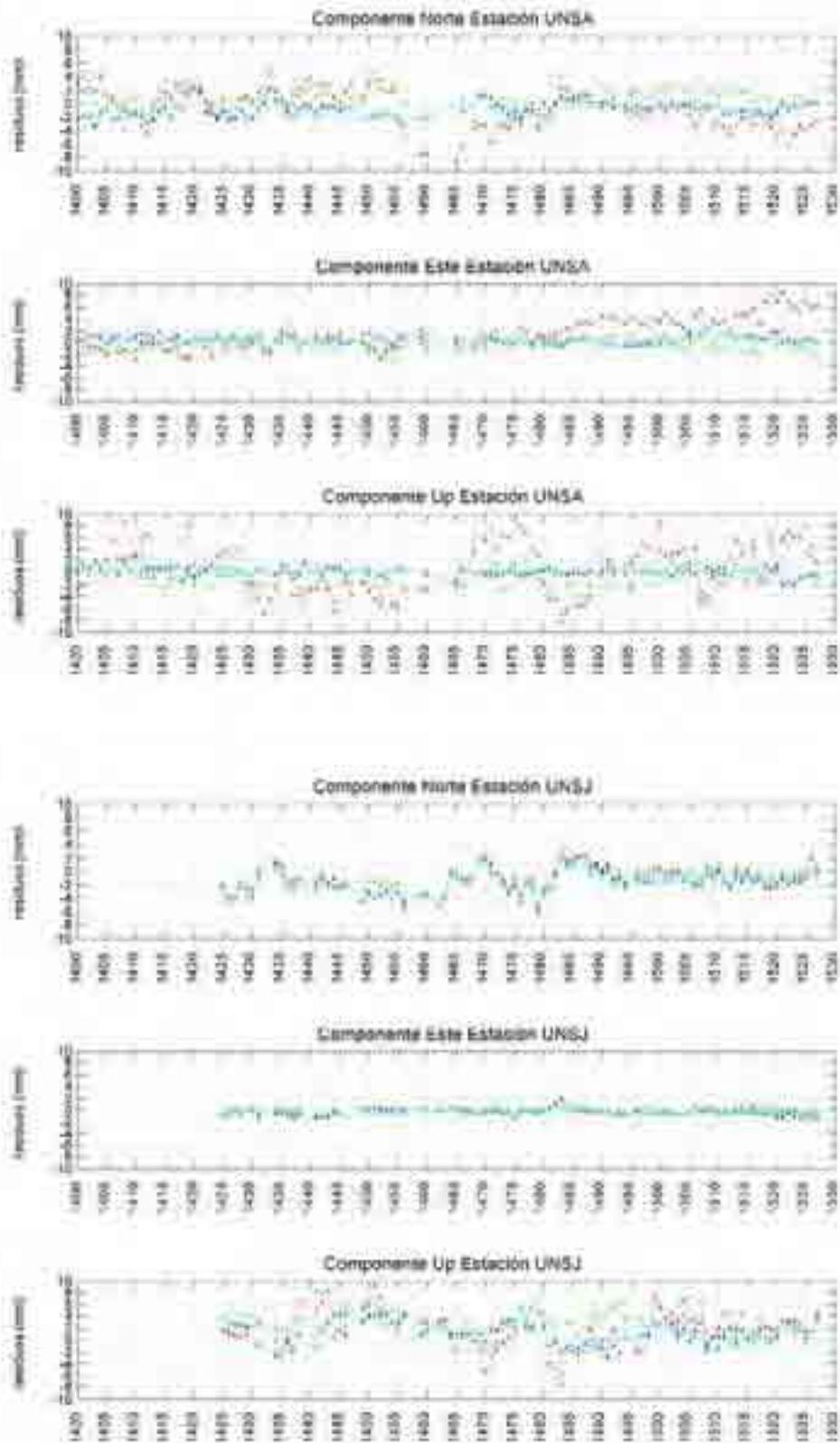


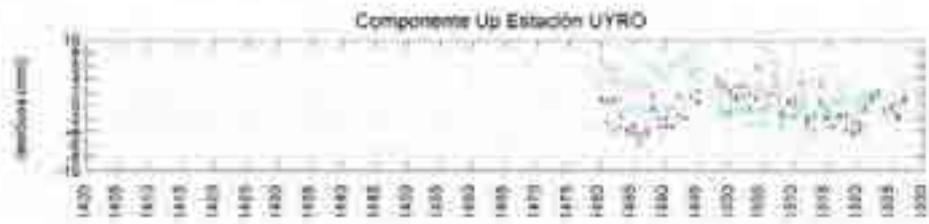
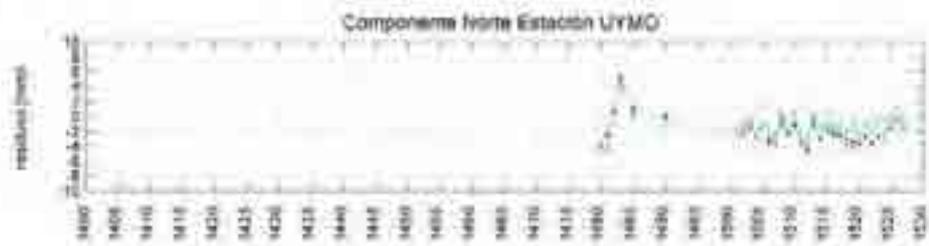


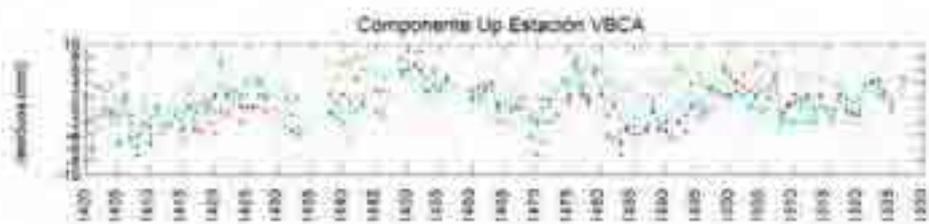
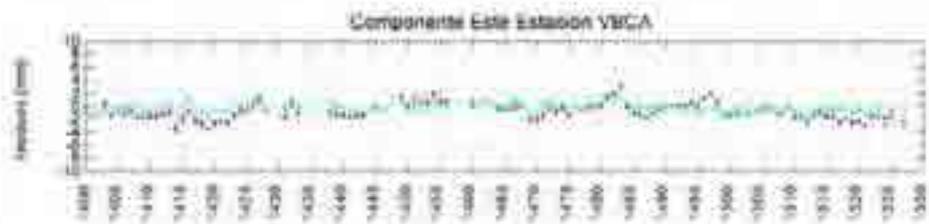
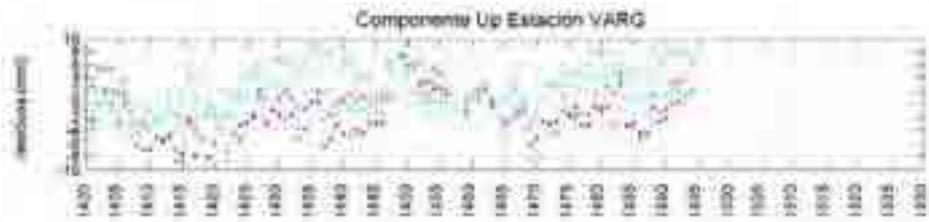
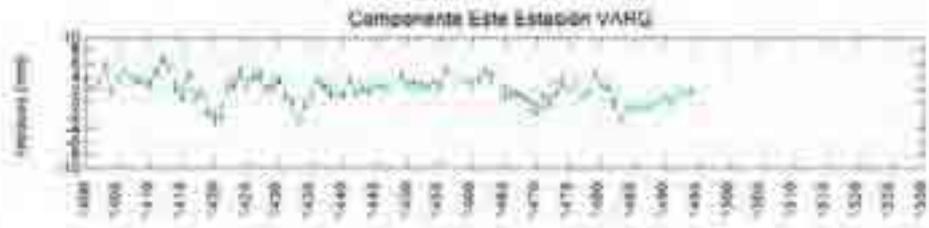
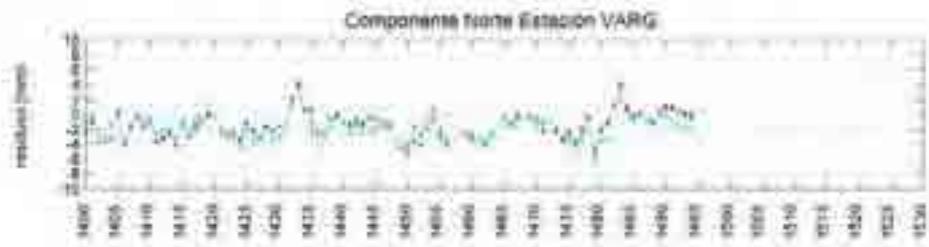


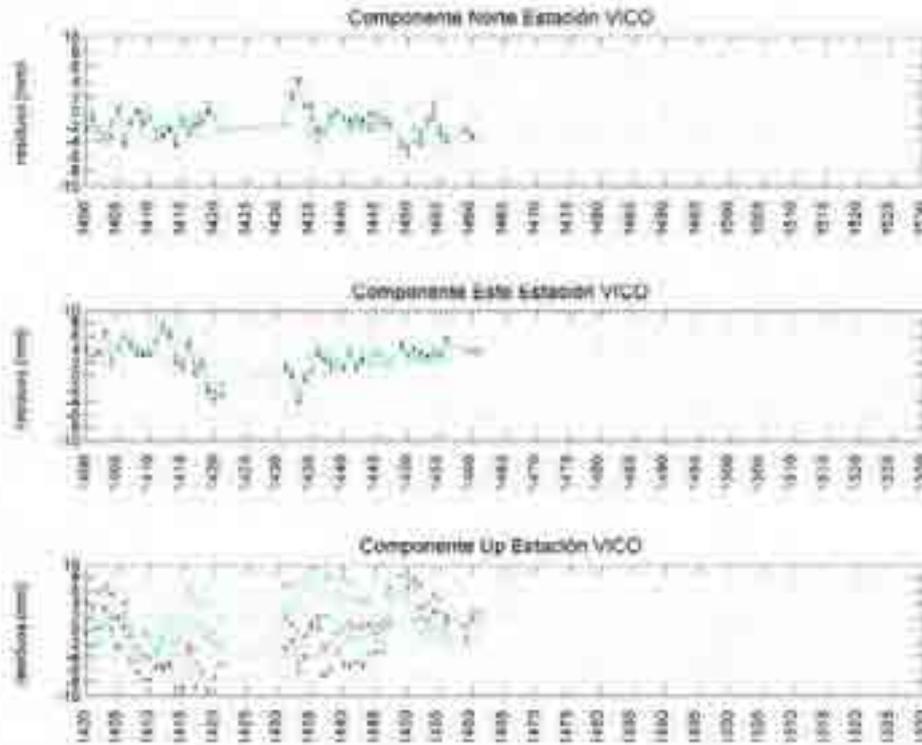










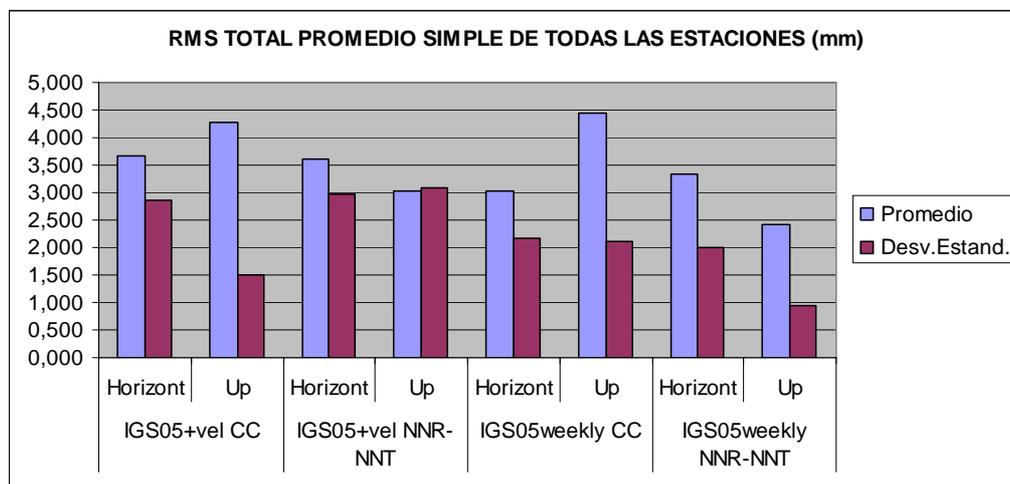


Promedio de los residuos luego de aplicar la transformación de Helmert para todas las estaciones de la red.

RMS TOTAL (rms N+rmsE+rmsUP)								
Estación	IGS05+vel CC		IGS05+vel NNR-NNT		IGS05weekly CC		IGS05weekly NNR-NNT	
	Horizont	Up	Horizont	Up	Horizont	Up	Horizont	Up
ALUM	1,584	1,052	1,417	1,414	0,765	1,627	0,948	1,175
AMHU	1,432	3,796	1,525	1,43	1,035	5,262	1,048	0,743
ANTC	3,823	3,834	4,346	2,8	3,712	3,857	4,264	2,663
AREQ	1,186	4,176	1,151	2,23	1,08	4,017	1,064	1,809
AUTF	6,299	6,254	6,782	5,516	5,018	5,371	5,704	4,21
AZUL	2,761	3,04	3,01	2,268	2,193	3,803	2,724	2,083
BELE	3,218	6,051	3,207	4,448	3,3	5,537	3,419	2,621
BOAV	2,37	5,086	2,577	2,938	1,917	6,22	2,095	1,733
BOGT	3,418	5,766	3,583	3,526	3,185	5,082	3,384	2,826
BOMJ	4,062	6,068	3,969	4,752	4,009	4,682	4,18	2,506
BRAZ	7,916	5,686	3,487	1,93	3,569	3,438	2,878	0,999
BRFT	4,813	7,241	4,644	7,096	4,865	5,55	4,953	4,092
CATA	1,774	1,126	1,598	1,52	0,778	1,694	1,036	1,307
CEFE	2,595	4,252	2,69	3,67	2,754	7,803	2,947	3,542
CFAG	1,774	3,348	1,966	2,262	1,599	3,552	1,975	1,933
CHPI	7,47	5,531	3,862	1,757	3,704	2,711	3,402	1,054
CONZ	5,179	3,692	3,133	1,685	3,461	3,543	3,142	1,379
COPO	1,611	3,757	1,786	2,015	1,657	3,552	1,926	1,666
CRAT	4,747	7,02	4,701	5,248	4,933	6,171	5,134	3,362

CRO1	5,795	4,98	5,314	2,429	4,224	3,894	4,62	1,886
CRUZ	1,799	4,531	1,881	2,337	1,353	4,297	1,581	2,004
CUIB	2,358	3,885	2,191	1,927	2,105	4,425	2,213	1,421
ESQU	4,451	6,149	4,12	6,413	1,856	4,591	2,387	4,356
GLPS	4,388	7,013	4,012	2,491	4,589	3,664	4,163	1,375
GUAT	7,454	7,786	7,28	5,97	6,171	5,553	6,744	4,345
GVAL	4,042	5,635	4,025	4,933	4,134	5,204	4,412	3,012
IGM1	3,01	3,414	3,406	2,706	2,913	3,843	3,408	2,439
IMBT	2,164	3,263	2,243	2,459	2,414	6,463	2,618	2,488
IMPZ	3,707	5,751	3,683	3,721	3,709	5,536	3,801	2,478
IQQE	1,081	2,509	0,881	0,793	0,943	2,303	0,633	0,741
ISPA	7,694	7,064	3,643	1,848	5,105	3,904	2,696	1,344
JAMA	6,295	7,835	7,125	5,644	5,947	6,682	6,874	4,616
KOUR	3,81	6,39	3,85	5,149	3,833	4,833	3,852	3,261
LHCL	3,224	3,774	3,697	2,926	2,968	3,696	3,454	2,71
LPGS	4,561	4,639	3,67	2,56	2,708	2,281	3,515	2,366
MABA	2,054	4,488	2,21	3,049	2,013	7,186	2,055	2,478
MANA	15,239	9,955	4,515	4,485	4,68	3,636	4,391	2,365
MAPA	3,633	5,93	3,679	3,763	3,675	5,645	3,746	2,565
MCLA	3,762	5,345	3,683	4,58	3,797	4,976	4,025	2,689
MECO	2,384	3,342	2,688	2,333	2,435	3,792	2,834	2,031
MGIN	2,375	3,164	2,524	2,654	2,804	6,803	3,15	2,755
MGUB	2,071	3,02	2,21	2,414	2,473	6,574	2,751	2,384
MPLA	3,695	2,807	4,169	3,723	3,919	4,331	4,449	3,323
MSCG	1,557	2,646	1,727	1,436	1,9	5,829	2,147	1,712
MZAC	2,437	3,561	2,83	2,437	2,369	3,685	2,835	2,106
MZAE	1,966	3,533	2,24	2,433	1,761	3,67	2,188	2,033
MZAS	2,122	3,569	2,358	2,531	1,876	3,628	2,272	2,096
NAUS	2,494	5,204	2,557	2,355	2,237	5,005	2,311	1,792
NEIA	3,418	4,402	3,521	3,654	3,502	4,808	3,856	2,713
OHI2	9,1	6,406	9,646	6,608	7,138	5,932	7,823	5,632
ONRJ	3,655	4,664	3,722	3,78	3,854	5,785	4,244	3,049
PALM	9,219	6,465	9,8	6,76	7,173	5,904	7,882	5,74
PARA	4,042	4,889	4,111	4,363	3,974	2,418	4,225	2,507
PARC	6,34	6,122	6,955	5,601	5,433	5,573	6,137	4,827
PDES	6,605	3,497	7,191	5,549	5,847	3,51	6,28	5,318
PEPE	2,942	4,659	3,104	4,357	3,46	7,892	3,74	3,539
PMB1	4,352	7,191	4,645	4,355	4,51	5,913	4,673	3,103
POAL	3,222	4,096	3,606	3,606	3,286	5,007	3,777	2,46
POLI	3,237	4,223	3,3	3,248	3,391	5,426	3,748	2,636
POVE	1,687	4,273	1,65	2,178	1,376	4,234	1,324	1,631
PPTTE	2,883	4,144	2,916	3,018	2,877	4,471	3,155	2,145
PUR3	6,446	7,555	7,433	4,145	6,734	6,98	7,431	4,516
RECF	5,19	7,618	5,197	6,759	5,486	6,086	5,712	3,767
RIO2	5,897	6,258	6,23	5,496	4,518	5,398	5,135	4,194
RIOB	1,369	3,807	1,425	1,431	0,987	4,649	1,107	1,181
RIOD	4,011	5,115	4,072	4,452	4,105	5,2	4,44	3,053
RIOG	8,282	5,075	9,037	6,799	7,087	5,262	7,666	7,326

RIOP	3,153	7,282	3,41	4,653	2,687	5,569	2,946	2,008
RWSN	4,325	4,198	4,842	3,589	3,927	4,297	4,522	3,122
SAGA	2,225	4,994	2,33	2,758	1,622	5,497	1,842	1,479
SALV	4,939	6,444	4,837	6,319	5,229	5,701	5,426	3,28
SANT	3,66	4,787	2,545	1,229	3,298	3,631	2,634	1,046
SAVO	2,756	4,873	2,887	4,232	2,944	8,447	3,144	3,994
SCUB	6,892	4,318	4,495	1,893	3,503	3,45	4,341	1,387
SMAR	2,99	3,989	3,285	3,075	3,097	4,22	3,474	2,384
SRLP	2,55	3,278	2,757	2,246	1,417	2,539	1,981	1,862
SRNW	4,013	6,544	4,215	3,656	4,087	5,385	4,212	2,834
SRZN	4,077	6,681	4,257	3,906	4,178	5,404	4,298	2,841
SSA1	2,874	4,908	3,002	4,276	3,052	8,472	3,278	4,11
SSIA	6,018	6,542	5,822	5,684	4,72	4,262	5,195	3,748
TERO	1,795	0,747	1,685	1,334	0,788	1,442	1,075	1,123
TOPL	1,861	3,917	1,986	2,813	1,934	7,041	1,941	2,457
TUCU	1,888	3,709	2,141	2,04	1,903	3,916	2,229	2,027
UBAT	3,915	5,232	3,983	4,052	3,987	5,549	4,355	3,194
UBER	3,193	4,437	3,132	3,62	3,179	4,607	3,397	2,275
UCOR	2,317	3,29	2,68	2,087	2,299	3,731	2,752	2,021
UFPR	1,804	3,097	1,844	2,349	2,09	6,414	2,252	2,257
UNRO	2,73	3,308	3,106	2,292	2,677	3,801	3,153	2,191
UNSA	4,169	4,302	1,621	0,891	2,315	3,018	1,712	0,818
UNSJ	2,026	3,618	2,378	2,263	1,943	3,83	2,425	2,028
UYMO	2,97	2,776	3,154	1,88	1,987	2,751	2,491	1,894
UYRO	2,755	2,845	2,997	2,291	1,968	3,602	2,495	1,914
UYTA	2,627	2,517	2,794	1,875	1,512	1,988	2,044	1,782
VALP	1,567	4,175	1,728	2,719	1,03	3,316	1,432	2,006
VARG	3,698	4,68	3,634	4,061	3,633	4,761	3,94	2,646
VBCA	3,564	3,734	4,08	3,037	3,34	3,975	3,912	2,763
VESL	15,953	7,37	16,628	6,432	10,227	5,845	11,322	5,242
VICO	4,393	5,824	4,536	5,34	4,302	4,723	4,622	2,706
Promedio	3,669	4,278	3,606	3,021	3,015	4,449	3,337	2,428
Desviación Estándar	2,859	1,512	2,983	3,073	2,163	2,112	1,991	0,937



**ANEXO III**  
**Coordenadas y velocidades solución SUR09P01**

Estación	X	Y	Z	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>	$\sigma V_x$	$\sigma V_y$	$\sigma V_z$
ALUM 41536M001	2253309,66760	-5206250,77740	-2911367,34310	0,00682	0,01370	0,00838	-0,00260	0,00620	0,01450	0,01616	0,03247	0,01986
AMHU 41646M001	2868209,93620	-5636111,81920	-827362,80780	0,00793	0,01380	0,00387	0,04540	-0,10640	-0,01210	0,00468	0,00814	0,00228
ANIC 41713S001	1608639,62340	-4816369,72690	-3847796,51910	0,00025	0,00059	0,00047	0,01930	-0,00690	0,00370	0,00028	0,00068	0,00054
AREQ 42202M005	1942826,20950	-5804070,33520	-1796884,24810	0,00027	0,00067	0,00026	0,00100	-0,00540	0,00750	0,00016	0,00040	0,00016
AUTE 41515S001	1360918,90510	-3420457,94260	-5191175,20700	0,00047	0,00105	0,00152	0,01240	-0,00730	0,00480	0,00028	0,00063	0,00092
AZUL 41529M001	2566993,12570	-4424962,80070	-3796807,75180	0,00110	0,00172	0,00146	0,00850	-0,00870	0,00310	0,00056	0,00088	0,00075
BOAV 41636M001	3117452,20080	-5555487,83050	314480,83660	0,00963	0,01644	0,00277	0,00260	-0,01850	0,01740	0,00575	0,00980	0,00165
BOGT 41901M001	1744398,99230	-6116037,37620	512731,75790	0,00023	0,00064	0,00015	-0,01370	0,04880	0,01330	0,00016	0,00045	0,00010
BOMJ 41612M001	4510195,82440	-4268322,35420	-1453035,19010	0,00060	0,00058	0,00026	-0,00120	-0,00260	0,01320	0,00050	0,00049	0,00021
BRAZ 41606M001	4115014,08070	-4550641,58300	-1741443,92200	0,00020	0,00021	0,00015	0,00010	-0,00530	0,01210	0,00013	0,00014	0,00010
BRFT 41602M002	4985393,52990	-3954993,43330	-428426,66920	0,00048	0,00041	0,00015	-0,00310	-0,00130	0,00790	0,00034	0,00029	0,00010
CATA 41534M001	2302597,66130	-5117329,05520	-3022751,27450	0,01624	0,03173	0,02022	0,00280	-0,01210	0,00430	0,00686	0,01340	0,00864
CEFE 41637M001	4562488,48350	-3871935,82040	-2200001,47170	0,01088	0,00957	0,00615	0,02400	-0,01100	-0,00080	0,00648	0,00570	0,00366
CHPI 41609M003	4164613,89130	-4162456,90410	-2445028,77430	0,00019	0,00020	0,00015	0,00330	-0,00720	0,01000	0,00013	0,00013	0,00010
CONZ 41719M002	1492007,68990	-4887910,72980	-3803639,88840	0,00014	0,00021	0,00018	0,03700	-0,00270	0,01610	0,00009	0,00014	0,00012
COPO 41714S001	1907040,81340	-5337379,02490	-2916334,78940	0,00027	0,00061	0,00036	0,02190	0,00200	0,01700	0,00017	0,00040	0,00023
CRAT 41619M001	4888826,03420	-4017957,46080	-798308,91520	0,00200	0,00050	0,00030						
CRO1 43201M001	2607771,24210	-5488076,66970	1932767,82560	0,00017	0,00024	0,00016	0,00670	0,01110	0,01230	0,00011	0,00016	0,00011
CRUZ 41641M001	1883105,44020	-6036606,23380	-839206,21870	0,00531	0,01433	0,00331	0,01160	-0,07460	0,00290	0,00316	0,00854	0,00197
CUIB 41603M001	3430711,39570	-5099641,59870	-1699432,83560	0,00039	0,00054	0,00024	-0,00340	-0,00400	0,01280	0,00035	0,00049	0,00021
ESQU 41533M001	1498229,08630	-4432287,10690	-4321164,28340	0,01377	0,03230	0,03084	-0,01440	0,01720	0,02330	0,00580	0,01362	0,01305
GLPS 42005M002	-33801,49690	-6377516,52570	-82154,35900	0,00015	0,00026	0,00013	0,05060	0,00210	0,01020	0,00010	0,00017	0,00009
GUAT 40901S001	-56063,56540	-6174978,67600	1596665,27590	0,00018	0,00078	0,00027	0,00500	0,00670	0,00320	0,00017	0,00079	0,00026
GVAL 41623M001	4490200,80250	-4036984,96770	-2048288,29890	0,00043	0,00041	0,00025	0,00380	-0,00550	0,01190	0,00041	0,00038	0,00023
IGMT 41505M003	2751804,04910	-4479879,31870	-3598922,49810	0,00026	0,00040	0,00032	0,00640	-0,00930	0,00530	0,00019	0,00028	0,00023
IMBT 41638M001	3714771,55270	-4221851,12010	-2999473,84120	0,01069	0,01203	0,00894	0,00380	-0,01380	0,00630	0,00636	0,00716	0,00532
IMPZ 41615M001	4289556,42380	-4680884,95960	-606347,23260	0,00100	0,00040	0,00200						
IQOE 41708S002	2034208,53740	-5629172,33120	-2196141,84270	0,00252	0,00609	0,00276	0,02100	0,01190	0,01810	0,00118	0,00285	0,00129
ISPA 41703M007	-1881703,46220	-5359979,78310	-2890599,25780	0,00029	0,00029	0,00029	0,06530	-0,01820	-0,00430	0,00015	0,00017	0,00015
JAMA 42601S001	1388059,85540	-5909149,00820	1951963,88560	0,00034	0,00100	0,00041	0,00160	0,02620	0,00060	0,00065	0,00204	0,00081
KOUR 97301M210	3839591,37940	-5059567,57120	579957,08120	0,00036	0,00046	0,00015	-0,00260	-0,00170	0,01060	0,00026	0,00033	0,00011
LHCL 41518S001	2079355,62500	-4582903,48740	-3905925,65150	0,00028	0,00053	0,00045	0,00470	-0,00810	0,00550	0,00018	0,00034	0,00028

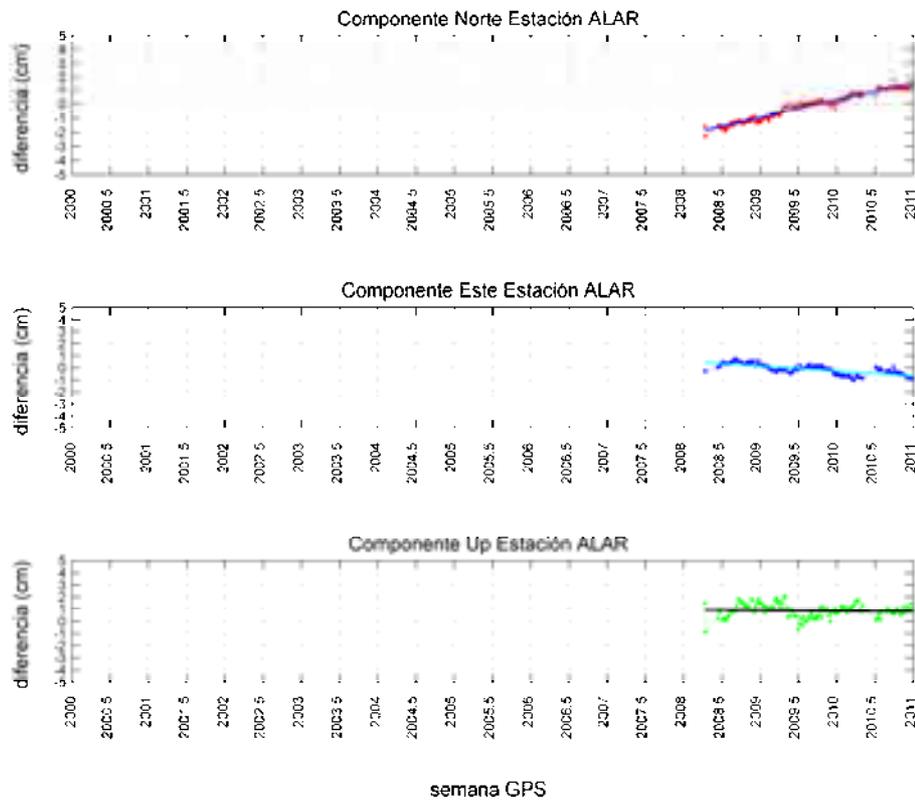
LPGS 41510M001	2780103,01000	-4437418,94680	-3629404,48910	0,00017	0,00022	0,00020	0,00470	-0,00690	0,00790	0,00011	0,00014	0,00013
MABA 41642M001	4156055,61060	-4801656,49890	-592100,55590	0,00961	0,01096	0,00297	0,06010	-0,06110	0,01040	0,00572	0,00651	0,00177
MANA 41201S001	407981,85660	-6222925,71600	1333528,98490	0,00016	0,00027	0,00016	0,00800	0,00200	0,00800	0,00010	0,00017	0,00010
MAPA 41629M001	4005461,13900	-4963550,32940	5162,33610	0,00047	0,00057	0,00016	-0,00470	-0,00040	0,01140	0,00041	0,00050	0,00013
MCLA 41624M001	4404519,58740	-4235798,42640	-1823409,07500	0,00040	0,00041	0,00023	0,00390	-0,00760	0,01090	0,00038	0,00038	0,00020
MECO 41526M001	2946988,57720	-4730056,99250	-3091864,99190	0,00028	0,00041	0,00029	0,00460	-0,00770	0,00830	0,00023	0,00034	0,00023
MGIN 41647M001	4076879,93670	-4270390,93850	-2407418,02570	0,00749	0,00780	0,00490	0,02360	-0,03000	-0,00080	0,00454	0,00473	0,00297
MIGUB 41652M001	4019130,59280	-4504012,56050	-2055168,69490	0,00692	0,00763	0,00411	0,03620	-0,03750	-0,00520	0,00420	0,00463	0,00249
MPLA 41521M001	2700316,84950	-4243736,74660	-3908569,71400	0,00046	0,00067	0,00062	0,00710	-0,00870	0,00870	0,00074	0,00110	0,00101
MSCG 41649M001	3468912,07140	-4870550,45250	-2213735,42570	0,00070	0,00100	0,00050						
MZAC 41503M001	1932262,71570	-5001226,54040	-3444667,81880	0,00022	0,00045	0,00032	0,01190	-0,00500	0,00910	0,00015	0,00031	0,00022
MZAE 41530M001	1987261,25810	-4955975,72890	-3477976,95950	0,00078	0,00164	0,00118	0,00880	-0,00370	0,00670	0,00041	0,00086	0,00062
MZAS 41528M001	1940230,20000	-4884145,44120	-3603203,69710	0,00028	0,00056	0,00042	0,00900	-0,00640	0,00770	0,00018	0,00035	0,00027
NAUS 41614M002	3179409,36520	-5519130,67690	-334110,06880	0,00032	0,00049	0,00015	-0,00990	0,01160	0,01080	0,00028	0,00045	0,00012
NEIA 41620M002	3875254,99470	-4292588,74640	-2681108,68790	0,00051	0,00057	0,00038	0,00350	-0,00660	0,01060	0,00048	0,00053	0,00036
OH12 66008M005	1525811,92740	-2432478,22610	-5676165,58810	0,00020	0,00029	0,00051	0,01980	-0,00270	-0,00440	0,00013	0,00019	0,00034
ONRJ 41635M001	4283638,36520	-4026028,86100	-2466096,74350	0,00071	0,00068	0,00046	-0,00040	-0,00450	0,01250	0,00059	0,00057	0,00038
PALM 66005M002	1192671,96100	-2450887,63230	-5747096,03570	0,00018	0,00028	0,00051	0,01820	-0,00740	-0,00610	0,00012	0,00020	0,00036
PARA 41610M001	3763751,65250	-4365113,83350	-2724404,59610	0,00084	0,00096	0,00064	-0,00720	0,00610	0,02330	0,00287	0,00327	0,00219
PARC 41716S001	1255992,46670	-3622975,14800	-5079719,24580	0,00020	0,00040	0,00051	0,00780	-0,00740	0,00720	0,00013	0,00026	0,00033
PDES 41524M001	1753203,67100	-3922031,13470	-4698513,49030	0,00041	0,00078	0,00089	0,00500	0,00130	0,01590	0,00111	0,00214	0,00245
PEPE 41650M001	4785329,91690	-4087942,49440	-1033193,90480	0,00884	0,00785	0,00295	0,02290	-0,01110	0,00800	0,00535	0,00475	0,00178
PMB1 43702S001	3626394,16780	-5206998,17230	643353,14750	0,00057	0,00078	0,00022	-0,00800	0,00330	0,01060	0,00104	0,00143	0,00035
POAL 41616M001	3467519,41880	-4300378,57510	-3177517,64750	0,00050	0,00060	0,00046	0,00500	-0,00530	0,01320	0,00043	0,00052	0,00040
POLI 41630M001	4010099,52100	-4259927,34880	-2533538,70740	0,00077	0,00081	0,00053	0,00240	-0,00660	0,01180	0,00061	0,00065	0,00042
POVE 41628M001	2774265,61840	-5662060,15070	-959415,89300	0,00033	0,00059	0,00019	-0,00400	-0,00110	0,00990	0,00021	0,00037	0,00012
PPTTE 41611M002	3687624,36790	-4620818,70680	-2386880,27800	0,00039	0,00048	0,00028	0,00450	-0,00680	0,01130	0,00038	0,00047	0,00027
PUR3 82001S003	2358177,92960	-5573619,62840	2007083,99830	0,00064	0,00137	0,00058	0,00310	0,00480	0,02540	0,00297	0,00651	0,00271
REFC 41617M001	5176588,62050	-3618162,16710	-887363,81610	0,00065	0,00049	0,00020	-0,00680	-0,00170	0,01210	0,00058	0,00044	0,00017
RIOD 41507M006	1429907,81380	-3495354,84060	-5122898,62230	0,00024	0,00044	0,00057	0,00820	-0,00950	0,00510	0,00015	0,00028	0,00035
RIOB 41645M001	2373576,77560	-5817088,34750	-1096515,66100	0,00689	0,01235	0,00367	0,01700	-0,08740	-0,00810	0,00351	0,00737	0,00219
RIOD 41608M001	4280294,88620	-4034431,26460	-2458141,28610	0,00050	0,00049	0,00032	-0,00080	-0,00510	0,01380	0,00046	0,00045	0,00030
RIOG 41507M004	1429907,80780	-3495354,84190	-5122898,62340	0,00041	0,00078	0,00107	-0,00110	-0,00470	0,00890	0,00213	0,00416	0,00575
RIOP 42006M001	1255144,97200	-6253609,45980	-1825669,81990	0,00044	0,00163	0,00026	0,00260	-0,00710	0,00370	0,00044	0,00172	0,00023

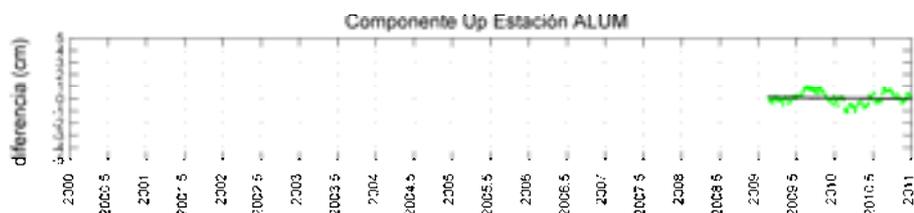
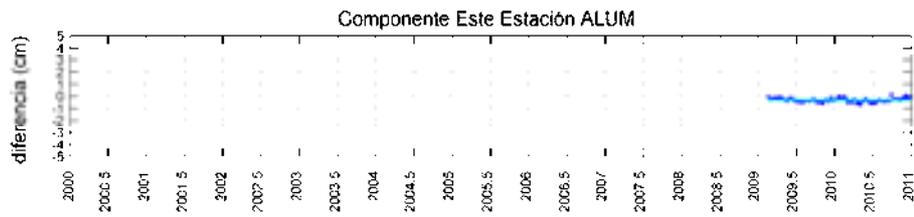
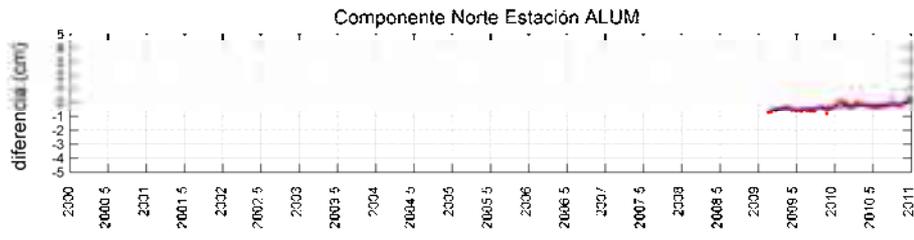
RWSN 41513M001	1956973,43860	-4217335,33280	-4351745,47200	0,00025	0,00045	0,00044	0,00270	-0,00850	0,00650	0,00017	0,00031	0,00030
SAGA 41639M001	2486243,75350	-5873685,30190	-15906,73180	0,00764	0,01644	0,00250	0,01060	-0,06070	0,01920	0,00455	0,00980	0,00149
SALV 41618M001	4863495,72850	-3870312,37900	-1426347,71760	0,00076	0,00063	0,00030	0,00380	-0,00330	0,01300	0,00129	0,00106	0,00048
SANT 41705M003	1759693,59190	-5044574,18030	-3468320,90550	0,00014	0,00022	0,00017	0,02340	-0,00380	0,01310	0,00009	0,00014	0,00011
SAVO 41643M001	4870283,74810	-3864605,31100	-1418872,52410	0,01001	0,00838	0,00416	0,00680	0,00580	0,01140	0,00595	0,00499	0,00247
SCUB 40701M001	1474538,07670	-5811243,27350	2168958,83320	0,00015	0,00025	0,00016	-0,00620	0,00100	0,00450	0,00010	0,00016	0,00011
SMAR 41621M001	3280748,41880	-4468909,78100	-3143408,60340	0,00036	0,00047	0,00034	-0,00030	-0,00320	0,01270	0,00031	0,00041	0,00030
SRLP 41532M001	2242229,73900	-4617565,93510	-3783897,72420	0,00389	0,00767	0,00622	0,00320	-0,01110	-0,00220	0,00177	0,00349	0,00284
SRNW 43703M001	3455962,49000	-5320074,90130	656216,07270	0,00049	0,00071	0,00020	-0,00600	-0,00210	0,01130	0,00067	0,00099	0,00024
SRZN 43701S005	3623419,98380	-5214015,45460	602359,22750	0,00050	0,00068	0,00020	-0,00410	-0,00070	0,01190	0,00068	0,00094	0,00023
SSA1 41644M001	4863840,30680	-3871158,63240	-1422726,68860	0,01453	0,01198	0,00541	0,02290	-0,00360	0,00960	0,00869	0,00712	0,00322
SSJA 41401S001	95567,01750	-6197785,59460	1500590,55910	0,00029	0,00120	0,00040	0,00830	0,00260	0,00300	0,00025	0,00104	0,00034
TERO 41531M001	2452644,46670	-5086396,46450	-2955957,24830	0,01873	0,03472	0,02193	0,01230	-0,03280	0,01390	0,00789	0,01463	0,00924
TOPL 41648M001	4174345,59670	-4690236,71110	-1118921,32380	0,00929	0,01020	0,00378	0,03980	-0,04360	0,00420	0,00552	0,00606	0,00225
TUCU 41520S001	2386117,19630	-5171223,30510	-2862949,08750	0,00037	0,00075	0,00044	0,00280	0,00110	0,01170	0,00027	0,00055	0,00032
UBAT 41627M001	4129567,71270	-4146742,98150	-2527616,41020	0,00100	0,00101	0,00064	0,02260	0,01050	0,01350	0,00091	0,00092	0,00059
UBER 41625M001	4014997,22150	-4509022,45720	-2052040,61000	0,00037	0,00042	0,00024	0,00240	-0,00590	0,00990	0,00035	0,00039	0,00022
UCOR 41502M001	2371430,05360	-4904119,99440	-3307377,43230	0,00028	0,00050	0,00035	0,00600	-0,00520	0,01330	0,00018	0,00033	0,00023
UFPR 41610M002	3763751,67150	-4365113,85350	-2724404,61420	0,00868	0,00982	0,00659	0,01320	-0,02090	0,00100	0,00517	0,00585	0,00393
UNRO 41525M001	2627448,20430	-4668383,19640	-3450213,47290	0,00028	0,00045	0,00034	0,00560	-0,00840	0,00710	0,00020	0,00032	0,00024
UNSA 41514M001	2412830,45080	-5271936,73760	-2652209,00570	0,00016	0,00023	0,00016	0,00560	-0,00440	0,01190	0,00011	0,00015	0,00011
UNSJ 41527M001	1987485,04710	-5085493,35670	-3317557,47240	0,00034	0,00072	0,00049	0,01240	-0,00280	0,01080	0,00021	0,00045	0,00031
UYMO 42301M001	2909133,01790	-4355451,30550	-3627801,19110	0,00218	0,00310	0,00260	0,00120	-0,01200	0,01220	0,00105	0,00149	0,00125
UYRO 42303M001	3144469,65830	-4258022,08910	-3546571,93650	0,00211	0,00275	0,00230	0,00520	-0,01370	0,00150	0,00106	0,00138	0,00116
UYTA 42302M001	3042868,19140	-4500645,47040	-3330675,38630	0,00571	0,00803	0,00609	0,00460	-0,00950	0,00590	0,00259	0,00364	0,00276
VALP 41712S001	1687310,37480	-5079964,52360	-3456509,28790	0,00218	0,00540	0,00381	0,02550	-0,00690	0,02570	0,00101	0,00251	0,00177
VARG 41626M001	4185518,28330	-4229235,80990	-2327739,56830	0,00041	0,00042	0,00027	0,00030	-0,00400	0,01110	0,00039	0,00040	0,00025
VBCA 41512M001	2319240,82950	-4411743,95770	-3966484,09770	0,00029	0,00049	0,00044	0,00180	-0,00600	0,01070	0,00020	0,00034	0,00030
VESL 66009M001	2009329,82400	-99741,49570	-6033158,41350	0,00345	0,00233	0,01001	0,00460	0,01390	-0,00210	0,00156	0,00106	0,00454
VICO 41613M001	4373283,31520	-4059639,08160	-2246959,63390	0,00040	0,00030	0,00100						

**ANEXO IV:**  
***Series de coordenadas de las estaciones de la red SIRGAS-CON-D***

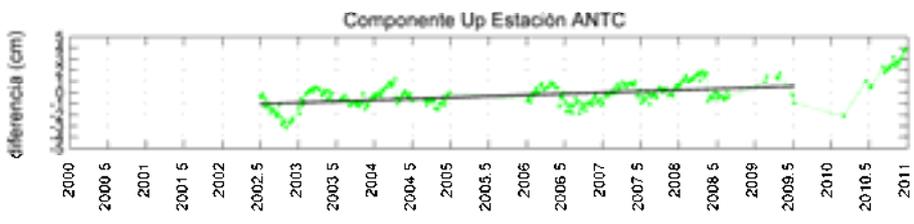
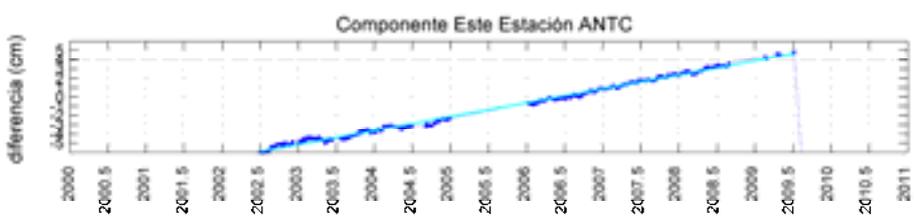
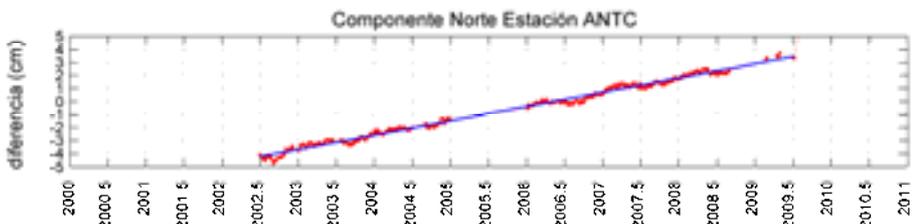
---

Los gráficos que se adjuntan presentan las series de tiempo de las coordenadas en Norte, Este y Altura elipsoidal semanales fijas para cada estación GPS. Para un periodo de 10 años.

