UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía,
Geodesia y Cartografía**

Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía

TESIS DOCTORAL

**Contribución a la definición de un modelo de
velocidades de la corteza terrestre para Ecuador
a partir de datos GNSS**

Doctorando

Marco Luna Ludeña

Directora

Dra. Alejandra Staller Vázquez

Junio de 2017

Resumen

La presente Tesis doctoral es una contribución a la definición de un modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador a partir de datos GNSS. Para ello se utilizan las observaciones GNSS durante el periodo 2008-2014 de 33 estaciones de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), además se incorporan otras 17 estaciones pertenecientes a IGS (*International GNSS Service*) con el fin de vincular la solución al marco de referencia global ITRF2008. Los datos GNSS fueron procesados con el software Bernese 5.0 siguiendo las recomendaciones del IGS, obteniendo series temporales diarias en coordenadas cartesianas y locales topocéntricas en el sistema ITRF2008 (IGb08) para cada estación.

Previo al análisis de las series temporales se detectaron y corrigieron *offsets* y se eliminaron *outliers* para obtener series libres de valores anómalos. Posteriormente se realizó un análisis exhaustivo de las series temporales mediante la descomposición aditiva, considerando que los datos de las series se generan como la suma de tres factores: tendencia, estacionalidad o periodicidad y ruido. La tendencia de una serie viene dada por el movimiento a largo plazo de los datos que la conforman, inicialmente se ha calculado utilizando una regresión lineal ponderada, aproximando a una línea recta el movimiento de cada estación. La periodicidad se ha determinado mediante análisis espectral de las series para datos que no están igualmente espaciados. El tipo de ruido se ha determinado mediante el cálculo del índice espectral a través del análisis del espectro de potencia aproximado a una ley de potencia dependiente de la frecuencia. Hemos incluido el análisis del ruido a fin de evaluar la magnitud de su efecto en relación con el cálculo de la velocidad a estimar y su incertidumbre.

Obtenidos la tendencia, estacionalidad y tipo de ruido, se introducen en el modelo general de la serie para calcular mediante estimación mínimo cuadrática nuevamente los parámetros sinusoidales de la periodicidad, ordenada en el origen y tendencia de la serie, de forma que se obtiene una estimación más realista de la magnitud de la velocidad y su incertidumbre. Todo este proceso se encuentra programado mediante scripts en Matlab, el archivo de entrada es el fichero SINEX resultante del procesamiento GNSS, generando como salida principal la velocidad con su respectiva incertidumbre para cada estación, de acuerdo a la tendencia, estacionalidad y tipo de ruido que presenten.

El campo de velocidades ITRF2008 final obtenido fue referido a un marco de referencia fijo en la placa Sudamérica, calculando para ello el polo SOAM/ITRF2008 a partir de cinco estaciones de IGS ubicadas en la parte estable de placa Sudamérica. El análisis de nuestro campo de velocidades refleja claramente el movimiento del bloque Norandino hacia el NNE con respecto a la placa Sudamérica y un régimen tectónico transpresivo con deslizamiento lateral dextral del sistema de complejo de fallas que forma el denominado Sistema Mayor Dextral de los Andes. Nuestros resultados muestran un comportamiento tectónico claramente diferenciado entre el norte y el sur de Ecuador, coincidiendo con la diferencia de comportamiento de la subducción ecuatoriana, con un acoplamiento más débil y superficial (0-15 km) al sur de Ecuador y un incremento del acoplamiento hacia el norte en la zona donde han ocurrido los mega-terremotos de subducción del último siglo. Además, las estaciones situadas al sur del golfo de Guayaquil, tienen componente ESE-SE lo cual indica que estas estaciones pertenecen al denominado Bloque Inca o Perú.

A partir del campo de velocidades absoluto y relativo a Sudamérica para Ecuador, se realiza la modelización mediante la aplicación de dos técnicas que se utilizan con mayor frecuencia para representar una superficie continua de velocidades: el método geoestadístico Kriging y el método de Mínimos Cuadrados Colocación. Los resultados obtenidos con ambos métodos fueron comparados con velocidades de estaciones utilizadas para la verificación y mediante validación cruzada. De entre las diferentes técnicas Kriging, la que mejor se ajusta al campo de velocidad de la corteza terrestre para Ecuador es el método Kriging Universal con un modelo de semivariograma esférico. El error cuadrático medio de predicción obtenido en este método es de 1.76 mm/año en la componente este y 1.81 mm/año en la componente norte, mientras que con el método de colocación mínimos cuadrados se obtuvieron errores cuadráticos medios de predicción de 1.70 mm/año y 1.73 mm/año para las componentes este y norte, respectivamente. Aunque ambas técnicas presentan errores de predicción muy parecidos, se concluye que el método que presenta mejor ajuste y fiabilidad para representar el modelo de velocidades de Ecuador es el método de colocación mínimo cuadrática. Se aportan los scripts desarrollados en Matlab con el modelo de velocidades de la corteza para Ecuador, el cual permite obtener la velocidad e incertidumbre de cualquier punto dentro del territorio ecuatoriano.

Por primera vez para Ecuador, se obtiene un campo de velocidades preciso a partir de datos GNSS continuos de las estaciones REGME, definiendo, a partir de éste, un modelo preciso de velocidades para la corteza terrestre para Ecuador, lo cual contribuye al conocimiento de la tectónica regional y geodinámica de la zona, así como la definición de un marco de referencia estable para el país.

Palabras clave: Series temporales; GNSS; Geodinámica; Ecuador; Modelo de Velocidades; Kriging; Mínimos Cuadrados Colocación.

Abstract

The present PhD thesis is a contribution for defining a velocity model of the crust of Ecuador from GNSS data. A set of GNSS observations from 33 stations of the REGME (*GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador*) network, covering the period 2008-2014 are used for this purpose. In addition, another 17 IGS (*International GNSS Service*) stations are considered in order to link the solution with the global reference framework ITRF2008. GNSS data are processed using the software Bernese 5.0 following the IGS recommendations to obtain daily time series for each station, both in cartesian coordinates and in topocentric local coordinates in the ITRF2008 (IGb08) system.

The series are depurated of anomalous values by the detection and correction of offsets and by the removal of outliers prior to the time series analysis. Subsequently, an exhaustive analysis of the time series is carried out by additive decomposition, considering that the data generated by the series are the sum of three factors: trend, seasonality or periodicity and noise.

The trend of a series is given by the long term motion of the data that compose it. Initially, it is calculated by weighted linear regression, adjusting the motion at a station to a straight line. The periodicity is determined by a spectral analysis of the series for unequally-spaced data. The type of noise is computed from the spectral index derived from the power spectra analysis approximated to a frequency-dependent power law. Results of the noise analysis will help evaluating its impact of the velocity calculations and their uncertainties.

The trend, seasonality and type of noise are introduced in a general model of the series to recalculate the parameters of the series, namely periodicity, intercept and trend by least squares adjustment. The new estimates of these parameters provide more realistic magnitudes of the velocities and their uncertainties.

This entire process is programmed in Matlab scripts. The input file is the SINEX file resulting from the GNSS processing, generating as the main output the velocity and the uncertainty for each station, according to the respective trend, seasonality and type of noise.

The ITRF2008 velocity field finally obtained is referred to a reference frame fixed to the South American plate. This required the computation of the SOAM/ITRF2008 pole from five IGS stations located in the stable part of South America. The analysis of the velocity field clearly reflects the north-northeastward motion of the North Andean Block with respect to the South American plate and a transpressive tectonic regime with dextral lateral slip of a complex fault system that constitutes the so-called Andean Major Dextral System.

Results show a clearly different tectonic behavior of the northern and southern parts of Ecuador. This coincides with the different behavior of the Ecuadorian subduction, with a weaker and shallower (0-15 km) coupling in southern Ecuador and a northwards increase of the coupling, where last subduction mega-earthquakes of the last century took place. Moreover, the stations located to the south of the Guayaquil Gulf present ESE-SE components that indicate that these stations are located in the Inca (or Peru) tectonic block.

A velocity model for Ecuador is carried out from the absolute velocity field and relative to South America for Ecuador, applying the two techniques that are most often used to

represent a continuous velocity surface: the geostatistical method Kriging and the least squares collocation method. The results obtained with both methods are compared with velocities of the stations used for the verification and with cross validation. From the different kriging techniques, the one that best fits the velocity field for the Ecuadorian crust is the Universal kriging method with a spherical semivariogram model. The root mean square error of the prediction obtained with this method is 1.76 mm/yr in east component and 1.81 mm/yr in north component. The collocation least squares method gives RMS errors of 1.70 mm/yr and 1.73 mm/yr for East and North components, respectively. Although both approaches have similar prediction errors, it is concluded that the method that presents a better fit and reliability for representing the velocity field of Ecuador is the least squares collocation method. The Matlab scripts developed with the crustal velocity model of Ecuador are provided. This allows obtaining the velocity and the uncertainty in any location of the Ecuadorian territory.