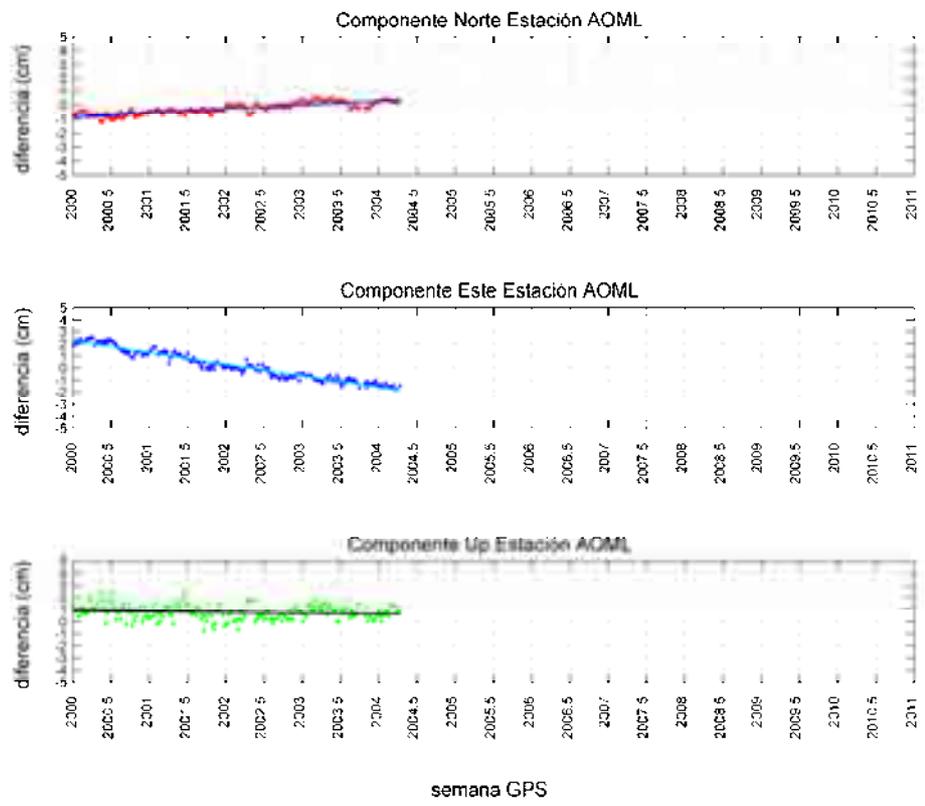
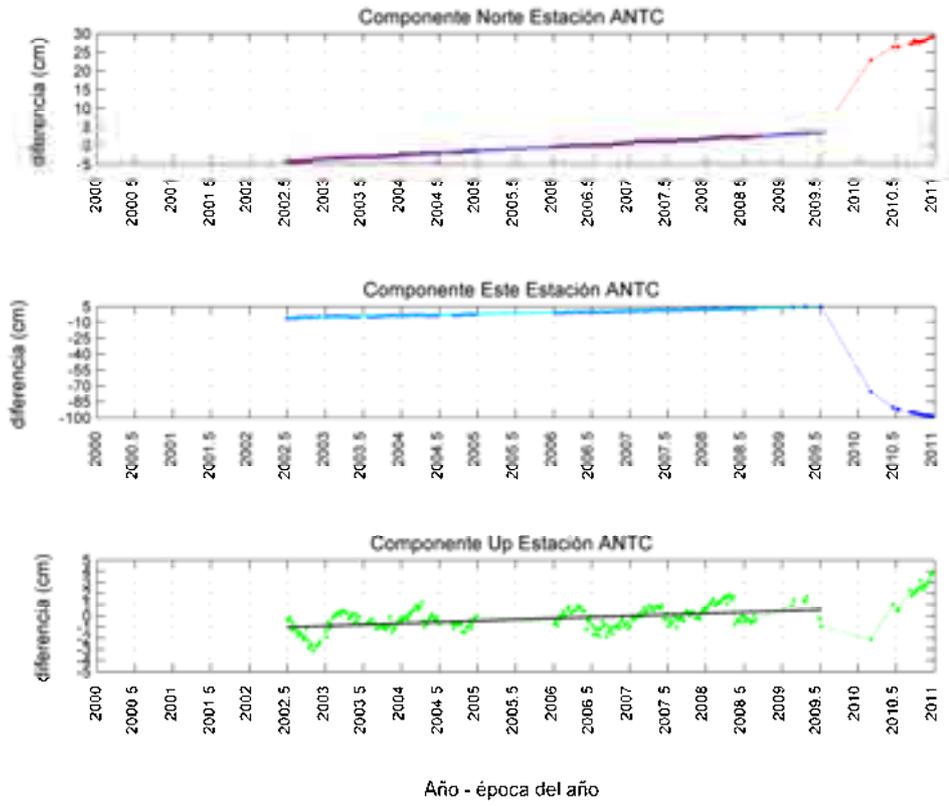


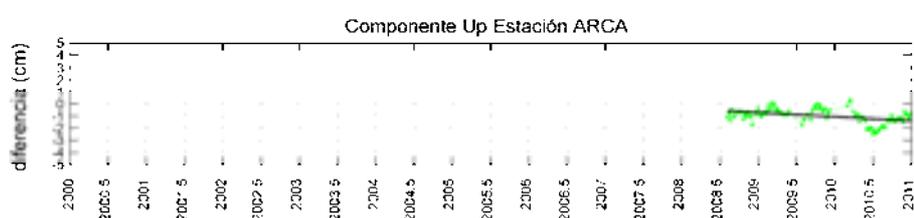
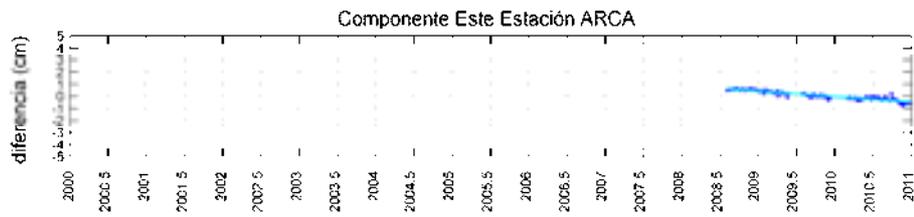
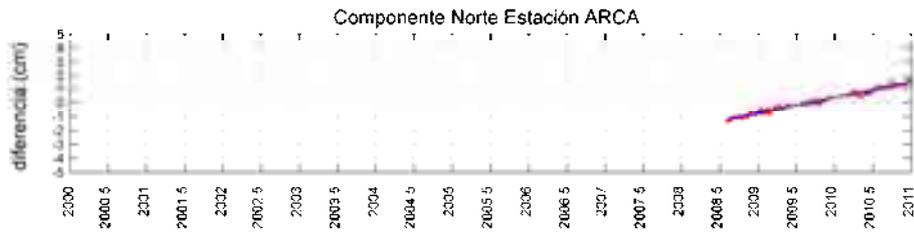


semana GPS

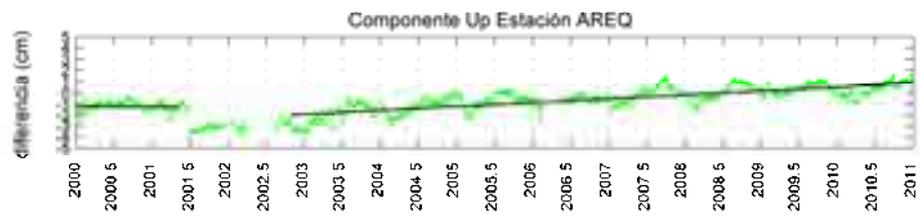
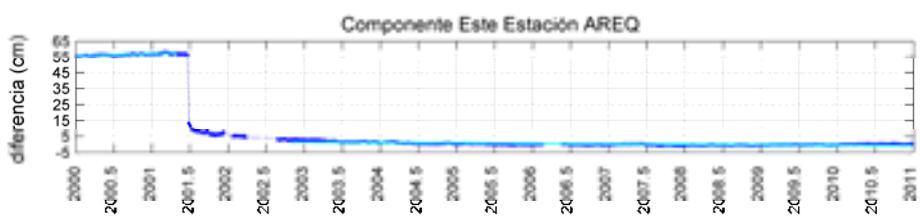
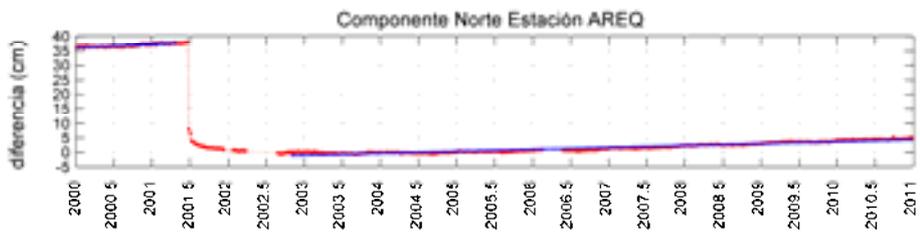


Año - época del año

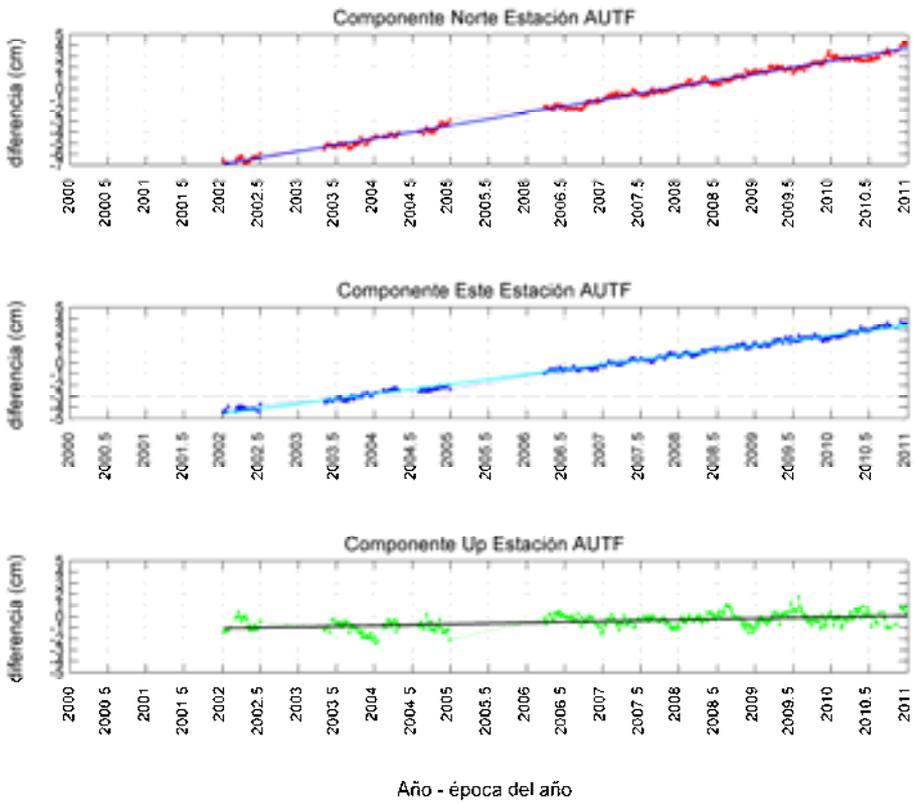
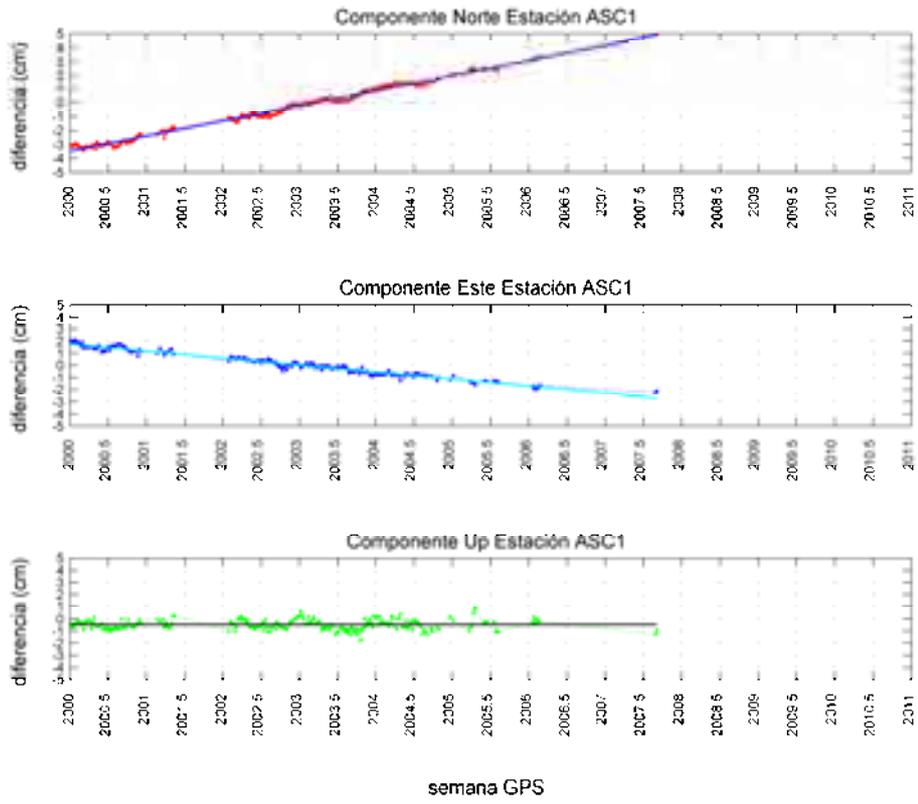


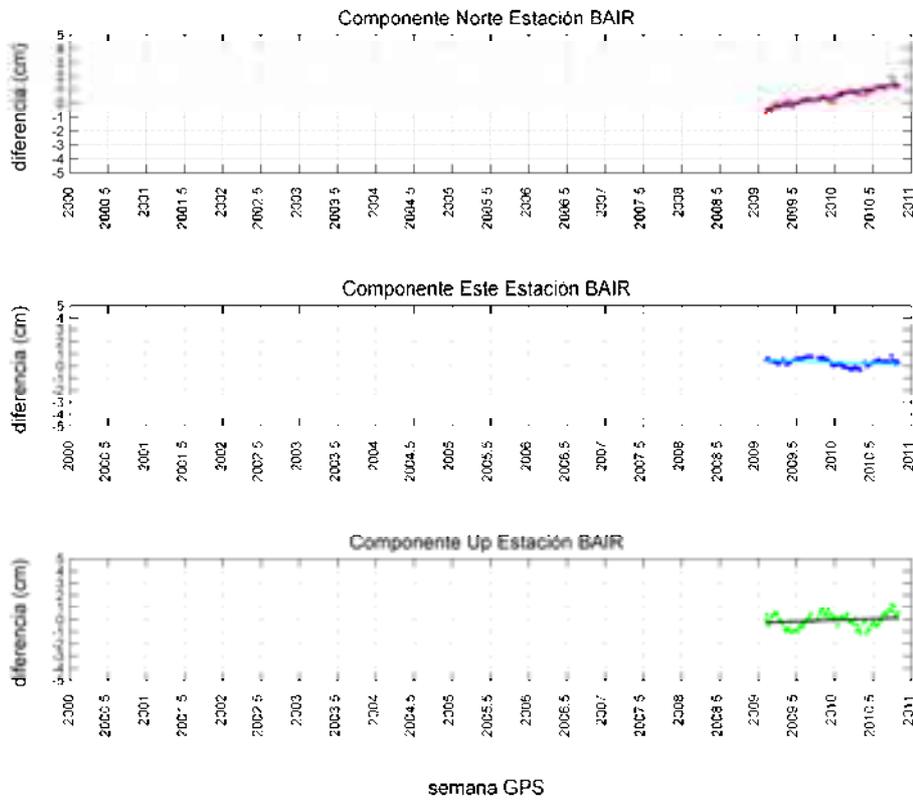
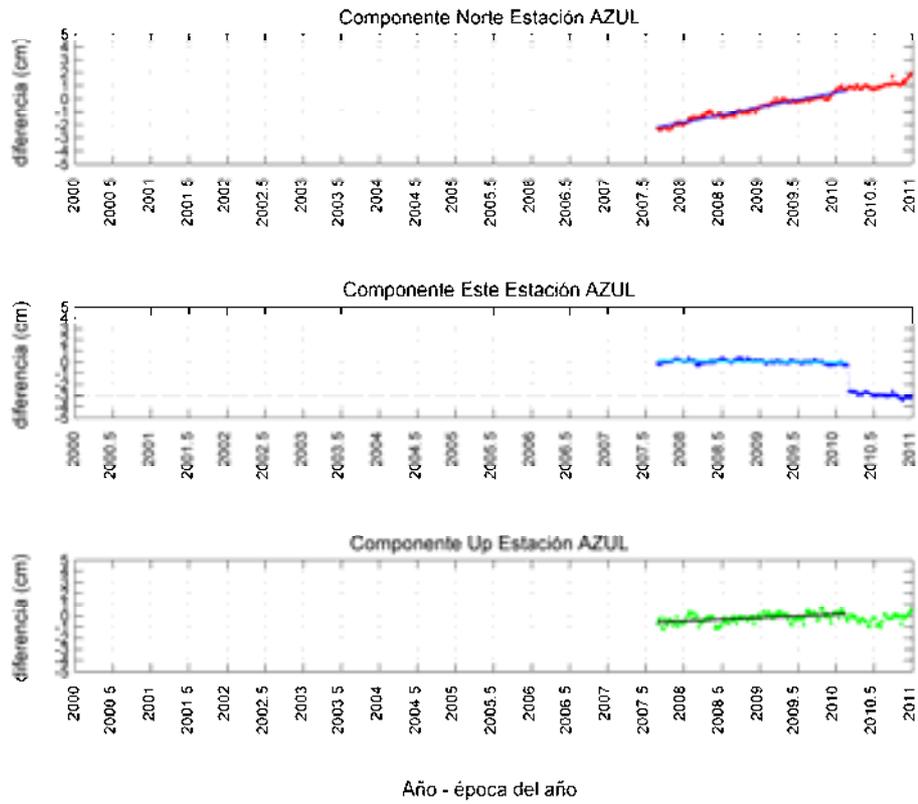


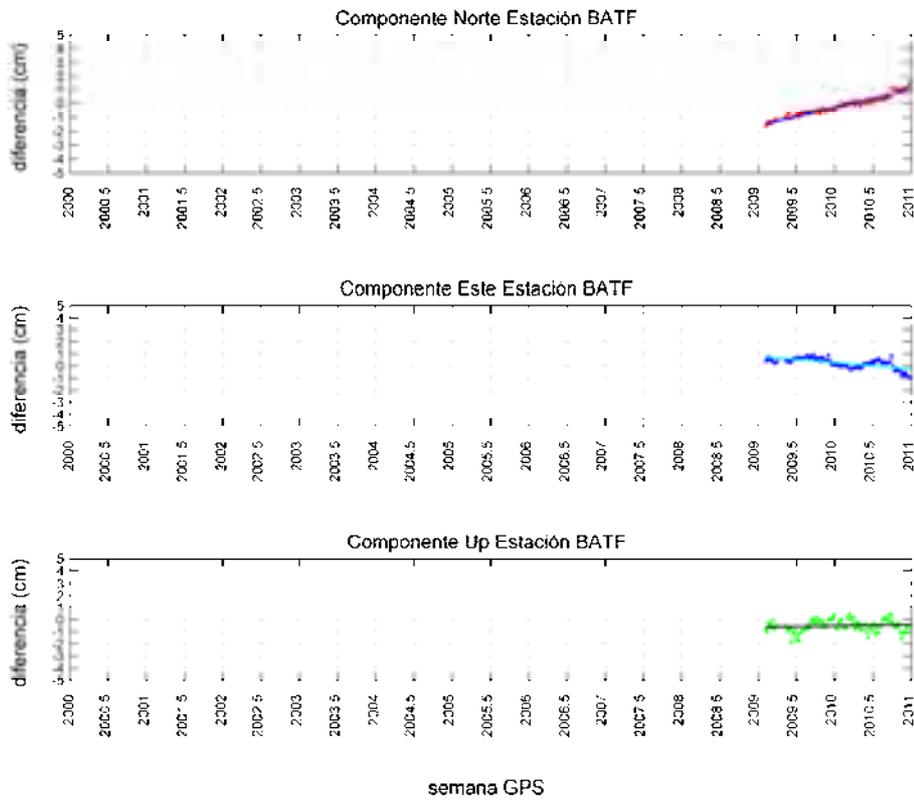
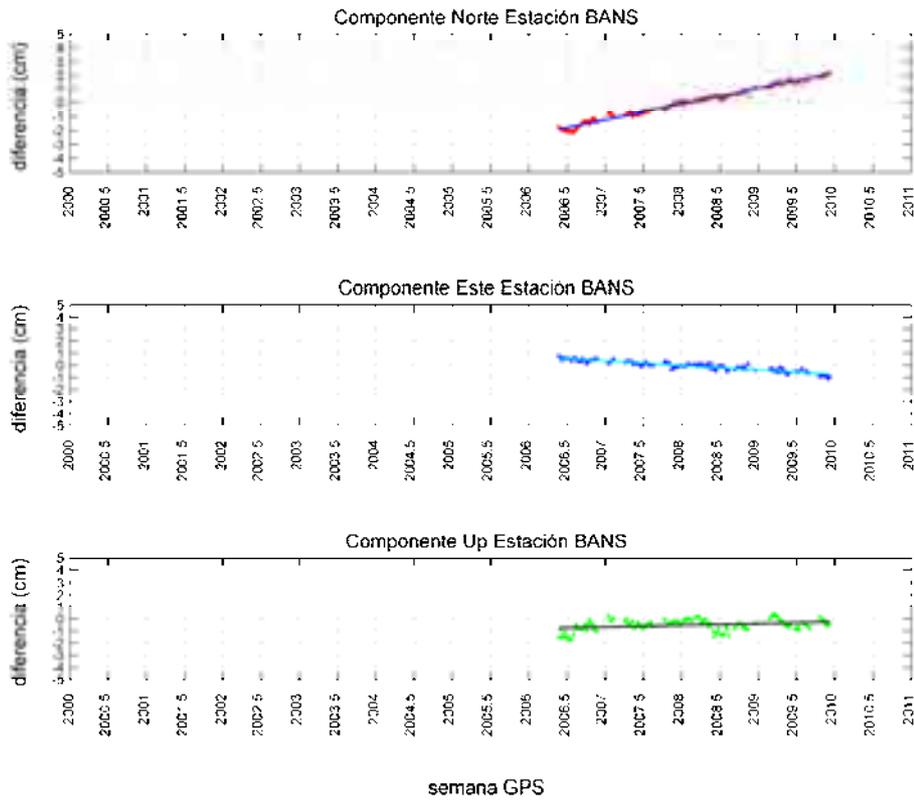
semana GPS

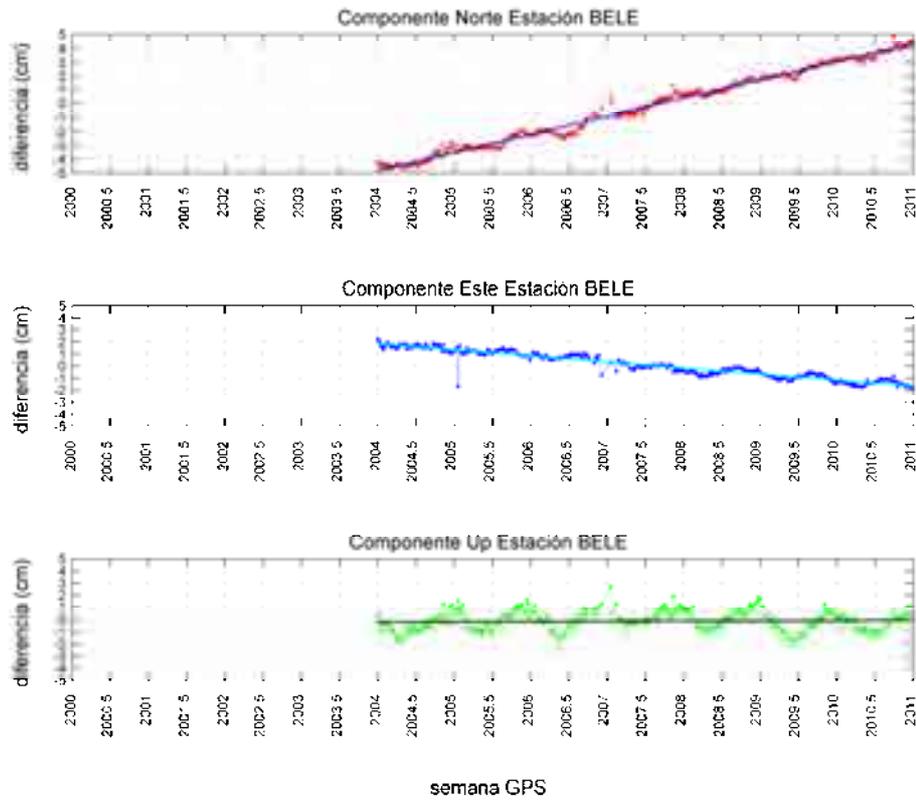
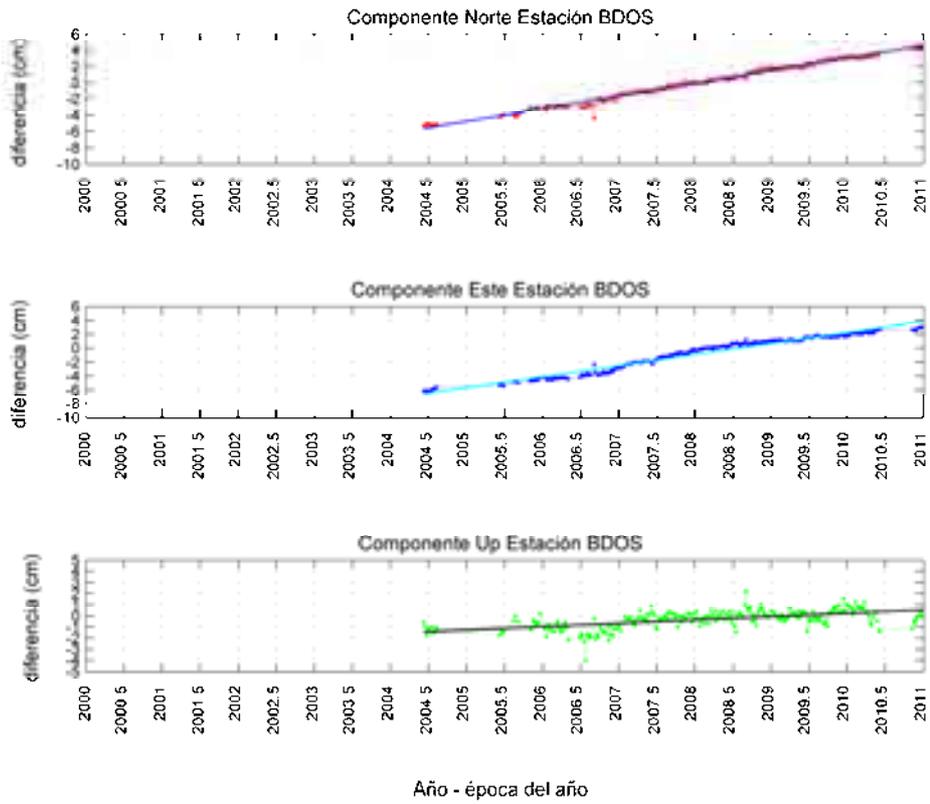


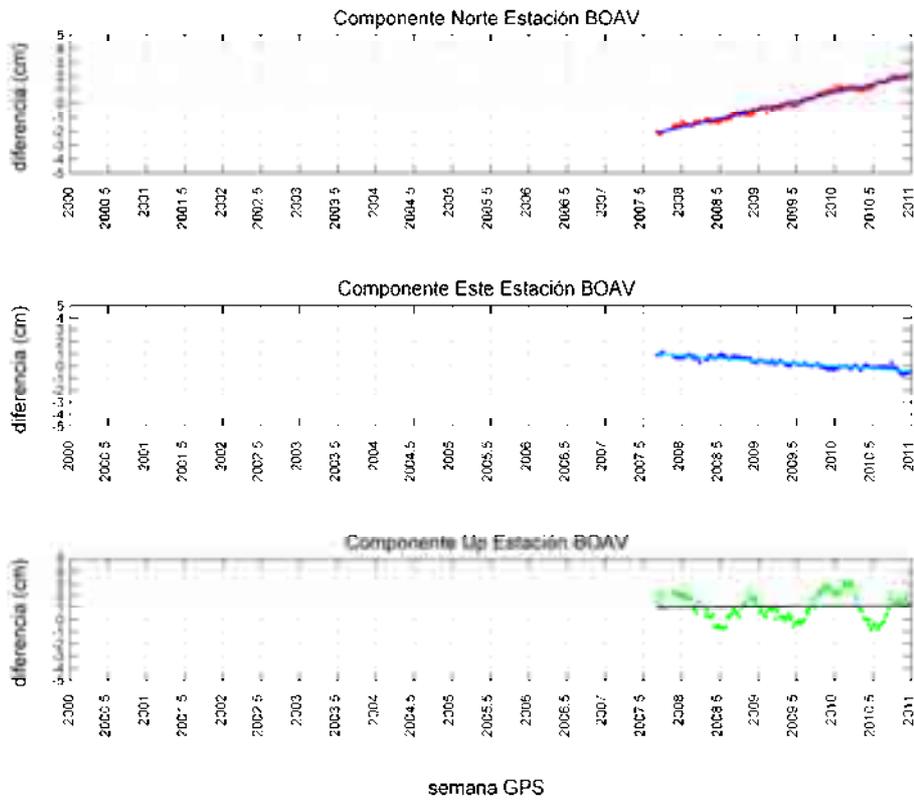
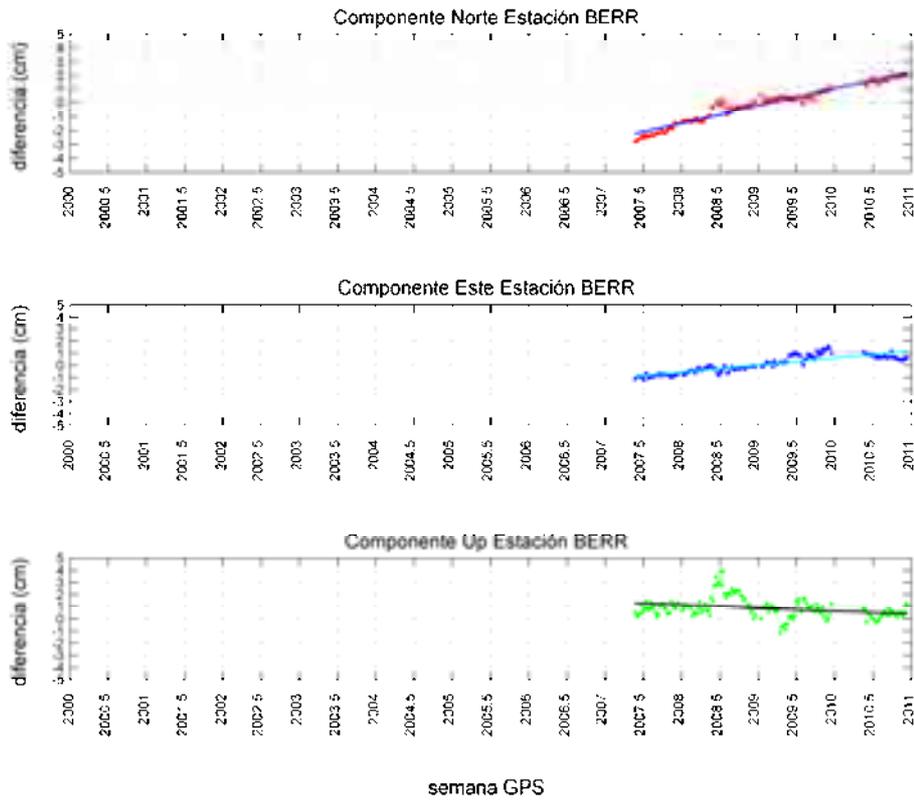
Año - época del año

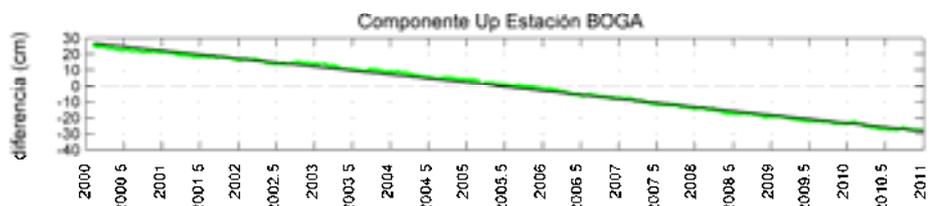
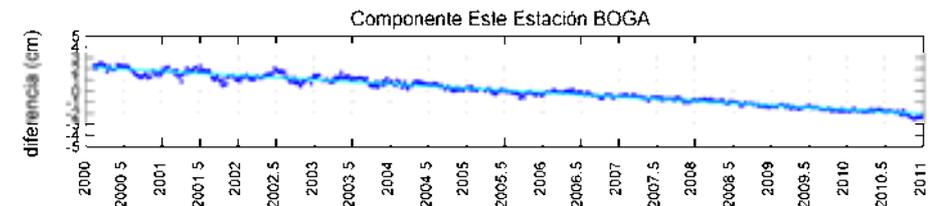
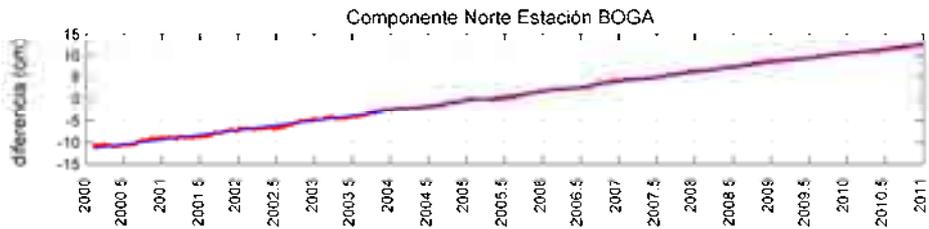




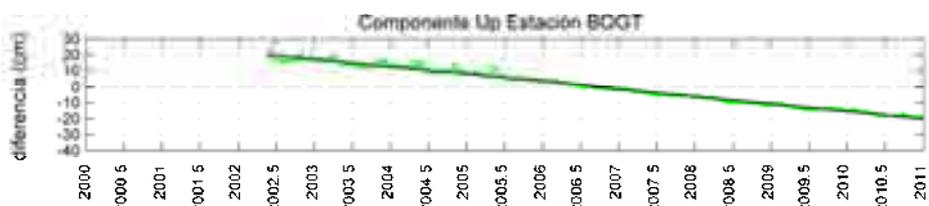
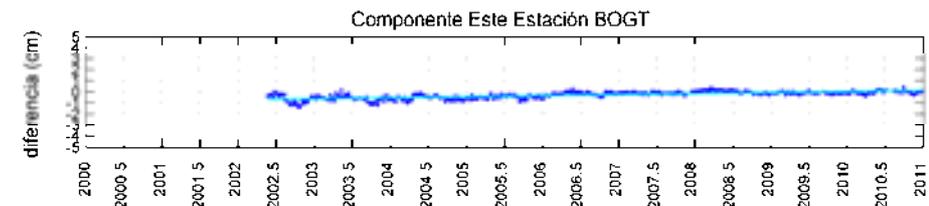
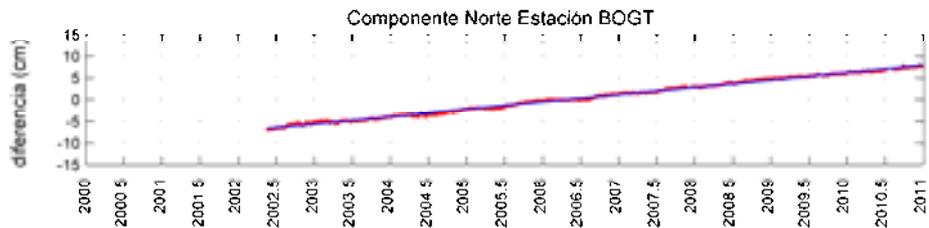




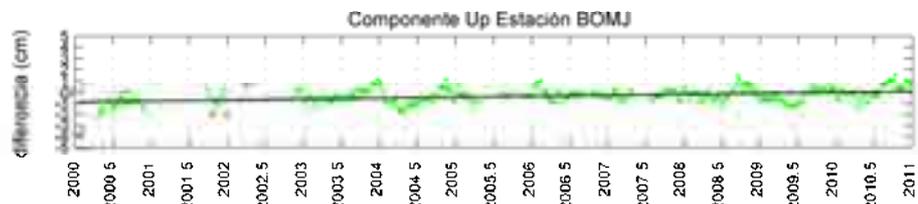
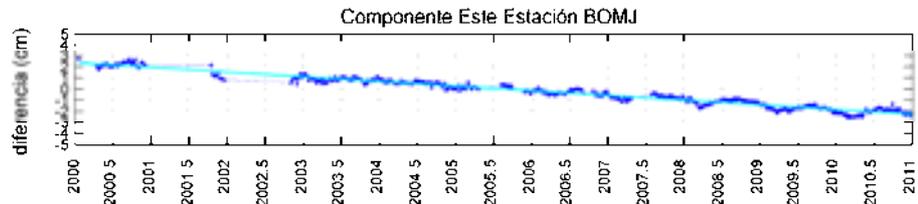
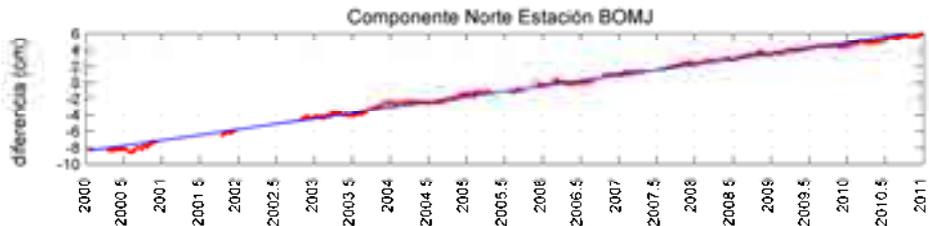




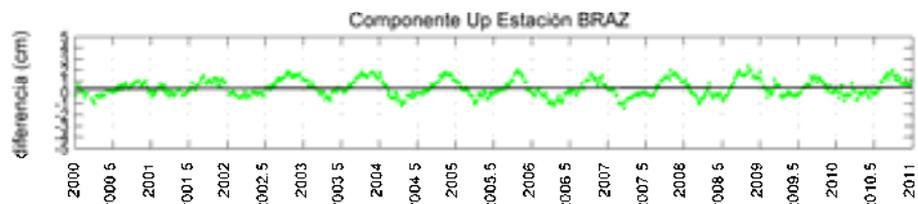
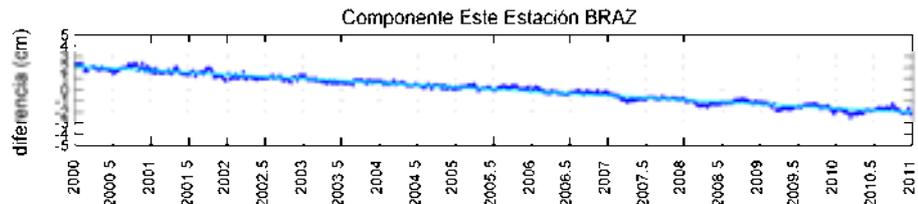
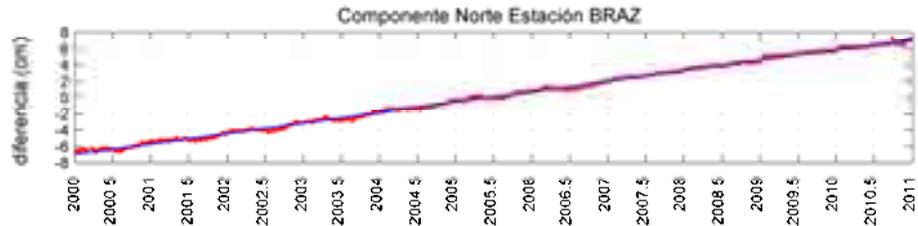
Año - época del año



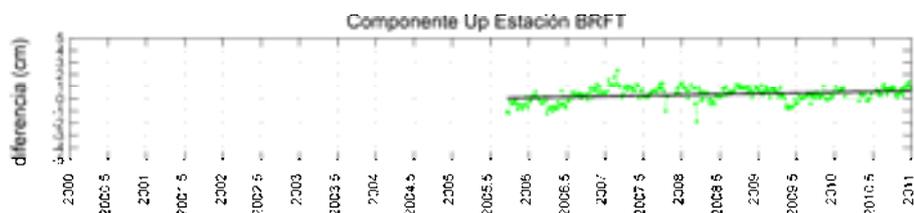
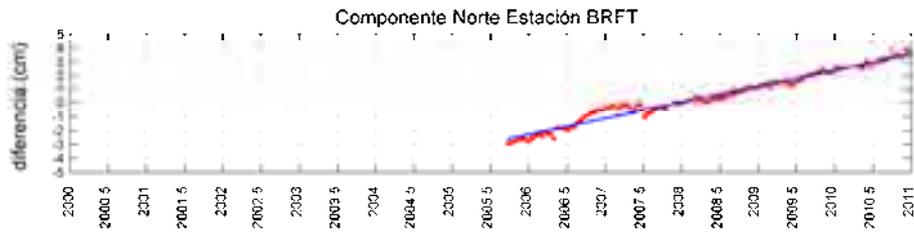
Año - época del año



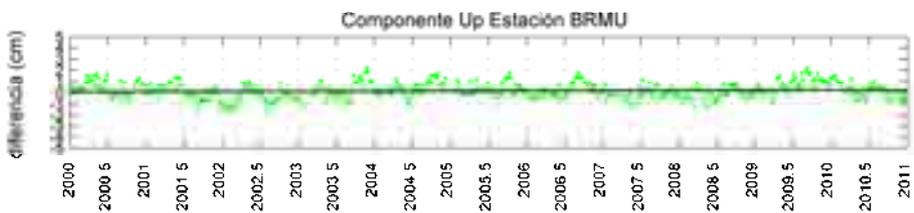
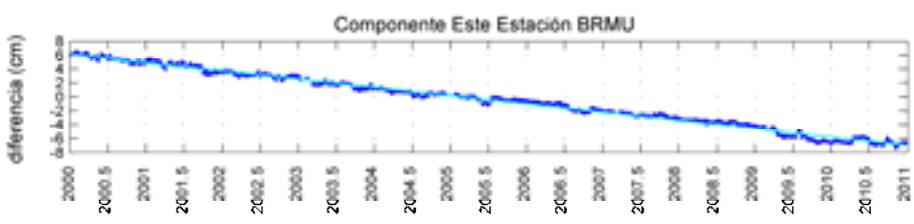
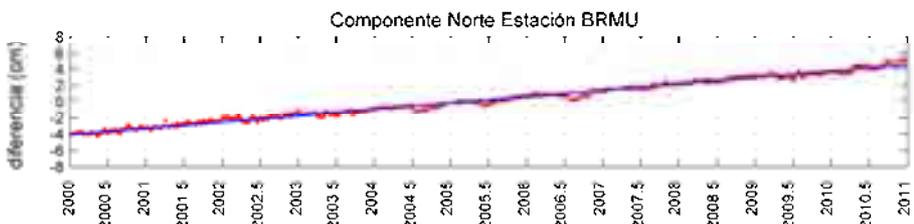
Año - época del año



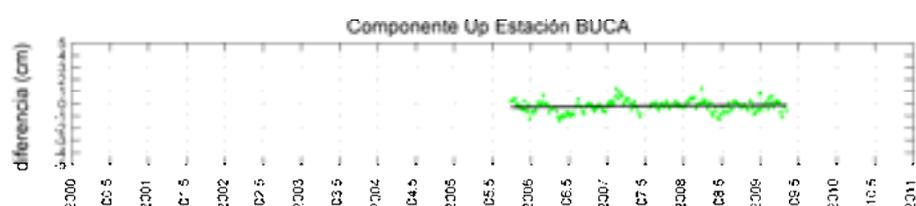
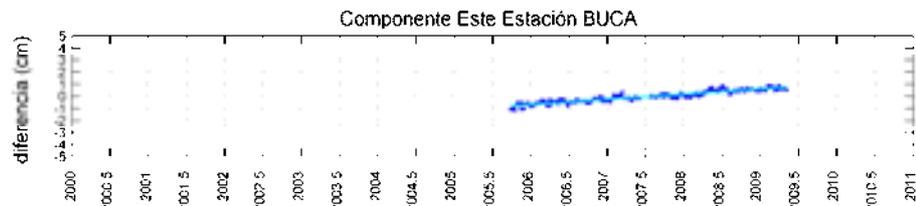
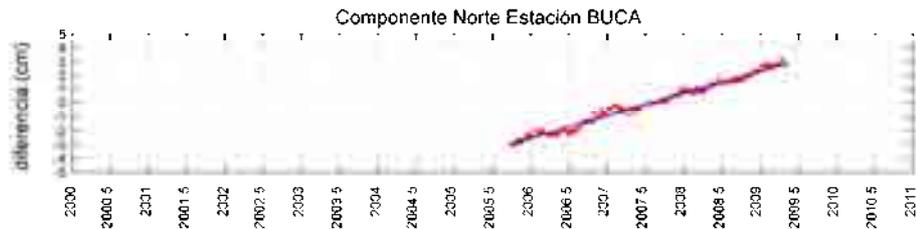
Año - época del año



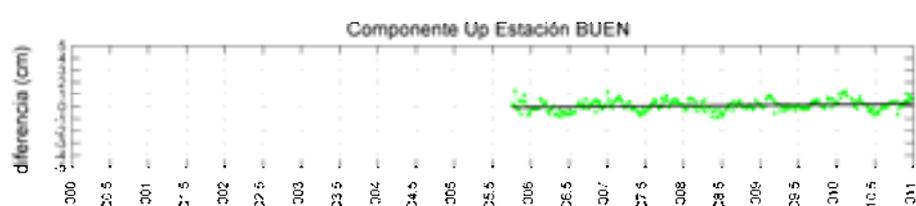
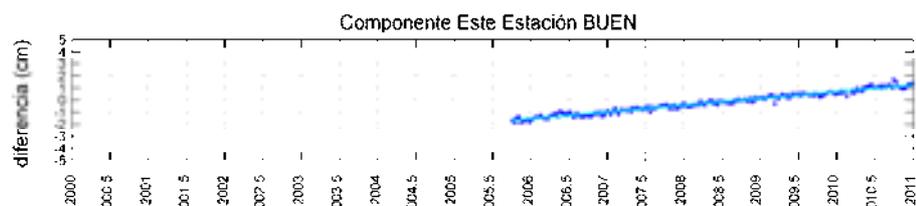
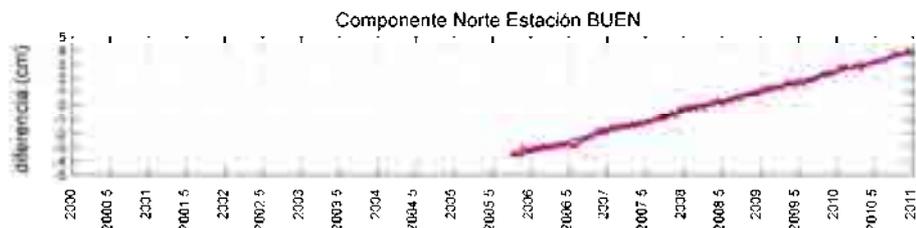
semana GPS



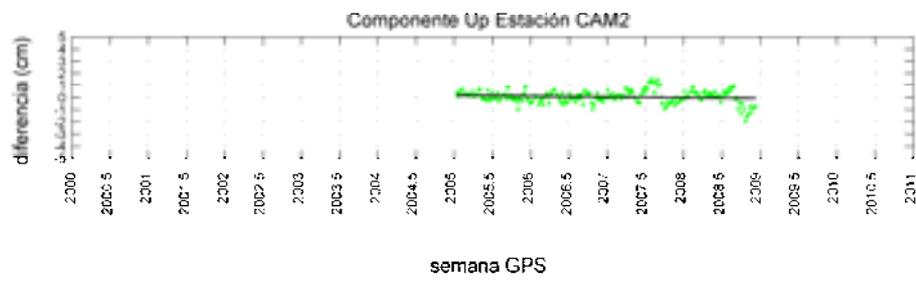
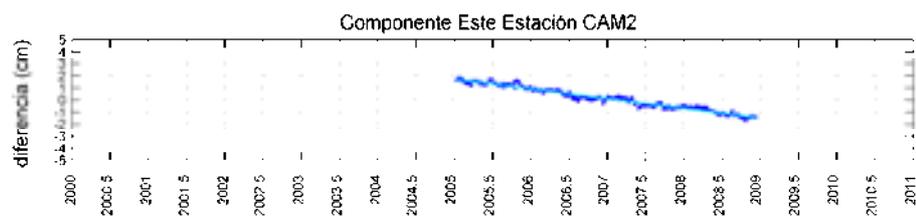
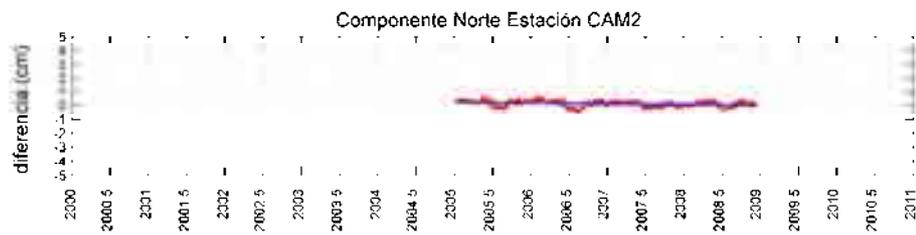
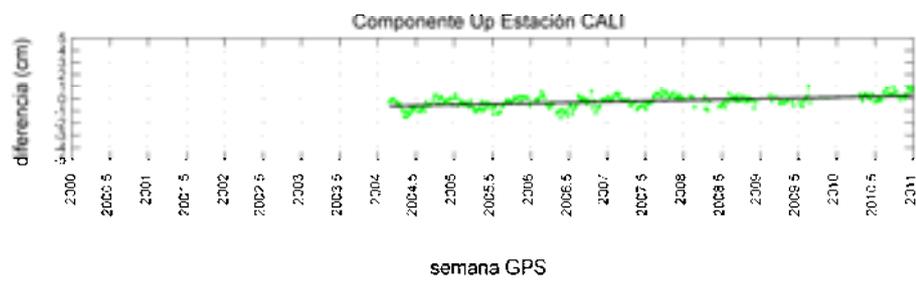
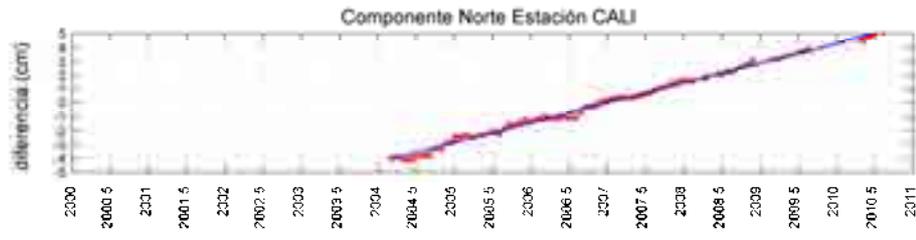
Año - época del año

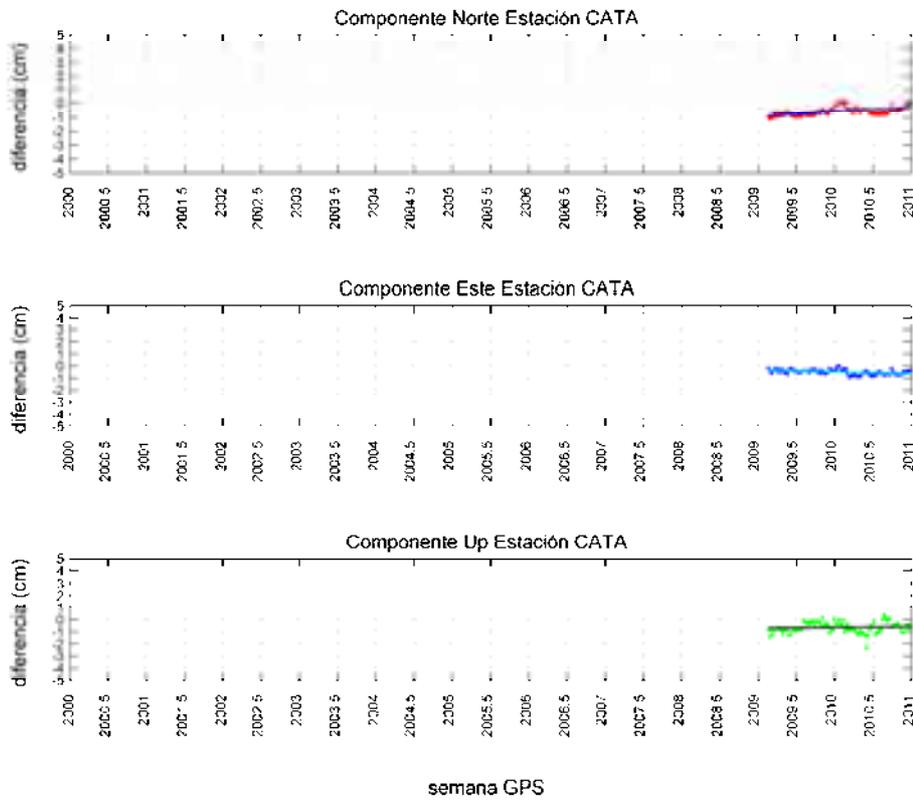
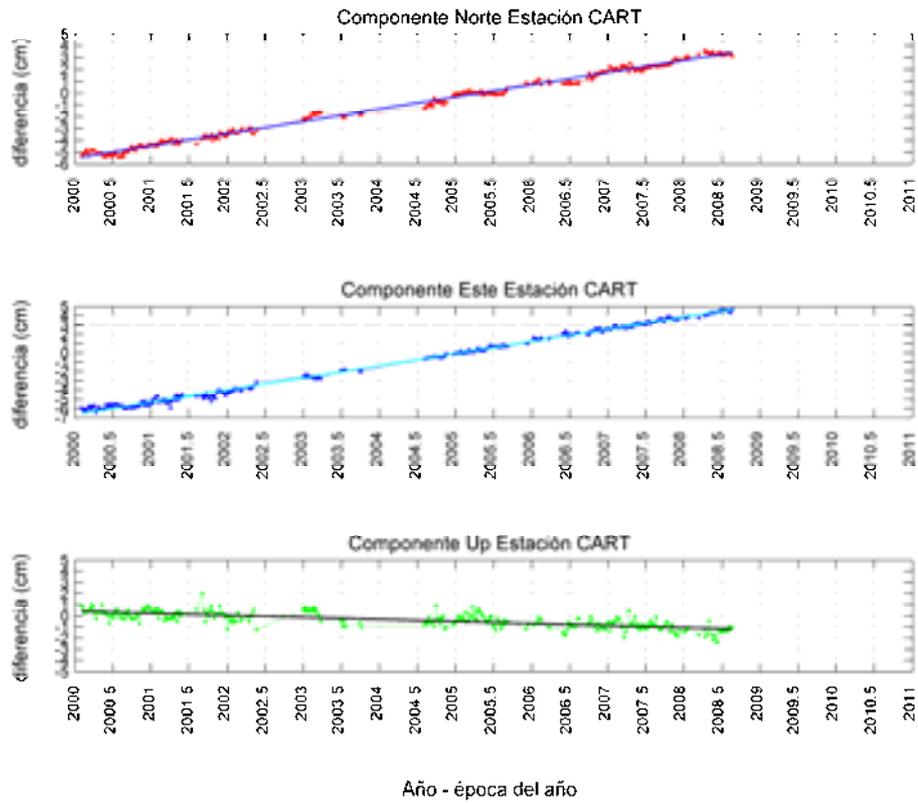