For the first time in Ecuador, an accurate velocity field is obtained from continuous GNSS data of REGME stations. From this, it is defined a precise velocity model for the crust for Ecuador. This contributes to the understanding of the regional tectonics and geodynamics of the area, and to define a stable reference framework for Ecuador.

Key words: Time-series; GNSS; Geodynamics; Ecuador; Velocity model; Kriging; Least squares collocation method.

DEDICATORIA

A Mercedes, el amor de mi vida, a nuestros hijos y a mi querida Madre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios. Sin él, nada de esto habría sido posible. A su madre, la Virgen María, por quererme con gran detalle.

A Alejandra Staller, Belén Benito, Jorge Gaspar, Sandra Martínez y Humberto Parra, por su cercanía, su apoyo incondicional y sobre todo por su calidad humana.

A Alejandra Staller, mi directora de tesis. Por esos días de 20 horas de trabajo, por su valiosa guía y asesoramiento en la realización de esta tesis doctoral.

A todos mis profesores, particularmente a Carmen Morillo, por su ayuda y brillante pedagogía.

A las autoridades de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE por todo el apoyo recibido.

A las autoridades del Instituto Geográfico Militar por la entrega de datos de la Red GNSS de Monitoreo Continuo de Ecuador- REGME, para la ejecución de este proyecto.

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes y justificación	1
1.2. Objetivos de la Tesis	3
1.3. Estructura de la Tesis	3
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	7
2.1. Marco Sismotectónico	7
2.2. Estudios Previos	12
2.3. La Red REGME	13
3. PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS	17
3.1. Sistemas y Marcos de Referencia usados en GNSS	17
3.2. Factores que influyen en el posicionamiento GNSS	21
3.2.1. Refracción atmosférica	21
3.2.1.1. Refracción troposférica	22
3.2.1.2. Refracción ionosférica	24
3.2.2. Errores en parámetros orbitales o efemérides	26
3.2.3. Errores en el reloj (satélite y receptor)	27
3.2.4. Efectos relativistas	27
3.2.5. Efecto multicamino (multipath)	28
3.2.6. Variación del centro de fase de la antena	29
3.2.7. Mareas terrestres	30
3.3. Análisis y recopilación de la información existente	30
3.3.1. Preparación de datos	33
3.4. Descripción del procesamiento mediante software científico Bernese 5.0.....	34
3.4.1. Creación y preparación de archivos para el procesamiento de una campaña	35
3.4.2. Transformación de los datos y órbitas de los satélites a formato Bernese	36
3.4.3. Pre-procesamiento	38
3.4.4. Procesamiento	40
3.4.5. Cálculo de las soluciones finales diarias	42
3.4.6. Automatización del procesamiento con BPE (Bernese Processing Engine)	43
3.5. Transformación a un sistema de referencia local-topocéntrico	44
3.6. Resultados	46
4. ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES GNSS. CAMPO DE VELOCIDADES PARA ECUADOR	49
4.1. Introducción	49
4.2. Análisis de series temporales	52
4.2.1. Detección y corrección de <i>outliers</i> y <i>offsets</i>	52
4.2.2. Descomposición aditiva de las series temporales	56
4.2.2.1. Tendencia	57
4.2.2.2. Estacionalidad	59
4.2.2.3. Ruido – Análisis espectral	62

4.2.3.	Resultados	65
4.2.3.1.	<i>Offsets y outliers</i>	65
4.2.3.2.	Tendencia, estacionalidad y ruido	68
4.3.	Obtención de velocidades	79
4.3.1.	Mediante Estimación Mínimo Cuadrática (EMC)	79
4.3.2.	Mediante estimación máxima verosimilitud (MLE) con el software CATS	87
4.3.2.1.	Descripción del método de máxima verosimilitud	88
4.3.3.	Comparación de resultados	92
4.4.	Campo de velocidades de la corteza para Ecuador	99
4.4.1.	Campo de velocidades relativo a la placa Sudamérica	101
4.5.	Discusión y conclusiones	107
4.5.1.	Estacionalidad	107
4.5.2.	Ruido	108
4.5.3.	Campo de velocidades	109
4.5.4.	Interpretación Tectónica	113
5.	MODELO DE VELOCIDADES	115
5.1.	Introducción	115
5.2.	Selección de las velocidades a utilizar	116
5.3.	Método geoestadístico Kriging	119
5.3.1.	Análisis exploratorio de datos	120
5.3.2.	Análisis estructural o modelación de las funciones de correlación	125
5.3.2.1.	Variable regionalizada	125
5.3.2.2.	Estacionariedad de segundo orden	125
5.3.2.3.	Estacionariedad débil o intrínseca	125
5.3.2.4.	Funciones de correlación espacial	126
5.3.2.5.	Semivariograma experimental y teórico	127
5.3.2.6.	Resultados	129
5.3.3.	Predicción.....	132
5.3.3.1.	Estimación de ponderaciones por medio de la función de semivarianza	132
5.3.3.2.	Validación del Kriging	135
5.3.3.3.	Resultados	135
5.4.	Método de Mínimos Cuadrados Colocación	140
5.4.1.	Ajuste por mínimos cuadrados. Modelos matemáticos de ajustes	140
5.4.2.	Modelo funcional	142
5.4.3.	Modelo estocástico	142
5.4.4.	Predicción de la señal completa	144
5.4.5.	Estimación de la precisión a posteriori	145
5.4.6.	Resultados	145
5.5.	Discusión y conclusiones	150
6.	CONCLUSIONES FINALES. LÍNEAS FUTURAS	157
6.1.	Procesamiento de datos GNSS	157
6.2.	Análisis de Series Temporales	158
6.3.	Campo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador	161
6.4.	Modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador	161
	REFERENCIAS	165

ANEXOS.....	175
Anexo A	175
Anexo B	177
Anexo C	181
Anexo D	189
Anexo E	207
Anexo F (en CD)	209
Anexo G (en CD)	209
Anexo H (en CD)	209

Lista de Figuras

Figura 1.1.	Esquema del desarrollo y estructura de la tesis.	5
Figura 2.1.	Cuadro pequeño esquina superior-izquierda marco tectónico regional. Marco sismotectónico de Ecuador. Los vectores negros indican la tasa relativa y el acimut entre las placas de Nazca y Sudamérica (Trenkamp et al., 2002) y el movimiento del Bloque Norandino relativo a la placa Sudamérica (Nocquet et al., 2014). El límite este y sur del Bloque Norandino corresponde al sistema mayor dextral, representándose simplificado mediante una línea (Chunga et al., 2016). Los cuadrados negros muestran la posición de las estaciones REGME usadas en este estudio con su identificador. Los triángulos amarillos indican la posición de los volcanes. Los círculos rojos muestran sismicidad instrumental ($M_w > 5$ prof < 40 km período 2008-2014) del catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC) del USGS (United States Geological Survey)	8
Figura 2.2.	A) Esquema estructural del noroeste de Sur América. PF: Falla de Pallatanga; BF: Falla de Boconó; G: Guayaquil; C: Caracas. B) Esquema tectónico de Ecuador. La dirección del movimiento de la placa de Nazca se indica con la flecha blanca (Trenkamp et al., 2002), las flechas negras indican el movimiento del Bloque Norandino en dirección NE e Inca en dirección SE (Nocquet et al., 2014). Las letras indican las ciudades, del sur al norte: T: Talara; M: Machala; G: Guayaquil; Mt: Manta; E: Esmeraldas. GCM: Megacizalla Guayaquil-Caracas. Figura modificada de Dumont et al., 2005	9
Figura 2.3.	Fotos de dos tipos de monumentación de las estaciones REGME. a) Monumentación sobre tejado con pilar de hormigón de 2 m de altura, estación CUEC. b) Monumentación sobre terreno, estación RIOP	14
Figura 2.4.	Mapa de Ecuador y ubicación de las estaciones REGME utilizadas en este estudio. Las estaciones marcadas con color verde son aquellas que tienen más de dos años de información, las de color anaranjado de 1.5 a 2.0 años de información y las de color rojo de 0.6 a 1.5 años de información	15
Figura 3.1.	Red SIRGAS de monitoreo continuo. Los puntos rojos corresponden a las estaciones de la red global del IGS y los puntos azules a las estaciones regionales de SIRGAS (tomada de SIRGAS, 2017)	21
Figura 3.2.	Retraso de la señal debido a efectos atmosféricos. S es la trayectoria verdadera de la onda entre el receptor y el satélite y G la distancia geométrica. Modificado de Sánchez (2008)	22
Figura 3.3.	Parámetros utilizados en la corrección ionosférica. Adaptado de Seeber, (2003)	25
Figura 3.4.	Efecto muticamino. Modificada de Seeber, (2003)	29
Figura 3.5.	Estaciones de la Red GNSS de Monitoreo de Ecuador (REGME) utilizadas en este estudio	32
Figura 3.6.	Estaciones IGS utilizadas para vincular las soluciones al marco	

	de referencia ITRF2008 (IGb08)	32
Figura 3.7.	Esquema del procesamiento de datos GNSS con el software Bernese GPS 5.0	35
Figura 3.8.	Representación de un salto de ciclo en las dobles (dd) y triples diferencias (dt) producido entre los instantes de tiempo t1 y t2. Modificada de García (2016)	40
Figura 3.9.	Sistema de coordenadas cartesianas globales (X, Y, Z) y topocéntricas locales (e, n, u). Modificada de Drewes (2014)	44
Figura 4.1.	<i>Offset</i> de la serie temporal de la estación PTEC. El eje de abscisas corresponde a la fecha de observación en años. El eje de ordenadas representa la posición de la estación, en las tres componentes (e, n, u), expresada en milímetros	54
Figura 4.2.	a) Serie temporal original componente este de la estación ALEC. b) Serie temporal aplicada proceso integrado de orden 1 donde los puntos rojos son datos que están fuera del intervalo $\overline{\Delta Z_1} \pm 3 \cdot \sigma_{\Delta Z}$ (intervalo marcado en línea amarilla discontinua). c) Serie depurada de valores atípicos mediante aplicación de procesos integrados. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	55
Figura 4.3.	a) Serie temporal componente este de la estación ALEC depurada mediante procesos integrados b) Los datos con residuales mayores que tres veces su desviación estándar se consideran valores atípicos (intervalo marcado con línea amarilla discontinua, en rojo línea de tendencia. c) Serie depurada de valores atípicos cuando sus residuales son superiores a tres veces su desviación estándar respecto a la tendencia de la serie. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	56
Figura 4.4.	Serie temporal de la estación LJEC en sus tres componentes (e, n, u), con la tendencia (en rojo). El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	58
Figura 4.5.	Serie temporal de la estación LJEC con el efecto periódico (línea roja) en sus tres componentes. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	61
Figura 4.6.	Espectro de potencia de la serie para la estación ALEC e índice espectral (pendiente de la recta en rojo), que indica ruido gaussiano fraccionario	63
Figura 4.7.	Series temporales caracterizadas por ruido blanco. Modificado de Ward y Greenwood (2007)	64
Figura 4.8.	Series temporales caracterizadas por ruido rosa (flicker). Adaptado de Ward y Greenwood (2007)	64
Figura 4.9.	Series temporales caracterizadas por ruido rojo (random walk). Adaptado de Ward y Greenwood (2007)	64
Figura 4.10.	Estación PTEC corregida por <i>offset</i> en todas sus componentes. En la parte superior se encuentran las series afectadas por <i>offset</i> y en la parte inferior las series corregidas. La línea verde representa el momento en que se produjo el <i>offset</i> . El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de	

	ordenadas representa la posición de la estación en milímetros..	65
Figura 4.11.	Estaciones con <i>offset</i> y <i>outliers</i> . La línea roja entrecortada representa el momento en que se produjo el <i>offset</i> , se presenta el error cuadrático medio antes de la eliminación de <i>outliers</i> y corrección de <i>offset</i> (rms1) y el error cuadrático medio de los datos depurados (rms2). El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	66
Figura 4.12.	Componente de las series temporales de las estaciones LJEC, CUEC y ECEC. Proceso de depuración de las series por eliminación de valores atípicos. Los puntos rojos indican los <i>outliers</i> eliminados en la serie. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	68
Figura 4.13.	Serie temporal de la estación CUEC en sus tres componentes (e, n, u). Se muestra la tendencia (línea roja) en cada componente con sus valores e incertidumbres. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros .	71
Figura 4.14.	Periodos predominantes de la estación CUEC. Los valores en el eje de las abscisas corresponden al periodo (días) y el eje de las ordenadas al espectro de potencia (mm ²). Los dos ejes se encuentran en escala logarítmica	72
Figura 4.15.	Serie temporal de la estación CUEC en sus tres componentes (e, n, u). Se muestra la estacionalidad (línea roja) en cada componente, con sus valores. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	74
Figura 4.16.	Densidad espectral de potencia de las estaciones REGME. El eje de las abscisas corresponde a las frecuencias (dia ⁻¹) y las ordenadas a la densidad espectral de potencia (mm ²). Se encuentran representadas en escala logarítmica	76
Figura 4.17.	Valores de los índices espectrales para la estación CUEC en cada una de sus componentes, sus valores corresponden a ruido blanco fraccionario. Los valores de ambos ejes se encuentran en escala logarítmica. El eje de las abscisas corresponde al logaritmo de las frecuencias (dia ⁻¹) y el eje de las ordenadas al logaritmo del espectro de potencia (mm ²)	78
Figura 4.18.	Serie temporal de la estación CUEC en sus tres componentes (e, n, u). Los puntos negros representan los valores observados con su incertidumbre (barra negra), la línea azul la tendencia y la línea verde la estacionalidad obtenida después del ajuste. La línea roja muestra la estacionalidad obtenida antes del ajuste. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros	80
Figura 4.19.	Comparación de las velocidades absolutas ITRF2008 obtenidas en este estudio con EMC con ruido blanco (en rojo), con la solución de SIRGAS SIR15P01 (en azul)	83
Figura 4.20.	Diferencia ente las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas en este estudio con EMC incluyendo ruido blanco (en rojo) y ruido flicker (en negro). Las incertidumbres	

	en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza	87
Figura 4.21.	Diferencia ente las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido blanco (en rojo) y ruido flicker (en negro). Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza	92
Figura 4.22.	Diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con EMC (en rojo) y MLE (en negro) con CATS incluyendo ruido blanco. Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza	95
Figura 4.23.	Diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con EMC (en rojo) y MLE (en negro) con CATS incluyendo ruido flicker. Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza	97
Figura 4.24.	Diferencias en velocidad horizontal en cada estación REGME obtenida entre las distintas soluciones calculadas. a) Diferencias entre las soluciones EMC y MLE con ruido blanco. b) Diferencias entre las soluciones EMC y MLE con ruido flicker	98
Figura 4.25.	Campo de velocidades horizontales ITRF2008 para Ecuador, obtenido a partir del análisis de las series temporales de las estaciones REGME por estimación EMC y ruido blanco. Elipses de error al 95% del nivel de confianza	100
Figura 4.26.	Campo de velocidades verticales ITRF2008 para Ecuador, obtenido a partir del análisis de las series temporales de las estaciones REGME por estimación EMC y ruido blanco. Incertidumbres al 95% del nivel de confianza	101
Figura 4.27.	Velocidades horizontales ITRF2008 de las estaciones IGS utilizadas en este estudio, con elipses de error al 95% de confianza. Las estaciones utilizadas para definir el marco de referencia sudamericano son: BRAZ, BRFT, LPGS, PARC y UNSA	102
Figura 4.28.	Campo de velocidad horizontal GNSS (vectores negros) de las estaciones REGME/IGS respecto al marco de referencia fijo en Sudamérica (SOAM). Elipses de error al 95% de confianza. El recuadro superior muestra la velocidad horizontal GNSS de la estación GLPS localizada en la placa de Nazca. Las líneas negras delinear las principales estructuras tectónicas. El límite entre el Bloque Norandino (BNA) y la placa sudamericana (SOAM) está definido por el Sistema Mayor Dextral de los Andes. Las líneas negras finas delinear el mapa de las fallas (Egüez, et al., 2003). Las líneas discontinuas azules muestran los perfiles A-A' y B-B' que se utilizarán para proyectar las velocidades (apartado 4.5.3). BNA - Bloque Norandino, Placa SOAM - Placa América del Sur	103
Figura 4.29.	Comparación de velocidades obtenidas en este estudio (Tabla 4.20) y velocidades en Ecuador de Nocquet et al. (2014) respecto a la placa de América del Sur fija	105
Figura 4.30.	Comparación de velocidades obtenidas en este estudio (Tabla 4.20) y las obtenidas por interpolación con el modelo de velocidades VEMOS2015 (Sánchez and Drewes, 2016) respecto a la placa de América del Sur fija	107
Figura 4.31.	Topografía y velocidades GNSS respecto a Sudamérica fija	