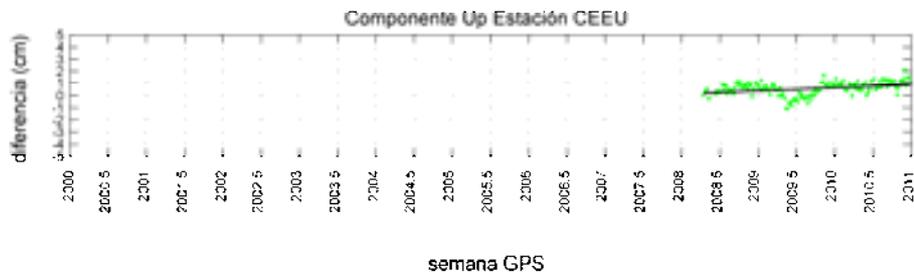
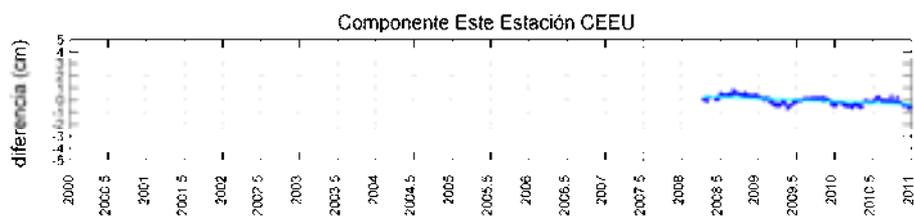
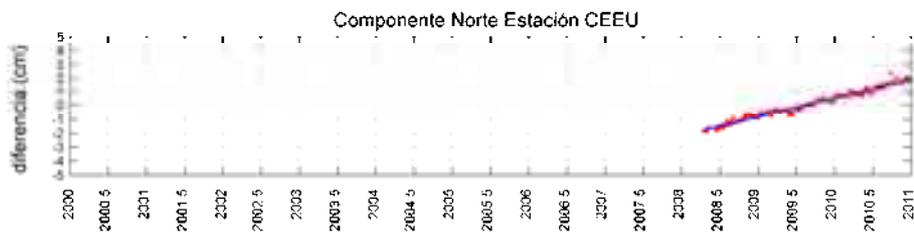
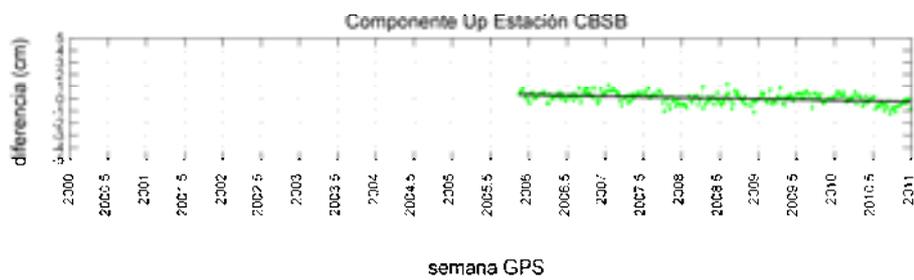
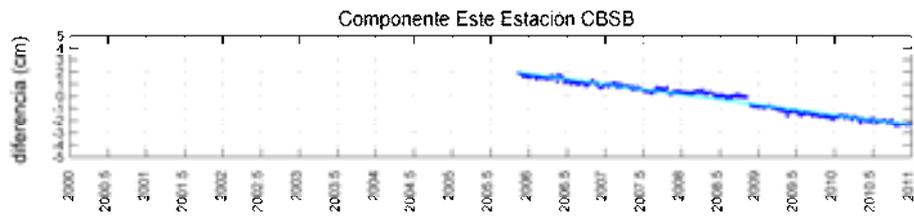
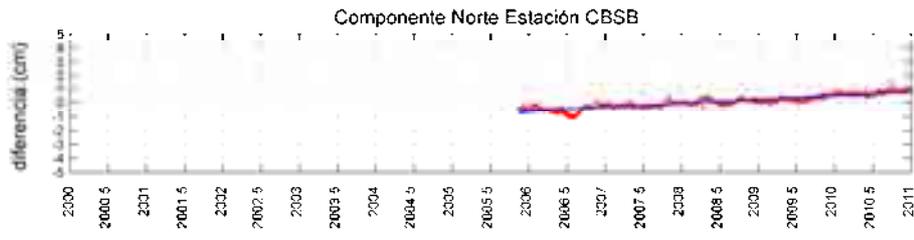
semana GPS

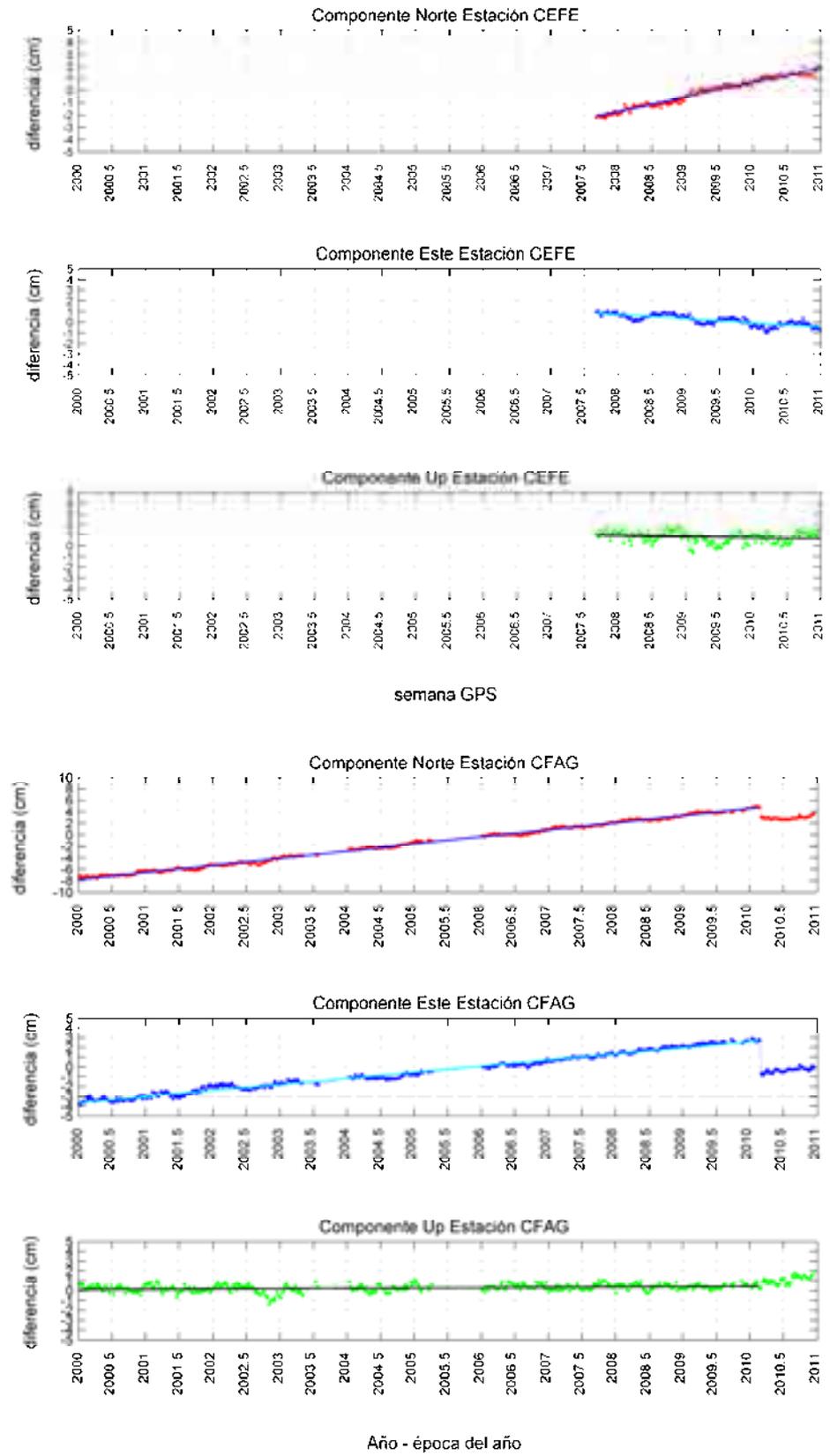


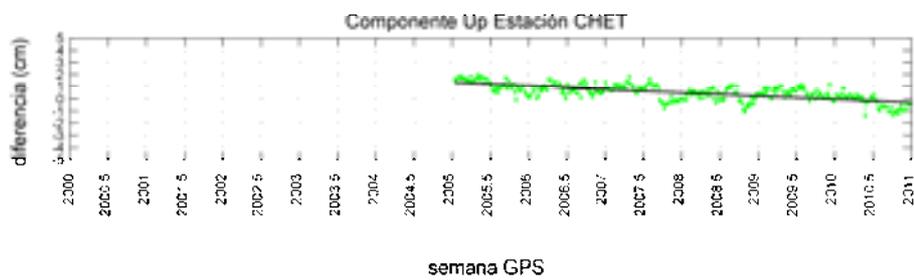
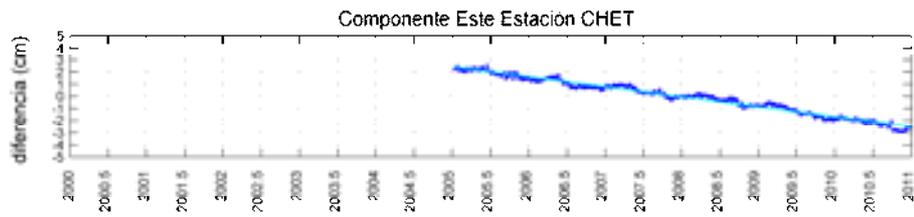
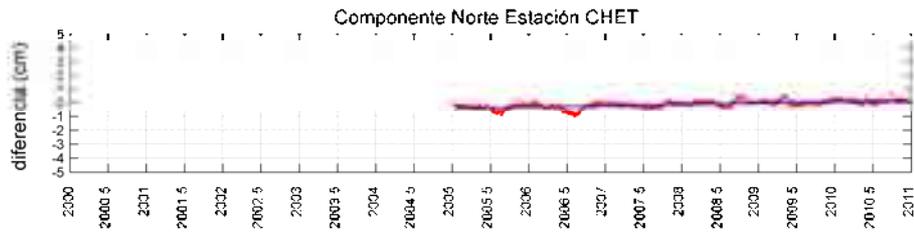
semana GPS



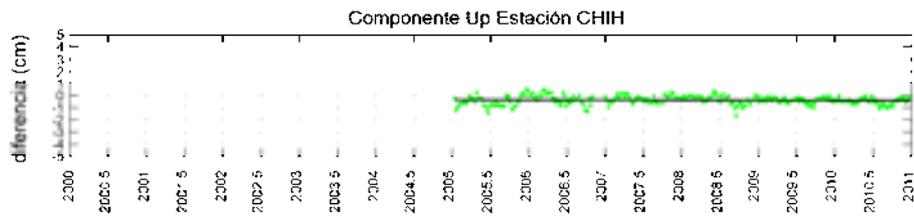
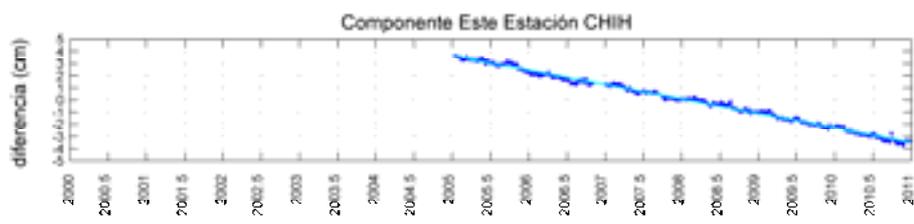
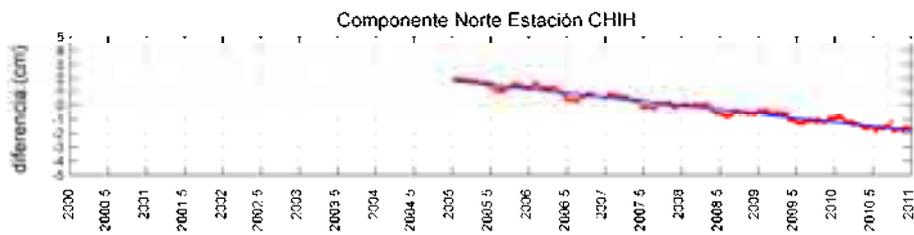




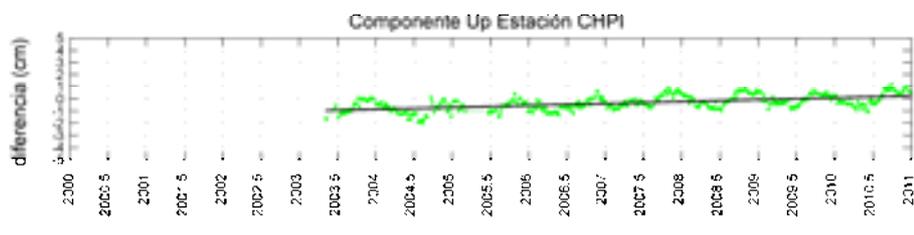
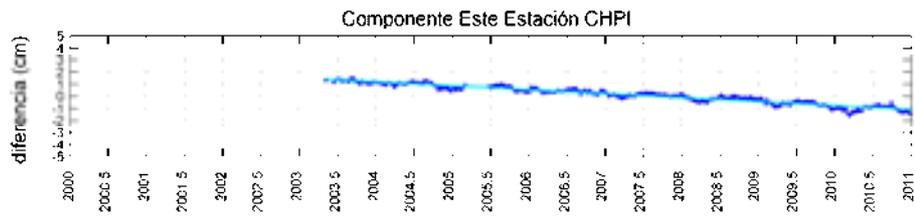
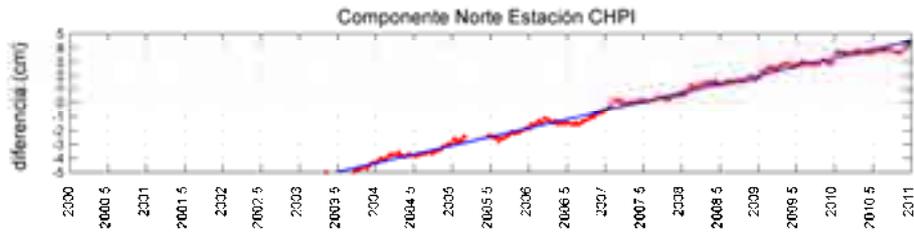




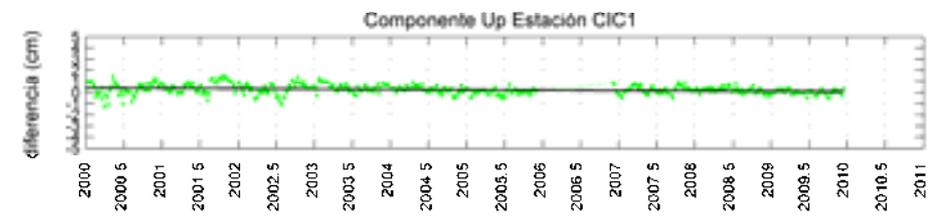
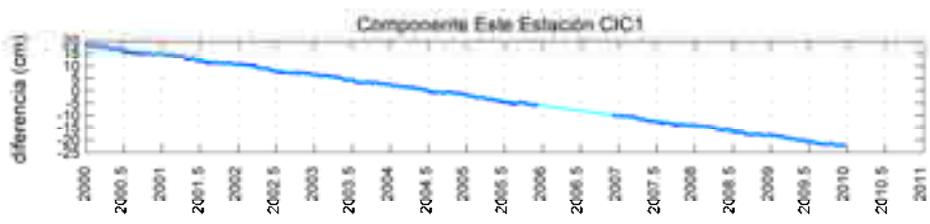
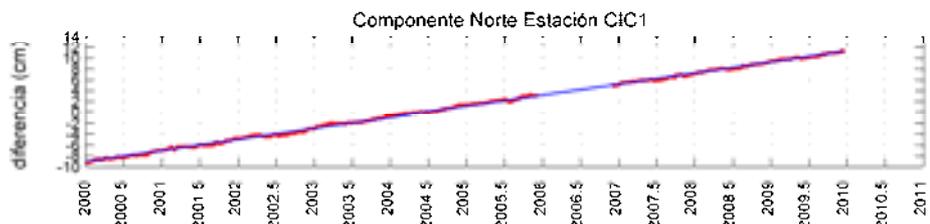
semana GPS



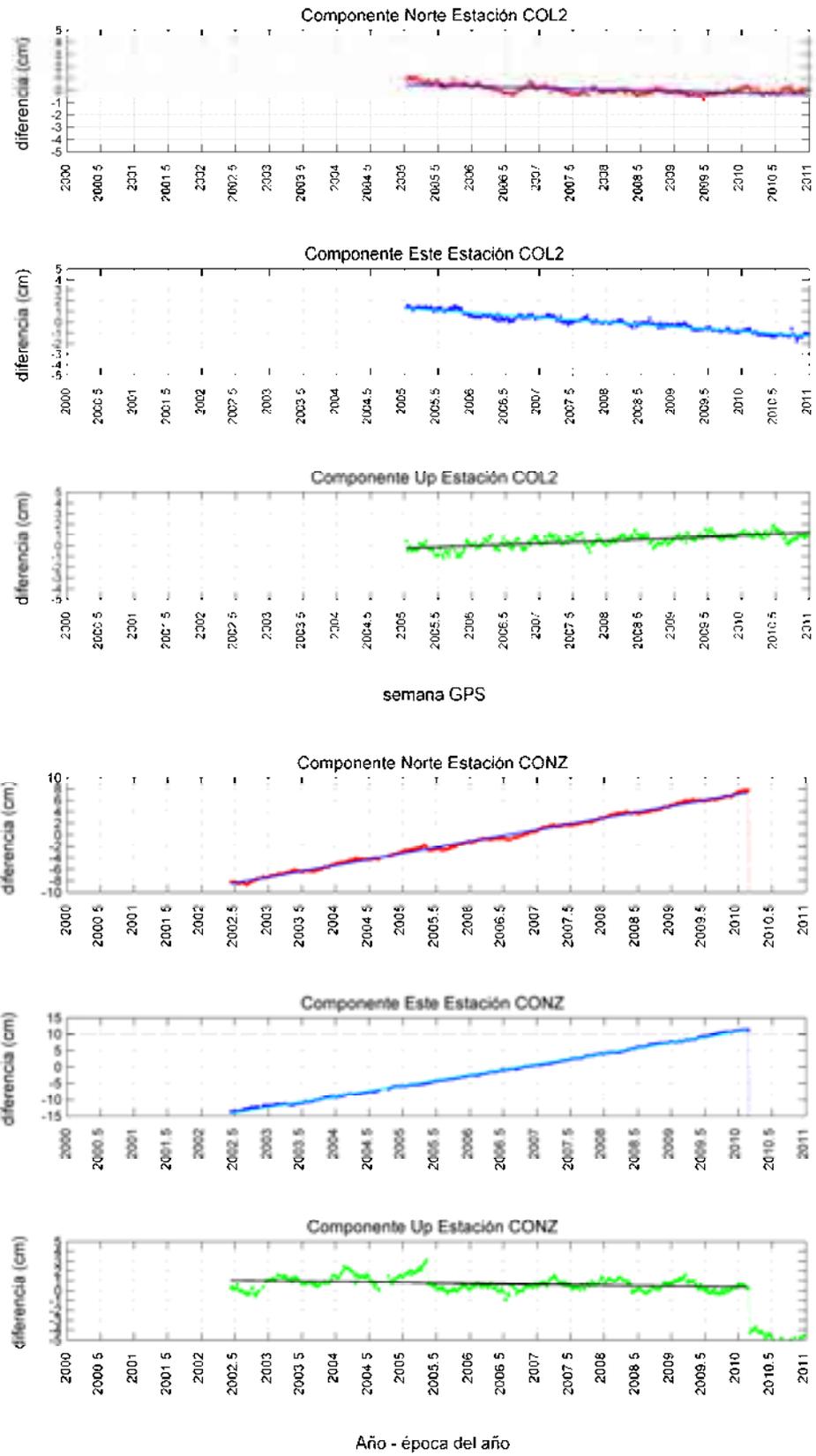
semana GPS

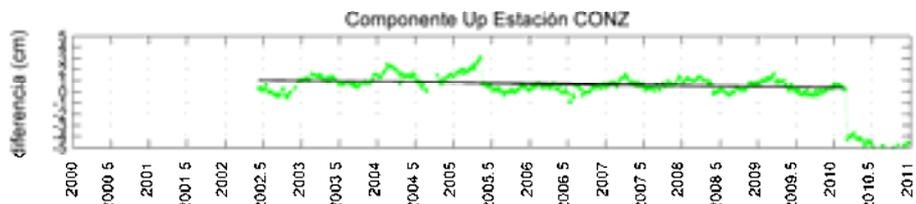
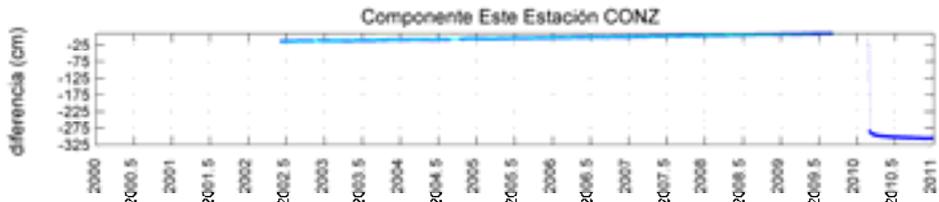
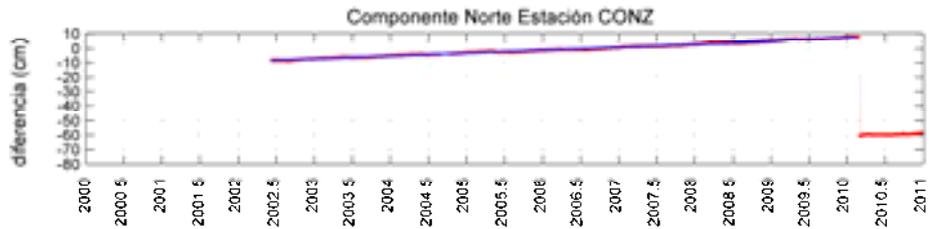


semana GPS

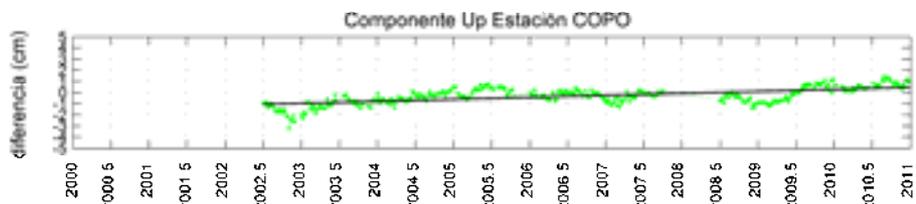
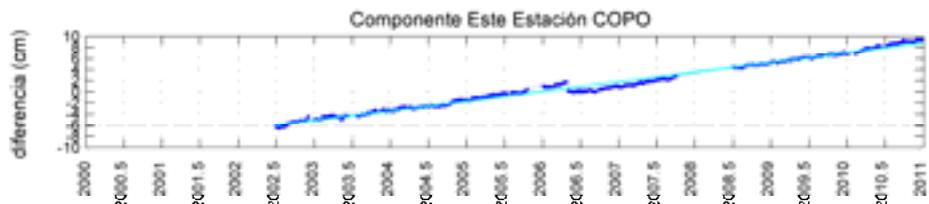
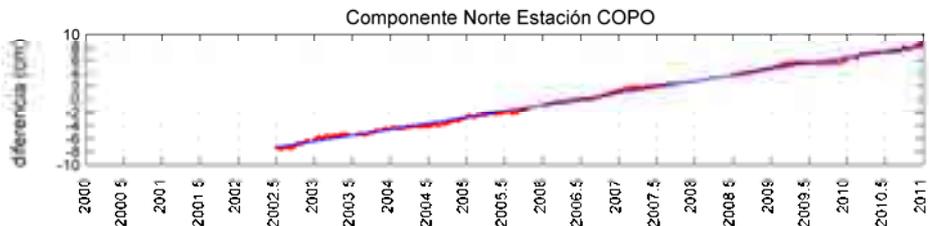


Año - época del año

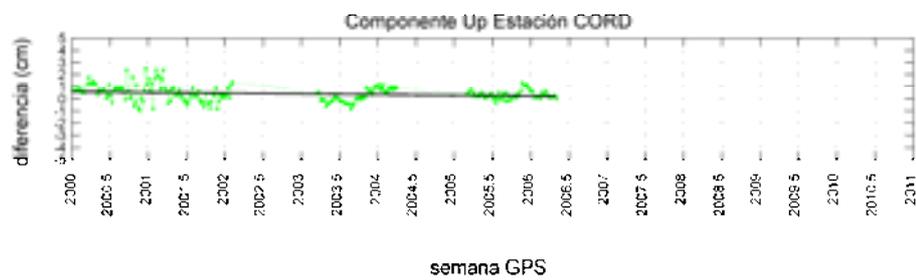
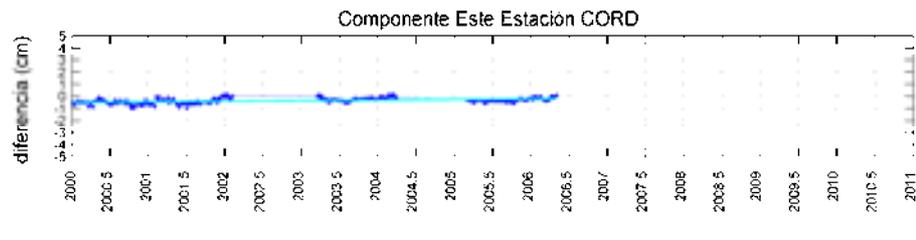
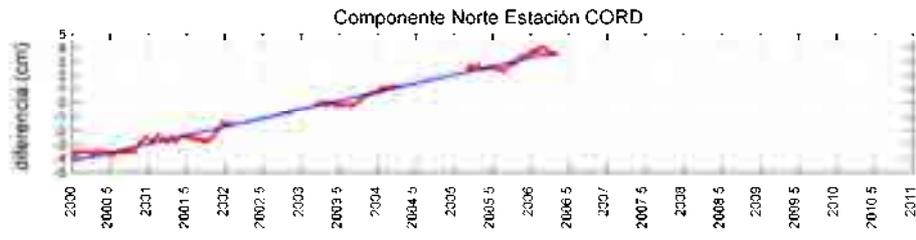




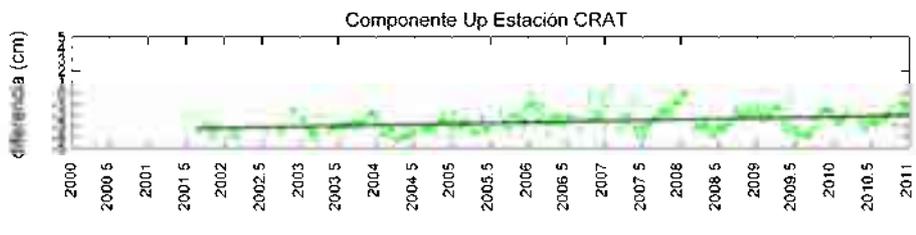
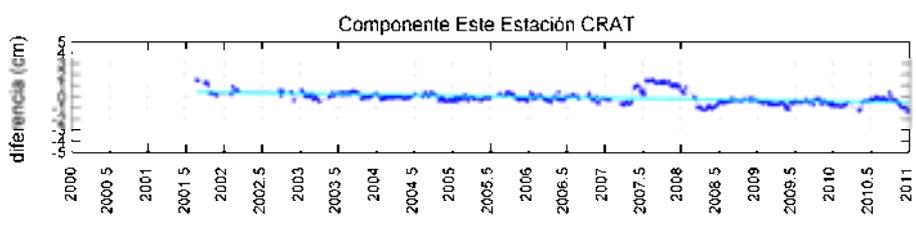
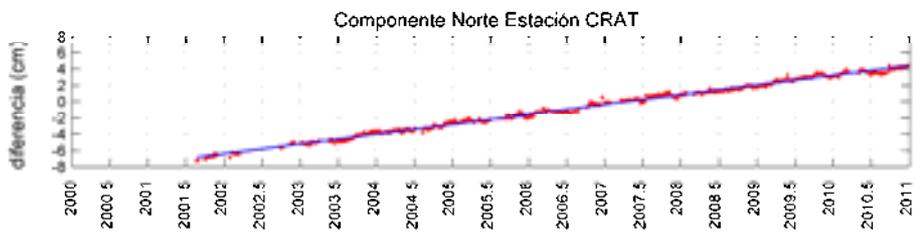
Año - época del año



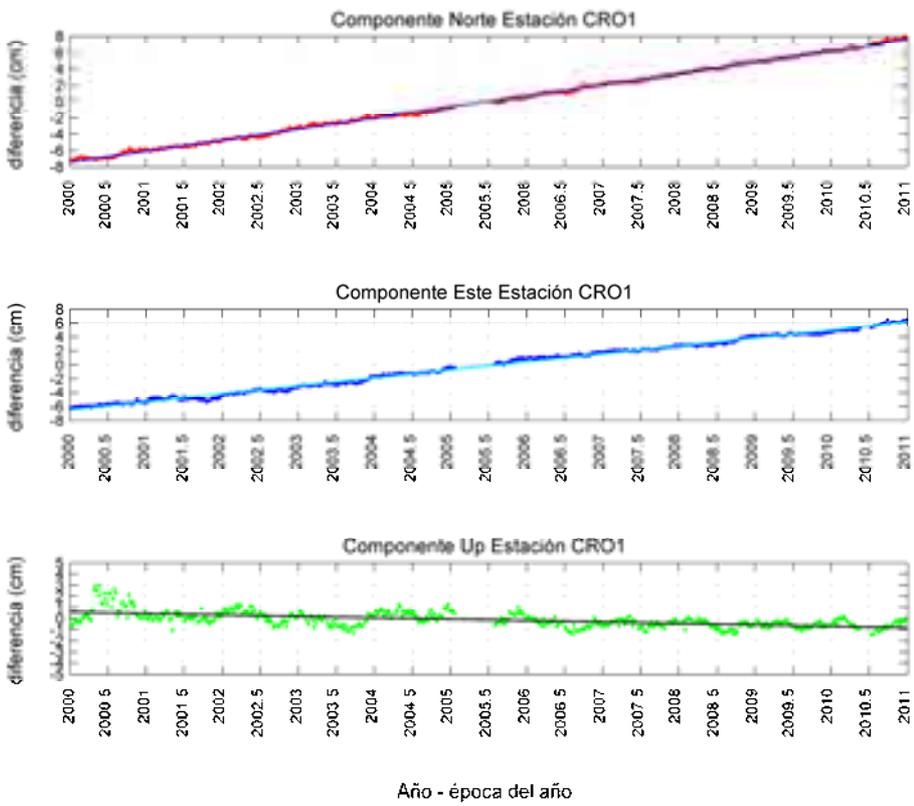
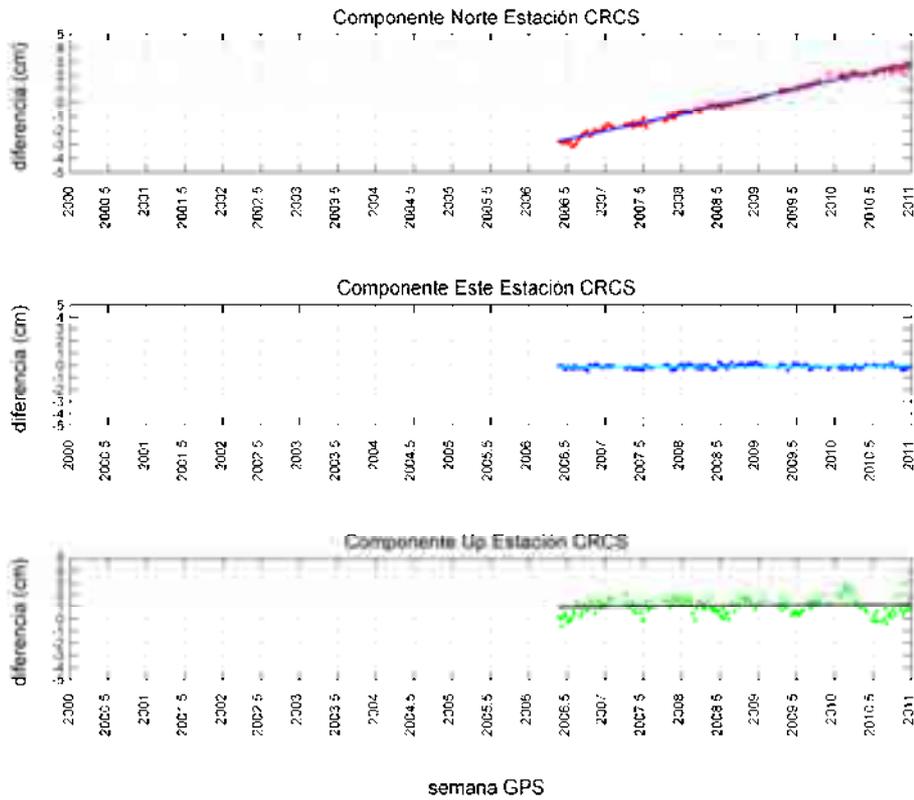
Año - época del año

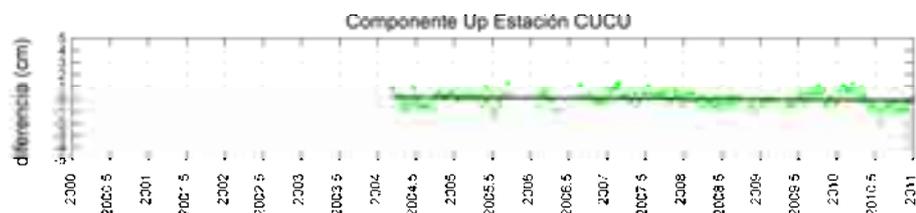
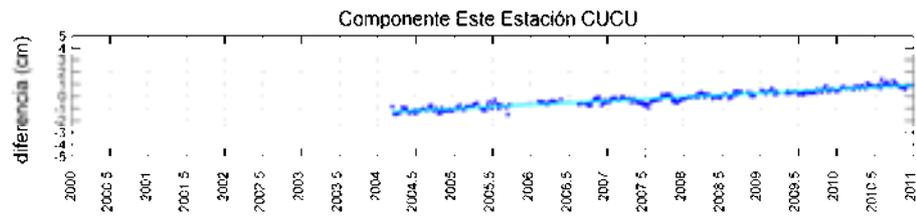
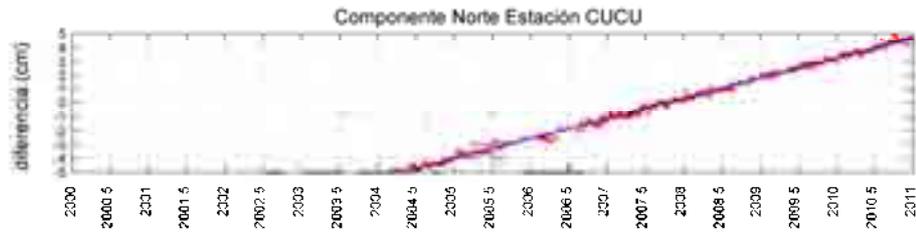


semana GPS

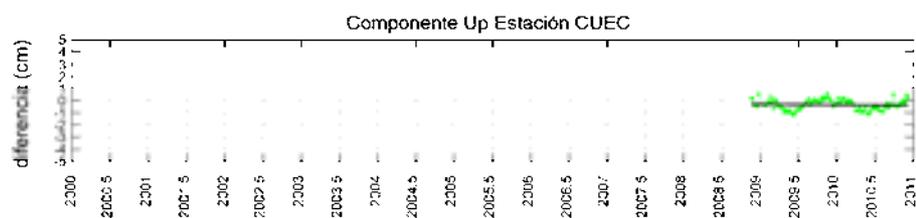
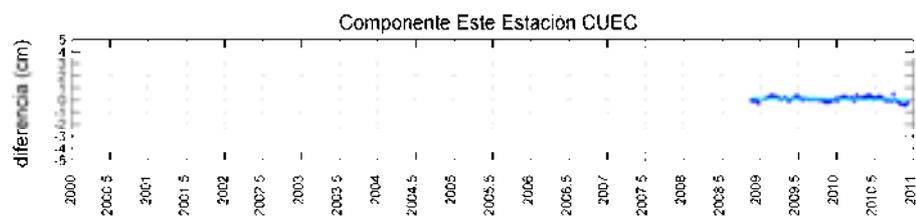
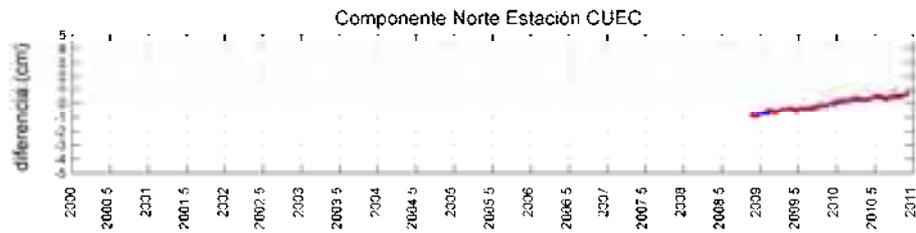


Año - época del año

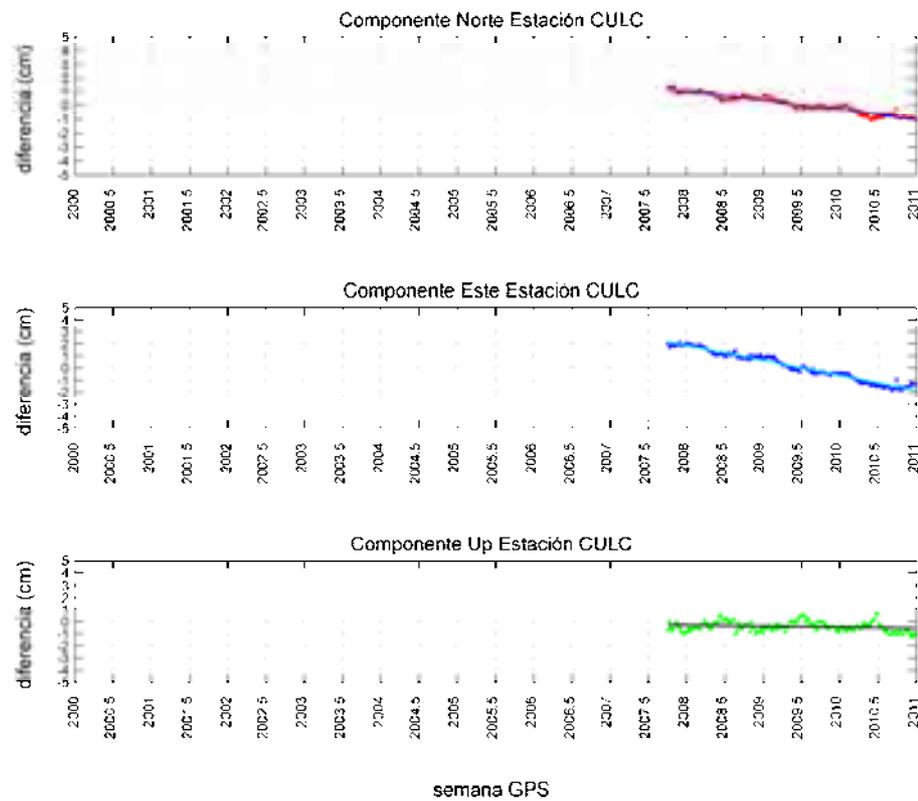
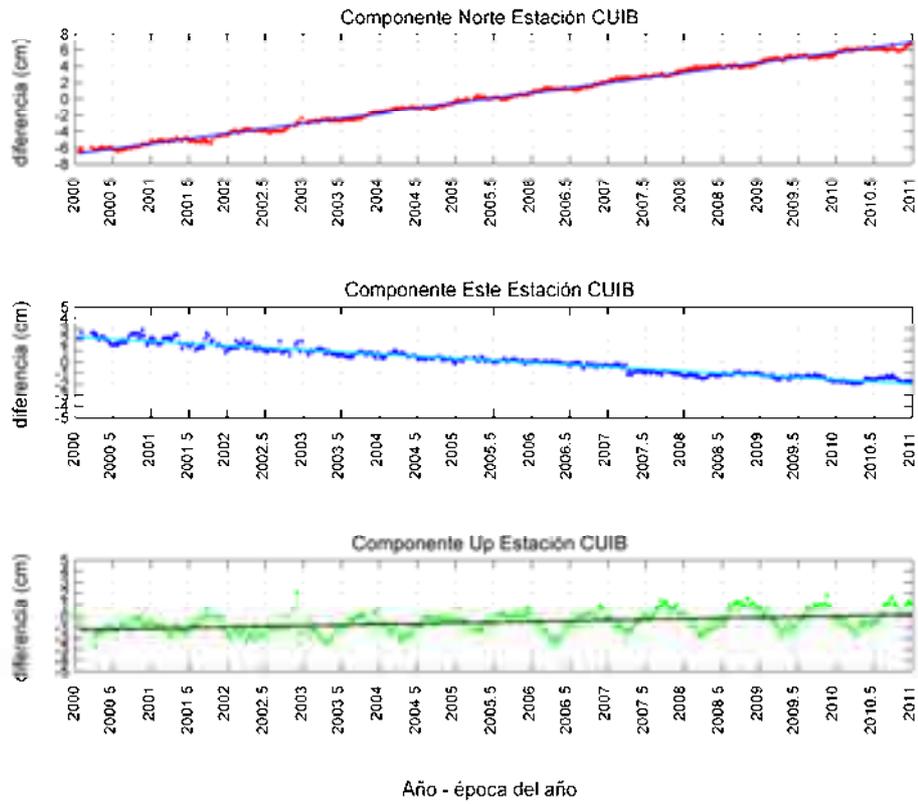


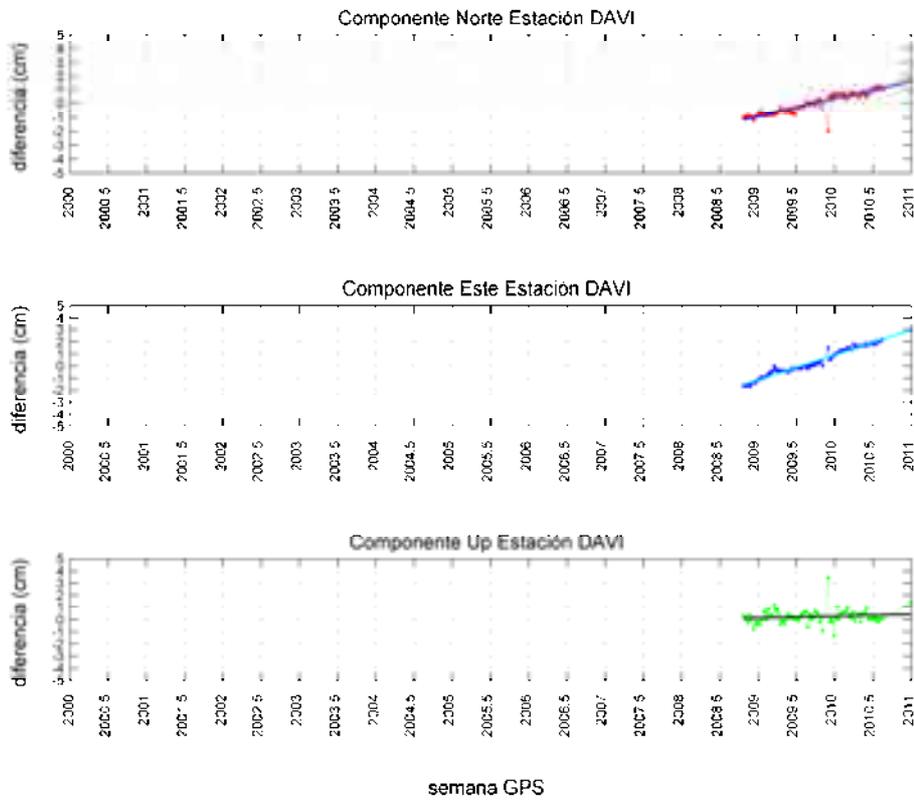
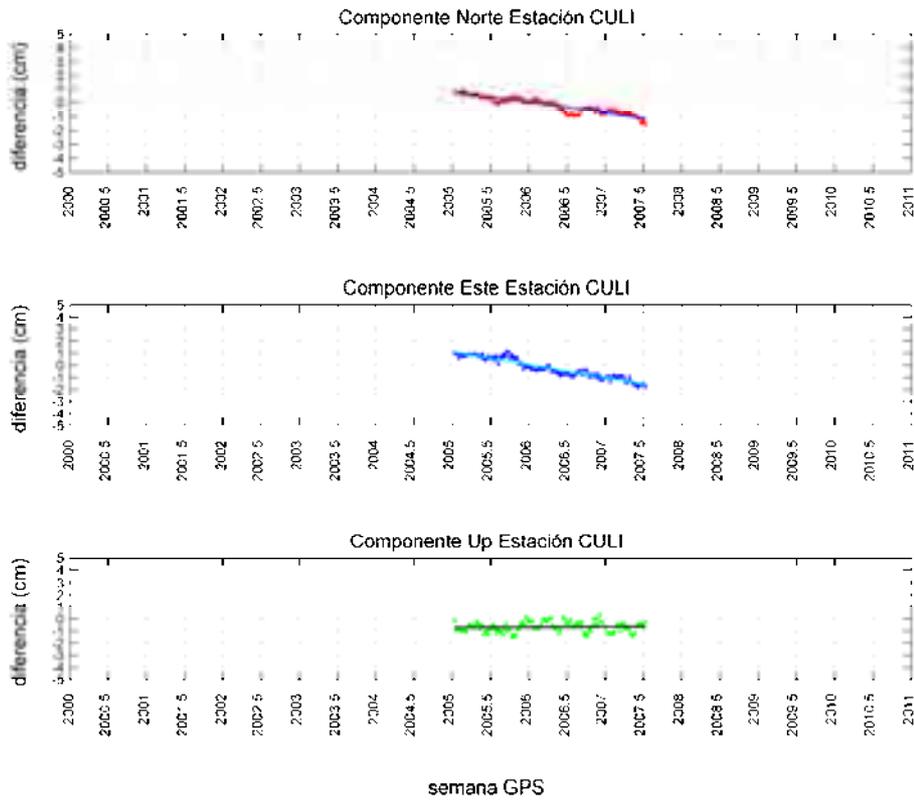


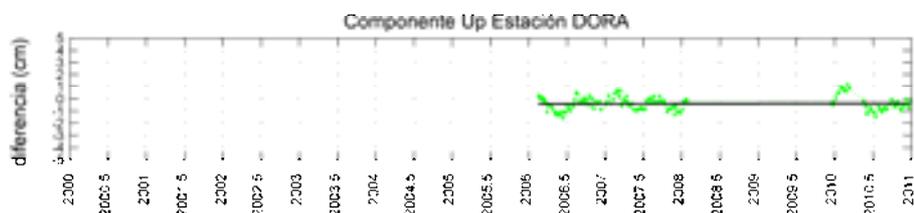
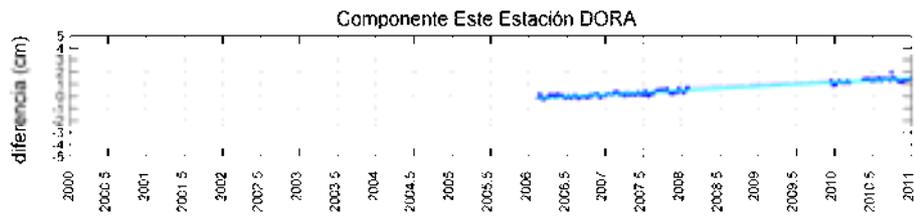
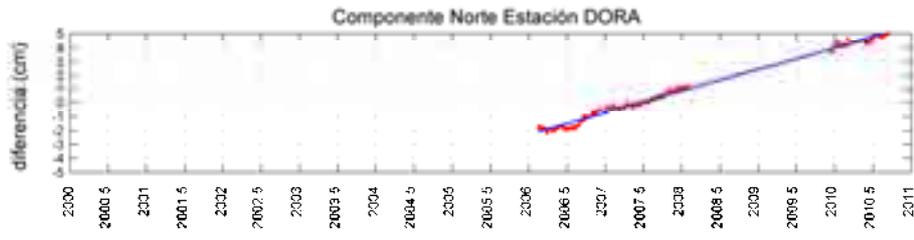
semana GPS



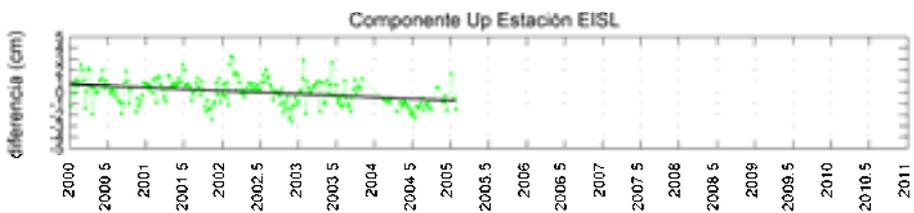
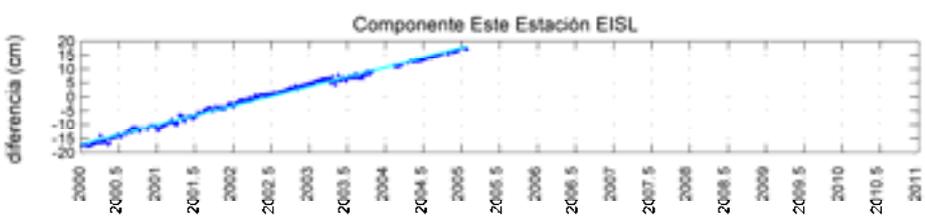
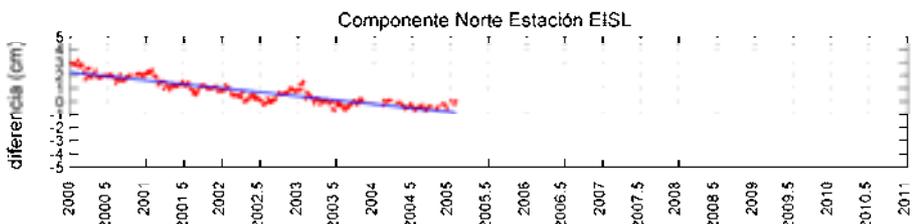
semana GPS



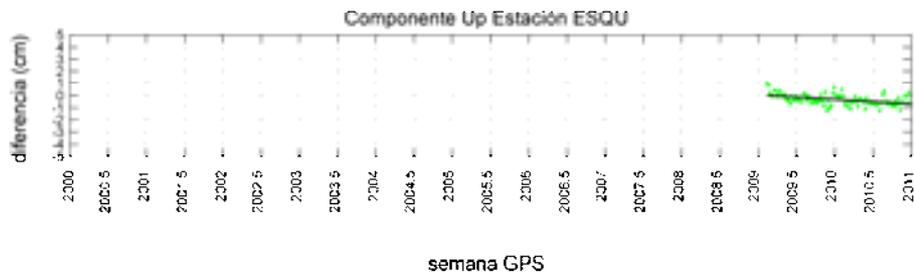
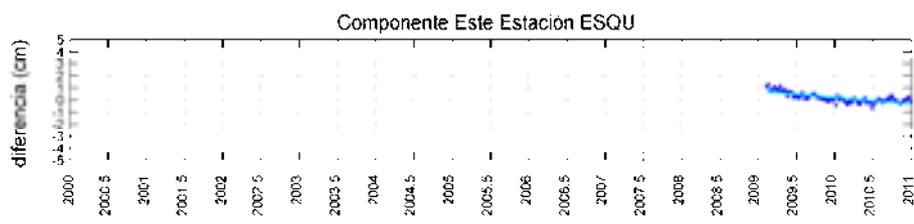
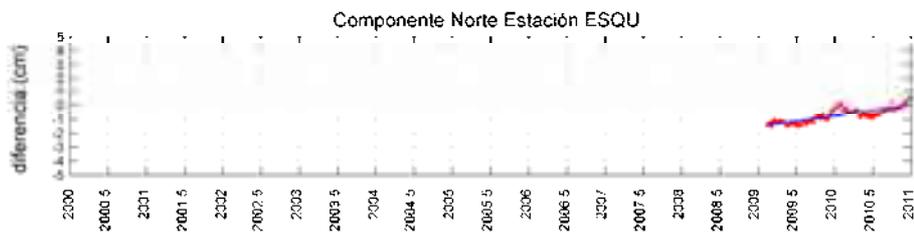
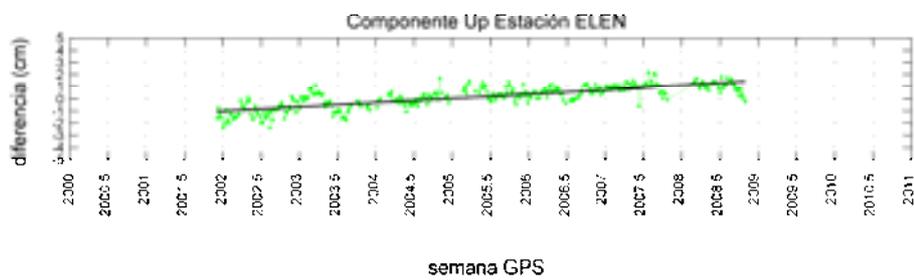
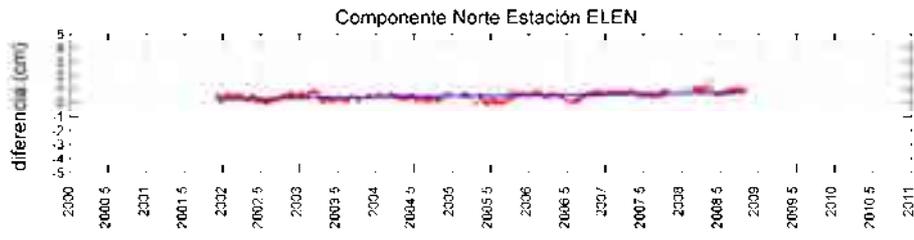


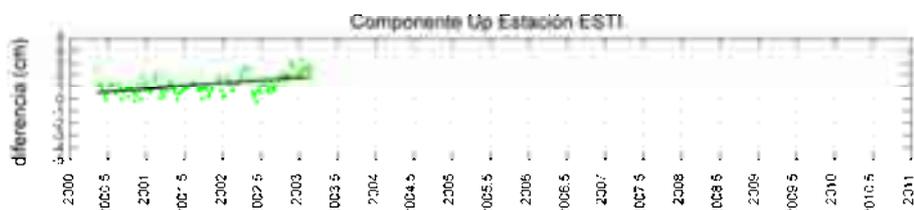
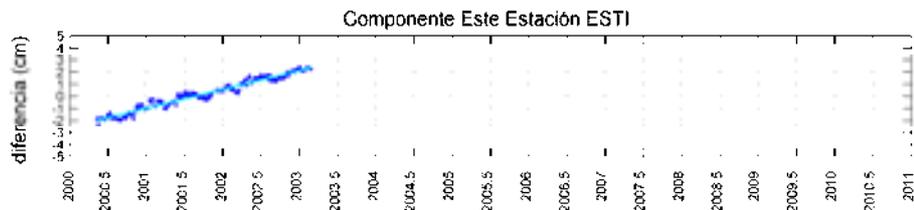
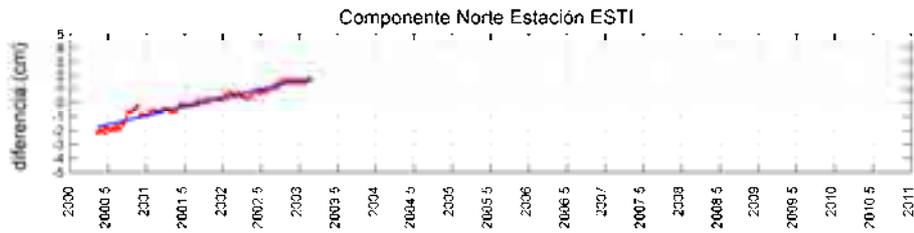


semana GPS

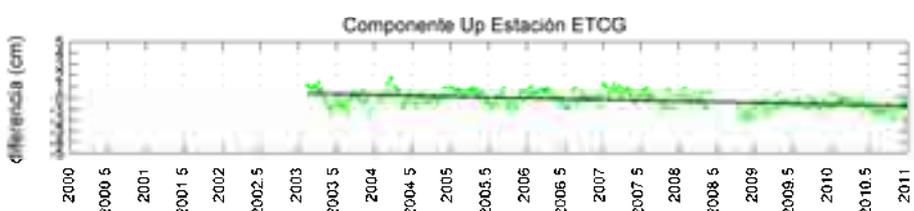
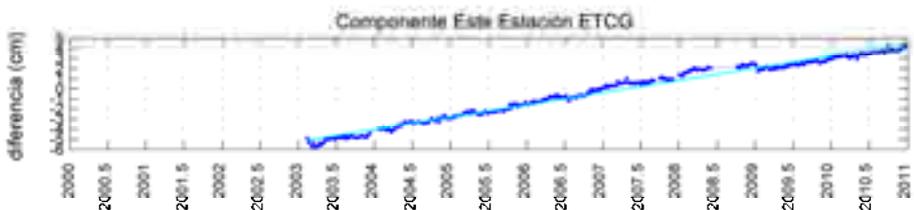
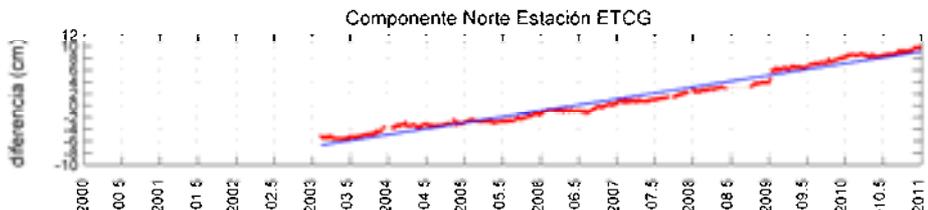


Año - época del año

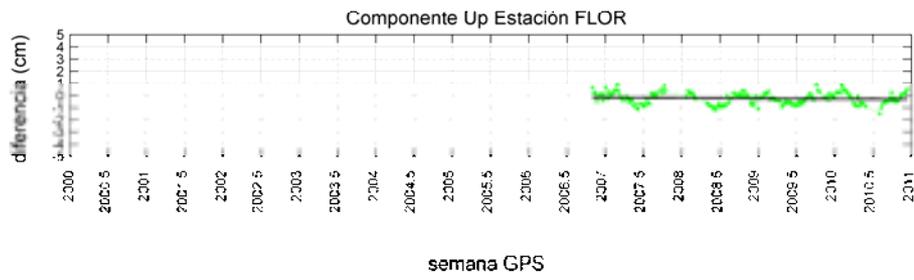
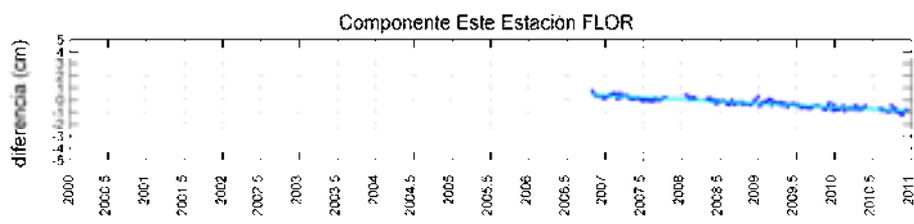
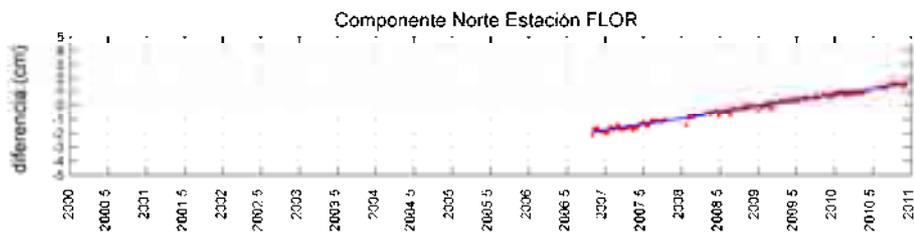
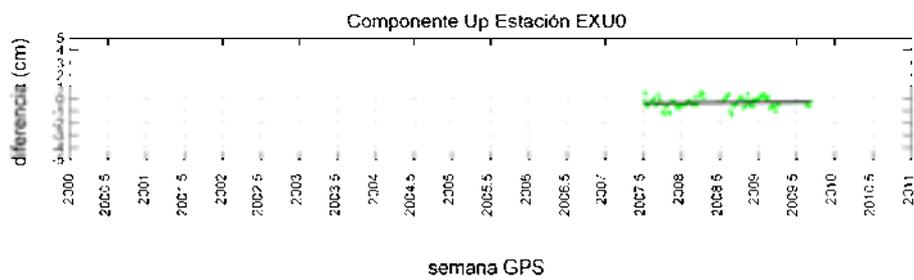
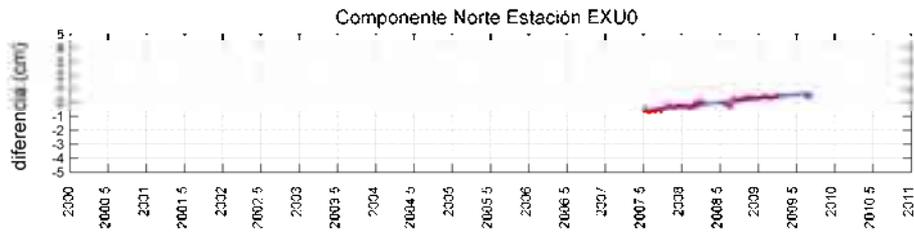


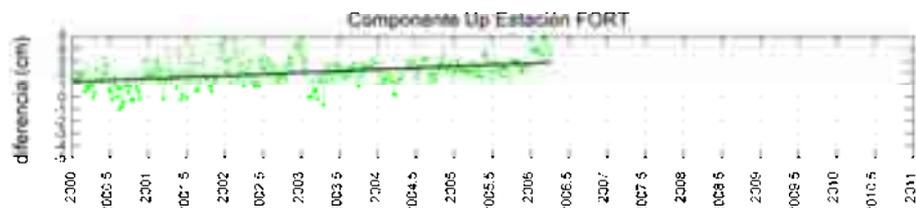


semana GPS

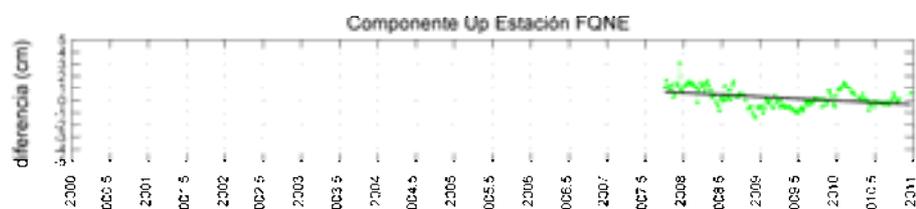
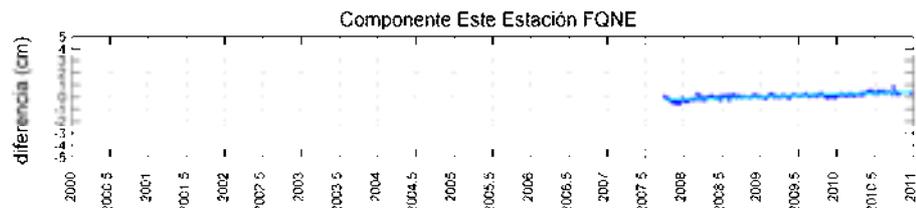
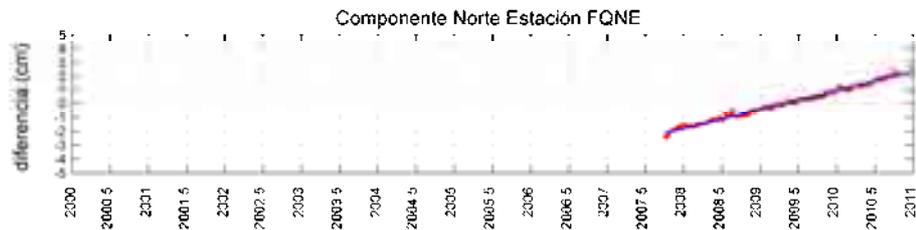


Año - época del año

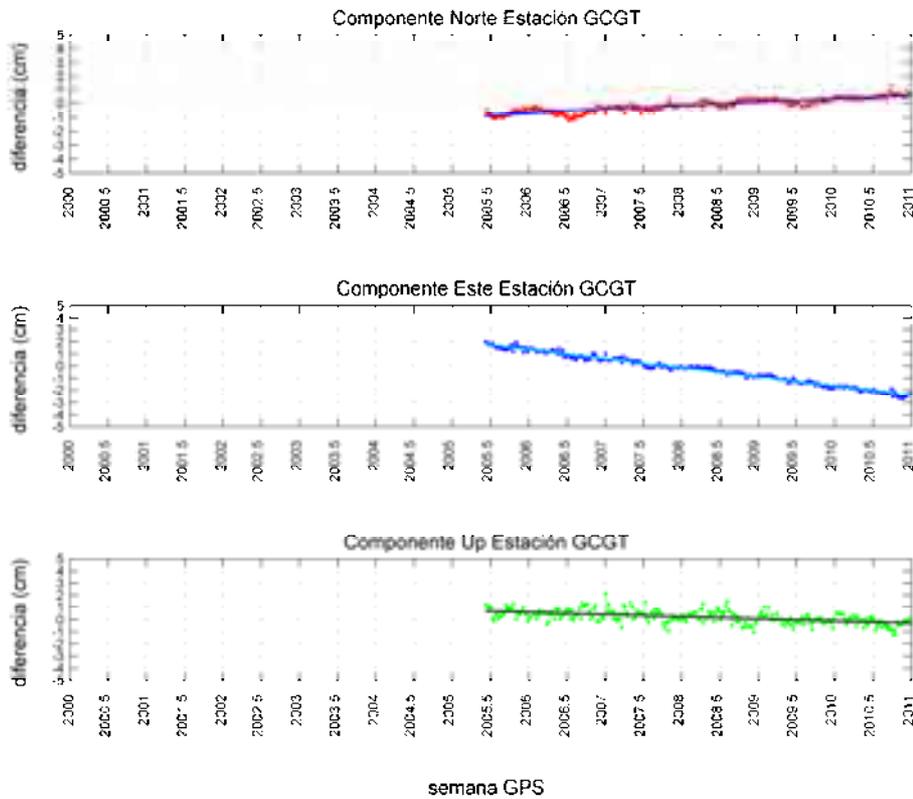
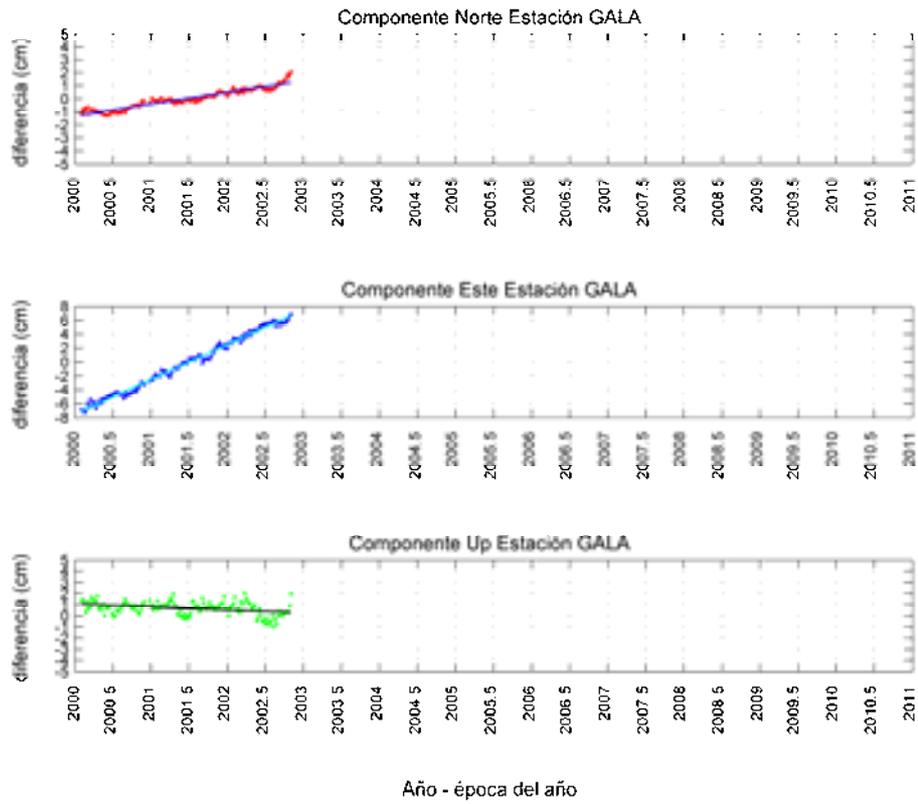


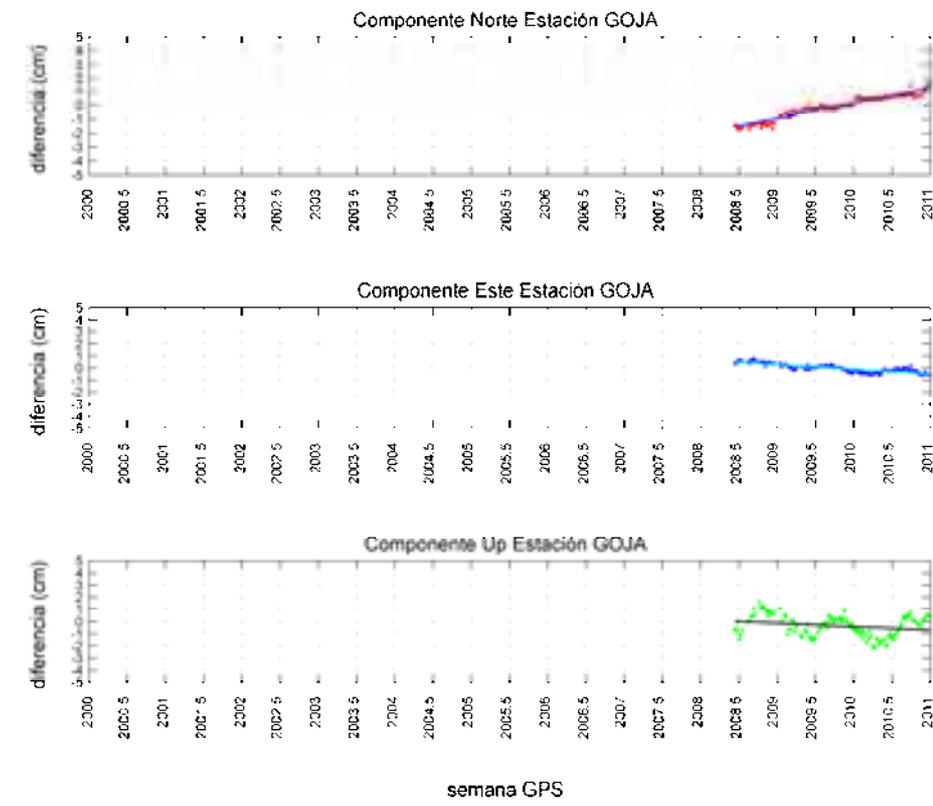
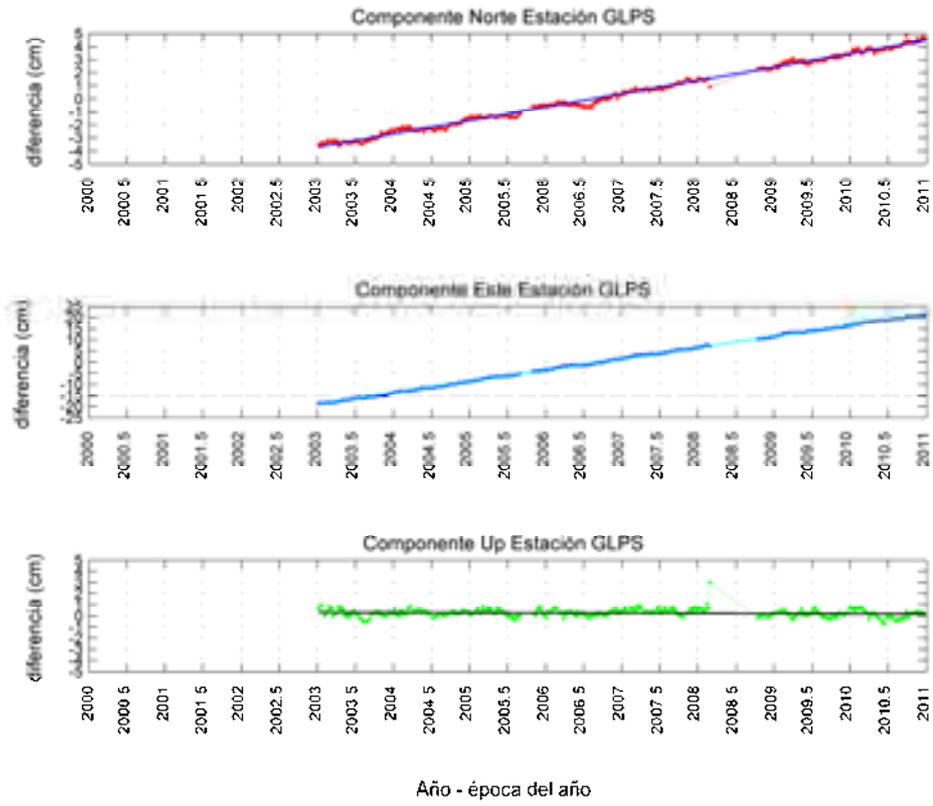


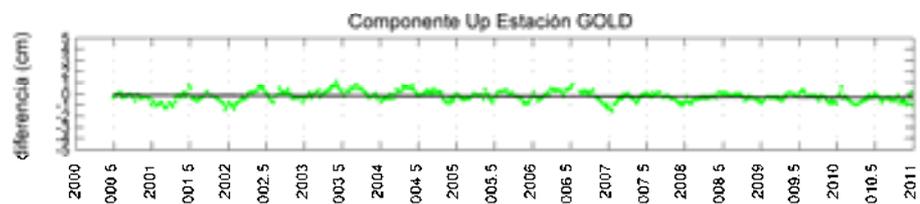
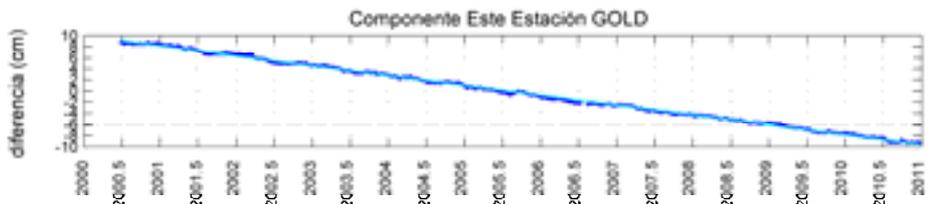
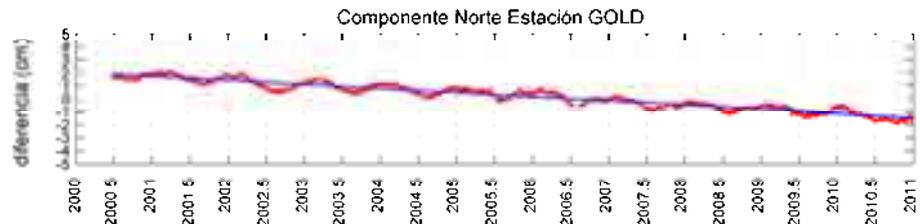
semana GPS



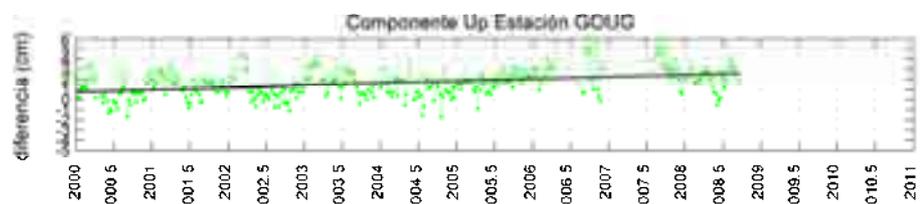
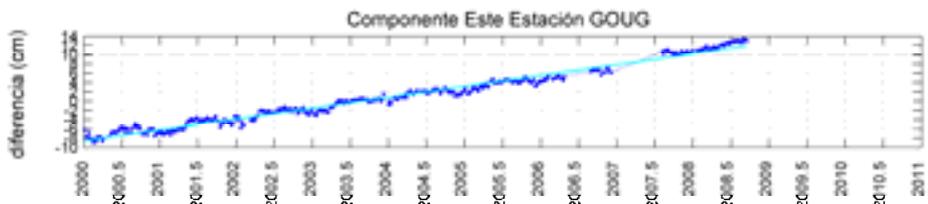
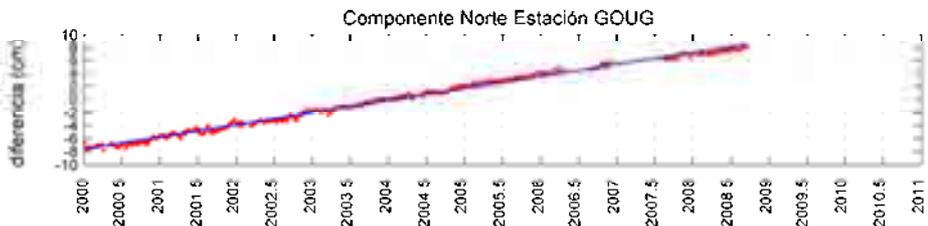
semana GPS



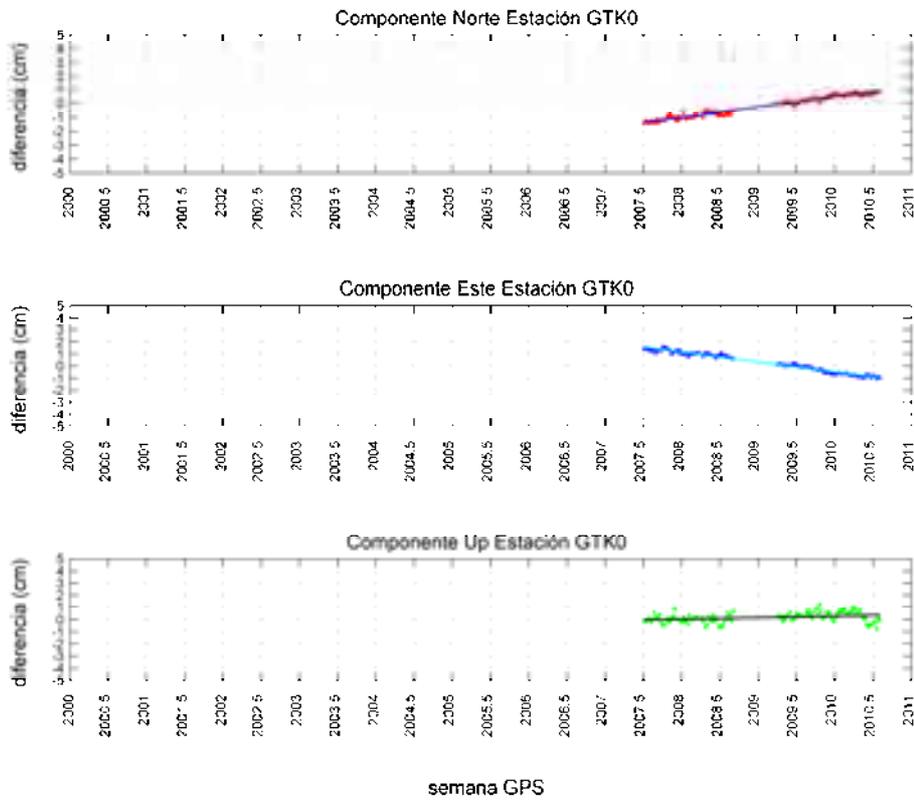
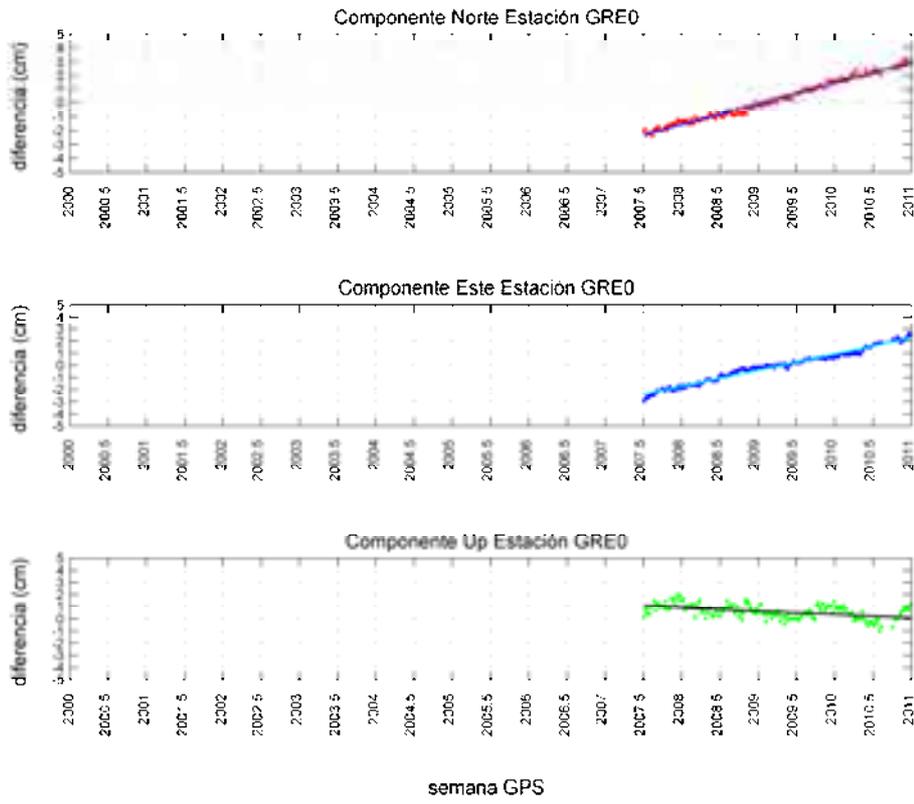


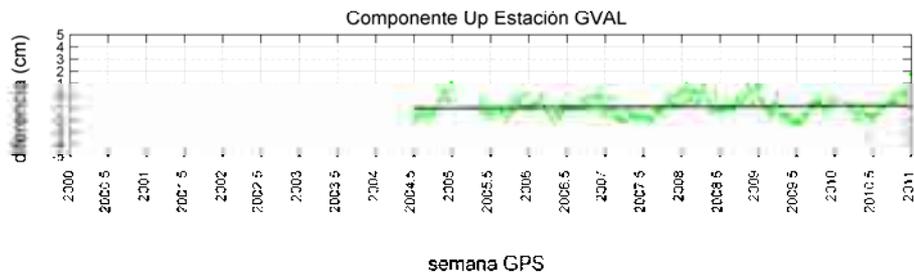
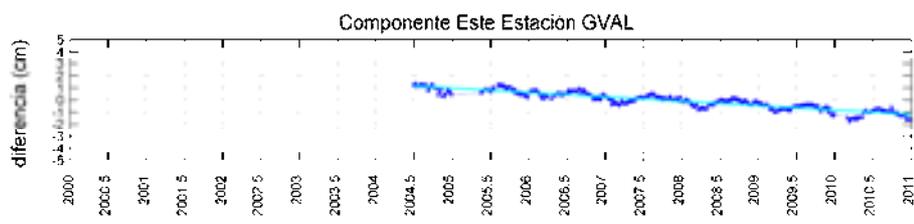
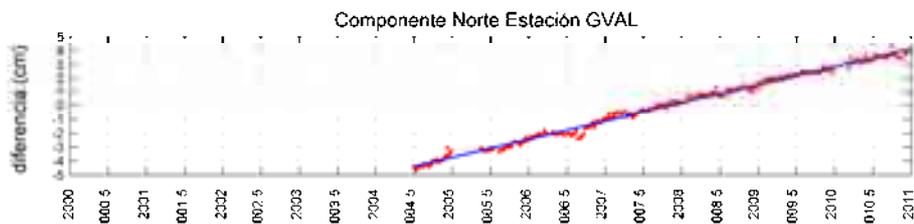
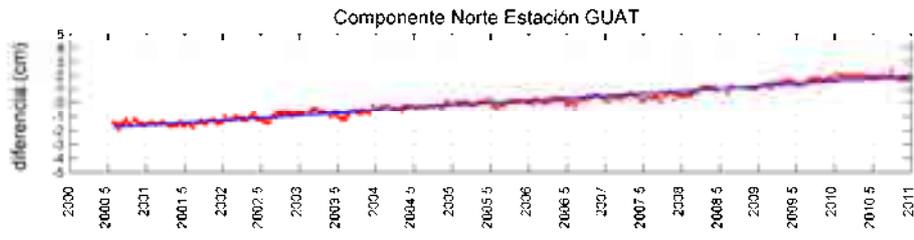


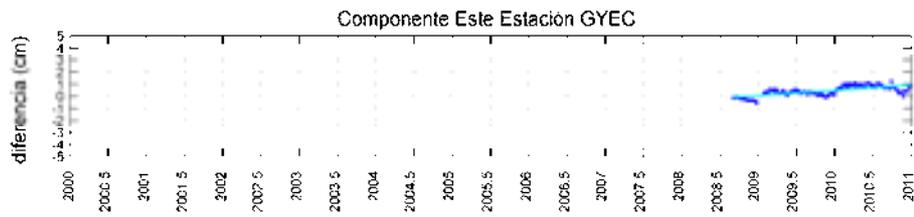
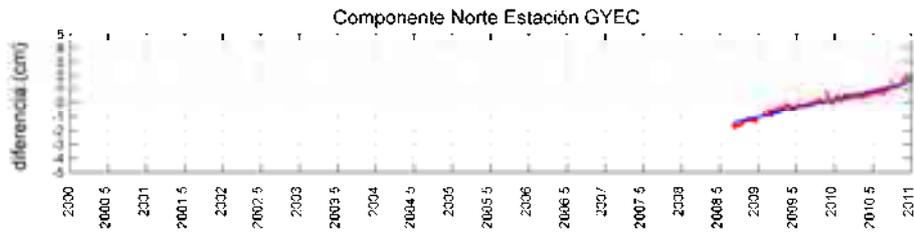
Año - época del año



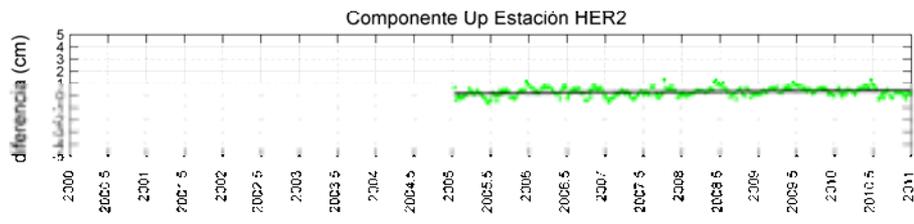
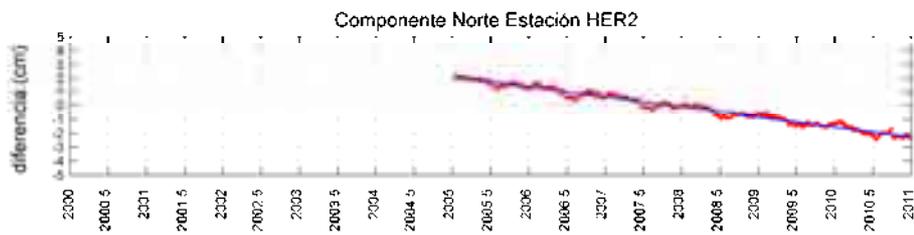
Año - época del año



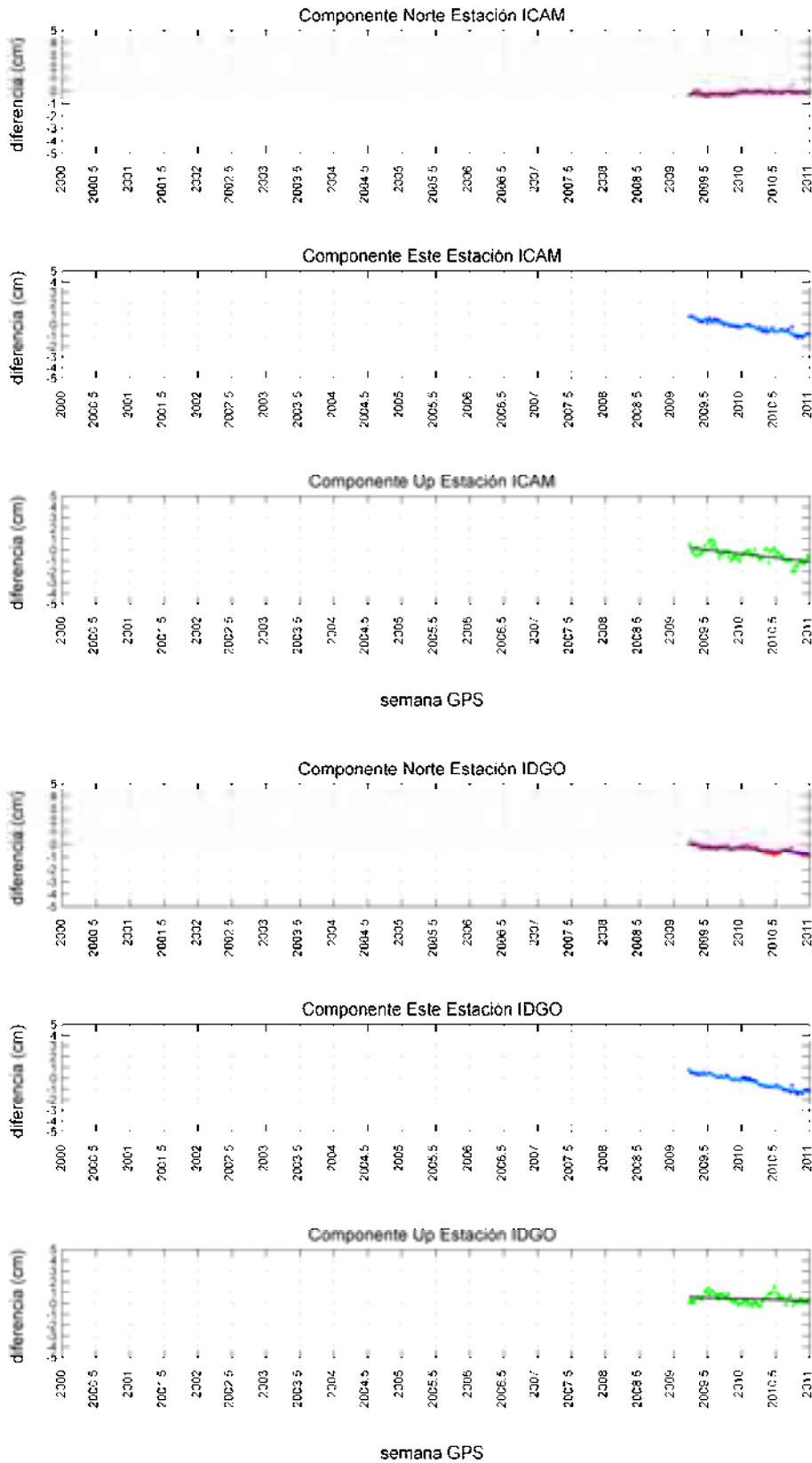


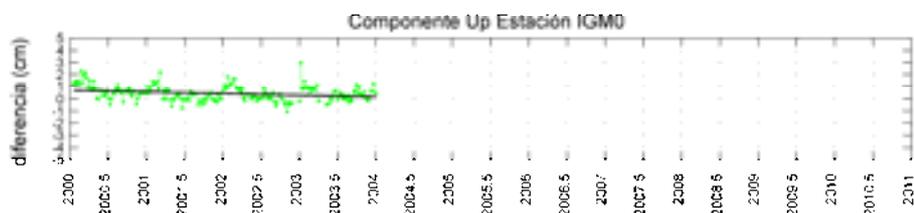
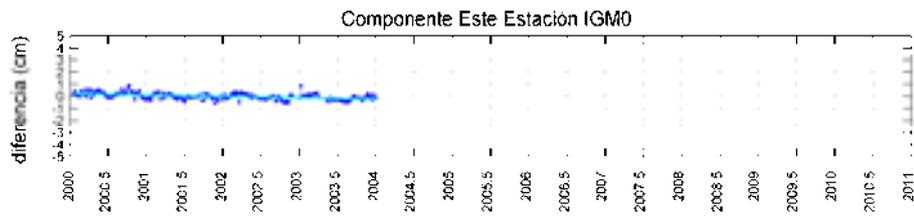
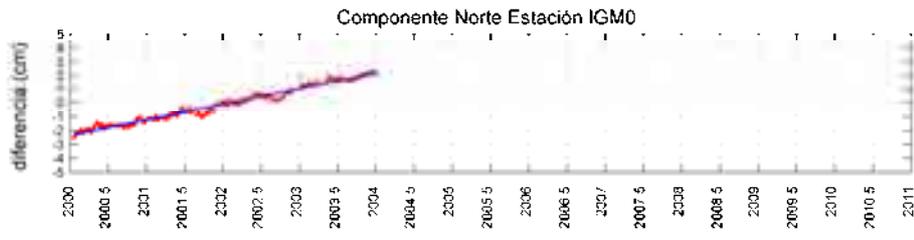


semana GPS

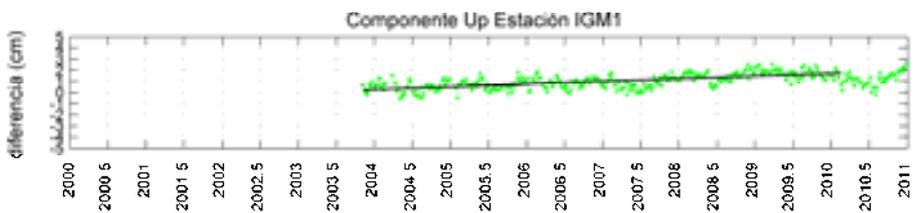
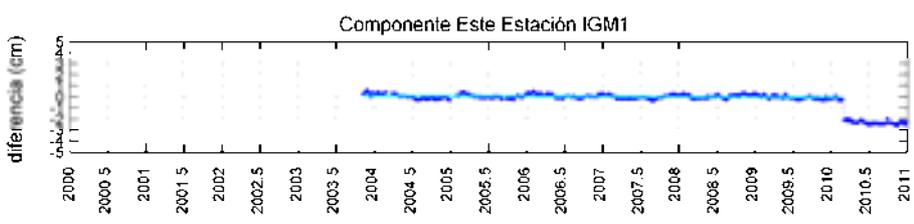


semana GPS

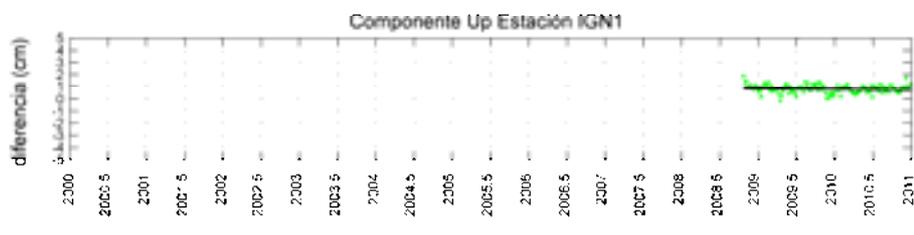
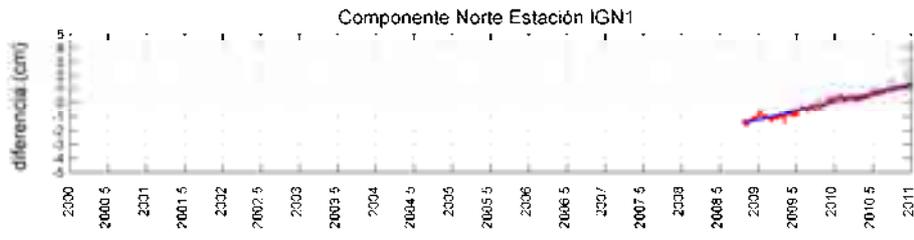




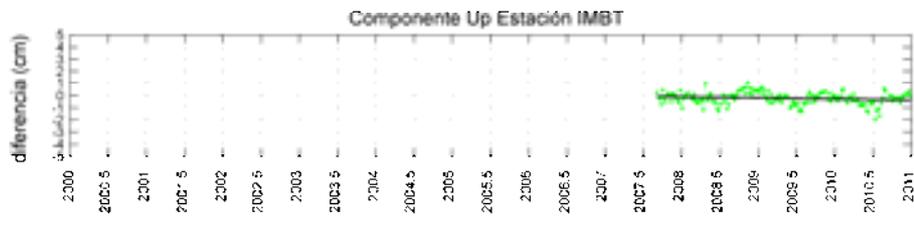
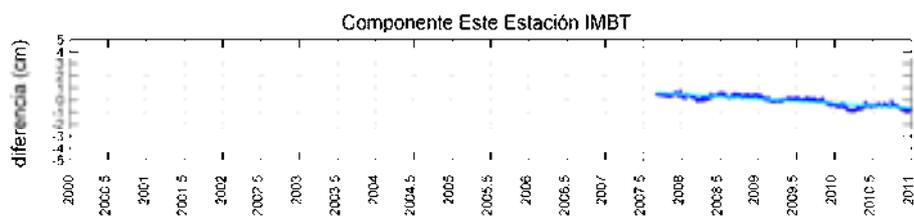
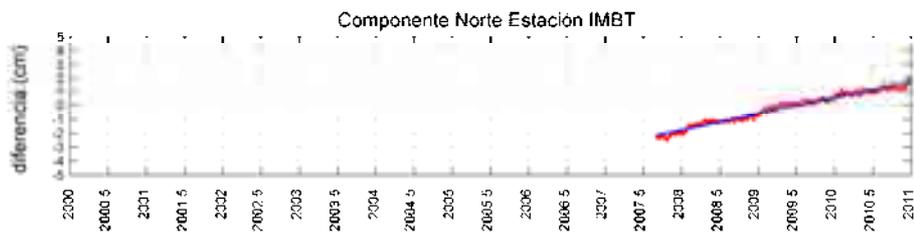
semana GPS



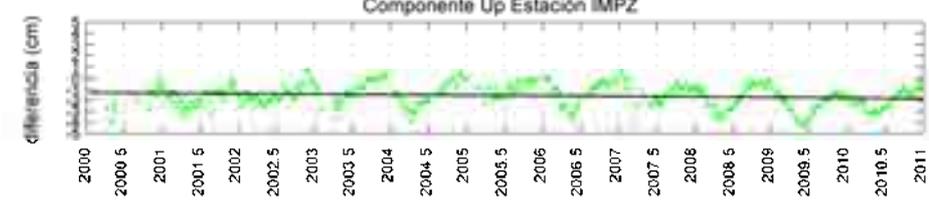
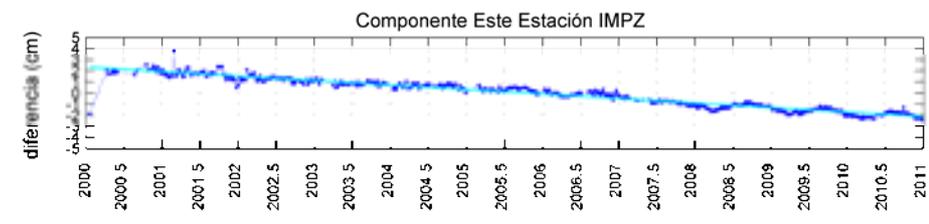
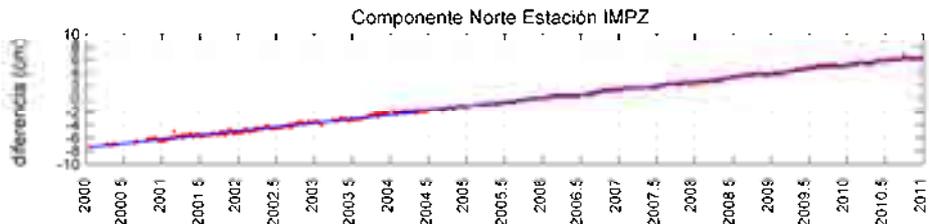
Año - época del año



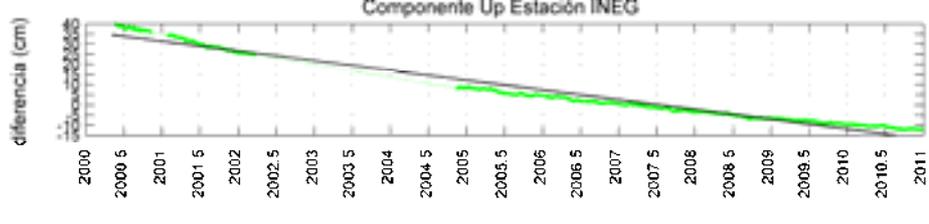
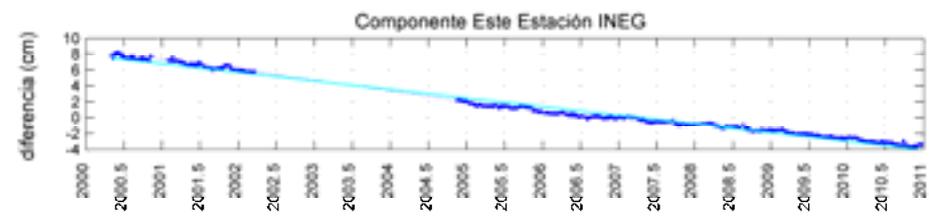
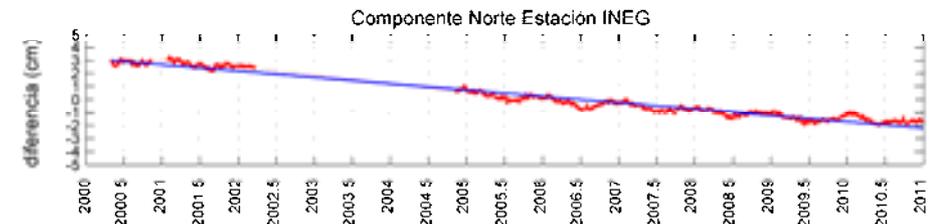
semana GPS