	proyectadas a lo largo de dos perfiles (ver Figura 4.28). Se representan gráficamente las componentes de velocidad del perfil paralela (círculos negros) y normal (triángulos) con su barra de error al 95% de nivel de confianza, en función de la distancia a lo largo del perfil. Las líneas verticales discontinuas muestran la ubicación de las estructuras principales del Sistema Mayor Dextral de los Andes (área sombreada). BNA - Bloque Norandino. Placa SOAM - Placa sudamericana	112
Figura 5.1.	Distribución espacial de las 94 estaciones REGME y RENAGE que se van a usar en la modelización (en rojo y negro, respectivamente) y las 16 estaciones RENAGE (en azul) que se van a usar para la validación	119
Figura 5.2.	Gráficos QQ-plot para los valores de velocidades en los tres componentes.....	121
Figura 5.3.	Histogramas y diagramas de caja de las velocidades en las tres componentes. Los histogramas de las tres componentes se encuentran en diferentes escalas horizontales y verticales	122
Figura 5.4.	Ubicación de las estaciones con valores atípicos	123
Figura 5.5.	Gráficos de dispersión de valores de velocidad respecto a las coordenadas geográfica. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente up	124
Figura 5.6.	Parámetros de un modelo de semivariograma teórico. La línea continua roja representa el semivariograma teórico, mientras que los puntos azules representan el semivariograma experimental	128
Figura 5.7.	Modelos de semivariogramas teóricos ajustados al semivariograma experimental para las tres componentes (e , n , u)	131
Figura 5.8.	Malla $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging estable. En rojo las velocidades de las 94 estaciones dato con sus incertidumbres al 95%. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%	137
Figura 5.9.	Malla $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging esférico. En rojo las velocidades de las 94 estaciones dato con sus incertidumbres al 95%. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%	138
Figura 5.10.	Malla $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ de velocidades de la corteza relativas a Sudamérica fija en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging estable. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%	139
Figura 5.11.	Malla $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ de velocidades de la corteza relativas a Sudamérica fija en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging esférico. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%	140
Figura 5.12.	Matriz de covarianza empírica. Los puntos azules corresponden al promedio de los valores de covarianza dentro de cada intervalo y la línea roja al modelo funcional de la covarianza empírica	144
Figura 5.13.	Función polinómica para la componente este	146
Figura 5.14.	Función polinómica para la componente norte	147

Figura 5.15.	Función de covarianza empírica para las componentes este y norte. Los puntos azules corresponden al promedio de los valores de covarianza dentro de cada intervalo y la línea roja al modelo funcional de la covarianza empírica	147
Figura 5.16.	Malla 0.25°x 0.25° de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación. En rojo las velocidades de las 94 estaciones dato con sus incertidumbres al 95%. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.....	149
Figura 5.17.	Malla 0.25°x 0.25° de velocidades de la corteza relativas a Sudamérica fija en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%	150
Figura 5.18.	Malla 0.25°x 0.25° con las diferencias entre las velocidades absolutas obtenidas con el modelo de Kriging Esférico y el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación	152
Figura 5.19.	Malla 1°x 1° de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador obtenidas con el modelo Kriging Esférico (rojo), Mínimos Cuadrado Colocación (azul) y VEMOS2015 (negro) (Sánchez y Drewes, 2016)	153
Figura 5.20.	Malla 1°x 1° de velocidades relativas de la corteza en Ecuador obtenidas con el modelo Kriging Esférico (rojo), Mínimos Cuadrado Colocación (azul) y VEMOS2015 (negro) (Sánchez y Drewes, 2016)	154

Lista de Tablas

Tabla 2.1.	Sismos con $M_w > 5$ y profundidad < 40 km. Periodo 2008-2014, obtenidos del catálogo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) de Ecuador, del National Earthquake Information Center (NEIC), United States Geological Survey (USGS), Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) y Model Output Statistics (MOS)	11
Tabla 2.2.	Resumen de datos de las estaciones REGME utilizadas en este estudio. Las estaciones REGME aparecen con su número DOMEX. Los datos limpios es el total de datos obtenidos una vez que se han eliminado los valores atípicos. El tiempo de observación corresponde a la diferencia de las épocas del último y primer dato registrados	16
Tabla 3.1.	Información sobre las estaciones IGS utilizadas en este estudio .	31
Tabla 3.2.	Información obtenida de la solución final de un archivo SINEX ..	46
Tabla 3.3.	Repetibilidad promedio y precisión de la solución semanal para cada una de las estaciones de la red REGME	47
Tabla 3.4.	Promedios de repetibilidad semanal y precisiones diarias y semanales de las coordenadas de las estaciones de la red REGME.....	48
Tabla 4.1.	Fecha y valor de los <i>offsets</i> detectados en las estaciones REGME	65
Tabla 4.2.	Porcentaje de valores atípicos eliminados para cada estación	67
Tabla 4.3.	Primera aproximación de las velocidades GNSS de las estaciones REGME. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año. wrmse, wrmsn y wrmsu: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm	69
Tabla 4.4.	Precisiones promedio de las estaciones REGME	70
Tabla 4.5.	Frecuencias y potencias de observaciones de las estaciones REGME	73
Tabla 4.6.	Periodos fundamentales y tiempos de observación de las estaciones REGME	75
Tabla 4.7.	Valores de índice espectral de las estaciones REGME	77
Tabla 4.8.	Velocidades GNSS de las estaciones REGME/IGS obtenidas en este estudio con EMC incluyendo la estacionalidad y ruido blanco. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año. wrmse, wrmsn y wrmsu: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm	81
Tabla 4.9.	Comparación de precisiones antes y después de aplicar estacionalidad	82
Tabla 4.10.	Comparación de las velocidades absolutas obtenidas en este estudio con EMC con ruido blanco, con la solución de SIRGAS SIR15P01. Velocidades en mm/año. Años Obs.: intervalo de tiempo de la serie temporal utilizado para calcular la velocidad en cada solución	83
Tabla 4.11.	Velocidades GNSS de las estaciones REGME obtenidas en este	

	estudio con EMC incluyendo ruido flicker. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año	85
Tabla 4.12.	Diferencia ente las velocidades de las estaciones REGME obtenidas en este estudio con EMC incluyendo ruido blanco y ruido flicker. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) obtenidas en la solución con ruido blanco y flicker	86
Tabla 4.13.	Velocidades GNSS de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido blanco. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año	89
Tabla 4.14.	Velocidades GNSS de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido flicker. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año	90
Tabla 4.15.	Diferencia ente las velocidades de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido blanco y ruido flicker. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) obtenidas en la solución con ruido blanco y flicker	91
Tabla 4.16.	Comparación de índices espectrales obtenidos a partir de EMC y MLE. Las estaciones se encuentran ordenadas en forma ascendente de acuerdo al número de observaciones. Int: Intervalo de observación en años. #obs: número de observaciones después de la eliminación de valores atípicos utilizados en la estimación de la velocidad	93
Tabla 4.17.	Comparación de velocidades ITRF2008 obtenidas a partir de EMC y MLE con ruido blanco. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) obtenida en ambas soluciones (EMC/MLE)	94
Tabla 4.18.	Comparación de velocidades ITRF2008 obtenidas a partir de EMC y MLE con ruido blanco. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) obtenida en ambas soluciones (EMC/MLE)	96
Tabla 4.19.	Velocidades ITRF2008 de las estaciones REGME e información relacionada. Los componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año. wrmse, wrmsn y	