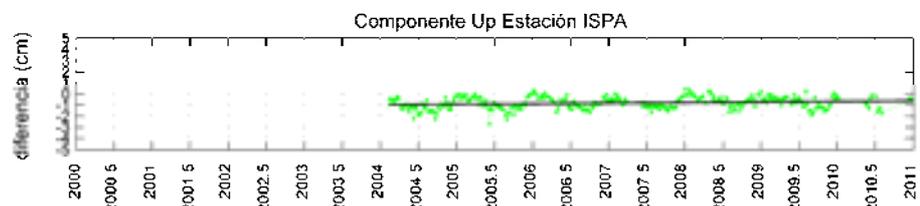
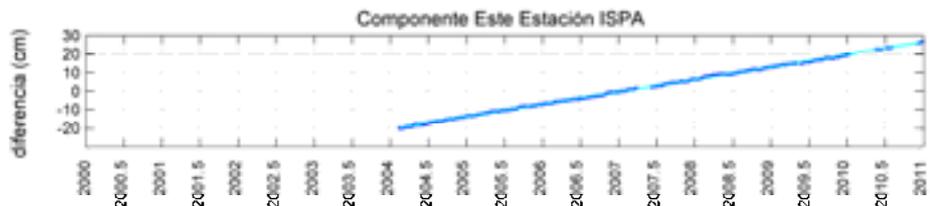
semana GPS



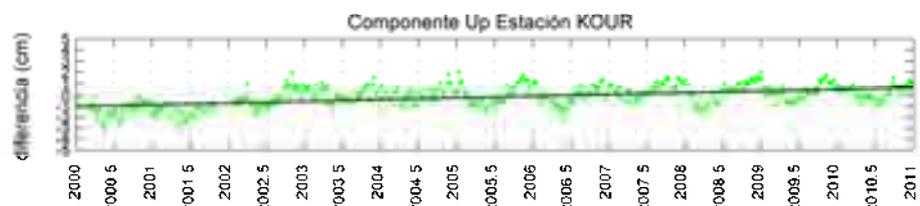
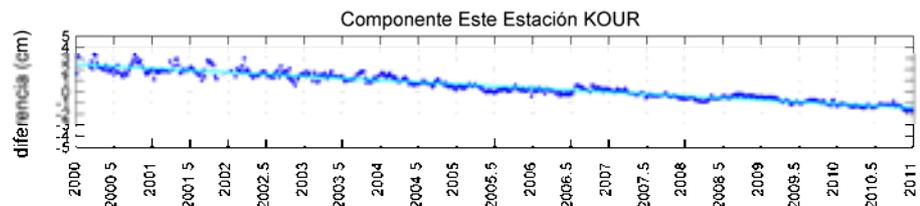
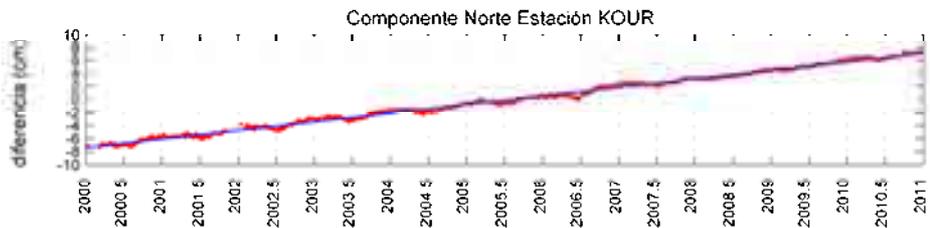
Año - época del año



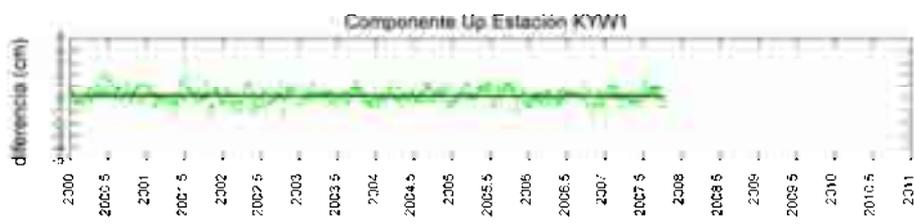
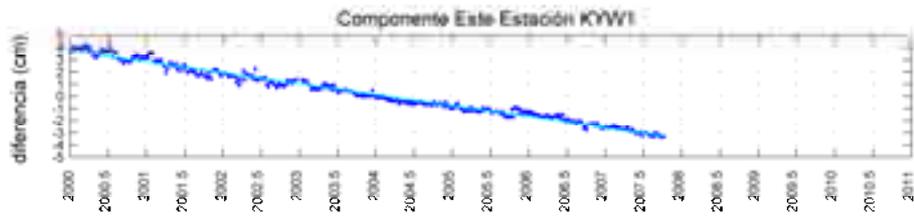
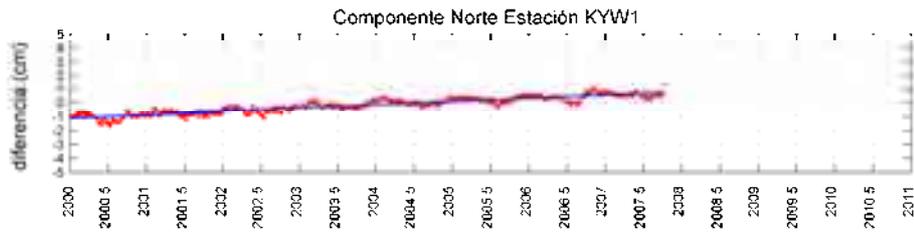
Año - época del año



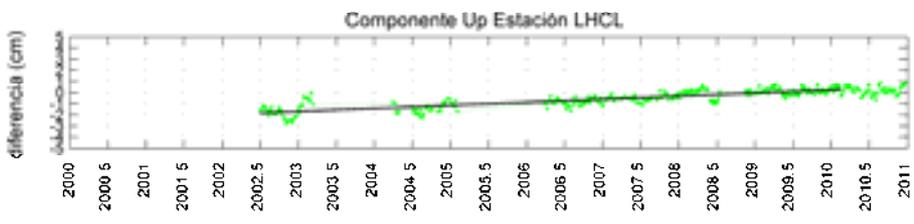
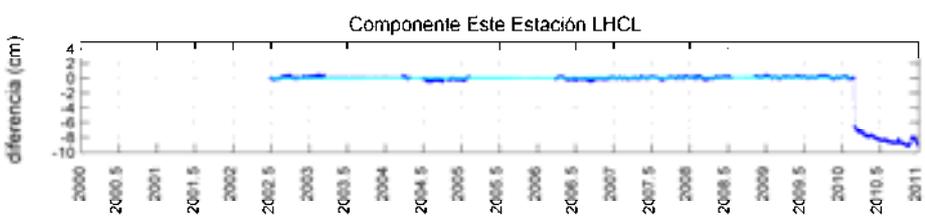
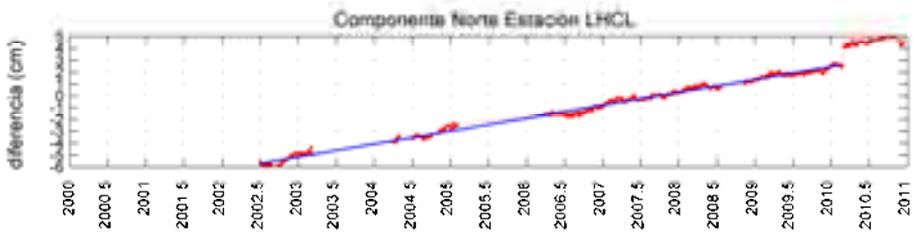
Año - época del año



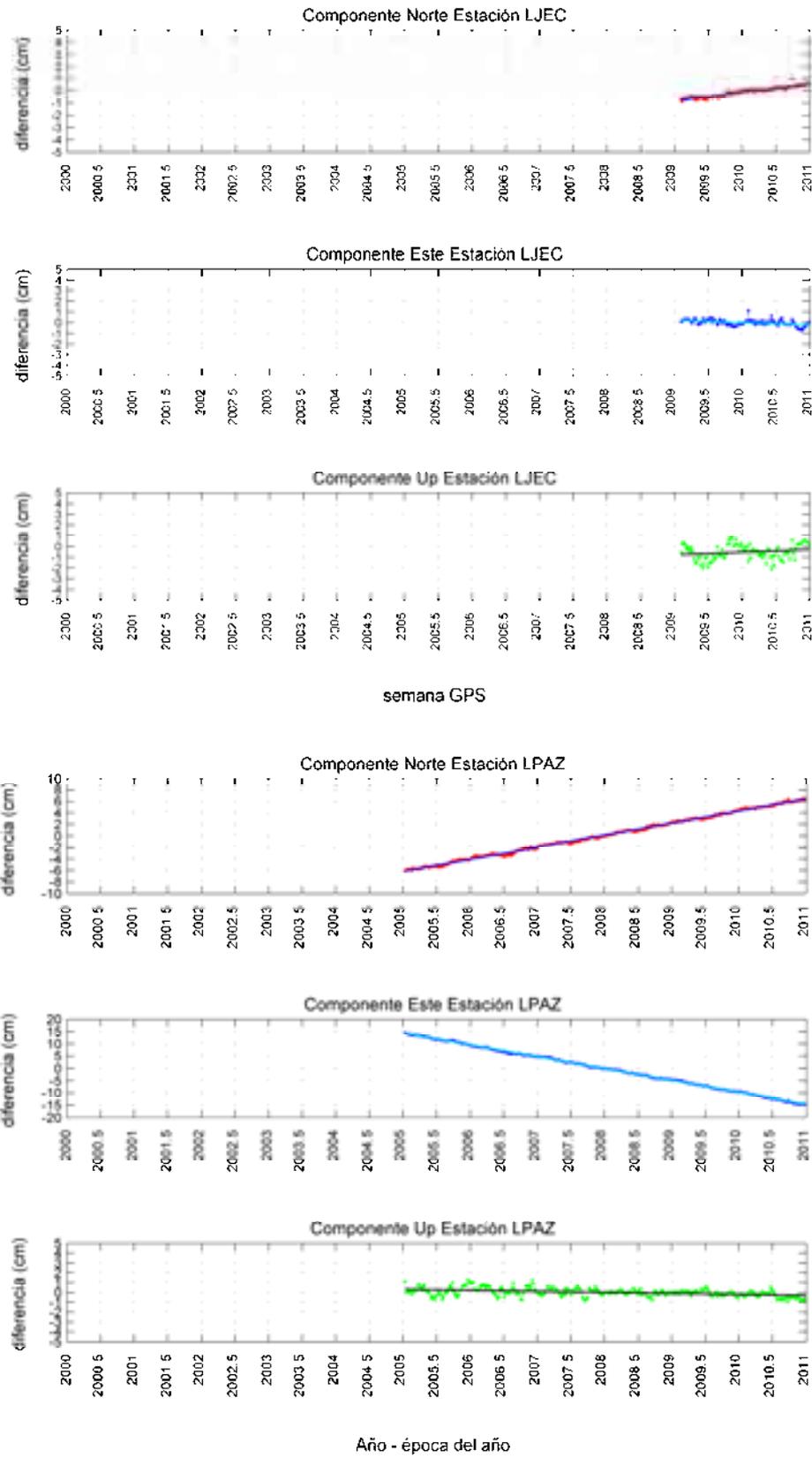
Año - época del año

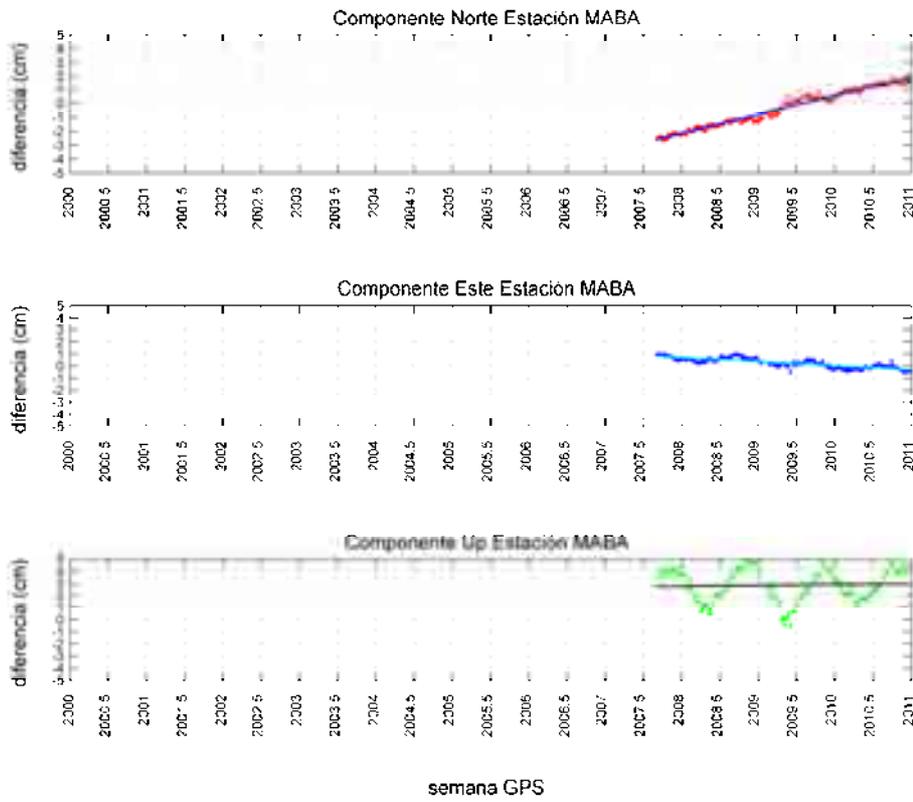
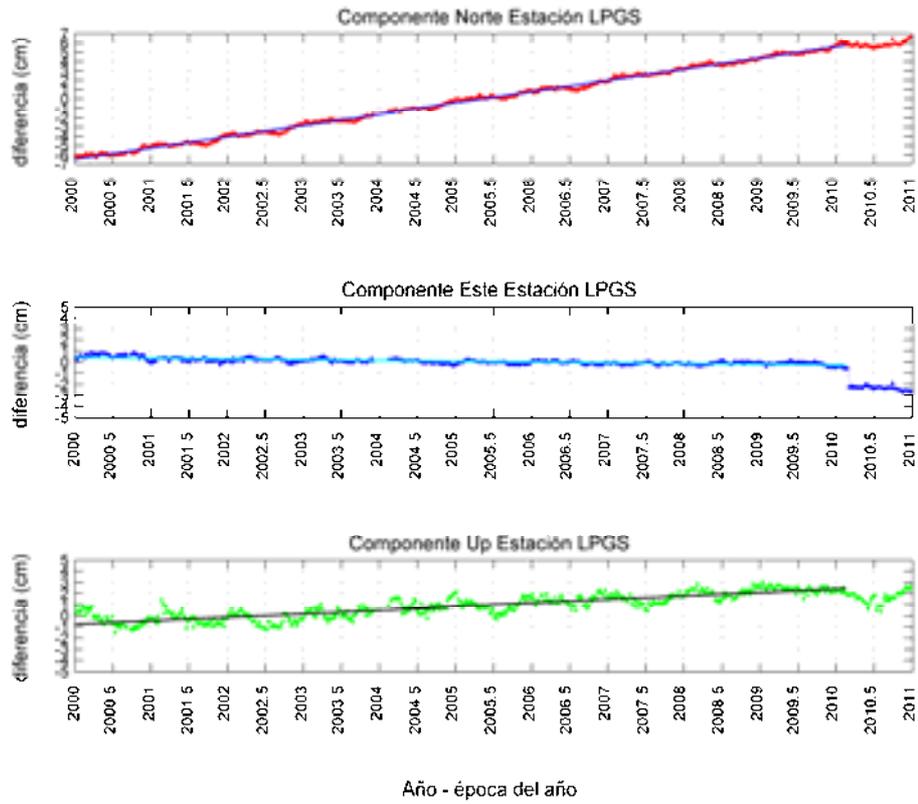


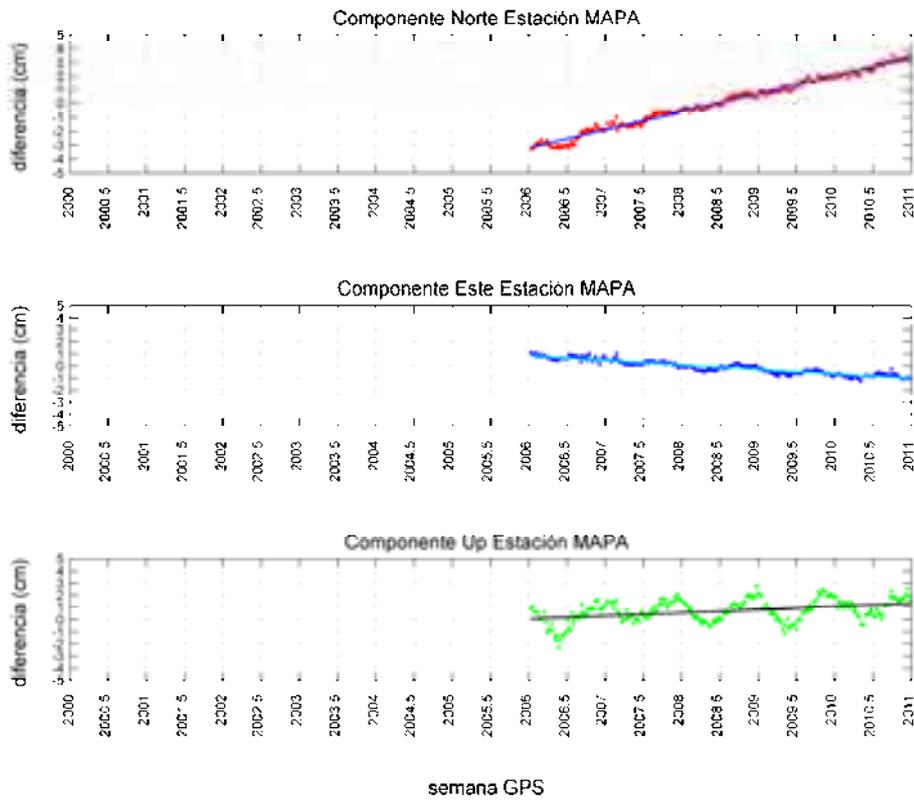
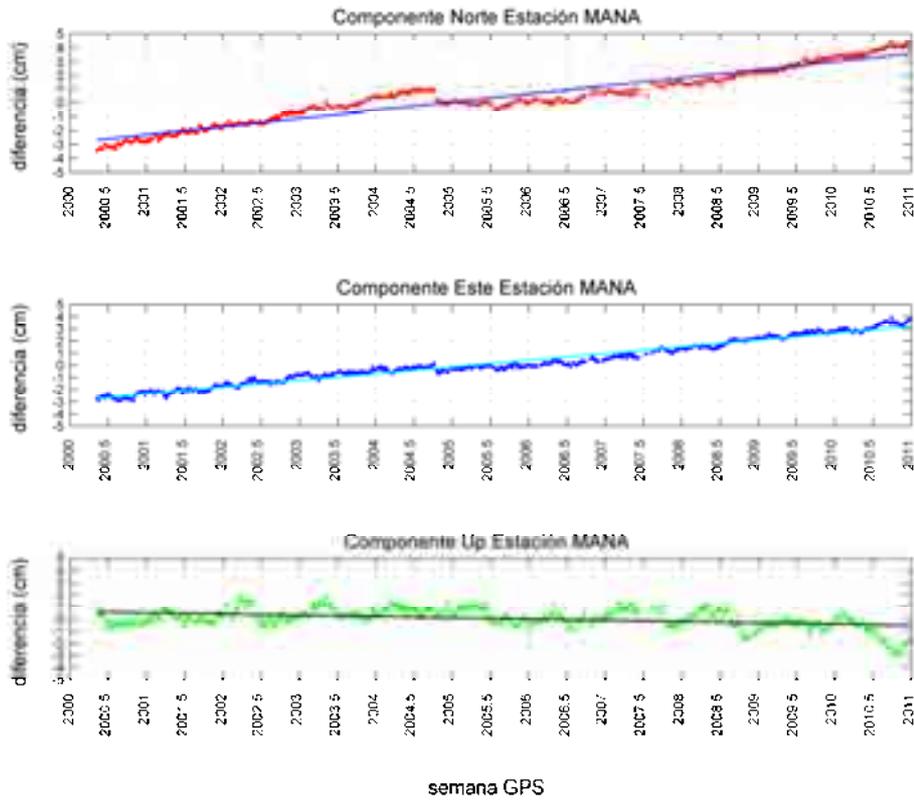
semana GPS

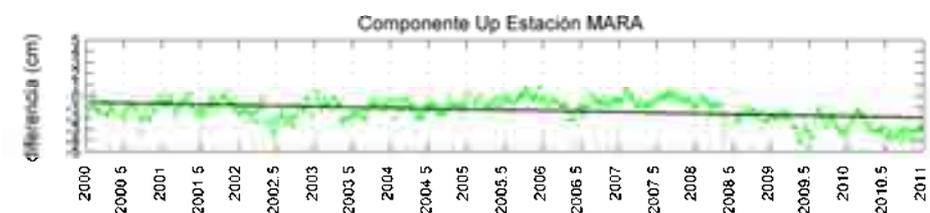
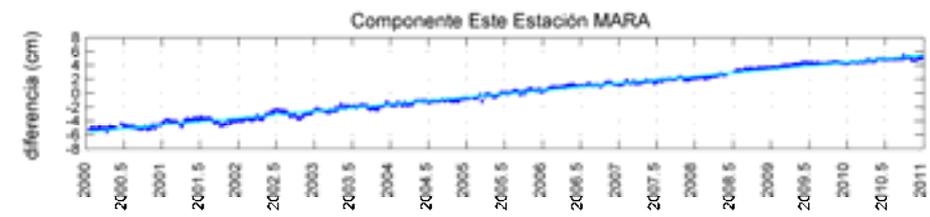
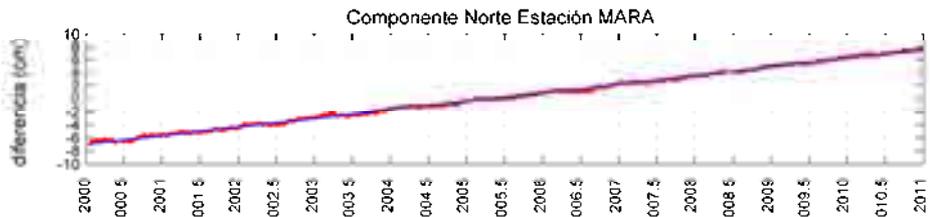


Año - época del año

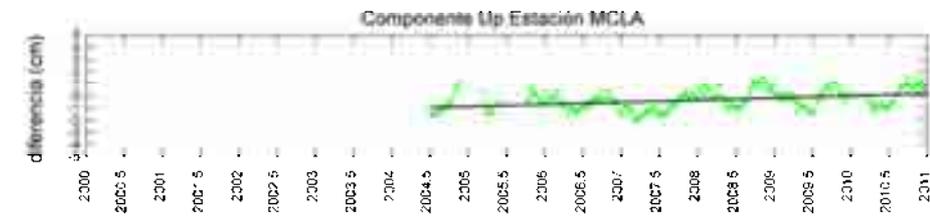
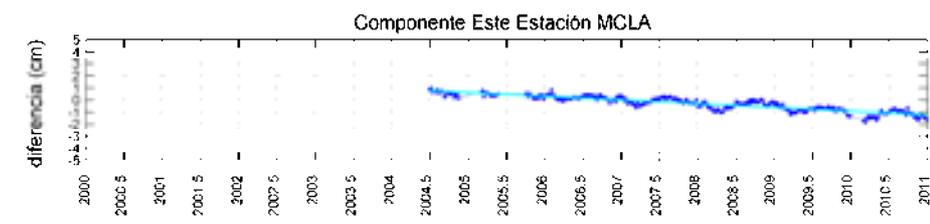
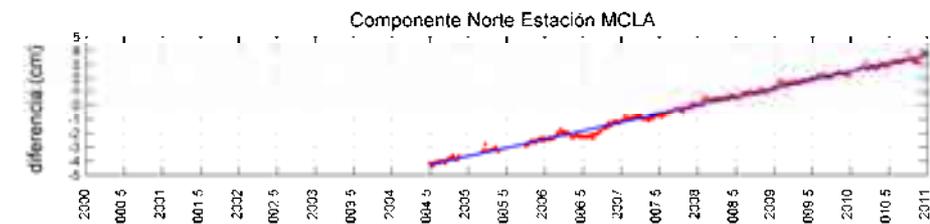




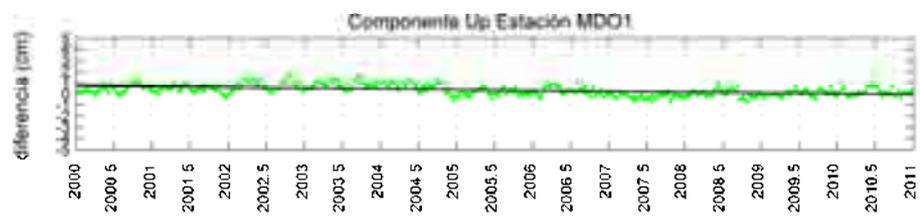
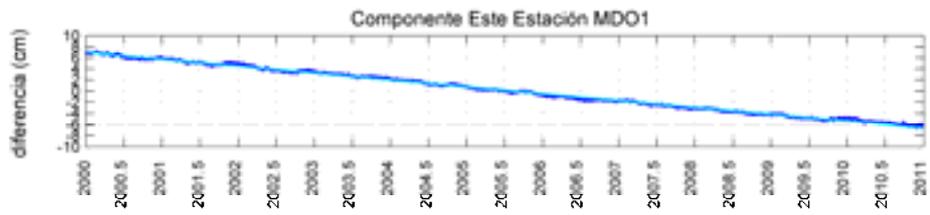
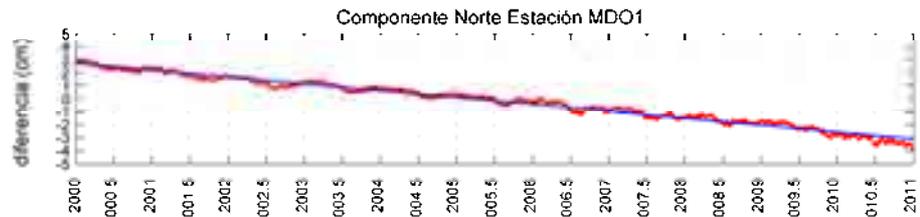




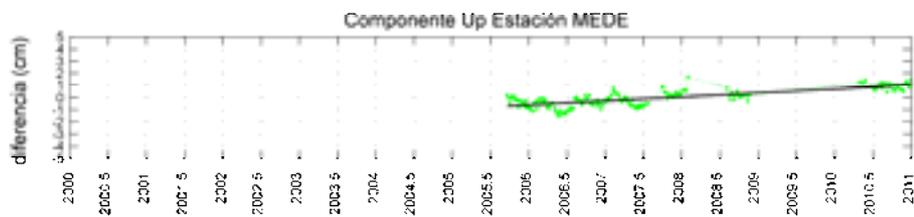
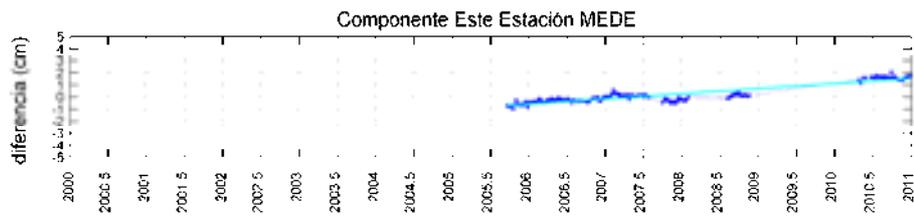
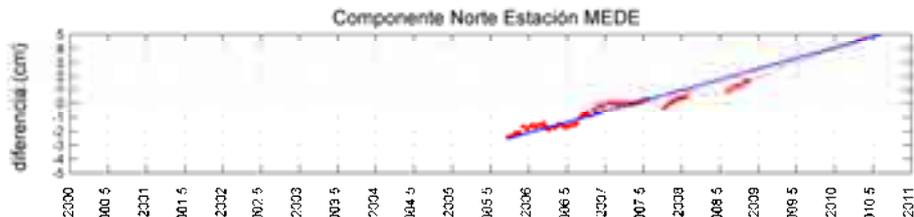
Año - época del año



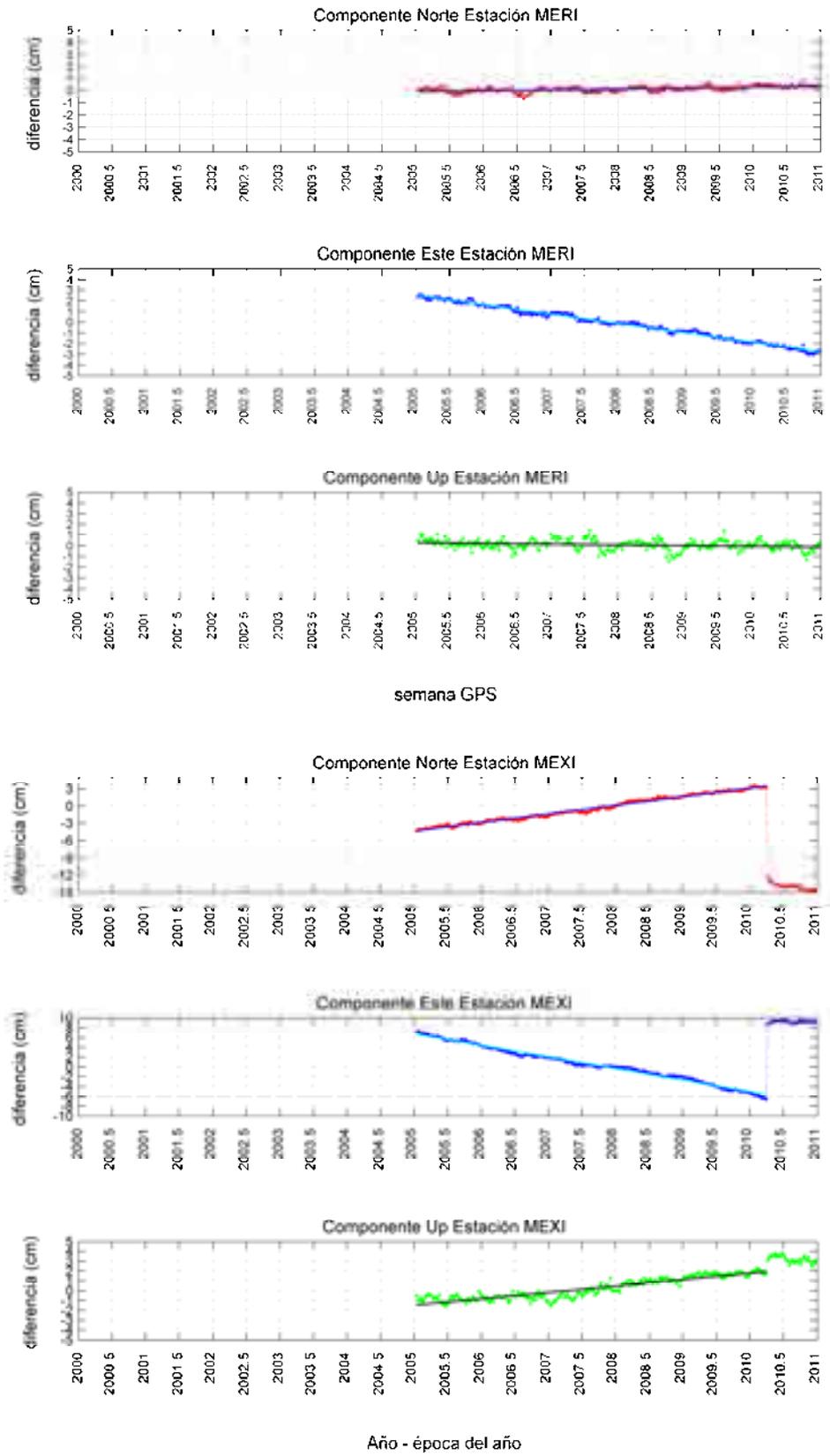
semana GPS

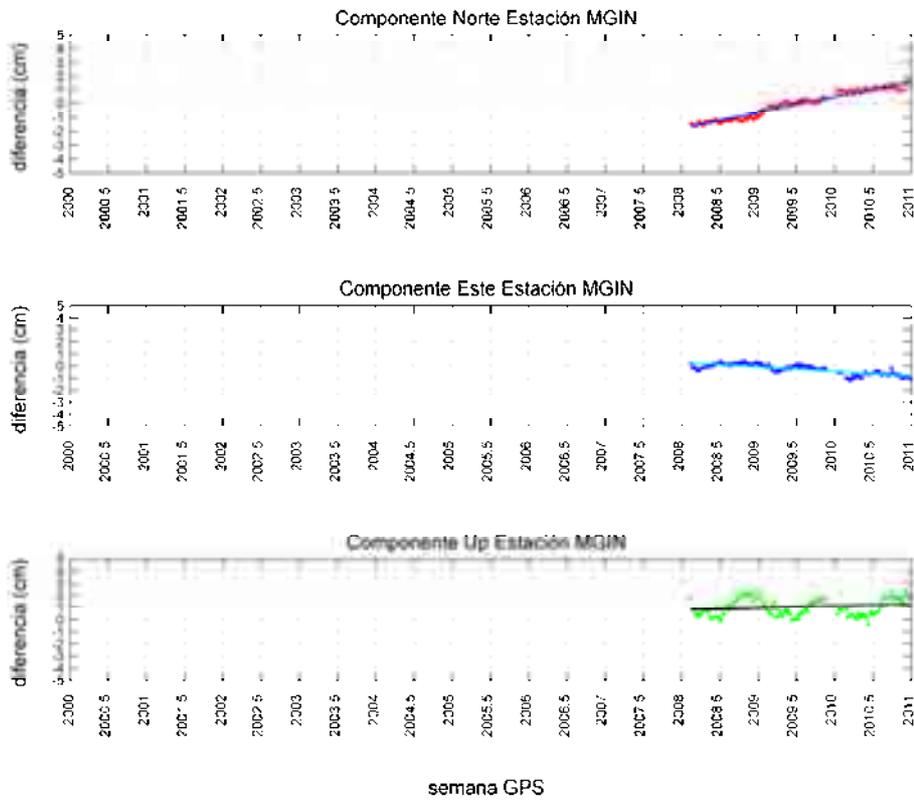
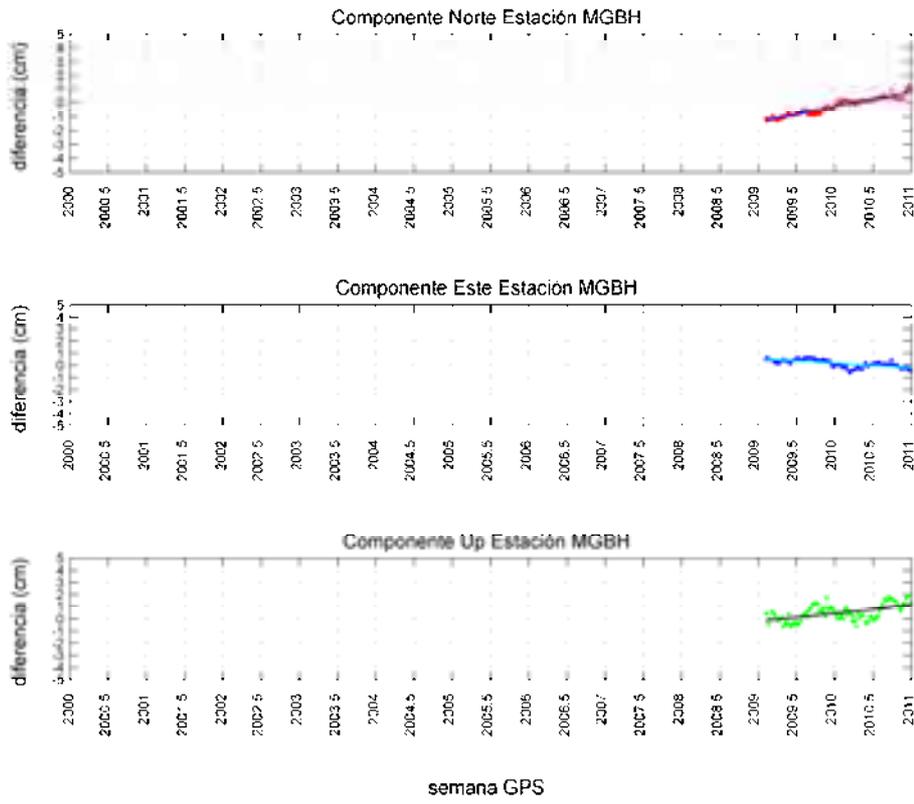


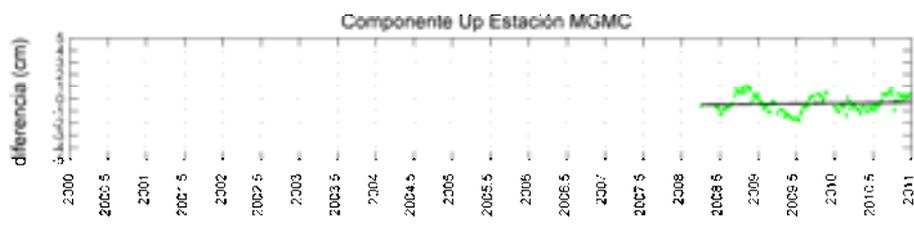
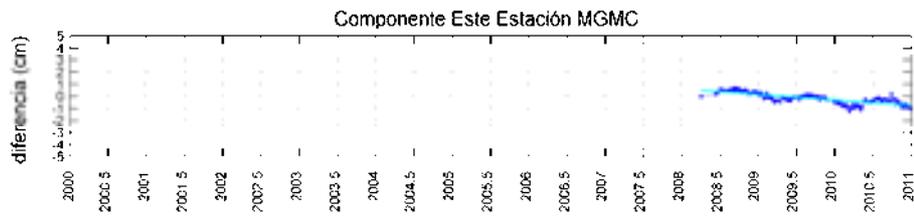
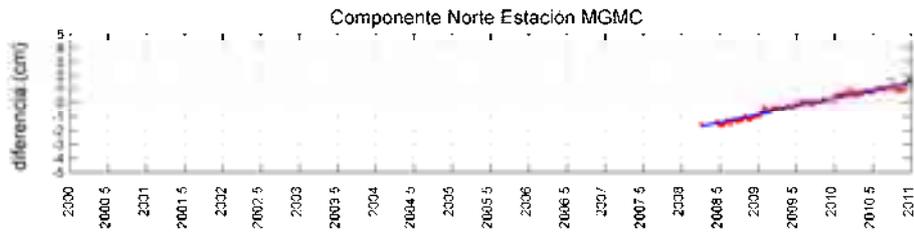
Año - época del año



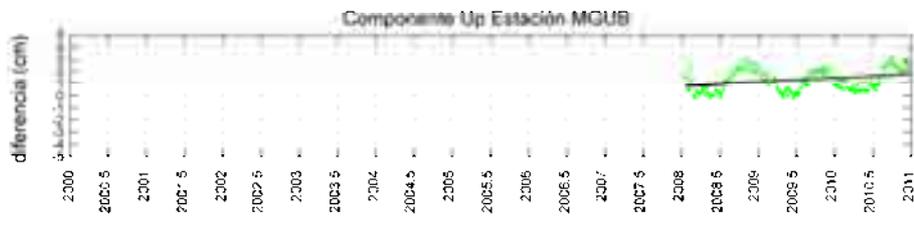
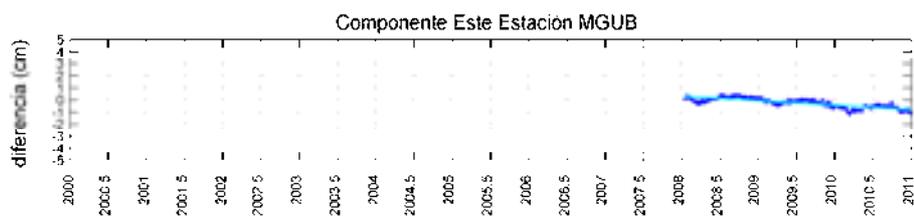
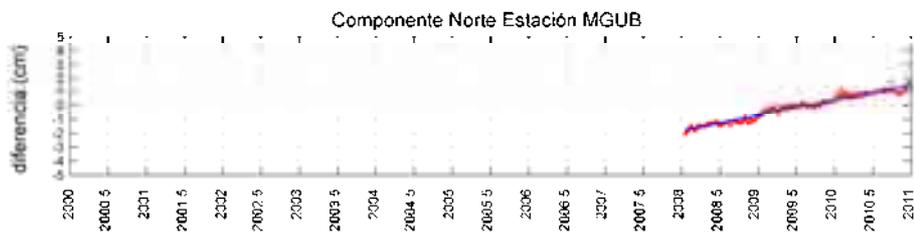
semana GPS



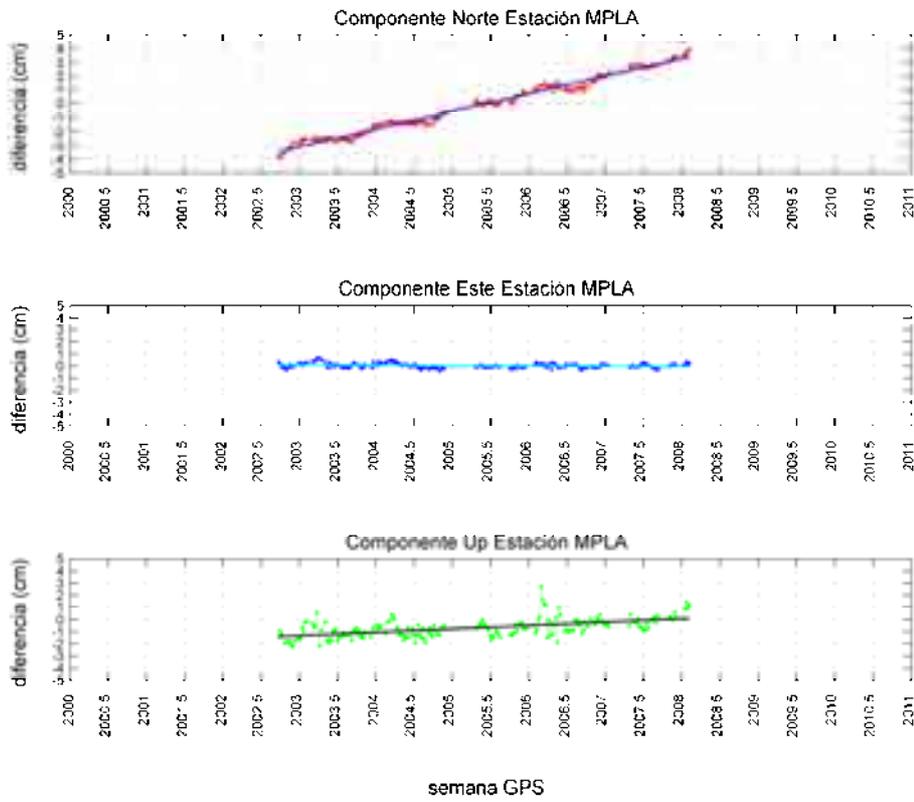
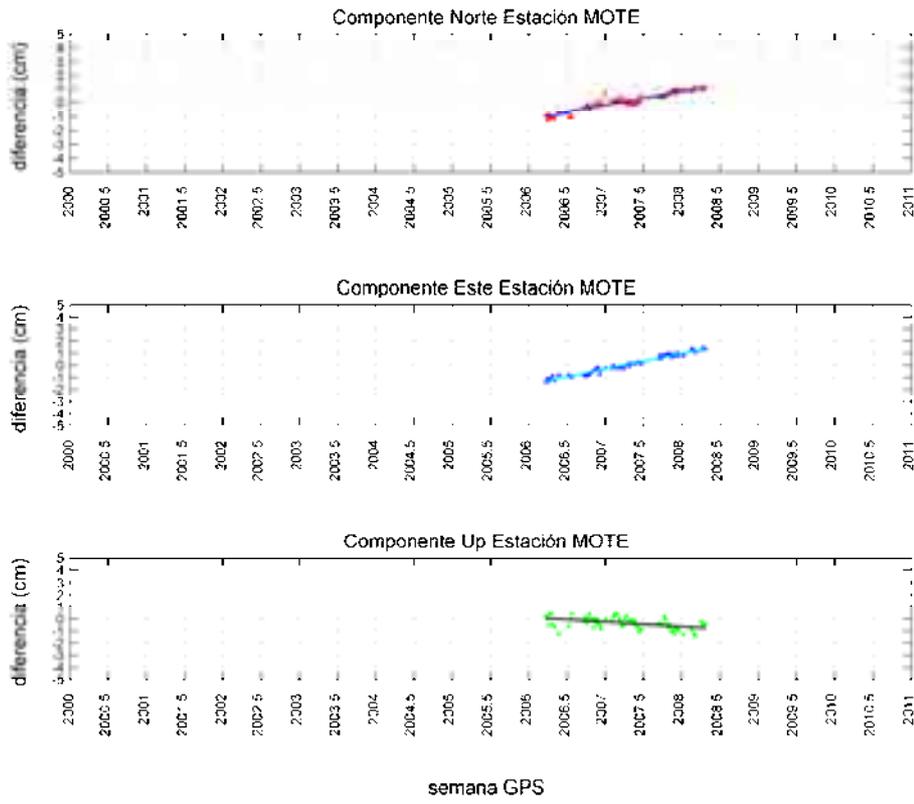


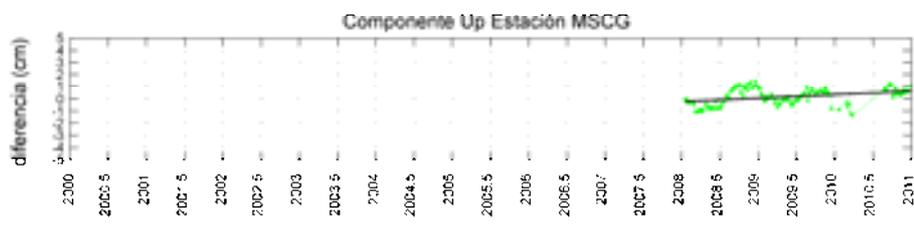
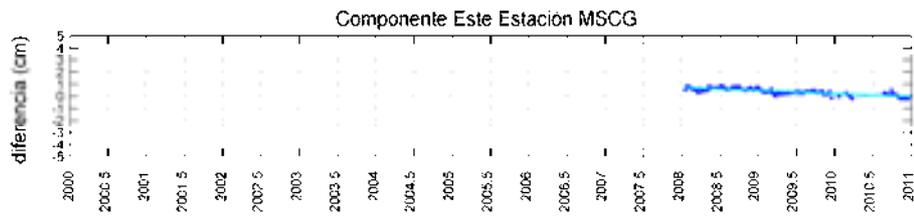
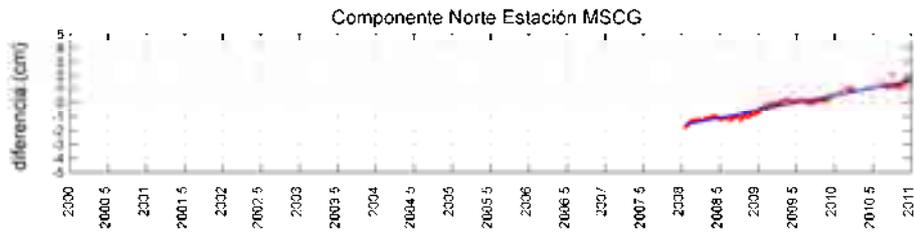


semana GPS

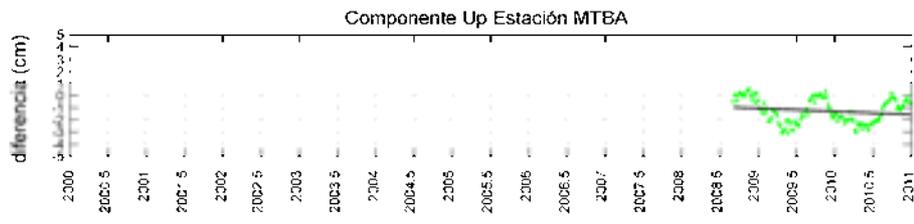
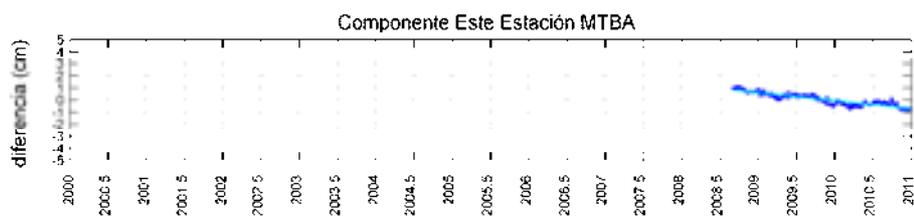
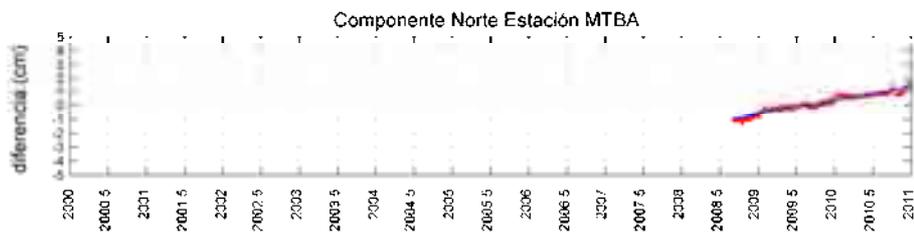


semana GPS

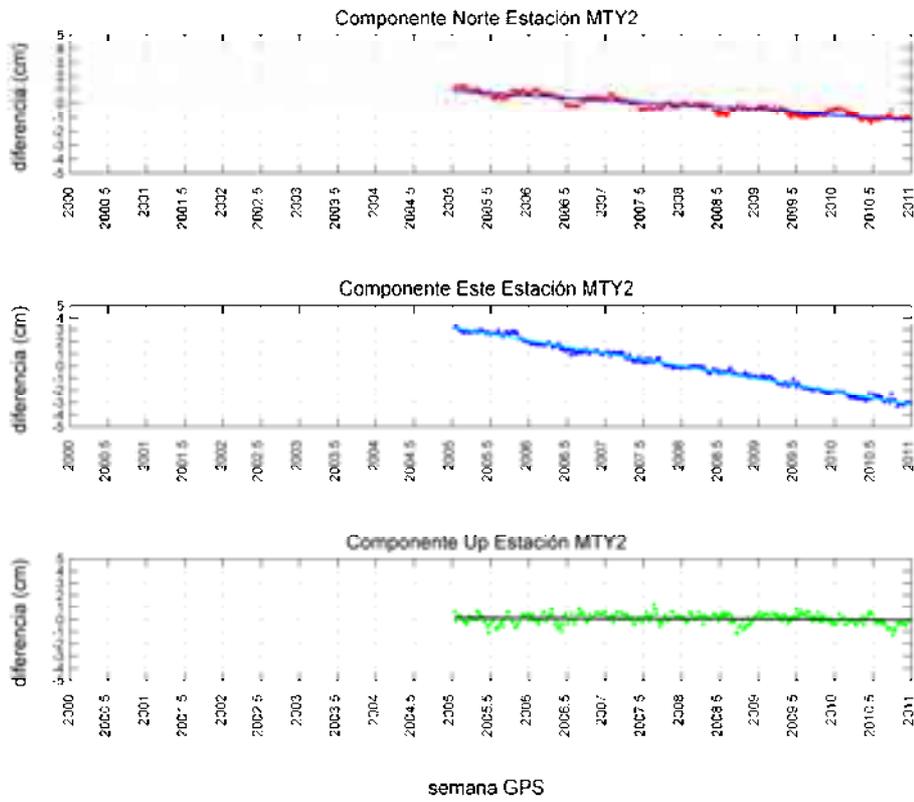
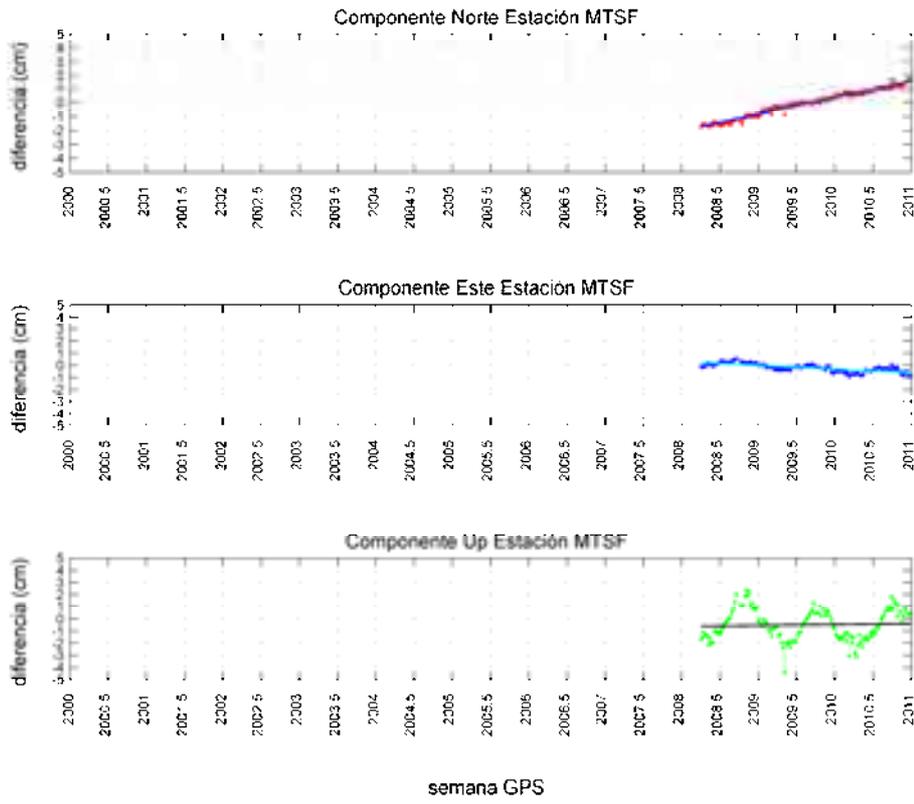


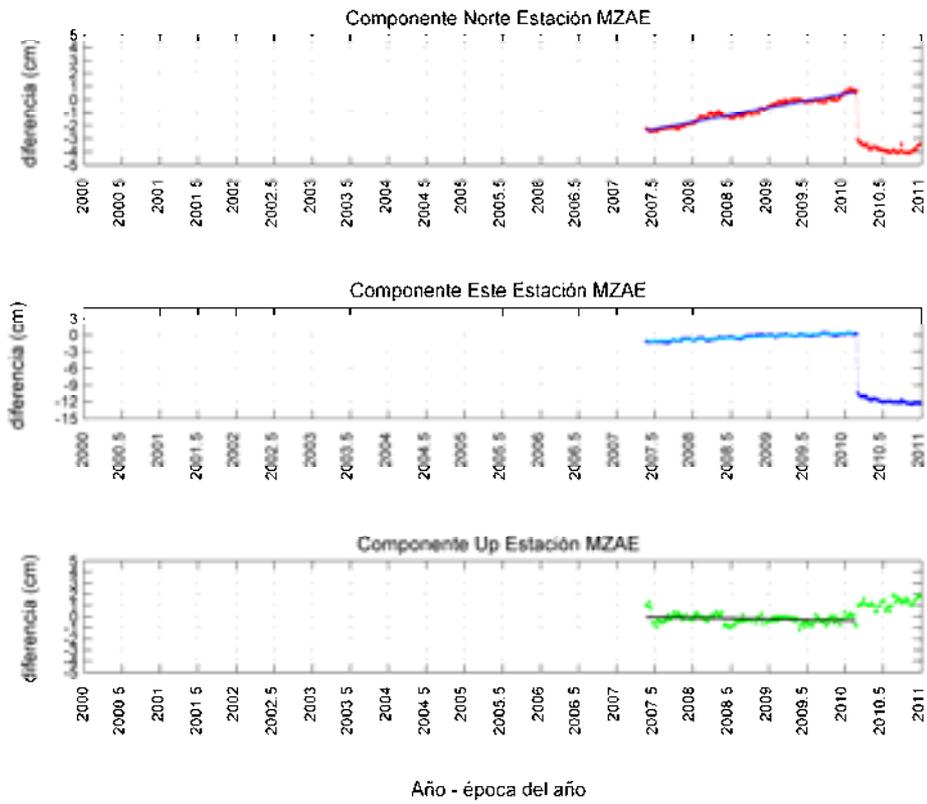
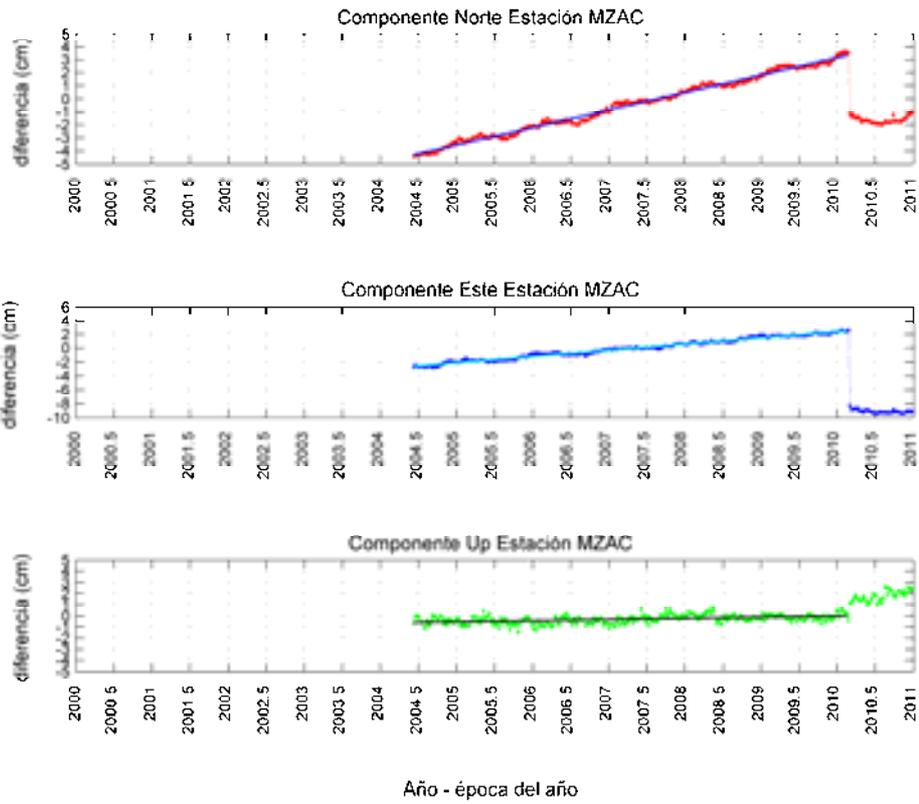


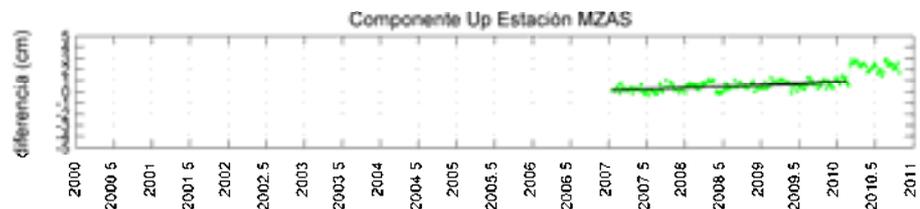
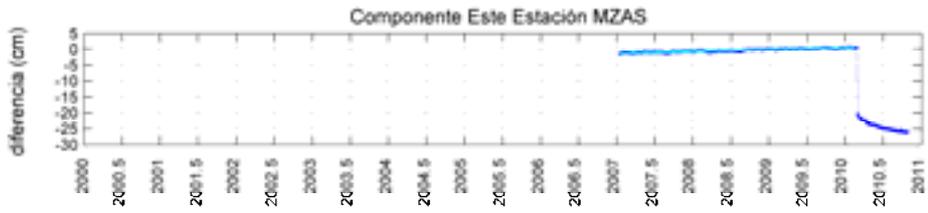
semana GPS



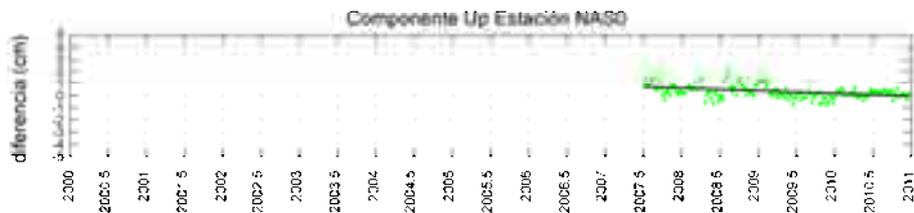
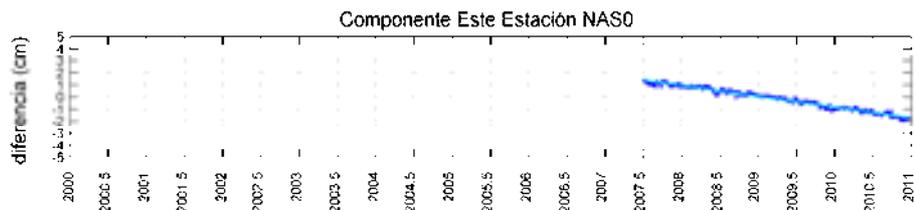
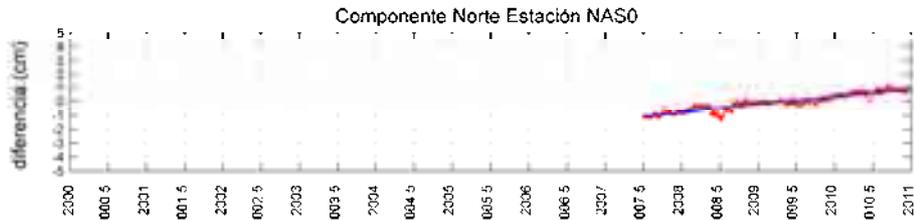
semana GPS



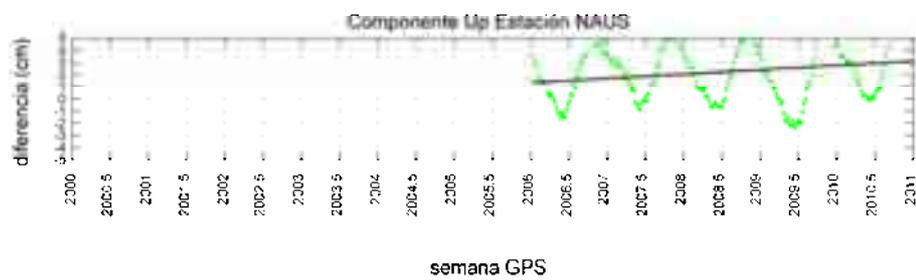
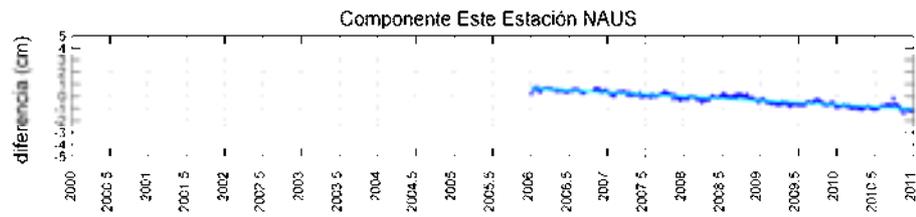




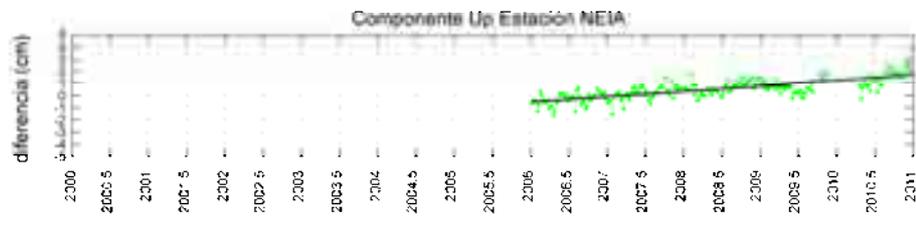
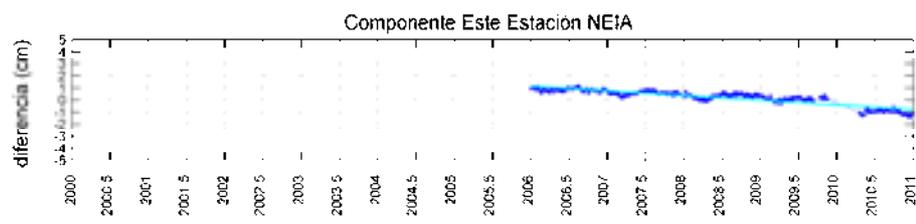
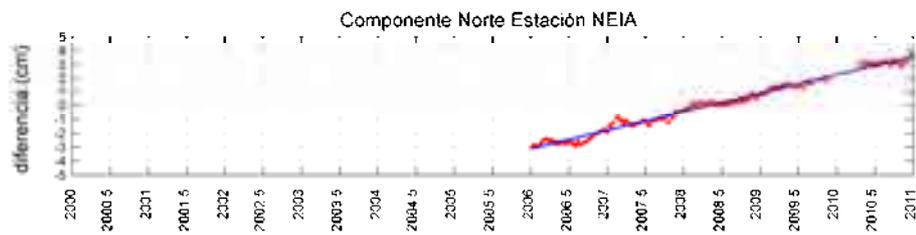
Año - época del año



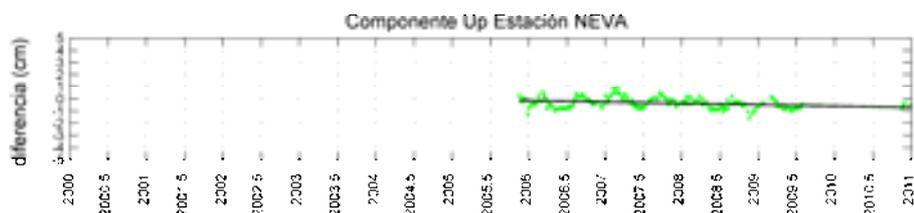
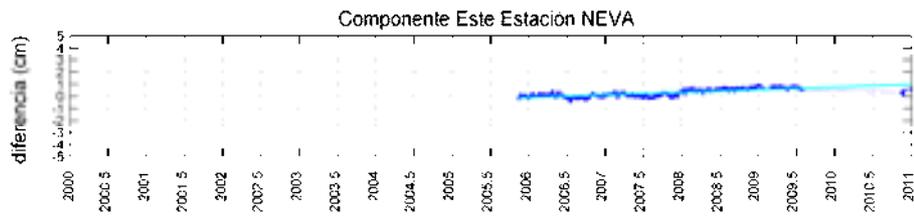
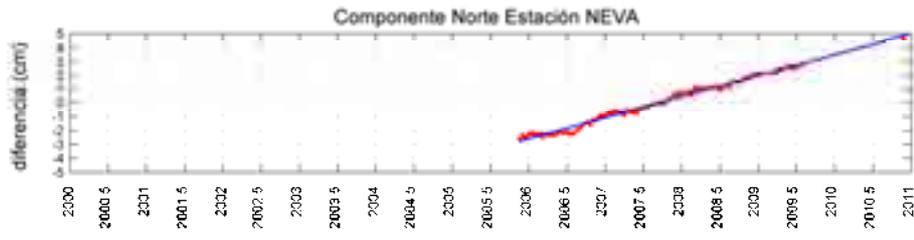
semana GPS



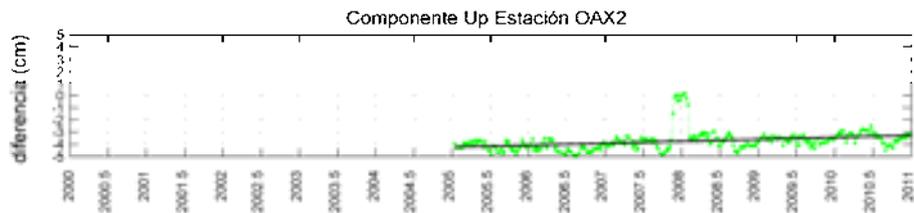
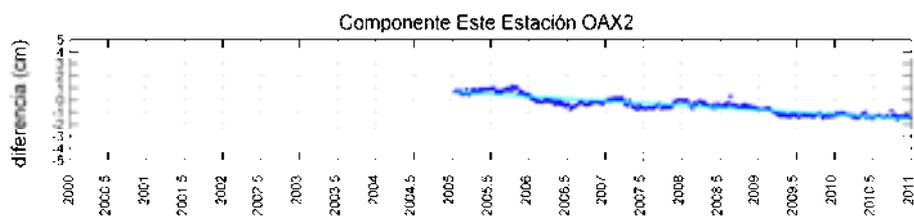
semana GPS



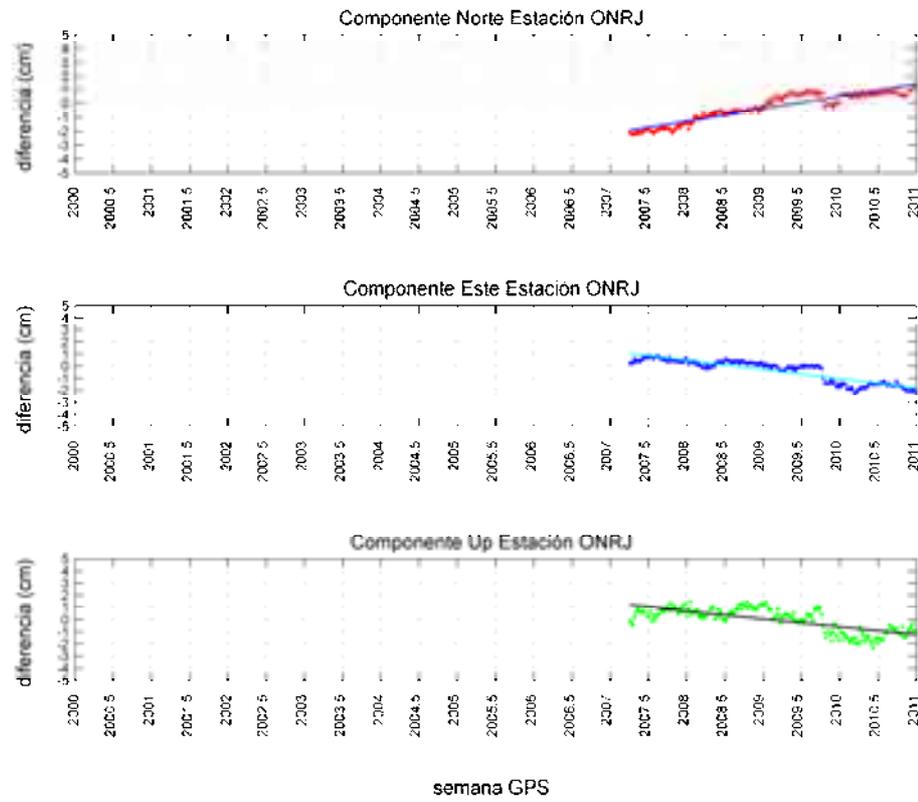
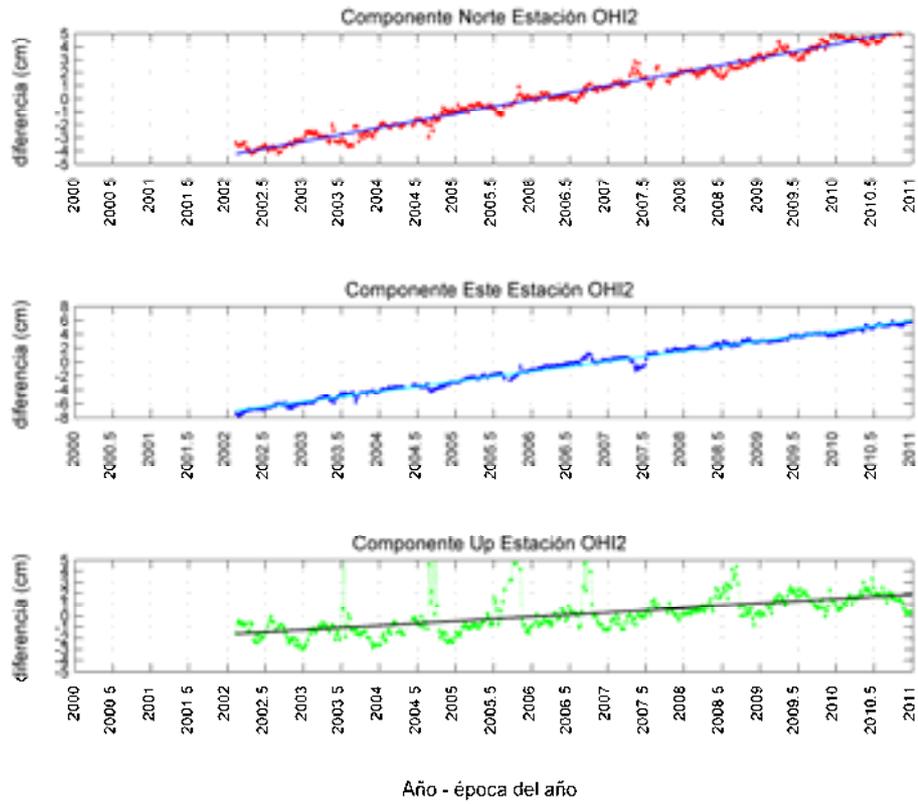
semana GPS

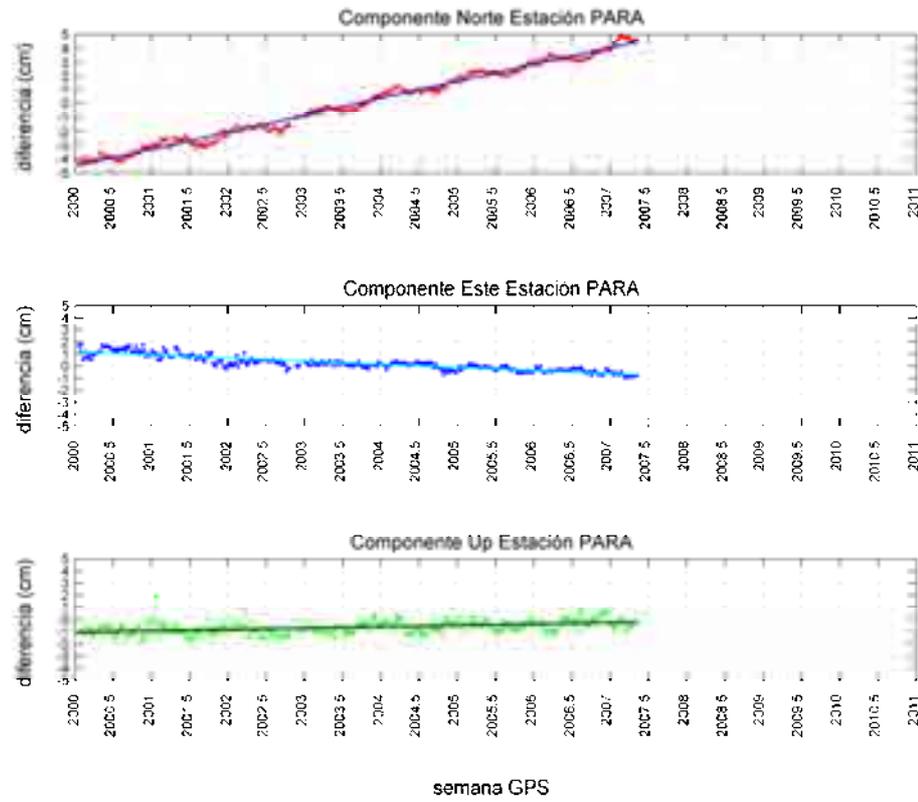
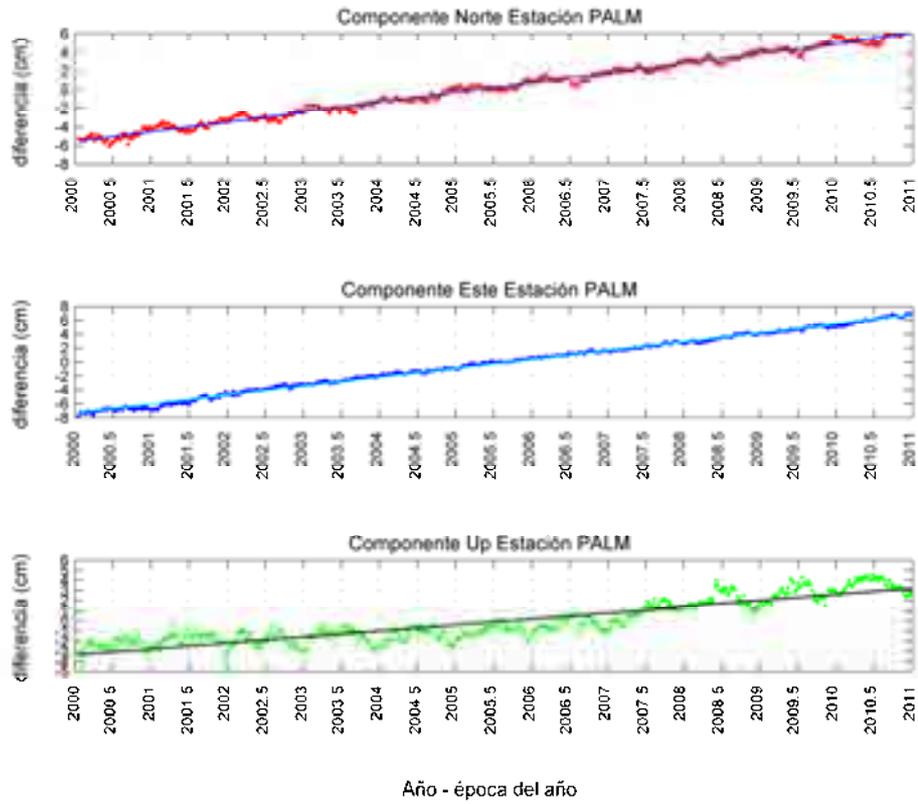


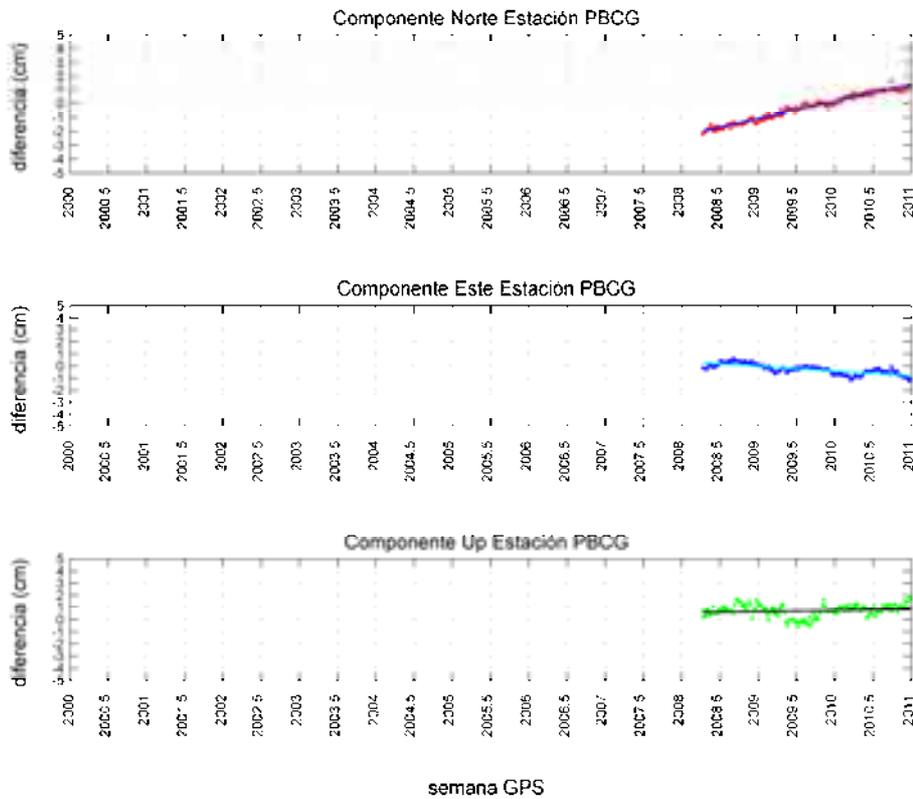
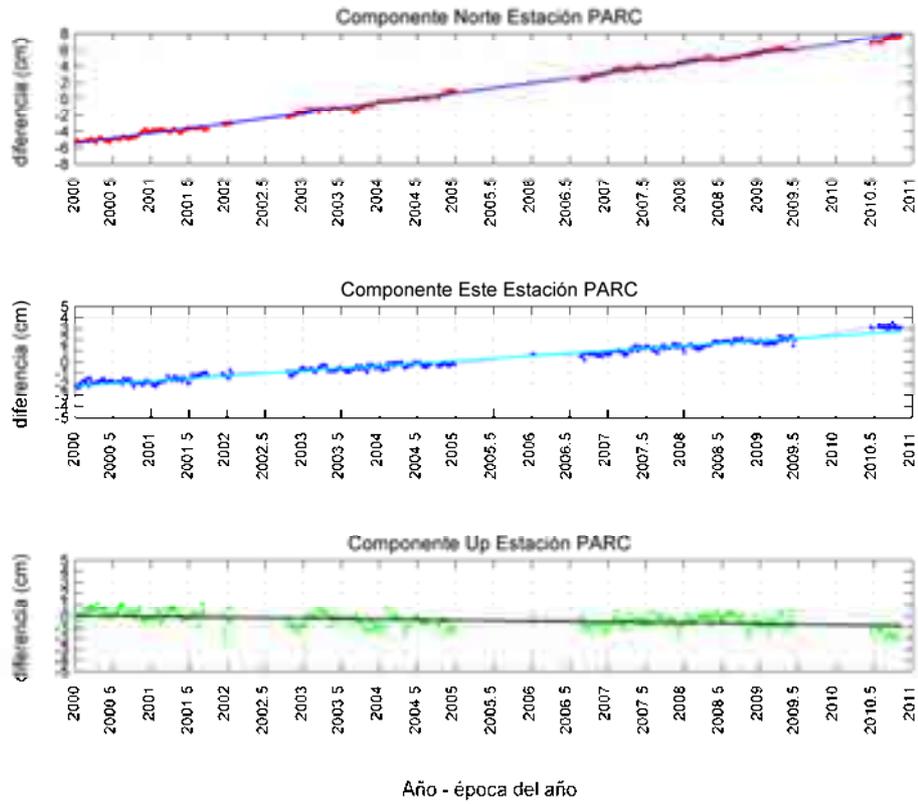
semana GPS

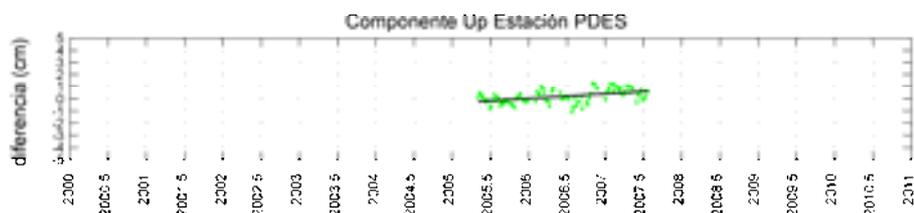
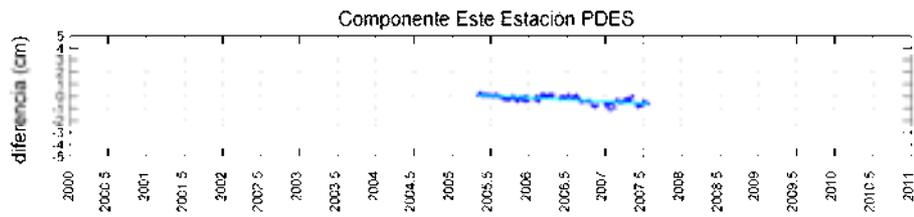
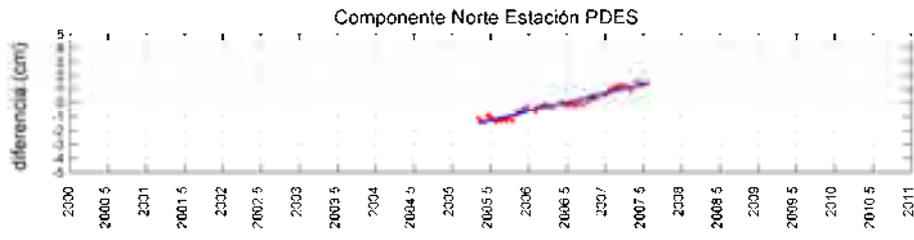


semana GPS

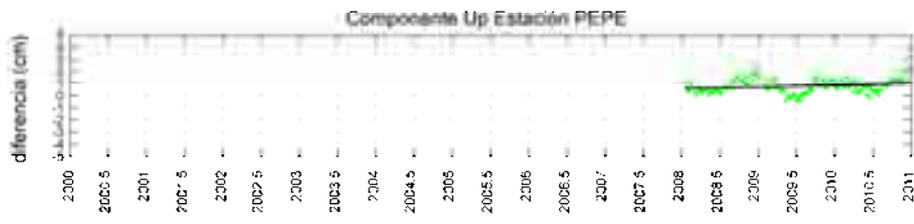
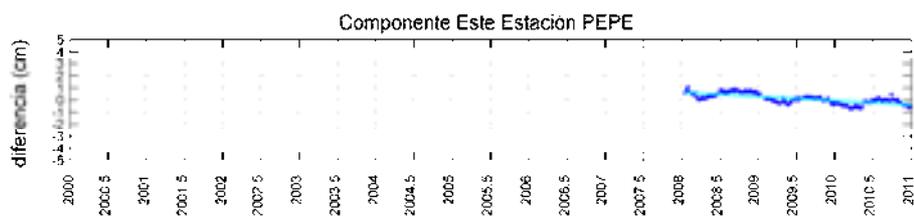
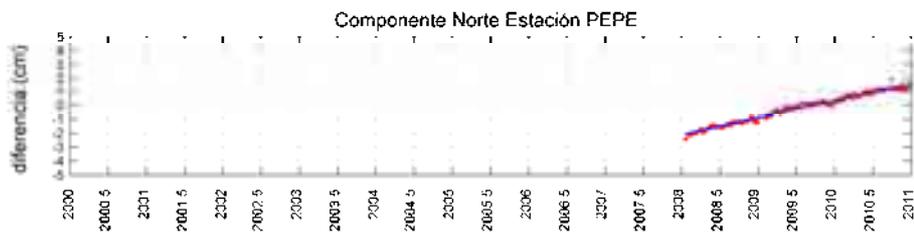




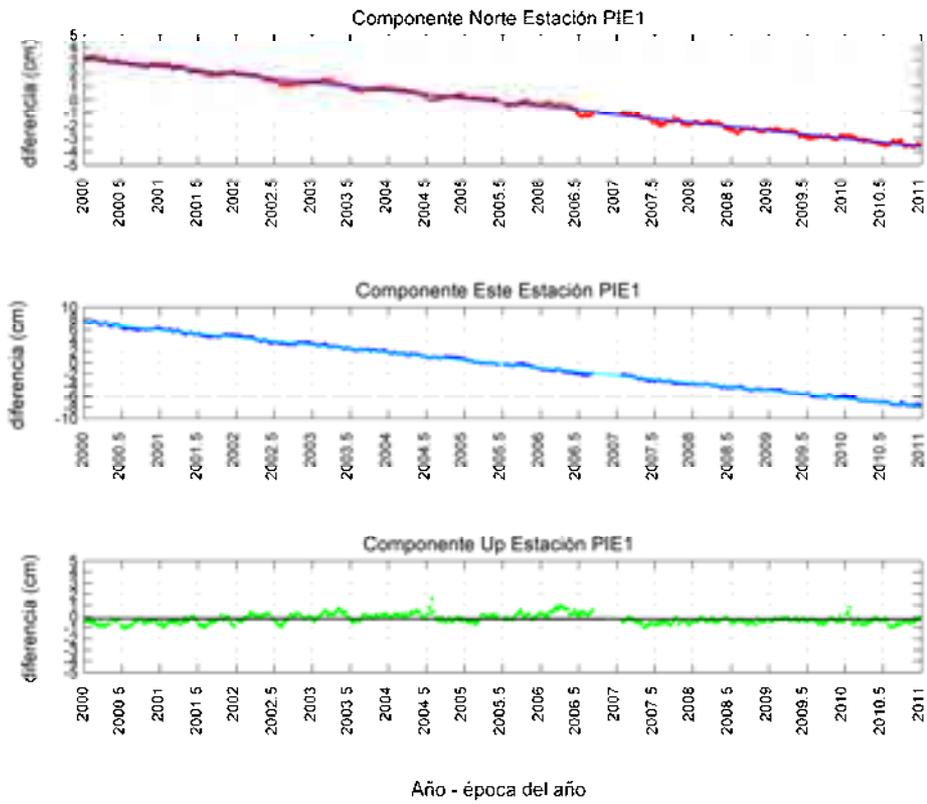
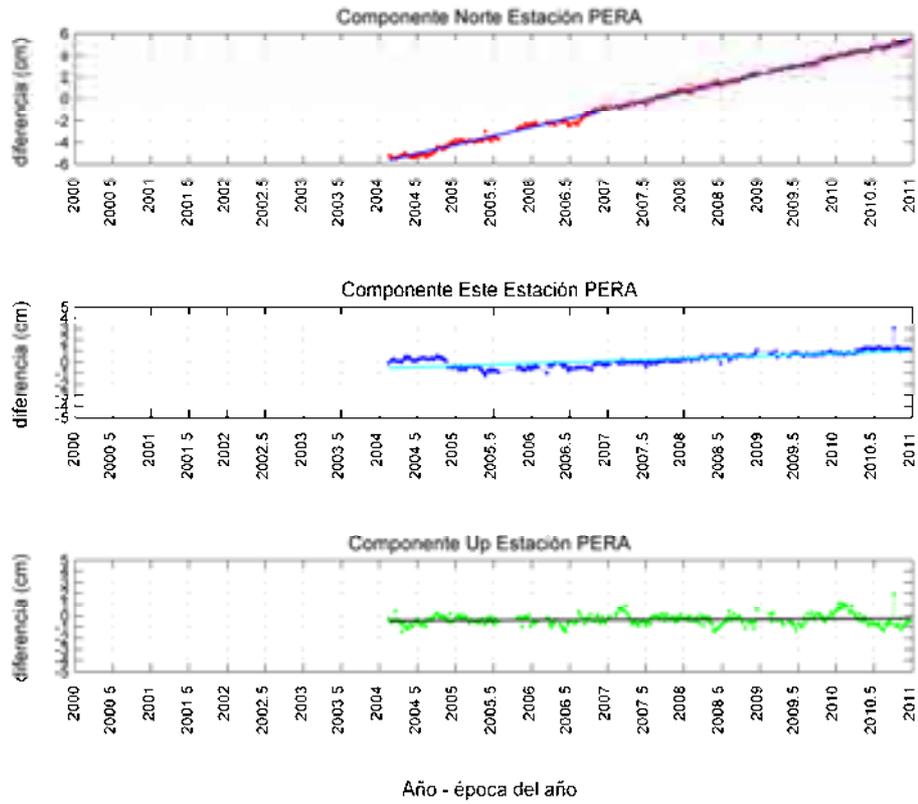


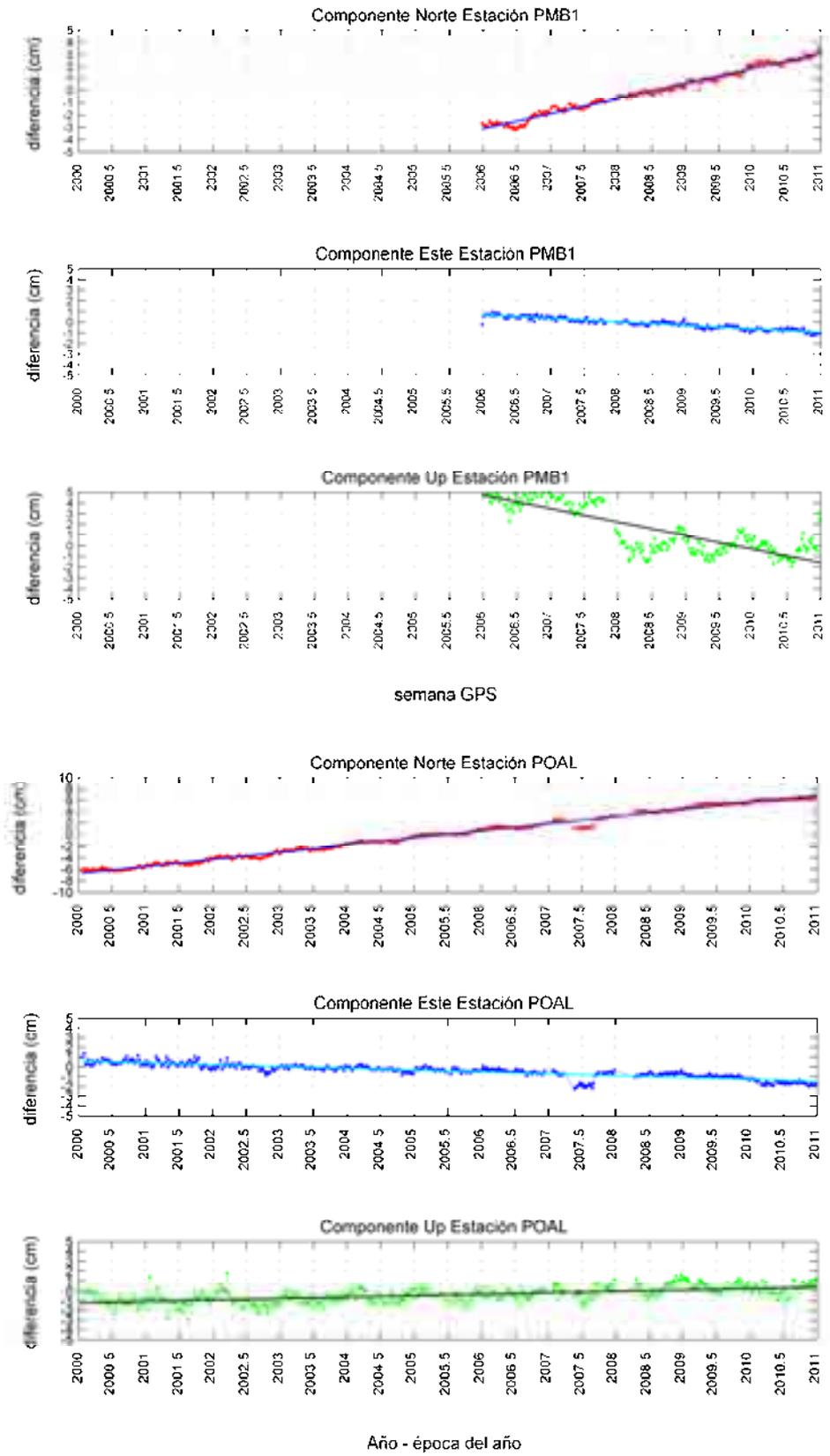


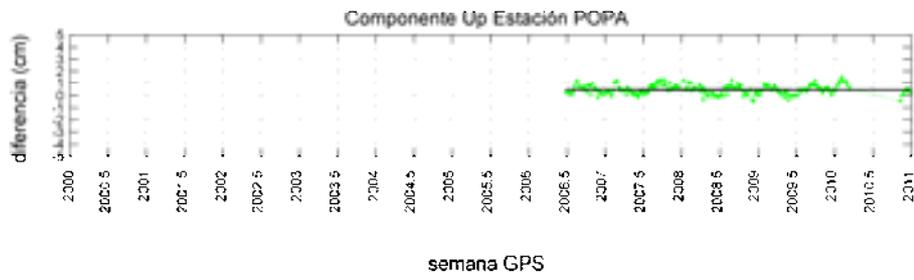
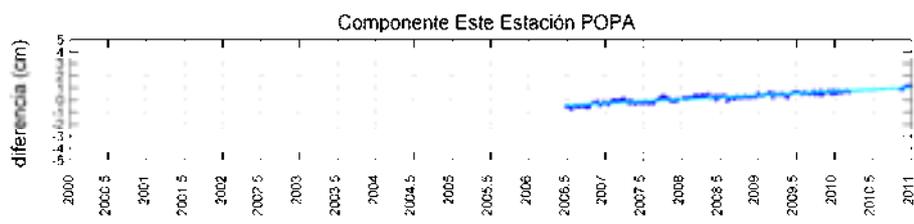
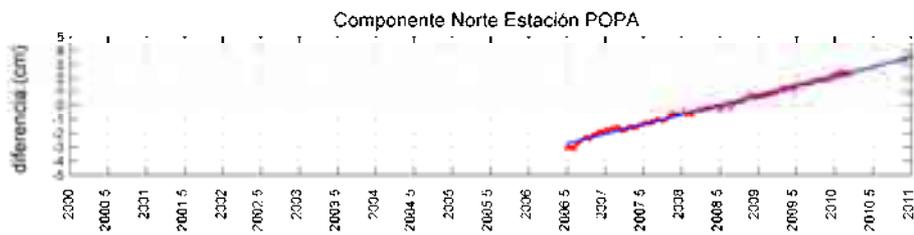
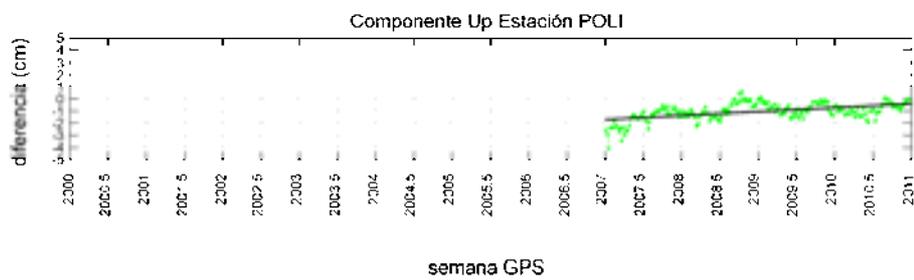
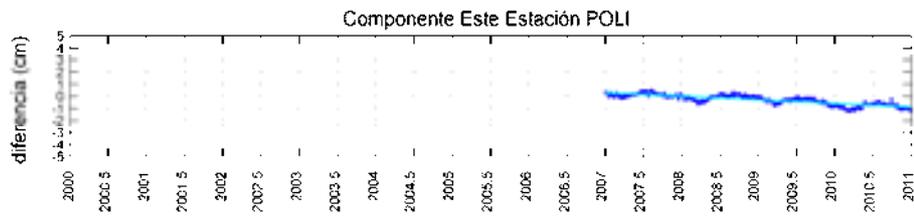
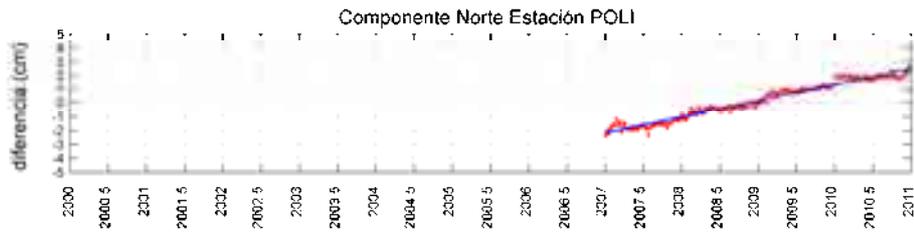
semana GPS

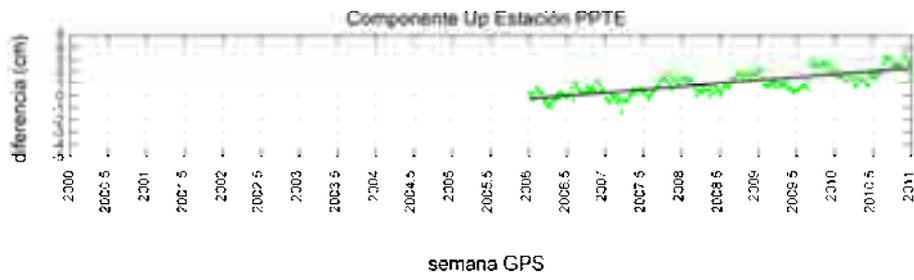
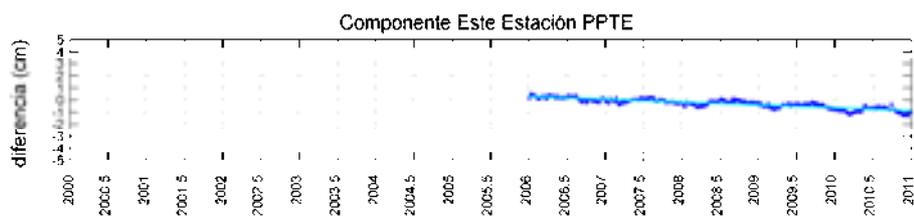
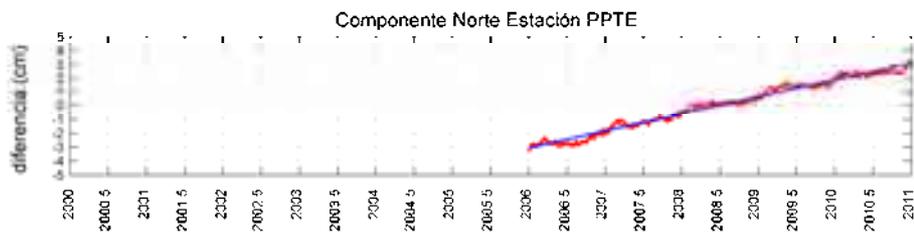
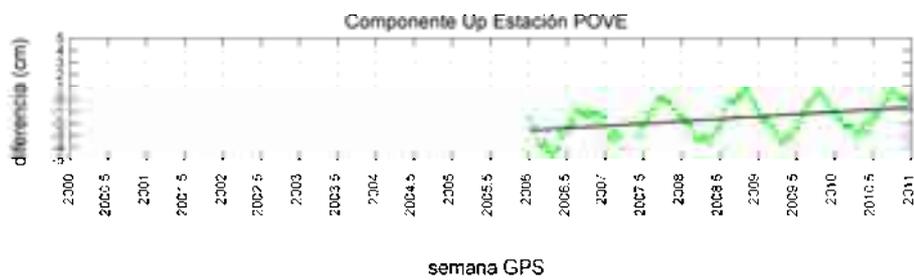
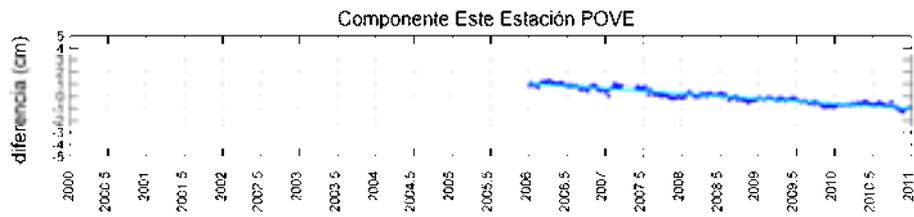
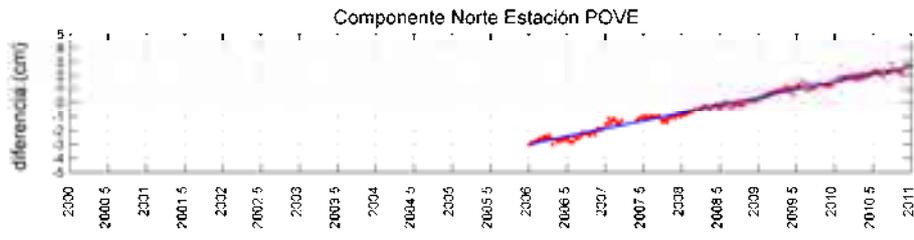