	wrmsu: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm. Periodo Obs.: periodo de observación de la serie temporal en año decimal. #Obs: número de observaciones después de la eliminación de valores atípicos utilizados en la estimación	99
Tabla 4.20.	Velocidades GNSS de las estaciones REGME / IGS relativas a la placa sudamericana e información relacionada. Los componentes de velocidad del GNSS del este, norte y vertical (VE, VN, VUP) y las incertidumbres al 95% de confianza (σ_{VE} , σ_{VN} , σ_{VUP}) se expresan en mm / año; wrms E, wrms N y wrms Up: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm	103
Tabla 4.21.	Comparación de velocidades fijas al marco de referencia Sur América obtenidas en este estudio y las obtenidas por Nocquet et al. (2014). Las velocidades se expresan en mm/año	105
Tabla 4.22.	Comparación de velocidades fijas al marco de referencia Sur América obtenidas en este estudio y las interpoladas con el modelo de velocidades VEMOS2015. Las velocidades se expresan en mm/año	106
Tabla 4.23.	Análisis de varianza de valores de índice espectral (e, n, u)	109
Tabla 5.1.	Estaciones de la red REGME-RENAGE a ser utilizadas para la modelización	116
Tabla 5.2.	Estaciones utilizadas para la validación del modelo	118
Tabla 5.3.	Estadísticos descriptivos de las velocidades	120
Tabla 5.4.	Prueba de Kolmogórov-Smirnov para una sola muestra. Las velocidades se encuentran en mm/año	121
Tabla 5.5.	Modelos teóricos de semivariogramas	128
Tabla 5.6.	Variabilidad del Número de pares para cada valor de h	130
Tabla 5.7.	Numero de pares para los diferentes intervalos con $h=0.37^\circ$	130
Tabla 5.8.	Valores de los parámetros de los semivariogramas teóricos con su correspondiente valor de error cuadrático medio. Las variables en estudio se encuentran en mm/año	132
Tabla 5.9.	Estimación en los puntos de validación utilizando Kriging Universal con modelos de semivariograma Esférico y Estable. Las velocidades se encuentran en mm/año y las incertidumbres están calculadas al 95% de confianza	136
Tabla 5.10.	Error cuadrático medio de los puntos de validación utilizando Kriging Universal con modelos de semivariograma Esférico y Estable en sus dos componentes	136
Tabla 5.11.	Valores de estadísticos para los modelos Esférico y Estable en sus dos componentes en la verificación por validación cruzada .	136
Tabla 5.12.	Estimación en los puntos de validación utilizando Mínimos Cuadrados Colocación	148
Tabla 5.13.	Error cuadrático medio de la validación para Mínimos Cuadrados Colocación	148
Tabla 5.14.	Valores de estadísticos para el modelo MCC en sus dos componentes para validación cruzada	148
Tabla 5.15.	Valores de estadísticos para las distintas técnicas utilizadas en la verificación por validación cruzada	150
Tabla 5.16.	Comparación de las distintas técnicas utilizadas con los datos de validación. Las velocidades se encuentran en mm/año	151
Tabla 5.17.	Errores cuadráticos medios (en mm/año) obtenidos de los	

	datos de validación en las diferentes modelos de predicción espacial	152
Tabla 5.18.	Ventajas e inconvenientes de las técnicas de predicción espacial utilizadas en este estudio: Kriging y Colocación Mínimo Cuadrática	155

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y justificación

El GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permite determinar la posición relativa tridimensional de un objeto sobre la superficie terrestre con precisión milimétrica. Tiene gran utilidad en la obtención de los desplazamientos horizontales y verticales de la superficie de la tierra, en cualquier momento, lugar y bajo cualquier condición meteorológica (Hofmann-Wellenhof, 2007).

En la actualidad con el desarrollo de las nuevas tecnologías cada vez es más extendida la implantación de redes de estaciones permanentes GNSS denominadas redes activas. En contraposición con las denominadas redes pasivas, formadas por vértices geodésicos o puntos materializados sobre el terreno, estas redes activas dotan a los usuarios (geodestas, topógrafos, investigadores y público en general) de un marco de referencia preciso, actualizable, con coordenadas y velocidades de las estaciones, y a su vez suministran datos GNSS para poder realizar mediciones precisas asociadas a dichas estaciones (Specht et al., 2011).

Las medidas obtenidas con GNSS son ampliamente utilizadas en las investigaciones de fenómenos geofísicos, como por ejemplo la cuantificación de la deformación cortical y determinación del movimiento de las placas tectónicas, así como para la determinación de deformaciones asociadas a volcanes, ajuste isostático glacial y variaciones del nivel medio del mar. Es obvio que las medidas GNSS son complementarias a otros datos geofísicos, necesarios para analizar y evaluar adecuadamente el fenómeno estudiado (Petrovski y Tsujii, 2012).

En 1993 Ecuador entra a formar parte del proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) a fin de determinar su Marco Geodésico de Referencia, participando en la medición de tres vértices geodésicos dentro del territorio nacional a través del Instituto Geográfico Militar Ecuatoriano (IGM). Posteriormente, entre los años 1994, 1996 y 1998 se realizó la medición de 135 puntos distribuidos por todo el país con el objetivo de obtener una densificación del marco de referencia enlazado a SIRGAS. Estos puntos constituyen hoy en día la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE), una red pasiva materializada por mojones que definen el Marco Geodésico de Referencia para Ecuador SIRGAS-ECUADOR, cuya realización se denomina SIRGAS95, siendo la época de referencia: 1995.4 (ITRF94) (IGM, 2016).

No fue hasta 2008 cuando el IGM comienza a establecer la Red GNSS de Monitoreo continuo para Ecuador (REGME), que al inicio de este estudio contaba con 33 estaciones y actualmente está conformada por 44 estaciones GNSS enlazadas a la RENAGE y a la Red Continental SIRGAS-CON.

Con los datos de la RENAGE y 10 estaciones de monitoreo continuo de la REGME, Cisneros y Nocquet (2011) obtuvieron el primer campo de velocidades para Ecuador. A partir de este campo de velocidades, Tierra (2016) presentó un primer modelo de velocidades de la corteza terrestre a nivel nacional utilizando para ello el método de redes neuronales artificiales mediante aprendizaje supervisado. Este trabajo presenta varios inconvenientes importantes, como por ejemplo que no se discriminan las estaciones que tienen incertidumbres muy altas o que tienen inconsistencias con

aquellas que se encuentran muy cercanas entre sí, tampoco se presentan los valores de las incertidumbres o los errores de predicción para cada resultado, los cálculos y resultados están dados en coordenadas cartesianas geocéntricas y además no se genera una malla de interpolación que permita su posterior uso.

A nivel regional, Drewes y Heidbach (2005) presentan el primer modelo de velocidades de la corteza para América del Sur VEMOS (*Velocity Model of South America*) obtenido a partir de las observaciones geodésicas realizadas en toda la región. Basándose en ese trabajo, posteriormente presentan el modelo de velocidades para América del Sur y el Caribe, denominado VEMOS2009 (Drewes y Heidbach 2012), usando para ello el método de los elementos finitos con un modelo geofísico y el método de Mínimos Cuadrados Colocación con funciones de correlación empírica.

Recientemente, Sánchez y Drewes (2016) presentan el modelo regional actualizado VEMOS2015, con datos de estaciones de América Latina y El Caribe en el periodo 2010–2015, obtenido mediante el método de colocación mínimos cuadrados.

En todos los trabajos citados anteriormente no se realiza un análisis exhaustivo de las series temporales para la obtención de las velocidades y sus incertidumbres.

Debido al terremoto del 16 de abril de 2016 (Ye et al., 2016), el IGM se está planteando definir el nuevo marco de referencia geodésico, con la finalidad de homologar la información geodésica-cartográfica generada en los distintos proyectos e investigaciones a nivel nacional. A partir del 17 de abril del 2016, el IGM utiliza como Marco Geodésico de Referencia para el Ecuador las coordenadas ajustadas a ITRF08 – época 2016.436 de las estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la red activa de control horizontal REGME (IGM, 2016).

Es por ello que esta tesis pretende ser una contribución a la definición de un modelo de velocidades de la corteza preciso y fiable para Ecuador.

Para tal efecto se procesaron las observaciones GNSS de 33 estaciones pertenecientes a la red REGME con datos durante el periodo 2008-2014, de las que se obtendrán series temporales de soluciones diarias de coordenadas. Nos centramos primeramente en la obtención de valores de velocidades más ajustadas a la realidad y con precisiones más realistas que las obtenidas por regresión lineal simple mediante el ajuste a una recta considerando solamente la tendencia. Proponemos para ello un análisis más riguroso de las series temporales mediante una descomposición aditiva determinando la periodicidad, tendencia y tipo de ruido presente en cada serie. Estos tres parámetros se utilizan para realizar un ajuste por mínimos cuadrados que nos da como resultado las velocidades finales de cada estación y sus incertidumbres. Una vez obtenido el campo de velocidades preciso de la corteza terrestre para Ecuador, se realiza la modelización del mismo mediante la aplicación de dos técnicas que se utilizan con mayor frecuencia para representar una superficie continua de velocidades: el método geoestadístico Kriging y el método de Mínimos Cuadrados Colocación.