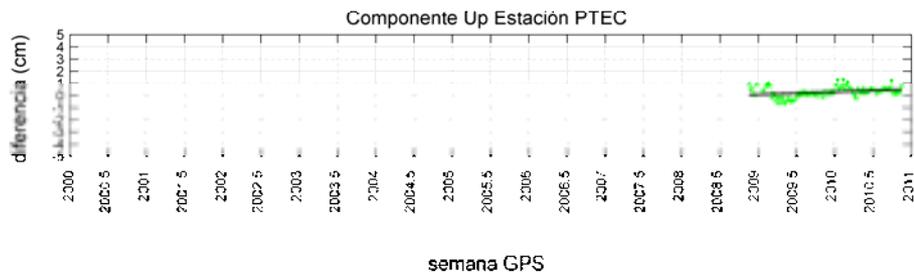
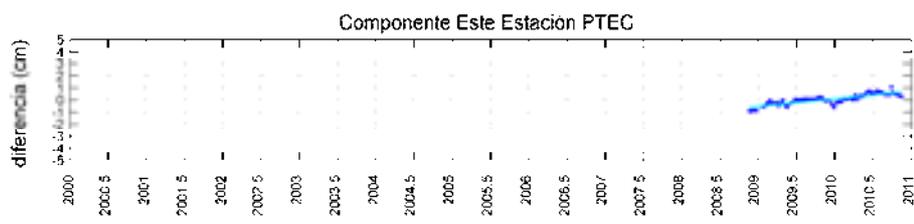
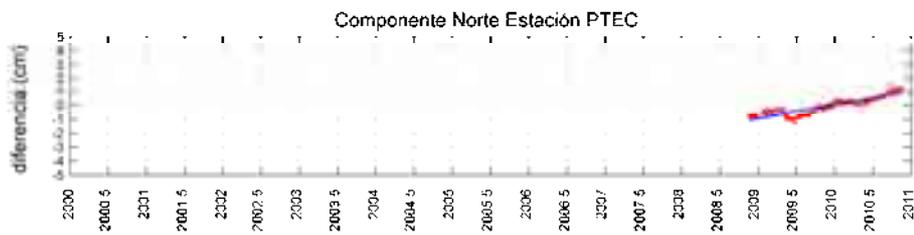
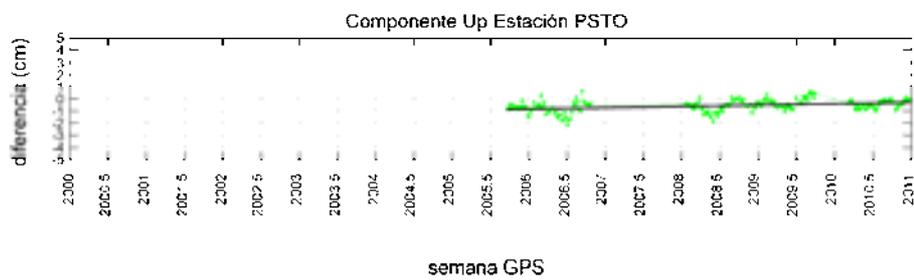
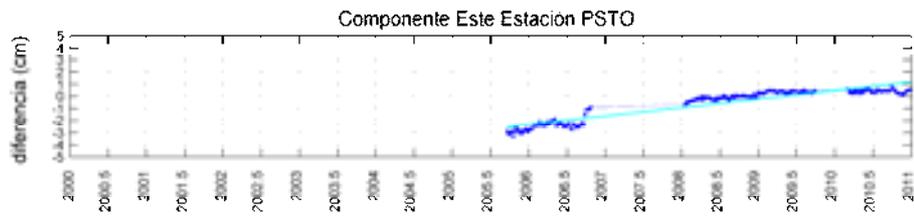
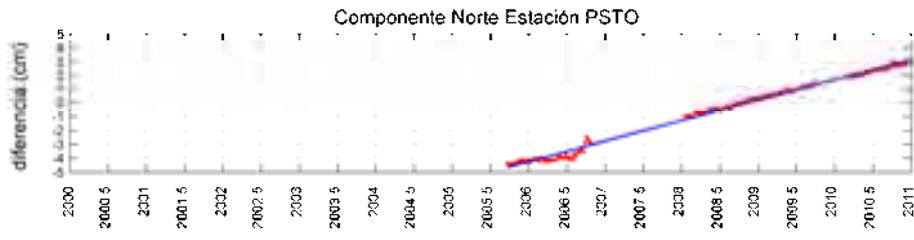
semana GPS

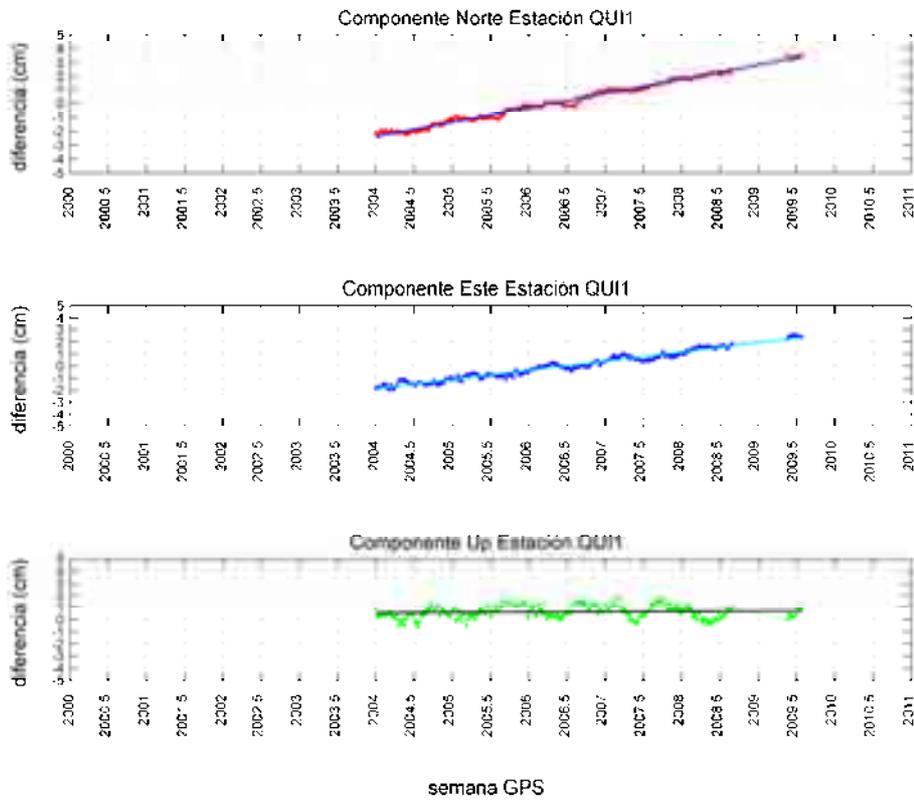
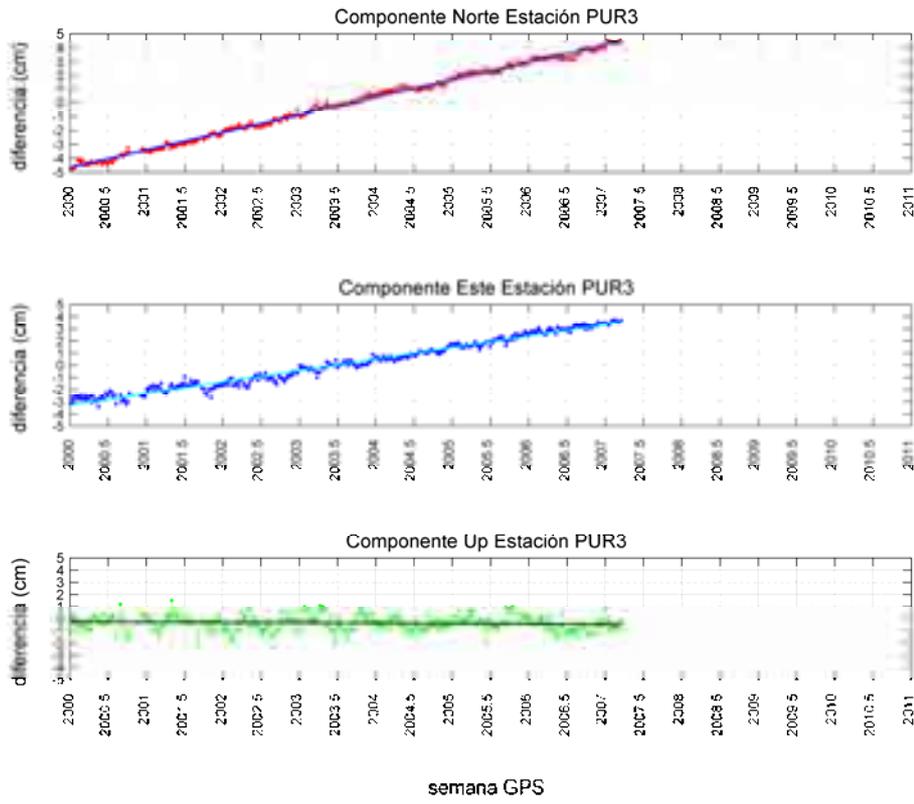


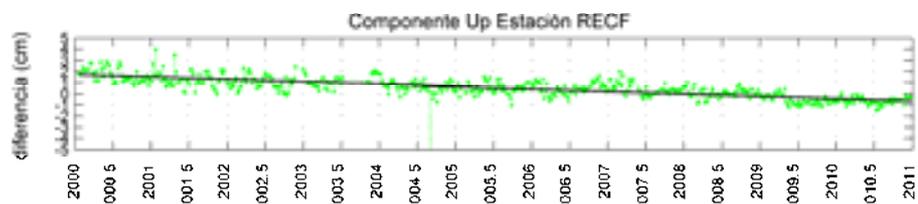
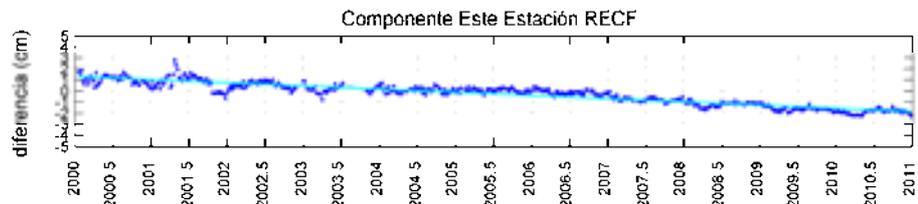
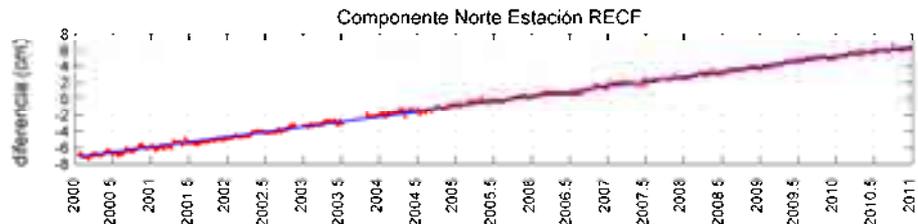




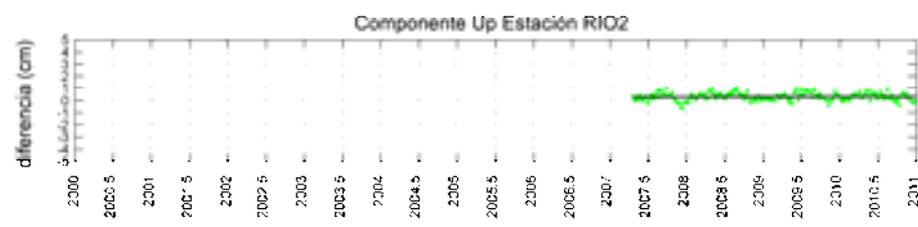
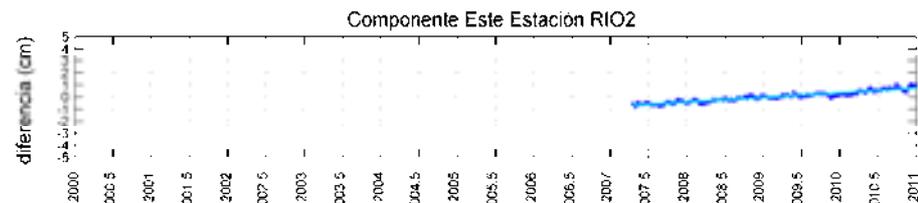
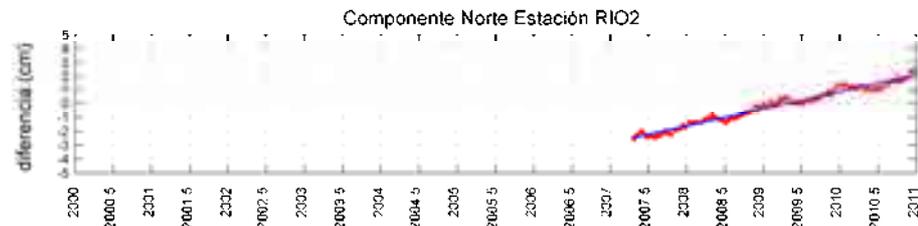




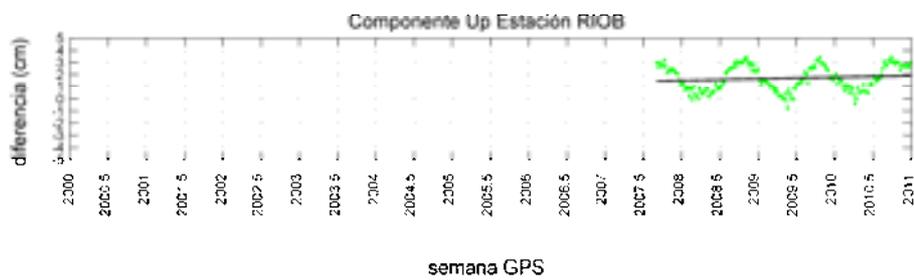
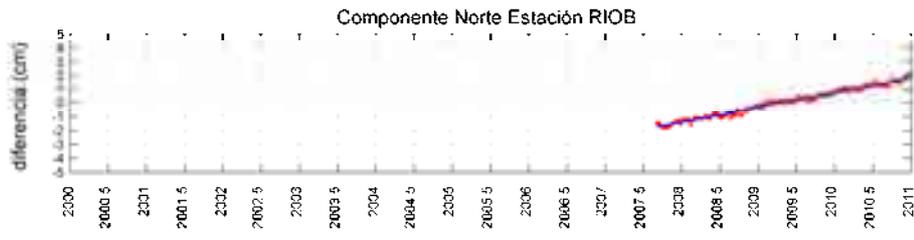




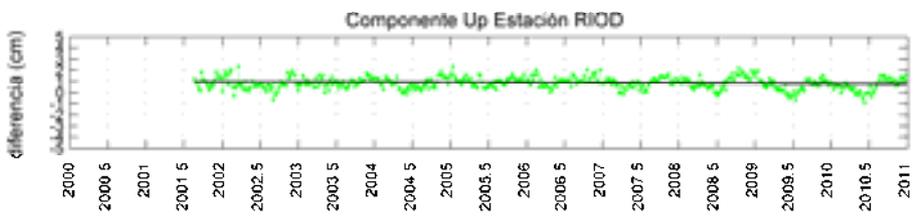
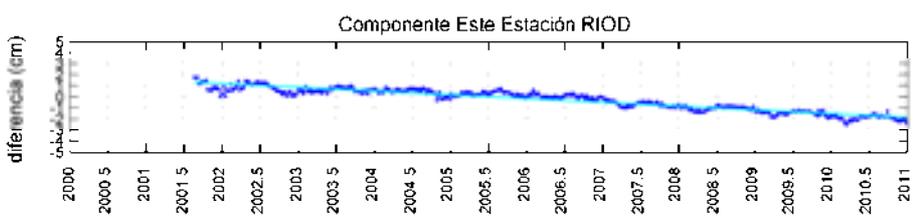
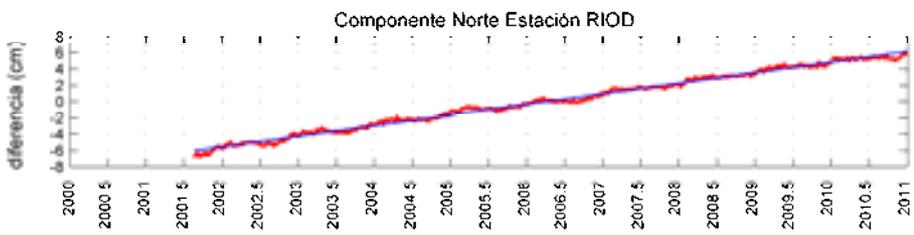
Año - época del año



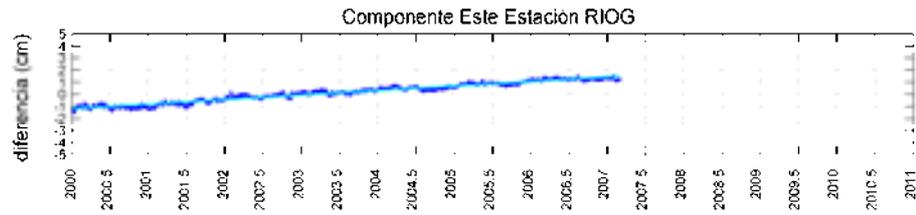
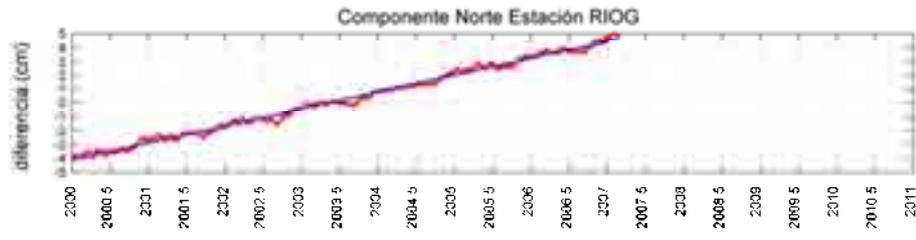
semana GPS



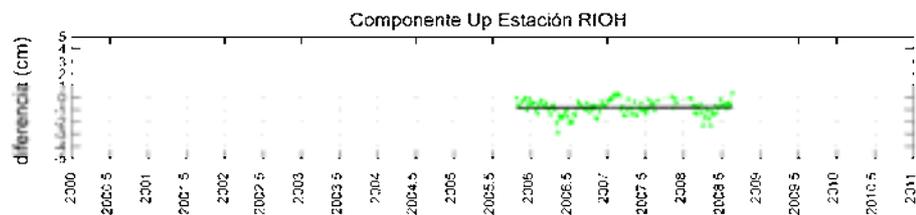
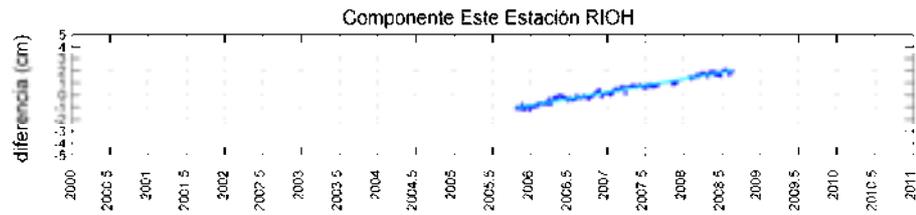
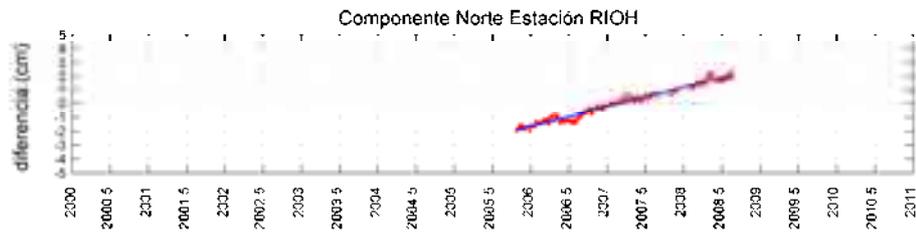
semana GPS



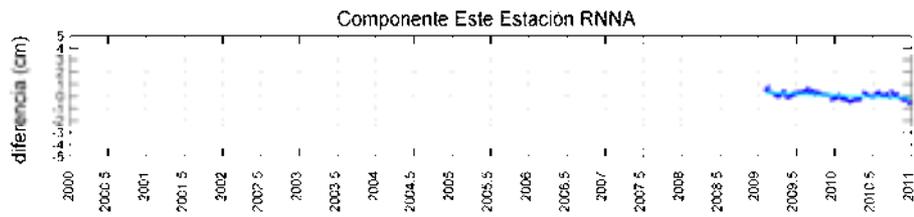
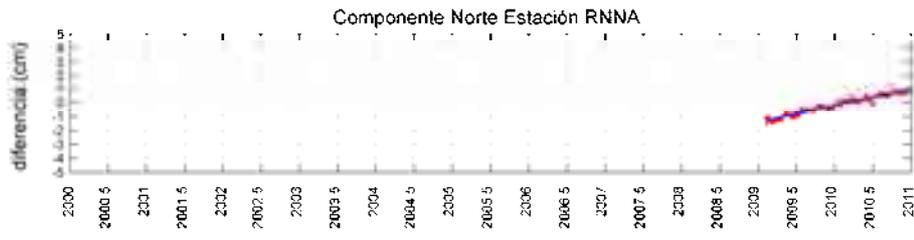
Año - época del año



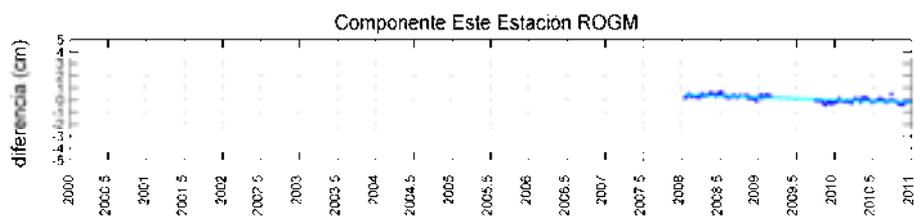
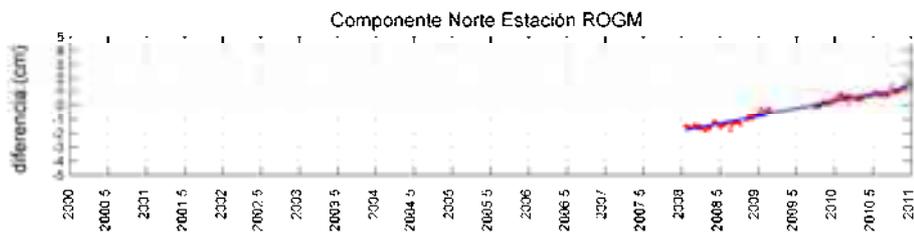
semana GPS



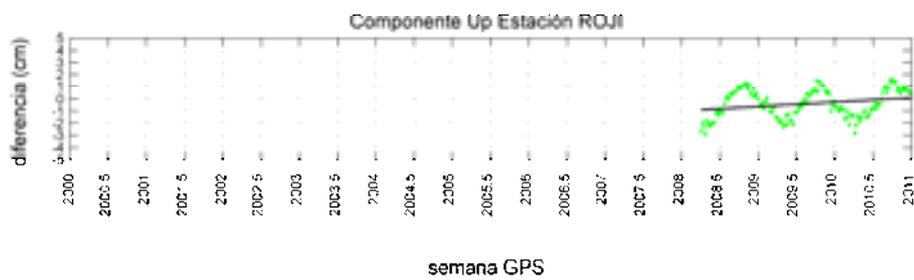
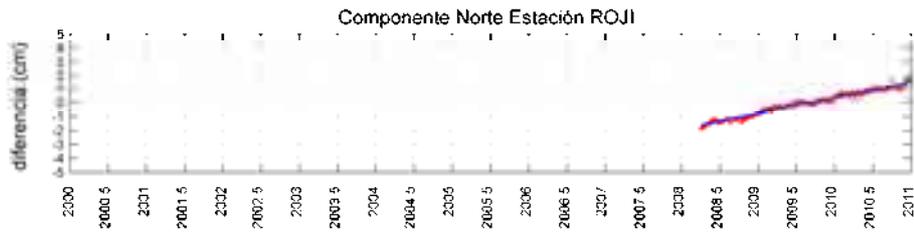
semana GPS



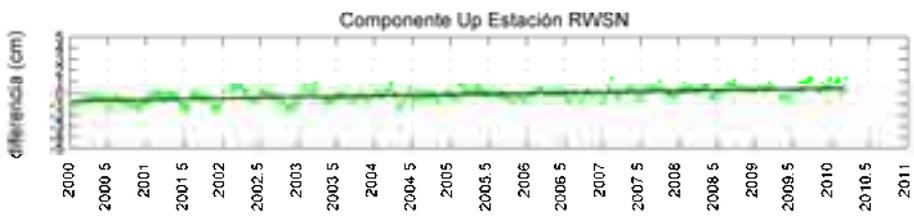
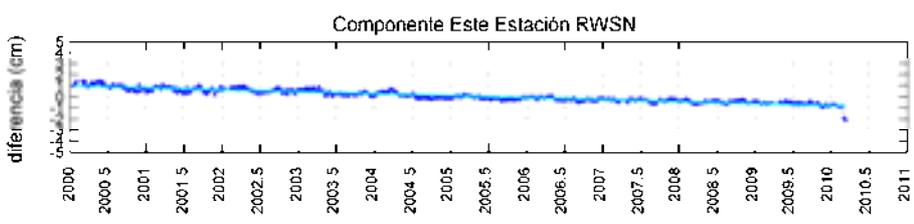
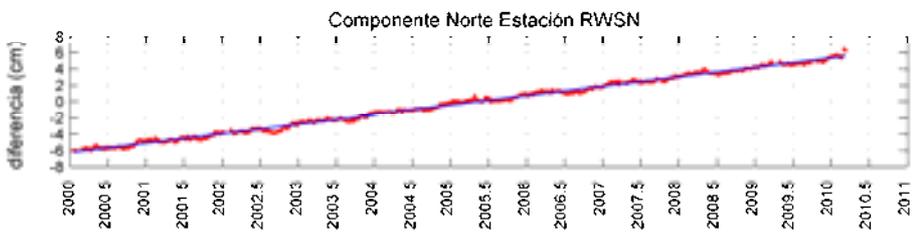
semana GPS



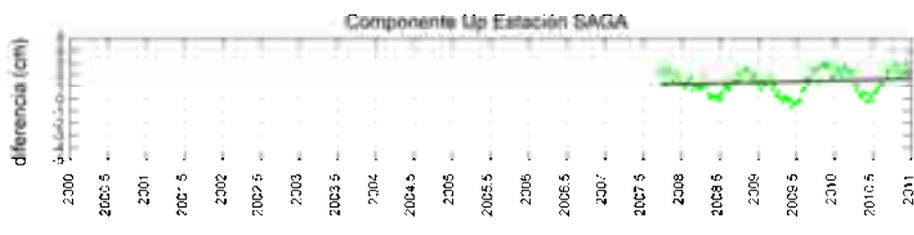
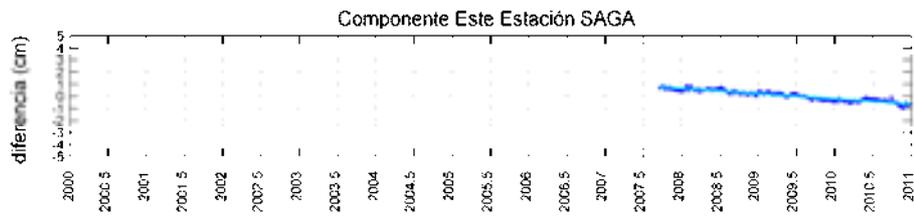
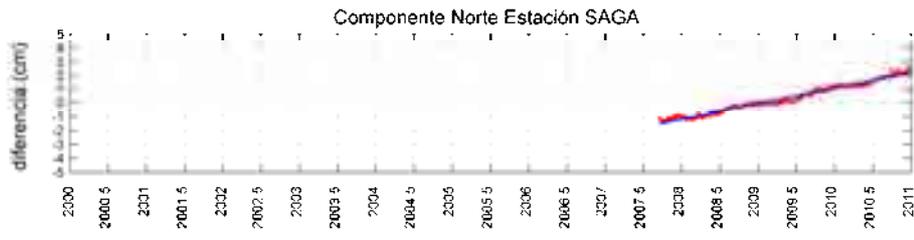
semana GPS



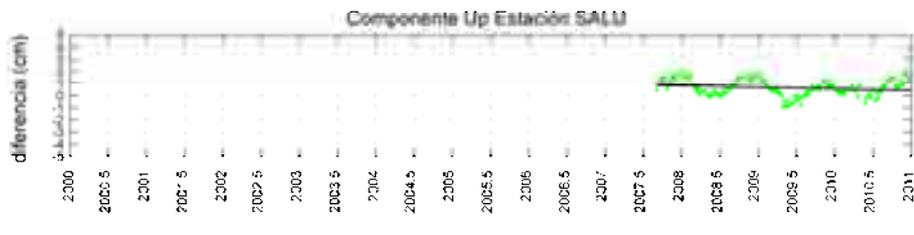
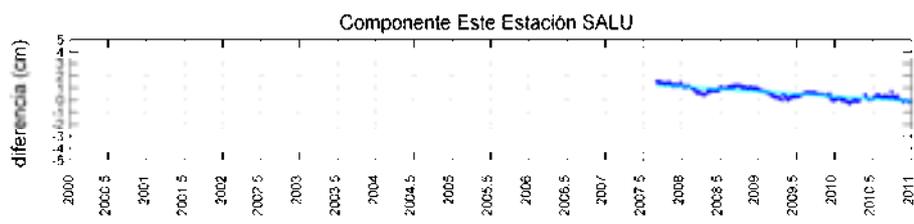
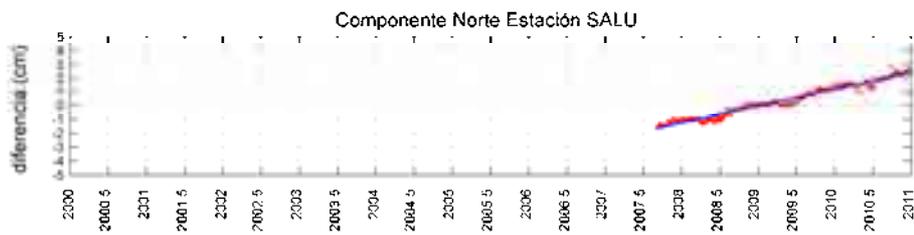
semana GPS



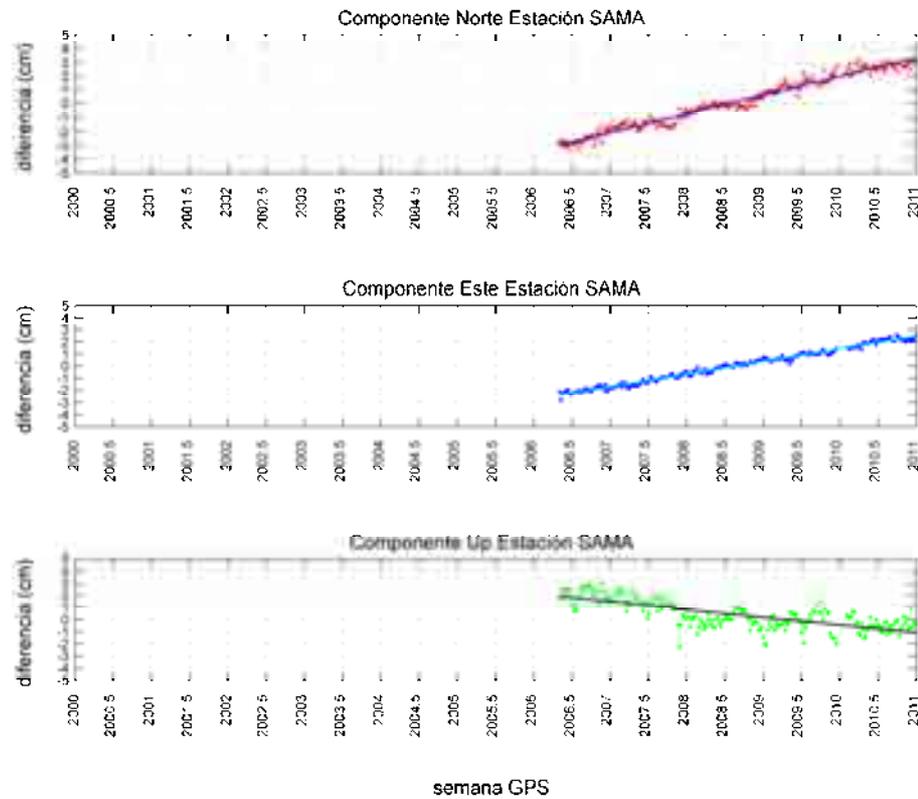
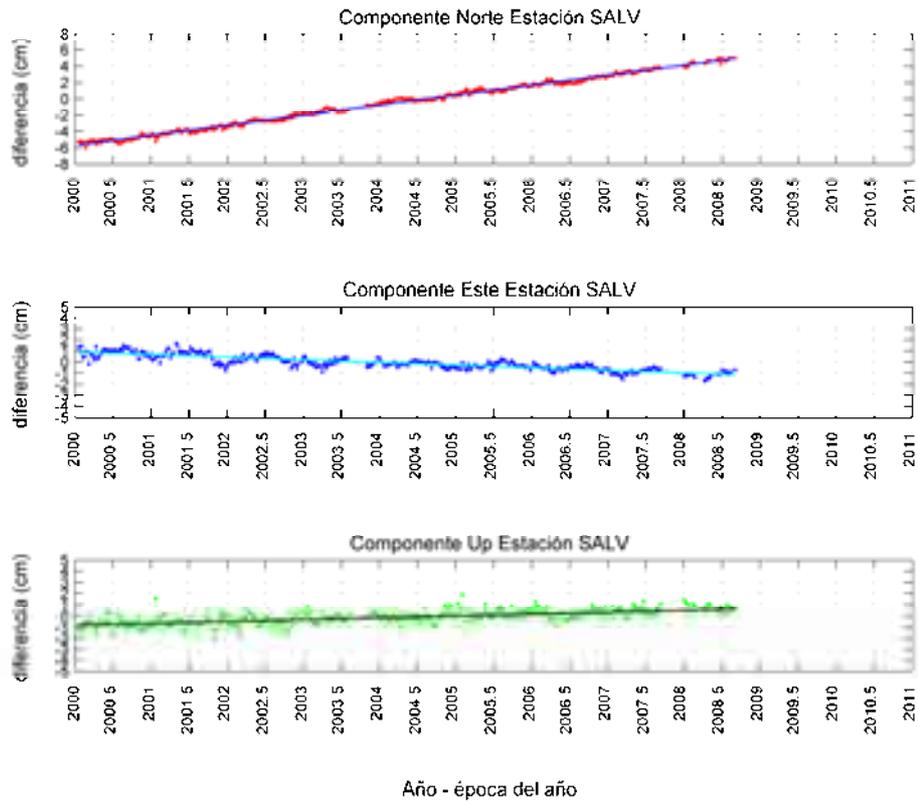
Año - época del año

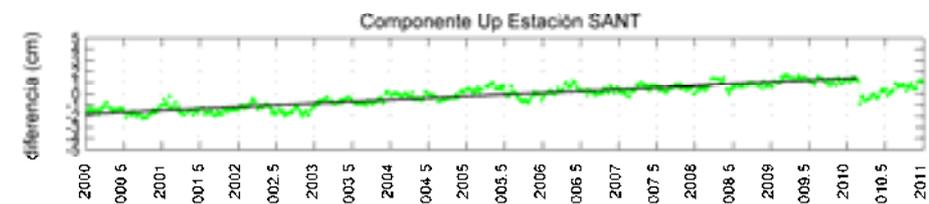
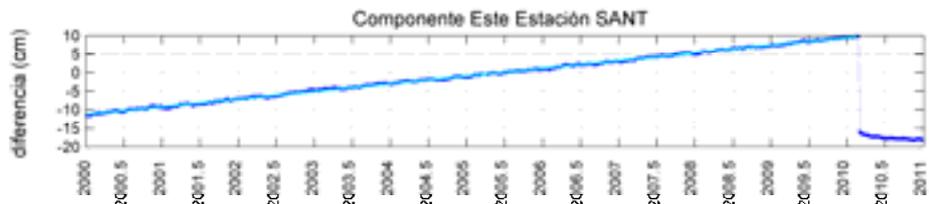
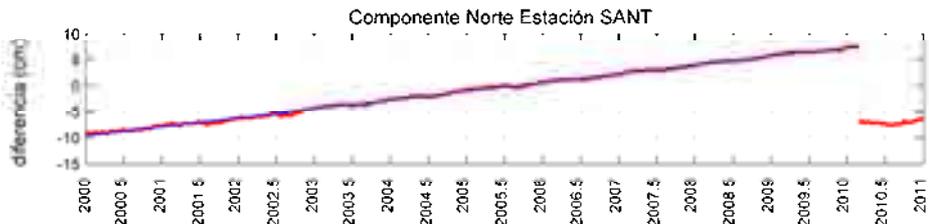


semana GPS

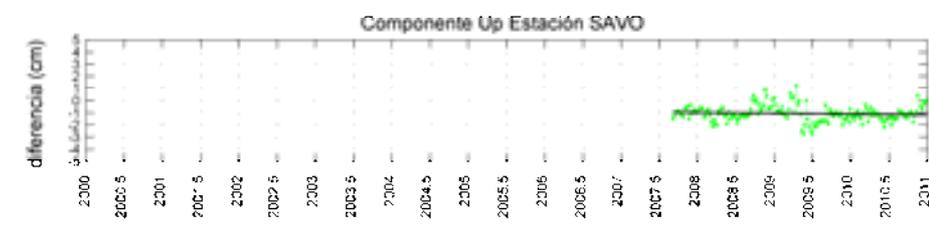
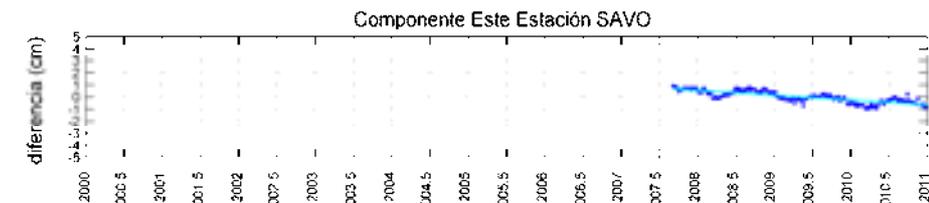
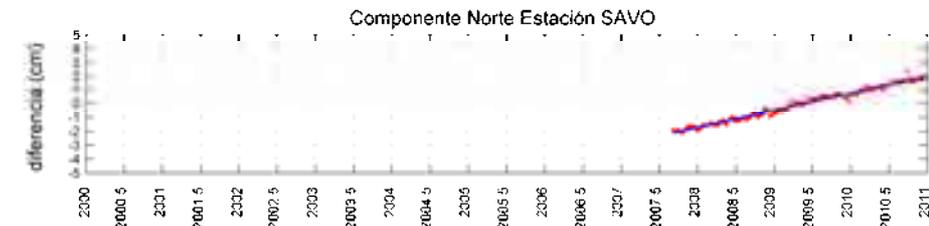


semana GPS

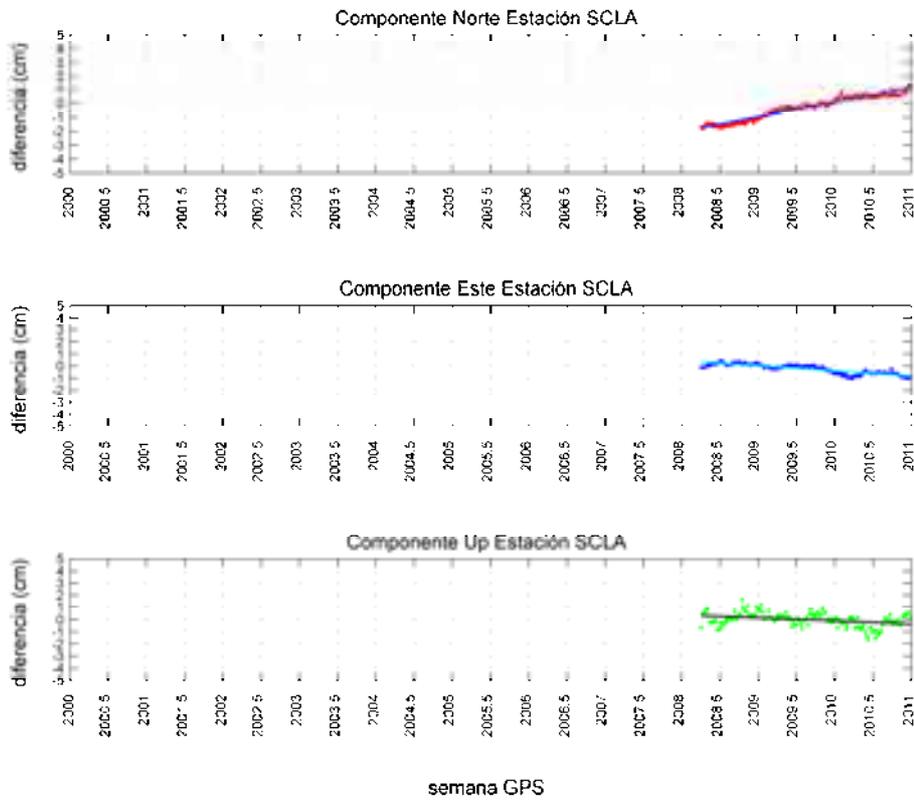
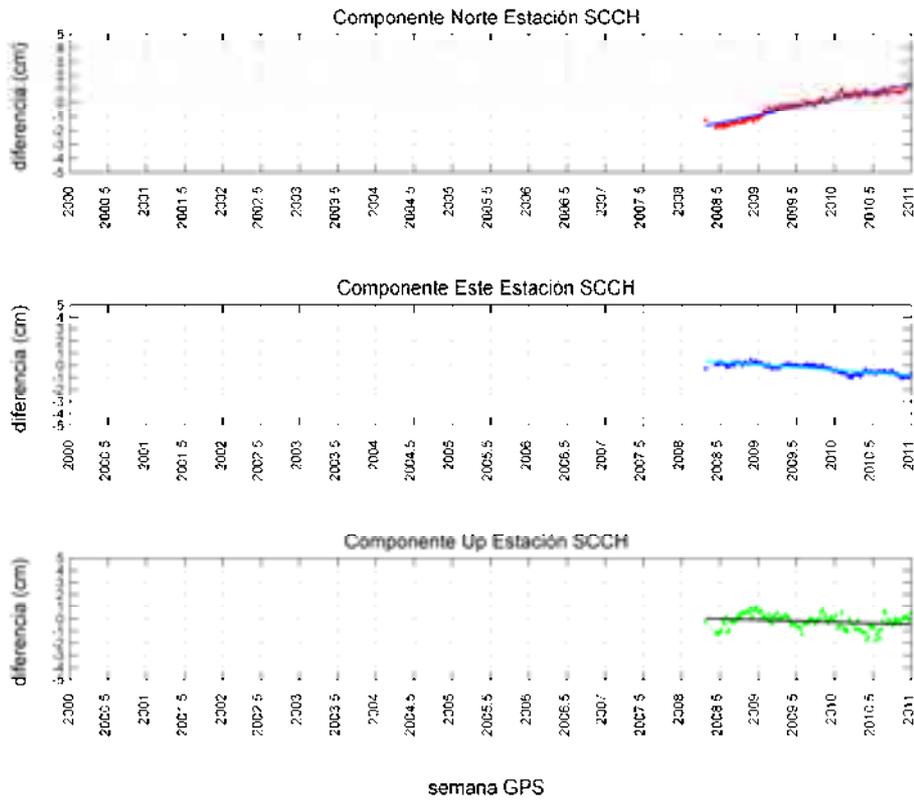


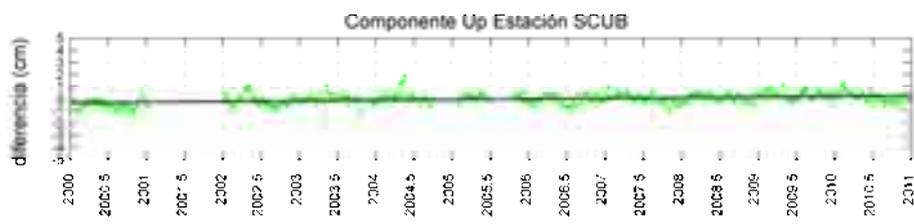
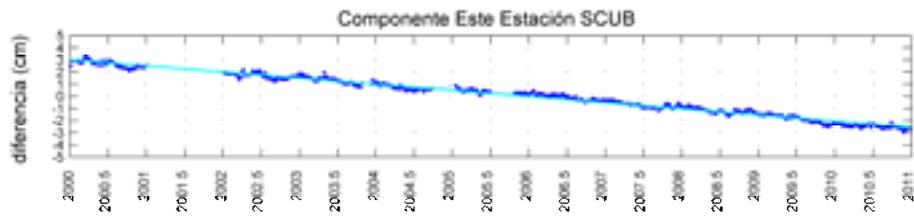
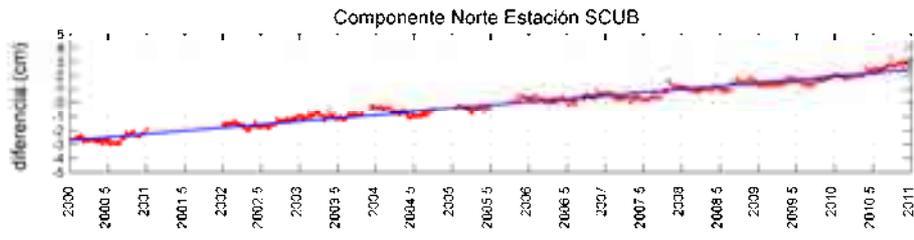


Año - época del año

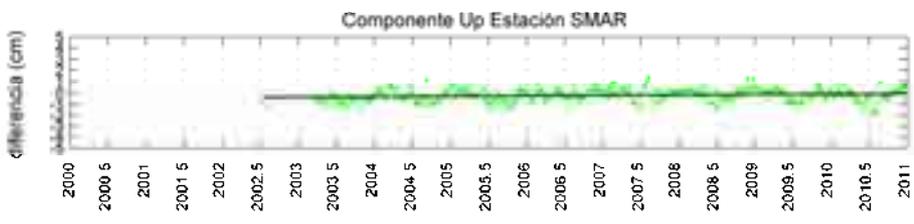
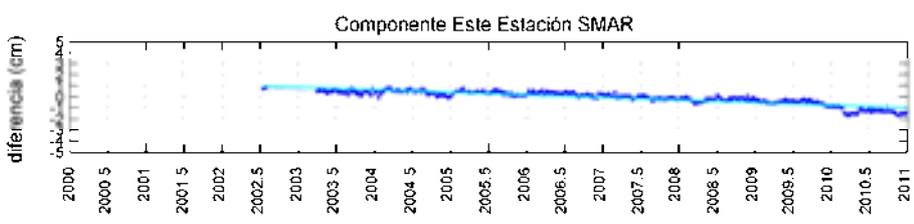
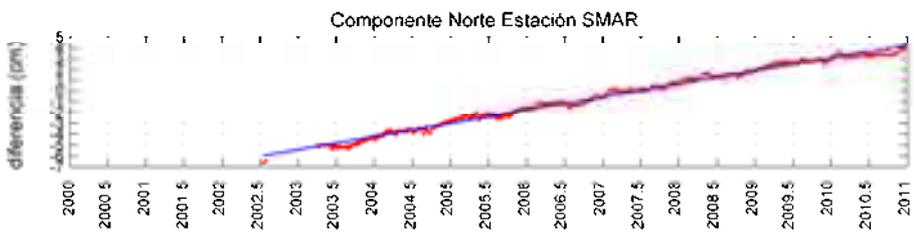


semana GPS

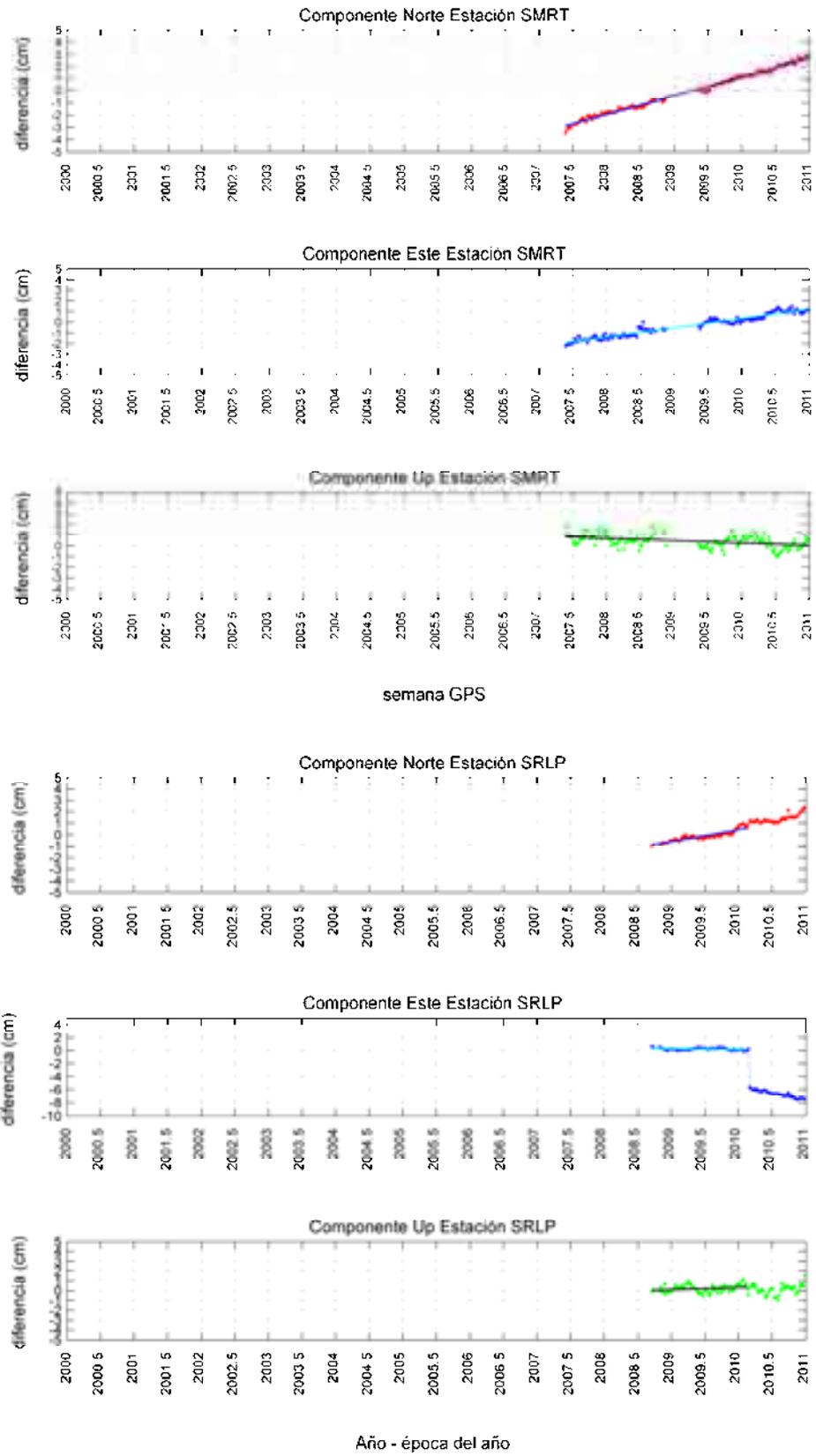


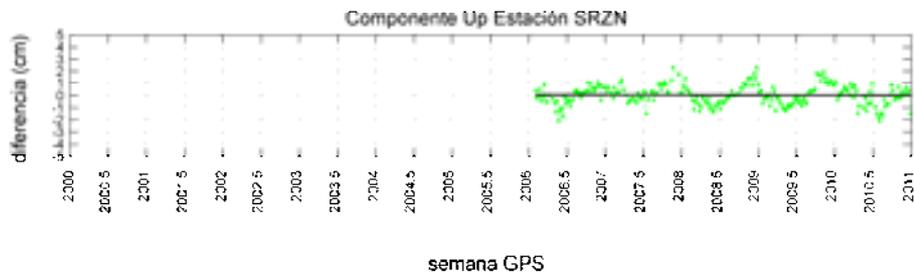
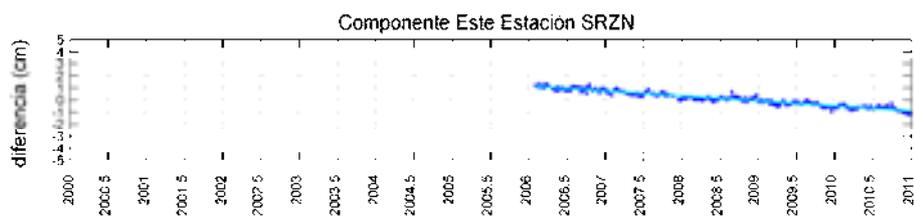
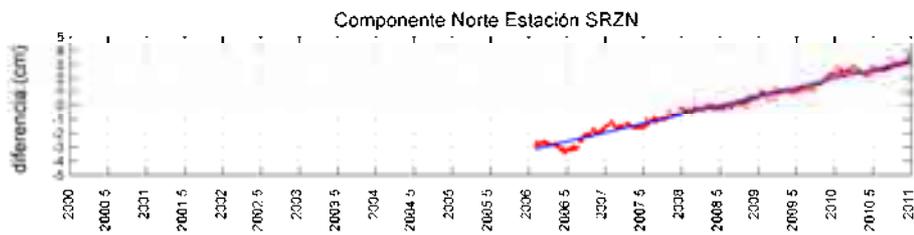
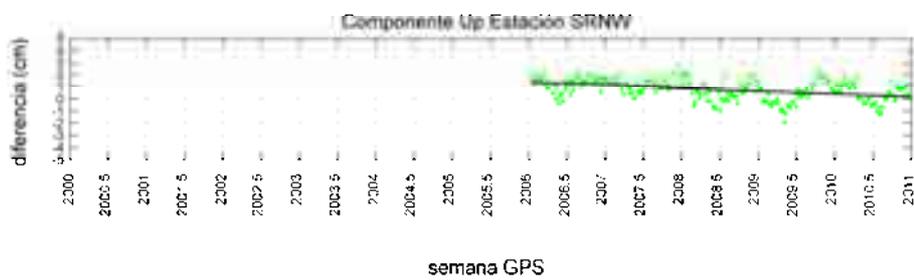
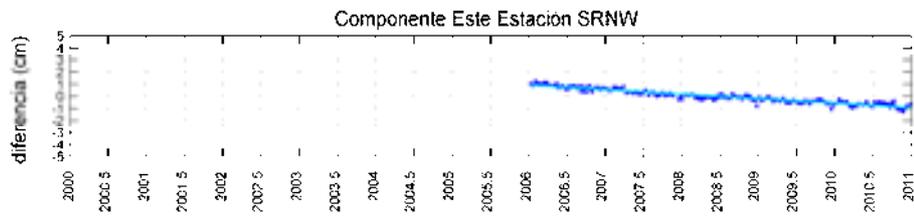
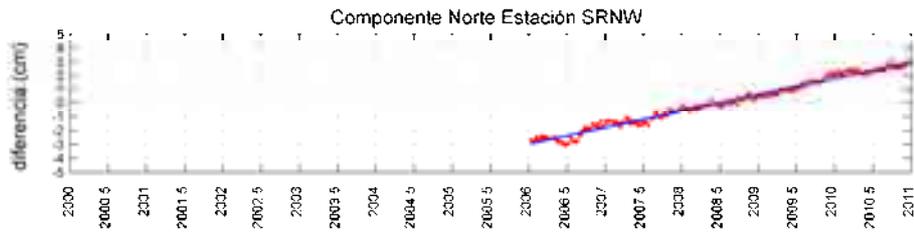


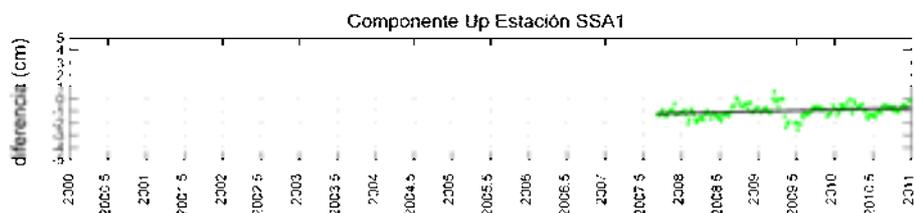
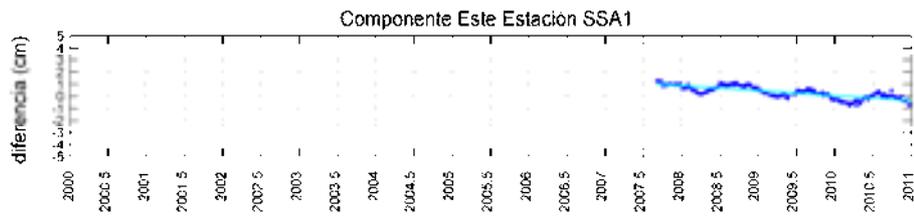
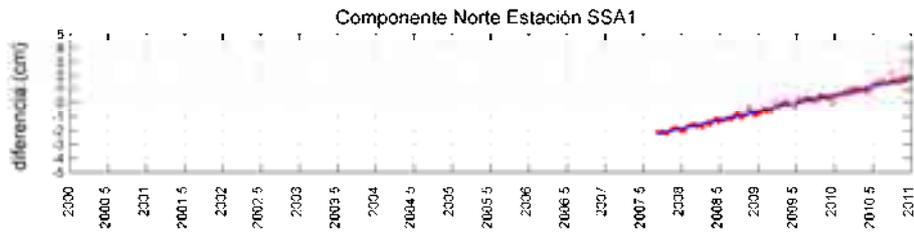
semana GPS



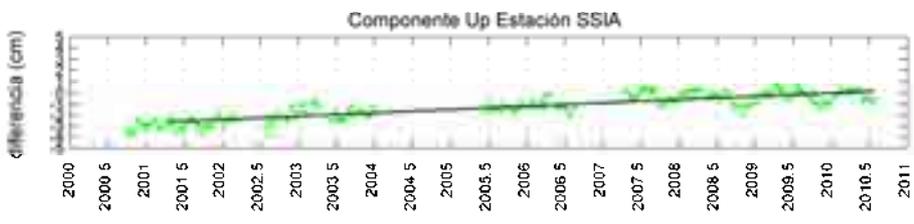
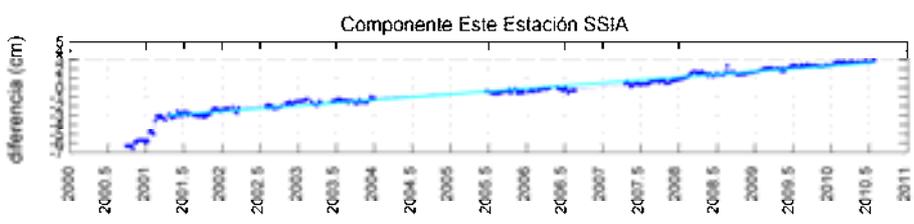
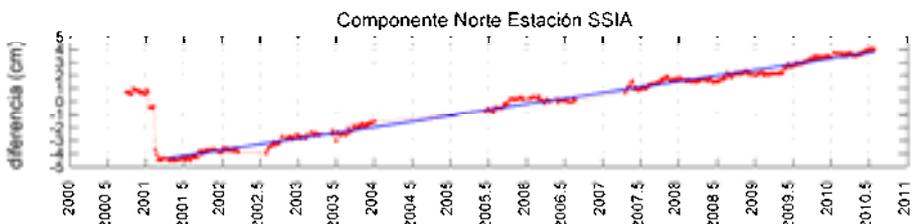
Año - época del año



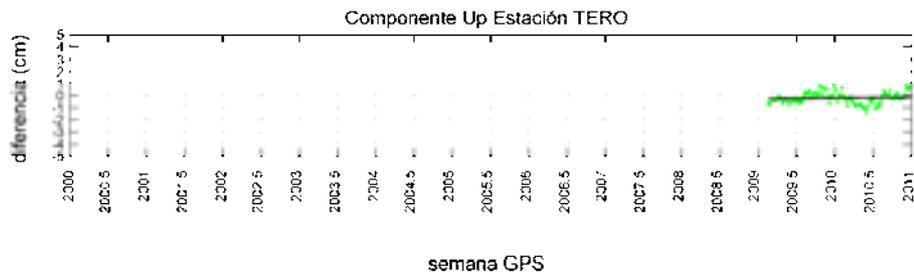
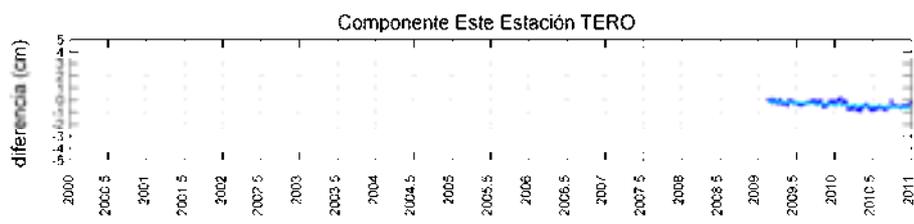
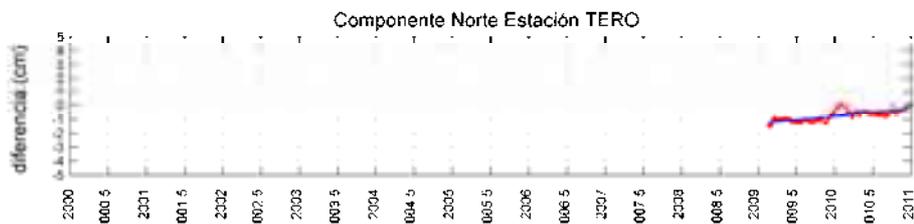
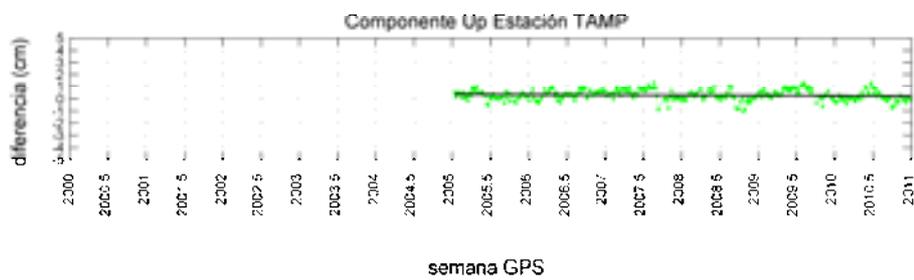
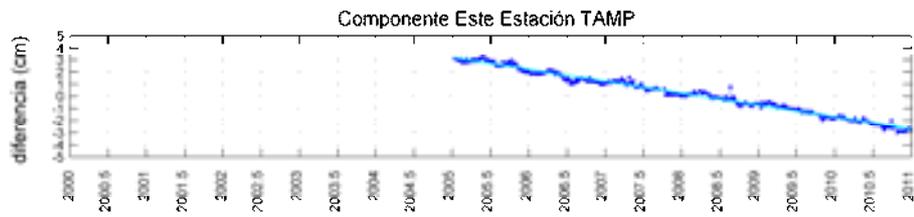
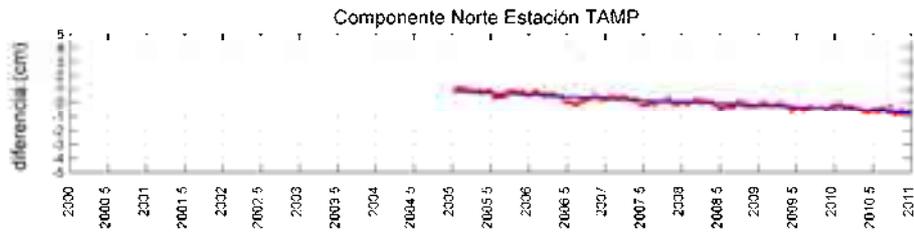


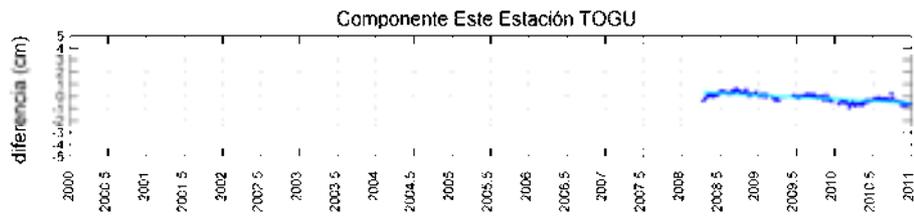
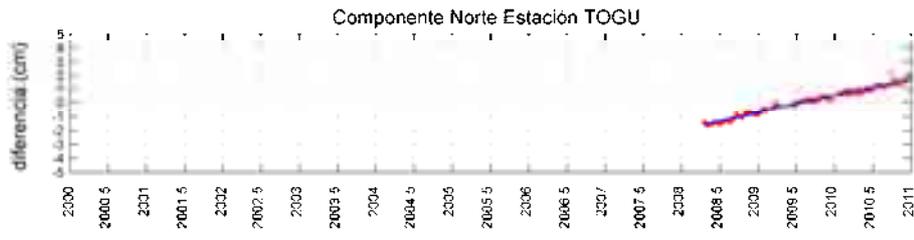


semana GPS

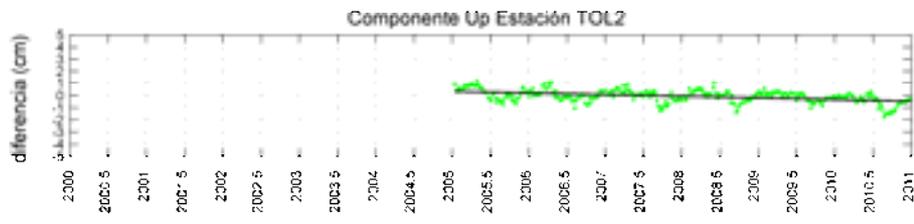
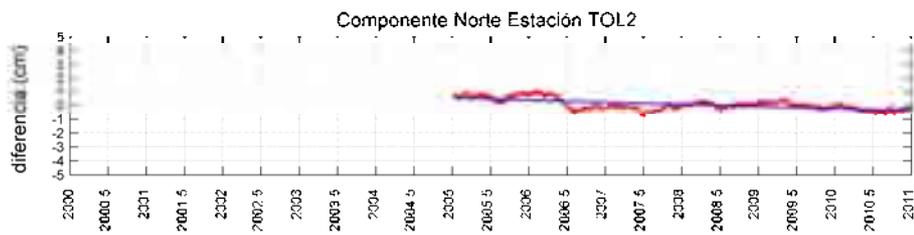


Año - época del año

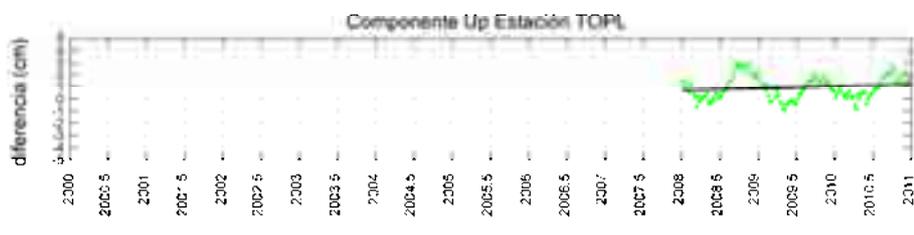
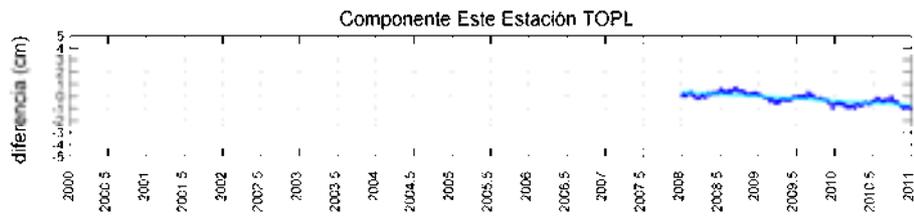
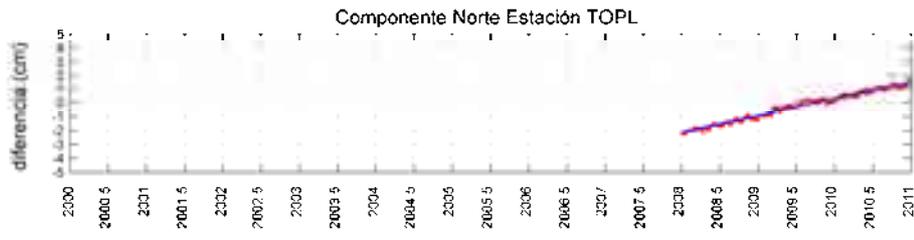




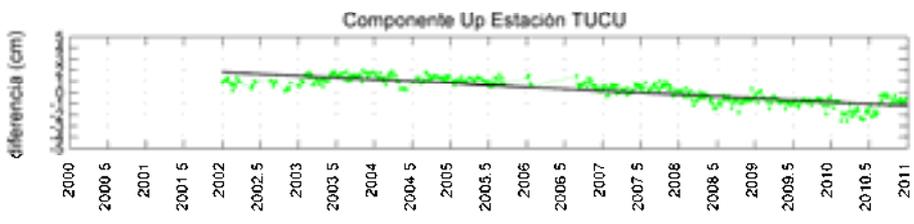
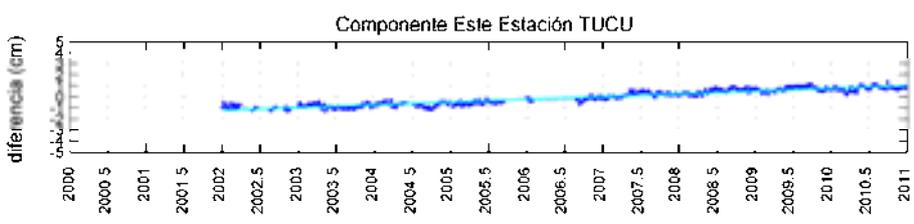
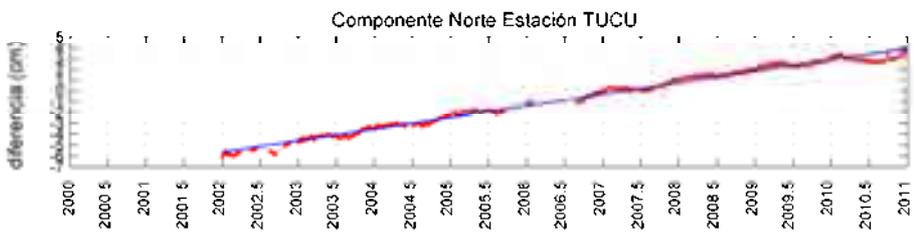
semana GPS



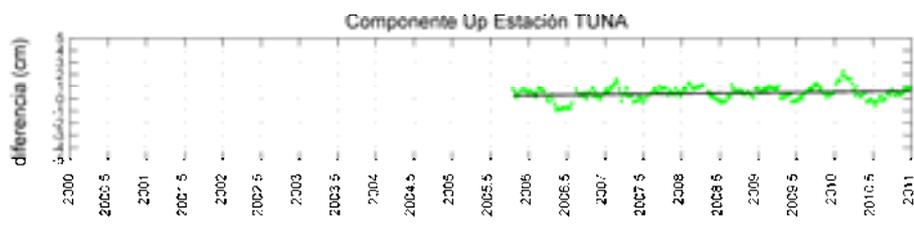
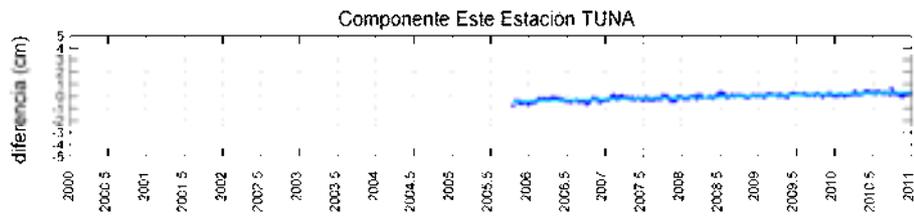
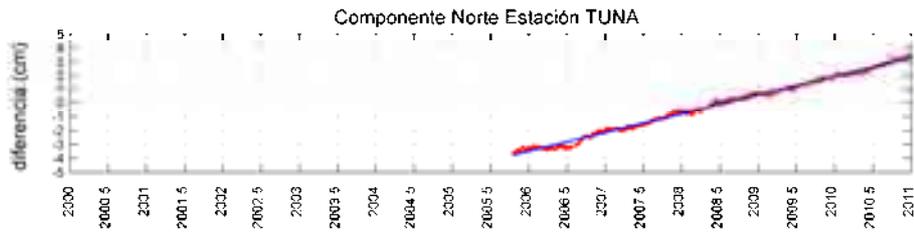
semana GPS



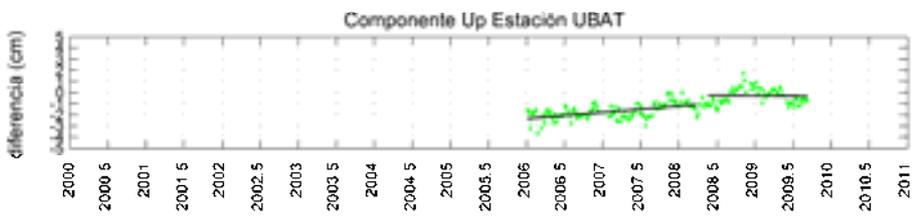
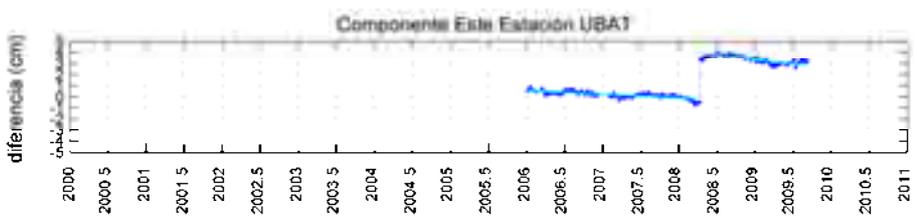
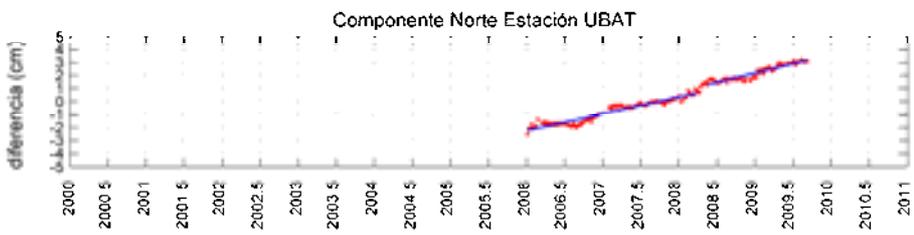
semana GPS



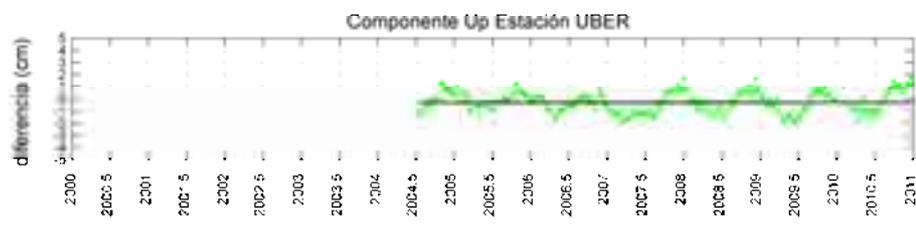
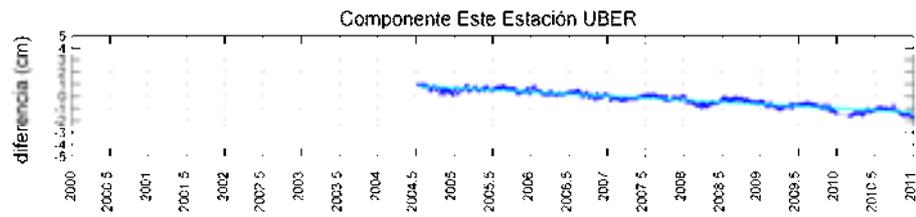
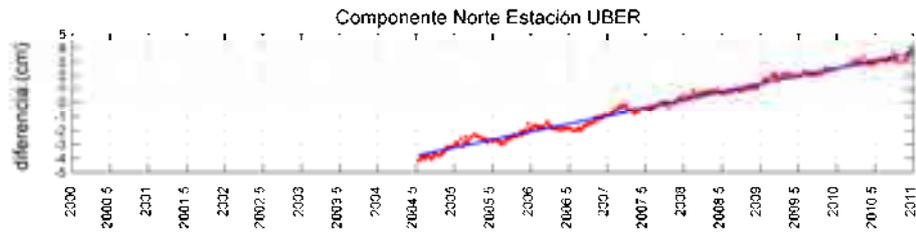
Año - época del año



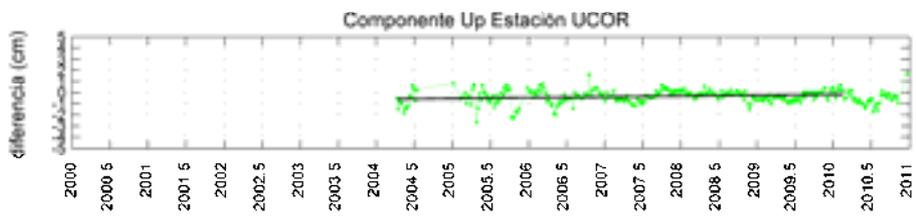
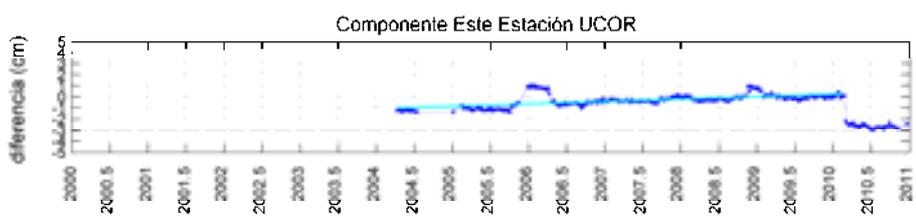
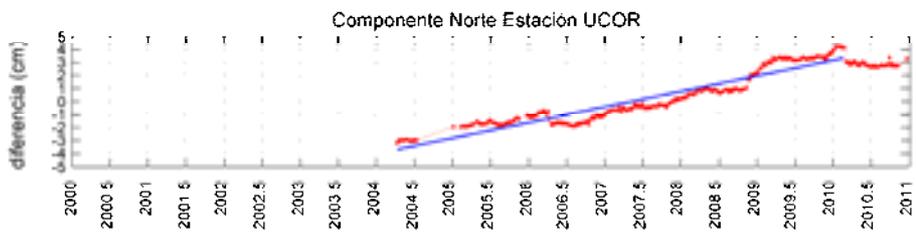
semana GPS



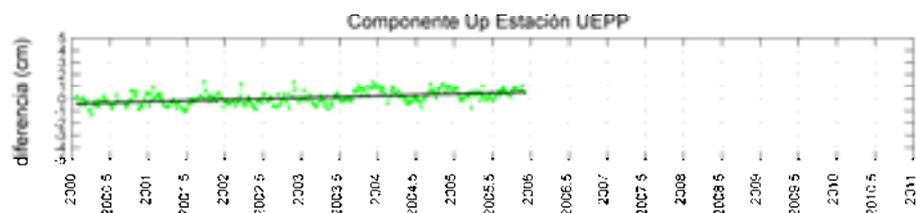
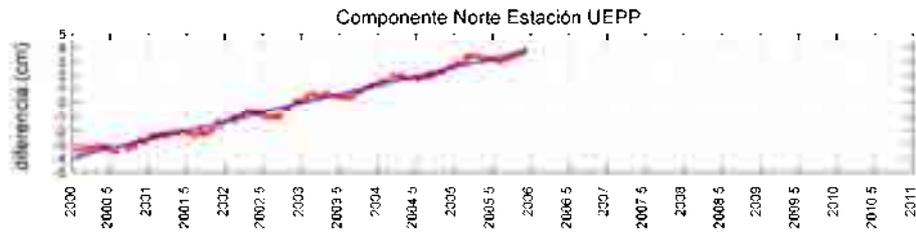
Año - época del año



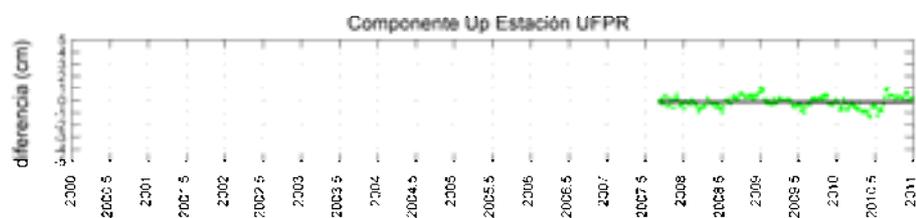
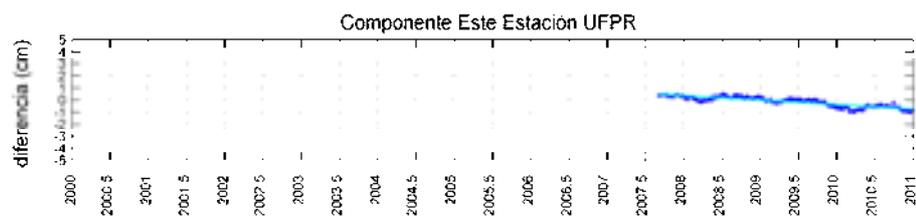
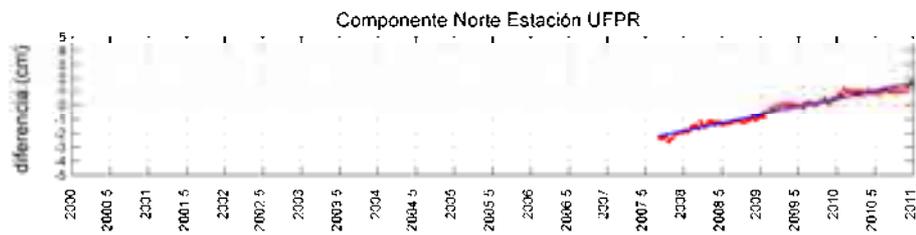
semana GPS



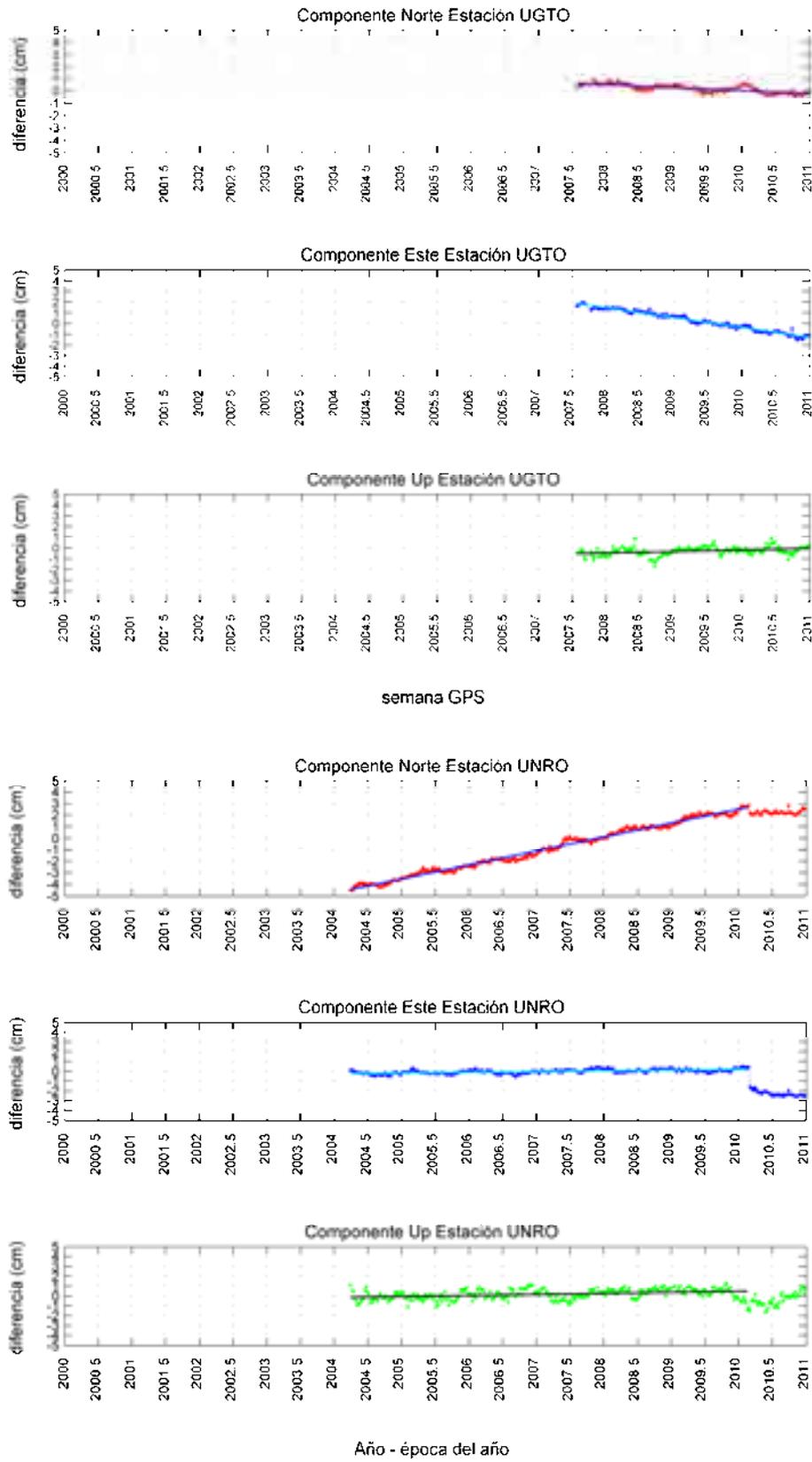
Año - época del año

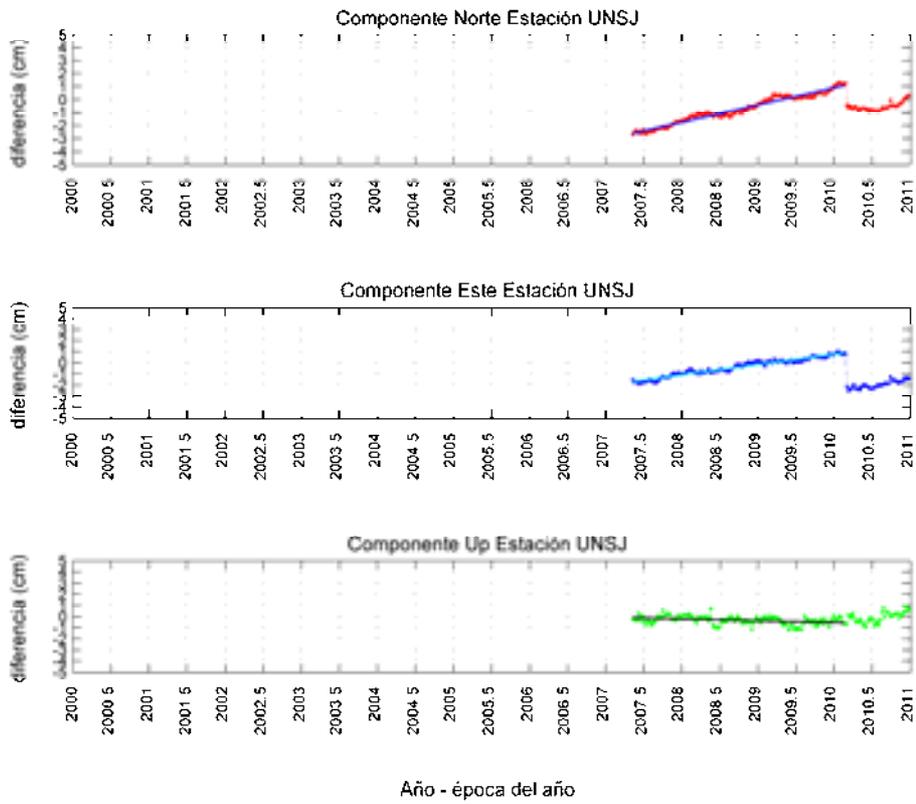
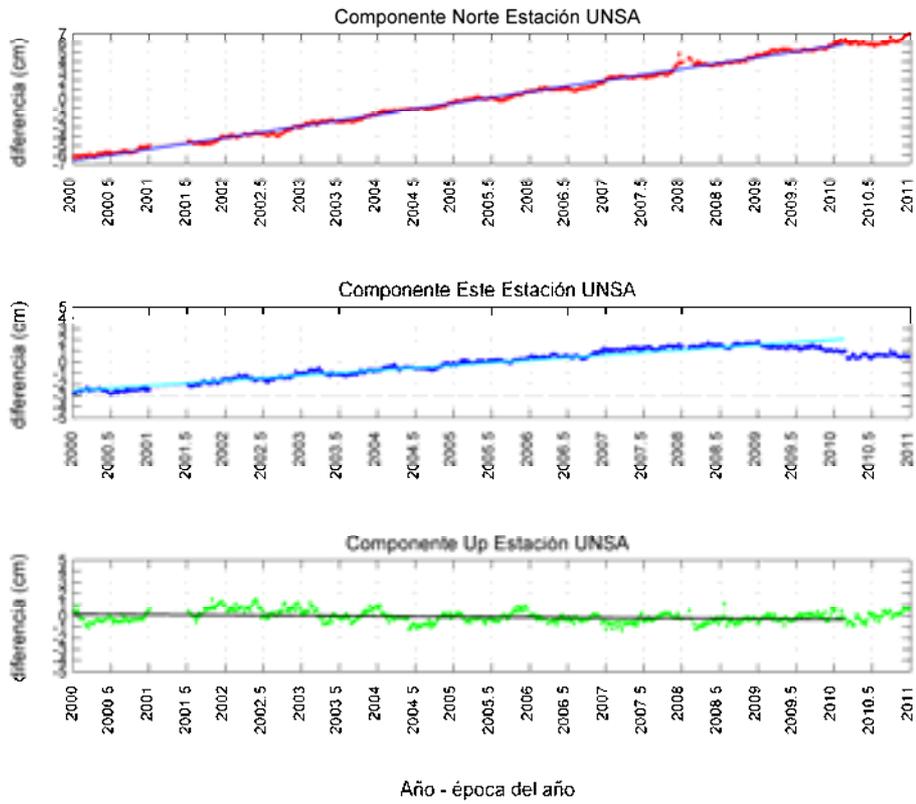


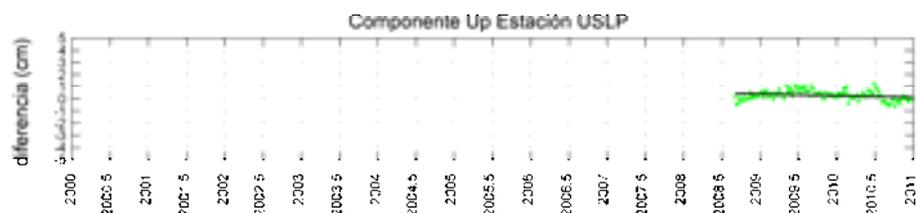
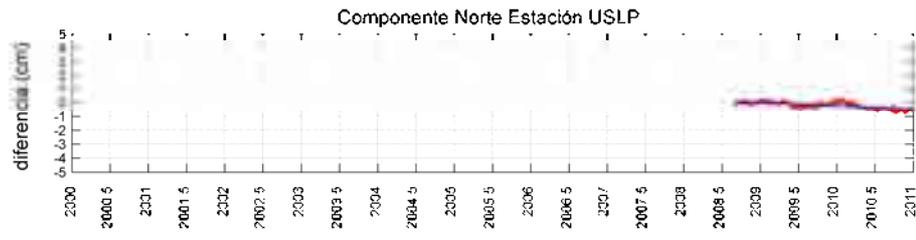
semana GPS



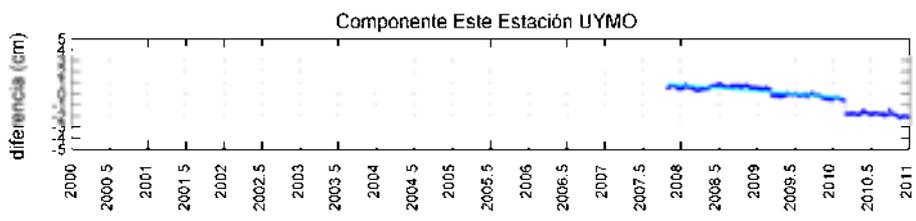
semana GPS



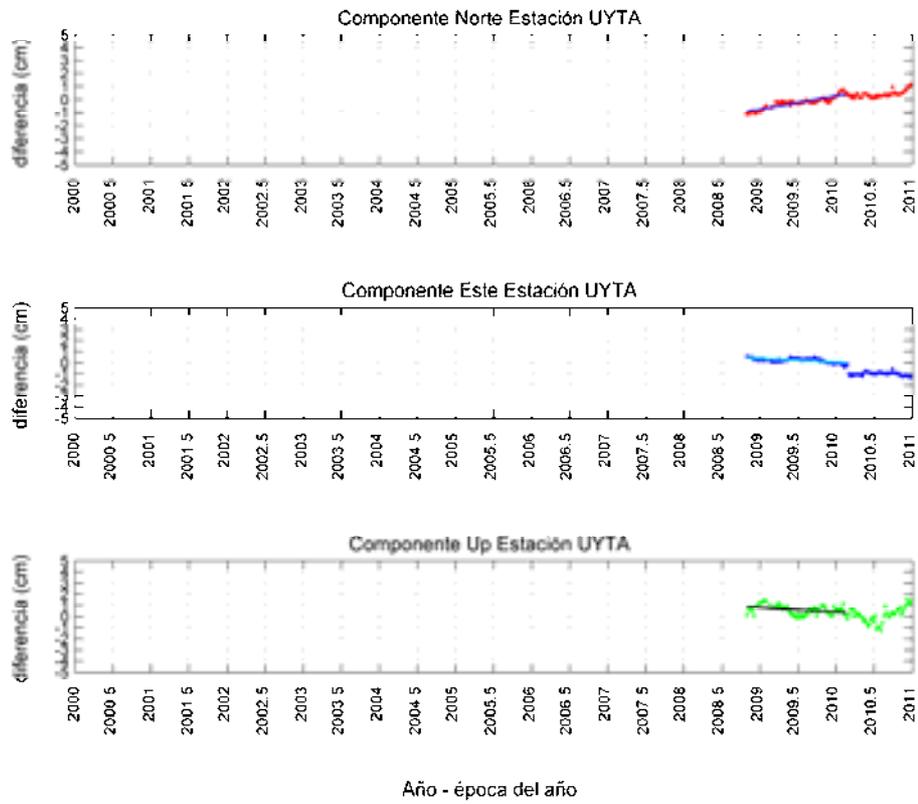
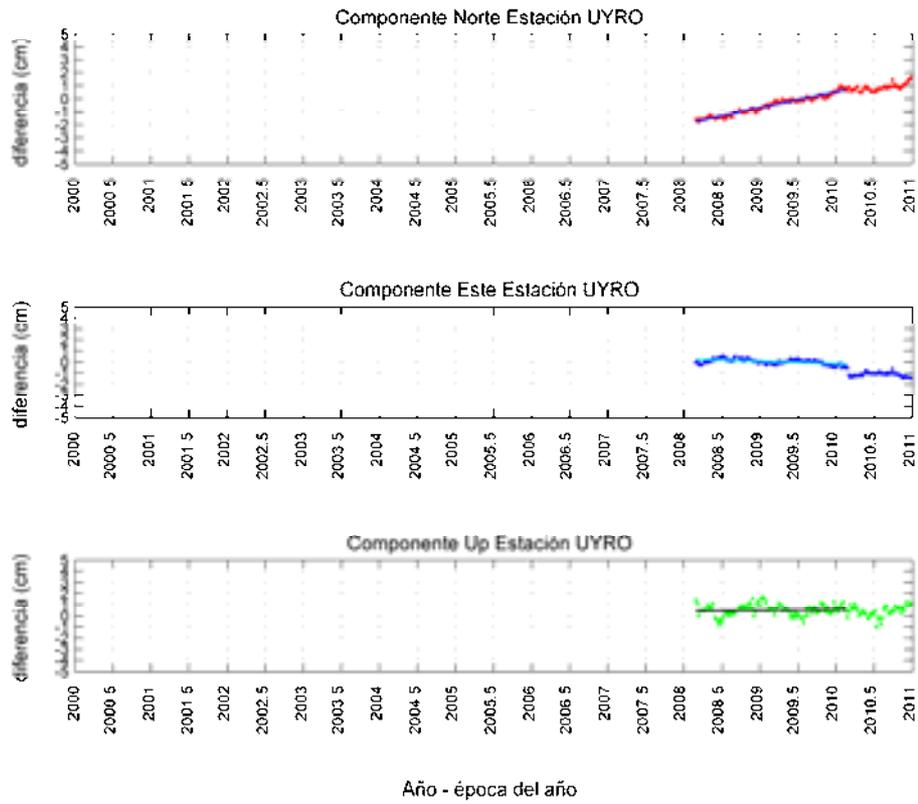


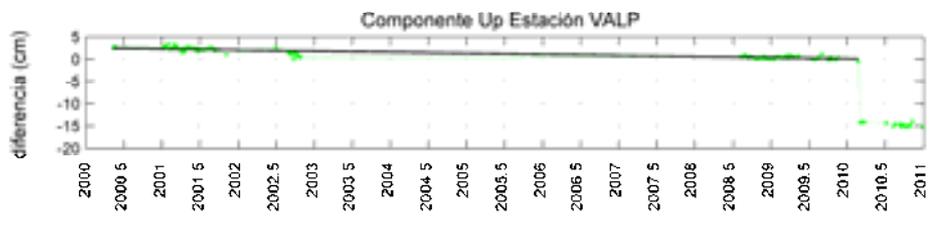
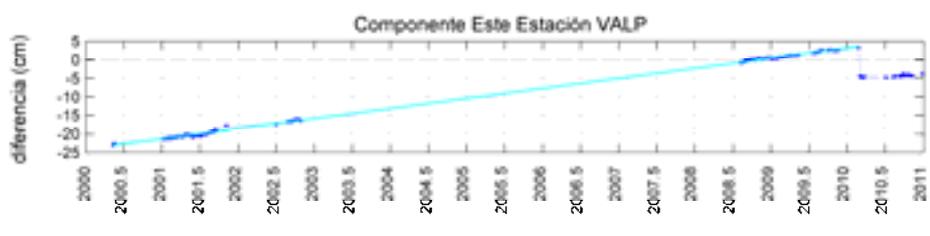
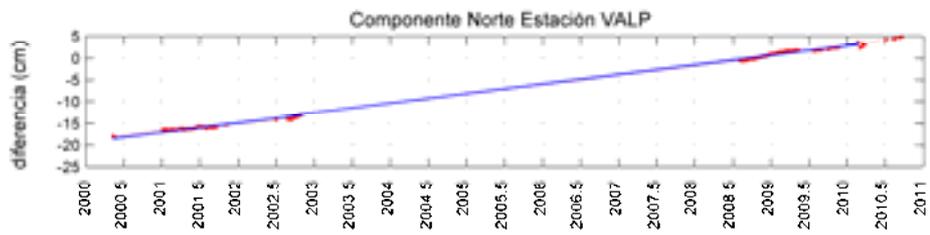
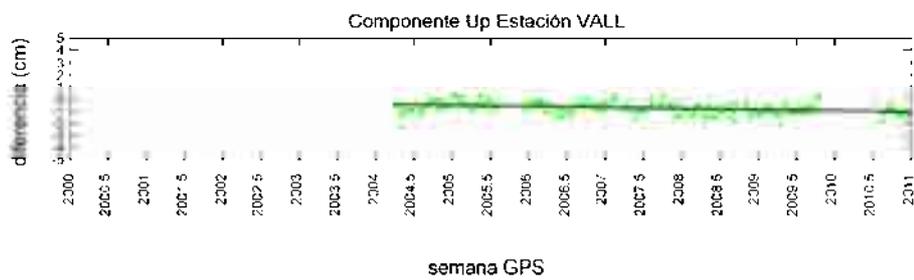
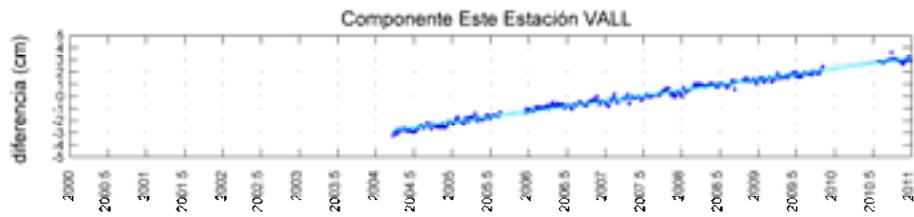
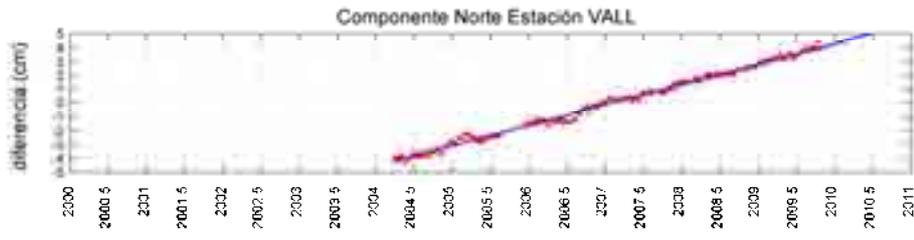


semana GPS



Año - época del año





Año - época del año