El campo y modelo de velocidades de la corteza terrestre obtenido en este estudio contribuirán a una mayor comprensión de la tectónica regional y geodinámica de la zona, permitiendo conocer, desde un punto de vista geodésico, las coordenadas de las estaciones en cualquier época respecto a un determinado sistema de referencia (ITRS), contribuyendo así a la realización del marco de referencia geodésico del país.

1.2. Objetivos de la Tesis

Esta tesis es una aportación más dentro del objetivo general de la definición de un modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador. En ella se utilizará la capacidad de las técnicas GNSS para obtener series temporales y determinar un campo de velocidades con sus incertidumbres para Ecuador. A partir de este campo de velocidades se analizará cuál es el método de interpolación óptimo para la obtención de un modelo de velocidades fiable y preciso para Ecuador.

En particular el presente trabajo pretende dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuál es el campo de velocidades actual en Ecuador?
- ¿Qué tipo de ruido y estacionalidad está presente en las series temporales de las estaciones de la red REGME?
- ¿Cómo afecta la inclusión del ruido y estacionalidad en el cálculo de la velocidad y sus precisiones?
- ¿Qué técnica de modelización se ajusta mejor al movimiento de la corteza terrestre en Ecuador?

Objetivo principal

Teniendo en cuentas estas cuestiones, el objetivo principal de esta tesis es contribuir a la definición de un modelo de velocidades de la corteza terrestre óptimo para Ecuador, a partir del análisis de datos GNSS de estaciones continuas. El campo de velocidades y el modelo contribuirán a una mayor comprensión de la tectónica y geodinámica de la zona, así como a la realización de un marco de referencia estable para Ecuador.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se plantean son:

- Analizar la estacionalidad y tipo de ruido, así como otros posibles efectos en cada estación, mediante el análisis de las series temporales obtenidas para cada estación en el periodo 2008-2014.
- Estimar velocidades horizontales y verticales de las estaciones REGME analizadas en el periodo 2008-2014 mediante la inclusión de estacionalidad y ruido en las series temporales.
- Evaluar las incertidumbres de las velocidades estimadas.
- Estimar un campo de velocidades homogéneo para el Ecuador, a partir de las observaciones GNSS de 33 estaciones de monitoreo continuo en el periodo 2008-2014.
- Aplicar, validar y comparar distintas métodos y técnicas de estimación e interpolación: geoestadística y colocación mínimo cuadrática para modelar el campo de velocidades estimado.

1.3. Estructura de la Tesis

La tesis se divide en 5 capítulos principales que a continuación se describen brevemente.

En el capítulo 2 se realiza la descripción del área de estudio, se exponen las causas de los movimientos de la corteza terrestre a través de la presentación del marco sismo tectónico que afecta a la zona, así como los estudios realizados al respecto.

Posteriormente se describe la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME) fuente de generación de los datos utilizados en esta investigación.

En el capítulo 3 se presenta una cronología de la evolución de los diferentes marcos de referencia en el periodo de estudio y los respectivos cambios de modelos de antenas y órbitas. Se menciona el marco de referencia con el que se va a trabajar y la estrategia de procesamiento a utilizar, además se describen los principales factores que afectan el posicionamiento GNSS, así como los modelos utilizados para minimizar su efecto. Posteriormente se describe el análisis y recopilación de la información existente, la preparación de datos para el procesamiento y se detallan las etapas del procesamiento mediante el software Bernese 5.0 (Dach et al., 2007). Previo a la presentación de los resultados se presenta la metodología para transformar las coordenadas de un sistema cartesiano global a un sistema de referencia local topocéntrico, para facilitar el estudio e interpretación de las series generadas en el procesamiento.

En el capítulo 4 se realiza un análisis exhaustivo de las series temporales mediante el estudio de la descomposición de las mismas. Se analiza la tendencia, periodicidad y tipo de ruido existente en cada serie, para posteriormente introducir todos estos parámetros en el cálculo de las velocidades mediante estimación mínimo cuadrática. Los resultados son contrastados con otras soluciones de estudios regionales y a través de soluciones generadas por el software CATS (Williams, 2008), para finalmente presentar el campo de velocidades final de la corteza terrestre para Ecuador, tanto absoluto (ITRF2008), como relativo a la placa sudamericana.

El objetivo del capítulo 5 es el aplicar las técnicas de interpolación para obtener un modelo que mejor se ajuste al campo de velocidades obtenido y la inclusión de algunas velocidades de la red pasiva. Para tal efecto, se aplican dos técnicas de interpolación: método geoestadístico Kriging y Mínimos Cuadrados Colocación. Se comparan los resultados en base a los errores de predicción y mediante evaluación cruzada para finalmente presentar el modelo de velocidades de la corteza óptimo para esta zona.

Además, al final de los capítulos 4 y 5, capítulos principales de esta tesis, se presenta un apartado de discusión y conclusiones, específico para cada uno de los temas desarrollados en estos capítulos.

El capítulo 6 se expone un resumen de las principales conclusiones obtenidas en este trabajo y las líneas futuras de investigación.

La Figura 1.1 muestra de forma esquemática el desarrollo y estructura de esta Tesis en sus diferentes capítulos.

Figura 1.1. Esquema del desarrollo y estructura de la tesis.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La República de Ecuador está ubicada en la parte noroccidental de América del Sur. Limita al norte con la República de Colombia, al este y sur con la República del Perú y al oeste con el Océano Pacífico (con más de 1200 km de costa, sin contar con el Archipiélago de Galápagos e islas continentales) (Figura 2.1). Con una superficie de 283.561 km² (275.677 km² región continental y 7.844 km² región insular), es el cuarto país más pequeño y el más densamente poblado de América del Sur con una población aproximada de 16.300.000 habitantes.

Desde un punto de vista geográfico, la Cordillera de los Andes atraviesa al Ecuador de norte a sur, dividiendo al territorio continental en tres regiones naturales: la región Litoral o Costa, la región Interandina o Sierra y la región Oriental o Amazonía. Además, el país tiene una cuarta región, la Región Insular o islas Galápagos, situadas en el océano Pacífico a 1000 km al oeste de la costa ecuatoriana (Figura 2.1).

Para un mejor entendimiento y comprensión de las velocidades de la corteza terrestre en Ecuador que se obtendrán en los capítulos siguientes, es necesario conocer el marco sismotectónico regional de la zona de estudio. Es por ello que en este capítulo se presenta la tectónica y sismicidad de la región y, en particular, de Ecuador. Además, se explicarán los estudios previos realizados en la zona relacionados con la determinación de velocidades de la corteza terrestre y se describirá en detalle la red de estaciones de monitoreo continuo (REGME) que se usará en este trabajo para la obtención de las series temporales y del campo de velocidad de la corteza para Ecuador.

2.1. Marco Sismotectónico

Desde un punto de vista tectónico, Ecuador se encuentra localizado en la zona de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica. Esto hace que se caracterice por tener una elevada tasa de deformación, alta actividad sísmica y un complicado régimen de esfuerzos, causado principalmente por la subducción de la placa oceánica de Nazca y la presencia de un complejo sistema de fallas activas que generan sismos corticales.

Así pues, el entorno tectónico de la zona está controlado por la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental de Sudamérica. La ubicación y geometría de la placa que subduce ejercen un control primario en el volcanismo activo de la Cordillera Central Norte de los Andes, la deformación transpresional en la placa superior y la sismicidad a diferentes niveles de profundidad (Hayes et al., 2012; Guillier et al., 2001).

La Fosa de Subducción se encuentra a una distancia aproximada de 100–200 km de la costa continental (Ortiz, 2013) (Figura 2.1). La Placa Oceánica de Nazca penetra bajo Ecuador con una dirección N 80°–83° E y movimientos relativos de 50 a 70 mm/año (Nocquet et al., 2009; Gutscher et al., 1999). Esta subducción es ligeramente oblicua, la placa subducente se hunde con un ángulo entre 25° y 35° y es discontinua a una profundidad cercana a los 200 km (Guillier et al., 2001). La velocidad de subducción de la placa de Nazca y de la Cordillera Carnegie (Figura 2.1) en la fosa Colombia–Ecuador es de 56 ± 2 mm/año (Trenkamp et al., 2002).

Figura 2.1. Cuadro pequeño esquina superior-izquierda marco tectónico regional. Marco sismotectónico de Ecuador. Los vectores negros indican la tasa relativa y el acimut entre las placas de Nazca y Sudamérica (Trenkamp et al., 2002) y el movimiento del Bloque Norandino relativo a la placa Sudamérica (Nocquet et al., 2014). El límite este y sur del Bloque Norandino corresponde al sistema mayor dextral, representándose simplificado mediante una línea (Chunga et al., 2016). Los cuadrados negros muestran la posición de las estaciones REGME usadas en este estudio con su identificador. Los triángulos amarillos indican la posición de los volcanes. Los círculos rojos muestran sismicidad instrumental ($M_w > 5$ prof < 40 km período 2008-2014) del catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC) del USGS (United States Geological Survey).

La Cordillera Carnegie (Figura 2.1 y 2.2) es un alto batimétrico en la placa de Nazca originado en el *hot-spot* (punto caliente) Galápagos. Tiene una dirección aproximada E-O y entra en la zona de subducción entre 1° de latitud norte y 2° de latitud sur (Witt et al., 2006). Se extiende desde las Islas Galápagos hasta la fosa de subducción y tiene una elevación aproximada de 2000 m sobre el fondo del océano. Varios estudios sugieren que esta cordillera juega un papel relevante en el mecanismo de subducción, el grado de acoplamiento interplaca y la deformación continental (Michaud et al. 2009; Goyes 2009; Trenkamp et al. 2002). Cuatro grandes terremotos (1906, 1942, 1958, 1979) (estrellas rojas en la Figura 2.1) han ocurrido en el flanco norte de la colisión de la cordillera y uno ocurrió a lo largo del flanco sur (1901). Gutscher et al. (1999)

indicaron que ninguno de estos eventos parece haberse roto a través de la cordillera misma. El último gran terremoto ocurrido en el flanco norte de la colisión de M_w 7.8 tuvo lugar en abril de 2016 (Ye et al., 2016) (Figura 2.1).

La zona de fractura Grijalva se localiza al sur de la cordillera de Carnegie (Figuras 2.1 y 2.2), con una orientación aproximada de N 60° E. Comienza a subducir frente al golfo de Guayaquil y se constituye en el límite entre la corteza Neógena de Nazca (con profundidades menores a 3000 m al Norte) y la corteza oceánica más antigua del Oligoceno (con profundidades superiores a 3000 m al Sur) (p. ej. Pedoja et al., 2009; Collot et al., 2009; Gutscher et al., 1999).

Figura 2.2. A) Esquema estructural del noroeste de Sur América. PF: Falla de Pallatanga; BF: Falla de Boconó; G: Guayaquil; C: Caracas. B) Esquema tectónico de Ecuador. La dirección del movimiento de la placa de Nazca se indica con la flecha blanca (Trenkamp et al., 2002), las flechas negras indican el movimiento del Bloque Norandino en dirección NE e Inca en dirección SE (Nocquet et al., 2014). Las letras indican las ciudades, del sur al norte: T: Talara; M: Machala; G: Guayaquil; Mt: Manta; E: Esmeraldas. GCM: Megacizalla Guayaquil-Caracas. Figura modificada de Dumont et al., 2005.

Dentro del territorio continental de Ecuador, la placa Sudamérica es subdividida en dos segmentos; uno en la parte septentrional denominado Bloque Norandino (BNA) (Figuras 2.1 y 2.2), y otro en la parte meridional, la placa Sudamericana propiamente. Los lineamientos estructurales entre ambos segmentos, inician en el Golfo de Guayaquil atravesando la cuenca de ante-arco costera y entrando a través de las depresiones interandinas hacia el Norte a través de la Cordillera de los Andes (p. ej. Chunga et al., 2016; Nocquet et al., 2014; Trenkamp et al. 2002) (Figura 2.1). Es importante indicar que no hay un lineamiento estructural bien definido entre estos dos segmentos, pero si se puede decir que corresponde a una franja de colisión de intraplaca, llamada por algunos autores Sistema Mayor Dextral (Chunga et al., 2016) y por otros mega-cizalla Guayaquil-Caracas (p.ej. Dumont et al., 2005). En sí, la delimitación de este margen activo continental intraplaca está sujeta a numerosas controversias (Eguez et al., 2003, Espinoza, 1992; Mendoza & Dewey, 1984). Trenkamp et al., 2002 delimita el BNA al este por la falla de Boconó, el sistema de fallas Andino del Este y la Megacizalla Guayaquil-Caracas, al norte por el cinturón deformado Sur Caribe y al oeste por la fosa Colombia-Ecuador y el micro-bloque de Panamá. La mega-cizalla Guayaquil-Caracas es un sistema de fallas de desgarre dextral con tendencia noreste y de fallas inversas en dirección norte y constituye el límite oriental a lo largo del cual se desplaza el BNA.

El BNA puede ser el resultado de la conjunción de varios factores, como la subducción oblicua de la placa de Nazca, el acoplamiento generado en la subducción, la competencia de la placa superior y el inicio en el proceso de subducción de la cordillera de Carnegie, entre otros (Witt y Bourgois, 2009). Pennington (1981) y Gutscher et al. (1999) proponen que la llegada de la Cordillera Carnegie a la fosa ecuatoriana inició el movimiento de escape del Bloque Norandino. Varios autores (p. ej. Trenkamp et al., 2002; Nocquet et al., 2009; Chunga et al., 2009; Witt y Bourgois, 2009; Egbue y Kellog, 2010) proponen un movimiento de N 35° E de orientación y 6-10 mm/año de velocidad para este bloque. Nocquet et al. (2014) estima una velocidad para este bloque entre 7.5-9.5 mm/año y dirección NE, explicando la cinemática desde el centro de Ecuador hasta Colombia.

En la zona sur de Ecuador (al sur del Golfo de Guayaquil), el margen de subducción del sur de Ecuador y norte de Perú es un segmento de la subducción en el que no ocurre un gran terremoto ($M_w > 8.0$) desde hace más de 5 siglos. En esta zona, estudios recientes (Nocquet et al., 2014) revelan el movimiento divergente entre dos grandes bloques tectónicos: el bloque Norandino en Ecuador y Colombia y un nuevo bloque tectónico en el norte de Perú, denominado “Bloque Inca”, que se desplaza a una velocidad de 6 mm/año en dirección SE (Figura 2.1 y 2.2).

La evidente variación en la distribución espacial (y características geoquímicas) del vulcanismo en la Zona Volcánica del Norte entre Colombia y Ecuador indica claramente que la subducción de la cordillera de Carnegie bajo el margen ecuatoriano influye fuertemente en el vulcanismo relacionado con la subducción. Se propone que el aplanamiento de la placa subducida inducida por la reciente subducción (<5 Ma) de la cordillera de Carnegie ha permitido el calentamiento progresivo de la corteza oceánica y su fusión parcial desde aproximadamente 1.5 Ma (Bourdon et al., 2003).

Teniendo en cuenta este marco tectónico, Ecuador es un territorio sísmicamente activo que históricamente ha sido afectado por numerosos terremotos destructivos. Se pueden diferenciar tres regímenes sismogénicos en Ecuador (Parra, 2016): (1) una fuente de interfaz de subducción, relativamente poco profunda y relacionada con el contacto entre placas oceánicas y continentales; (2) una fuente cortical, ubicada en la placa continental, de naturaleza poco profunda, que sugiere una profundidad bajo los

Andes de hasta ~75 km y (3) una fuente de subducción en la fosa, relacionada con la deformación de la placa oceánica subducida a niveles profundos.

El evento más fuerte, localizado entre la costa y la fosa, tuvo lugar el 31 de enero de 1906 con magnitudes estimadas de M_w 8.8, seguido de otros eventos, cuyas fechas y magnitudes estimadas son: 14 de mayo de 1942, M_w 7.8; 19 de enero de 1958, M_w 7.8; 12 de diciembre de 1979, M_w 8.1; 16 de abril de 2016, M_w 7.8 (estrellas en la Figura 2.1).

Sin embargo, en las tierras altas del Ecuador se registraron eventos de menor magnitud que causaron mayor daño, debido a su poca profundidad y proximidad a las ciudades. Se asocian principalmente con los sistemas de fallas que acomodan el movimiento entre el bloque Norandino y la placa sudamericana.

En la Tabla 2.1 y Figura 2.1 se presentan los eventos corticales con profundidades menores a 40 km y $M_w > 5$ que han ocurrido durante el periodo del presente estudio, 2008-2014.

Tabla 2.1. Sismos con $M_w > 5$ y profundidad < 40 km. Periodo 2008-2014, obtenidos del catálogo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) de Ecuador, del National Earthquake Information Center (NEIC), United States Geological Survey (USGS), Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ) y Model Output Statistics (MOS).

<i>Fecha (dd/mm/aaaa)</i>	<i>Latitud (°)</i>	<i>Longitud (°)</i>	<i>Profundidad (km)</i>	<i>M_w</i>	<i>Catálogo</i>
26/01/2008	-2.94	-80.69	12.0	5.2	IGEPN
09/02/2009	-6.56	-81.15	15.0	5.9	USGS-NEIC
15/02/2009	-5.85	-80.89	21.0	6.0	USGS-NEIC
21/02/2009	-2.77	-78.13	12.0	5.0	IGEPN
26/03/2009	-5.72	-81.33	10.0	5.8	USGS-NEIC
19/07/2009	-1.66	-80.40	4.1	5.4	IGEPN
27/08/2009	-5.48	-81.22	37.0	5.3	USGS-NEIC
09/10/2009	-0.99	-77.96	17.5	5.2	IGEPN
15/11/2009	3.28	-82.86	25.0	5.2	USGS-NEIC
25/11/2010	0.42	-79.98	17.0	5.1	ISC
14/09/2011	-4.41	-81.57	12.0	5.1	IGEPN
13/10/2011	-6.66	-75.85	12.0	5.8	IGEPN
17/10/2011	-5.48	-77.09	21.0	5.3	IGEPN
24/10/2011	-3.76	-75.18	32.6	5.2	IGEPN
09/11/2011	-5.81	-77.60	12.0	5.6	IGEPN
17/11/2011	-1.67	-81.62	22.4	5.7	IGEPN
19/11/2011	-1.69	-82.07	12.0	5.3	IGEPN
23/11/2011	3.78	-82.70	12.0	5.3	IGEPN
08/02/2012	0.62	-79.31	4.8	5.7	IGEPN
08/06/2012	-1.92	-81.62	12.0	5.2	IGEPN
18/06/2012	-1.07	-78.82	5.2	5.1	IGEPN
26/06/2013	-2.88	-80.66	16.2	5.1	IGEPN
30/07/2012	-1.94	-80.78	10.0	5.3	IGEPN
12/08/2013	-5.38	-81.82	16.0	6.2	GFZ
18/10/2013	-1.01	-81.41	10.0	5.0	IGEPN
25/11/2013	-3.28	-80.29	39.0	5.2	IGEPN
30/11/2013	-2.68	-77.24	21.7	5.2	IGEPN
14/12/2013	-2.93	-80.82	12.9	5.3	IGEPN
09/03/2014	1.61	-79.41	8.2	5.3	IGEPN
14/03/2014	-2.09	-79.87	52.0	5.1	IGEPN
25/03/2014	-2.25	-79.28	8.1	5.6	IGEPN
16/06/2014	1.54	-79.49	15.0	5.4	MOS
12/08/2014	-0.05	-78.42	5.3	5.1	IGEPN
20/10/2014	0.79	-77.94	4.6	5.8	IGEPN

2.2. Estudios Previos

Los trabajos previos realizados en la zona de estudio incluyen varios proyectos regionales que involucran diferentes países. Entre los más importantes estudios geodésicos y geodinámicos que implica el cálculo de velocidades a nivel regional se encuentran: Proyecto de geodinámica SAGA desarrollado en la parte central de Chile en el periodo 1994-1996 (Klotz et al., 2001) y en el norte de Chile durante los años 1996 y 1997 (Khazaradze y Klotz, 2003). El proyecto de geodinámica CASA, desarrollado en Costa Rica, Panamá, Colombia y Ecuador entre los años 1991- 1998 (Trenkamp et al., 2002), que contó con la observación de 12 estaciones en Ecuador. Este proyecto se desarrolló también en Venezuela desde 1988 a 2002 (Kaniuth et al., 2002a). El proyecto integrado CAP-SNAPP, desarrollado en Perú y Bolivia durante el periodo 1993-2001 (Kendrick et al., 2001. 2003).

Drewes y Heidbach (2005) calcularon el primer modelo de velocidades para la corteza en Sudamérica, denominado VEMOS (*Velocity Model of South America*). Para ello usaron 8 estaciones pasivas dentro del territorio ecuatoriano. Este modelo de velocidades también se usaba para la interpolación de movimientos puntuales en redes geodésicas y marcos de referencia.

Posteriormente Drewes y Heidbach (2012) presentan un modelo de velocidades para América del Sur y el Caribe, denominado VEMOS2009, derivado del procesamiento de observaciones geodésicas (GPS) y usando para ello dos métodos: el método de elementos finitos con un modelo geofísico, y el método de Mínimos Cuadrados Colocación con funciones de correlación empírica. Para este modelo Ecuador aportó con información de 8 estaciones pasivas y una estación de monitoreo continuo.

Recientemente, Sánchez y Drewes (2016) presentaron el modelo regional actualizado VEMOS2015, calculado mediante el método de Mínimos Cuadrados Colocación con funciones de covarianza determinadas empíricamente. Se utilizaron datos de estaciones de América Latina y Caribe en el periodo 2010 – 2015, a partir de mediciones GNSS registradas después de los fuertes terremotos ocurridos en Chile y México en 2010. Este modelo se apoya exclusivamente en la solución multianual SIR15P01 proporcionada por la Red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). La cinemática de la red de referencia SIRGAS es determinada mediante el cálculo rutinario de soluciones multianuales, siendo SIR15P01 la solución multianual más reciente (SIRGAS, 2017). Para la determinación de este modelo, Ecuador contribuyó con información de 18 estaciones de monitoreo continuo de la Red REGME (ver apartado 2.3).

Uno de los trabajos recientes más importantes desarrollados en la zona noroeste de Sudamérica es el presentado por Nocquet et al. (2014) que mediante la observación de un conjunto de estaciones GNSS en Colombia, Ecuador y Perú, analizaron el movimiento de los bloques Norandino e Inca, para ello el Ecuador contribuyó con las observaciones de 13 estaciones de monitoreo continuo y 36 estaciones pasivas.

Más específicamente para Ecuador, Cisneros y Nocquet (2011) presentaron un campo de velocidades para el país en base a mediciones de la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE), una red pasiva materializada por mojones de las cuales se hicieron campañas en los años 1994, 1996 y 1998, tomándose como uno de los criterios para su selección que los tiempos de observación sean de mínimo 180 minutos por campaña. Se incluyeron las primeras estaciones de monitoreo continuo con tiempos de observación muy cortos. En este trabajo se generaron series con datos muy espaciados, y por lo tanto no se realizó un análisis exhaustivo de las mismas. Las velocidades con sus incertidumbres fueron calculadas suponiendo ruido blanco puro o ruido blanco

escalado por algún valor empírico derivado de la repetibilidad en las series de tiempo (p. ej. Dixon et al. 2000). Además, se identificaron algunos problemas propios de la época, como por ejemplo para la campaña GPS de 1998 el uso de los receptores ASHTECH L-XII generó un problema sobre la componente este, causado por un error del reloj existente en este tipo de receptor. Además, el procesamiento se forzó al establecimiento de líneas bases muy largas debido a un número reducido de estaciones IGS (*International GNSS Service*) que disminuyó la precisión del cálculo (Cisneros y Nocquet, 2011). La red RENAGE la constituyen 135 estaciones pasivas, de las cuales se seleccionarán las mejores para complementar nuestro modelo, como se verá en el capítulo 5.

En base a este campo de velocidades, Tierra (2016) presentó un primer modelo de velocidades de la corteza para Ecuador estructurado mediante una red neuronal artificial del tipo RBF (*Radial Basis Functions*) mediante aprendizaje supervisado. Los datos obtenidos fueron agrupados en tres grupos de acuerdo a la metodología de las redes neuronales artificiales: el primero para la fase de entrenamiento, el segundo para determinar la capacidad de generalización y el tercero para la evaluación. En este trabajo no se hizo un análisis previo de los datos, ya que existen velocidades con valores atípicos tanto en magnitud como en incertidumbre que en algunos casos superan los 10 mm. Los resultados presentados tampoco dan las precisiones con las que fueron obtenidas dichas velocidades. Además, este trabajo sólo calcula un único modelo de velocidades absolutas (ITRF) en coordenadas cartesianas geocéntricas (X, Y, Z), sin obtener modelos horizontales de velocidades relativas a la placa sudamericana y tampoco genera una malla de interpolación que permite su uso posterior. Por todo lo cual, hasta la fecha Ecuador no dispone de ningún modelo de velocidades nacional preciso y de uso, tanto absoluto como relativo a la placa sudamericana.

2.3. La Red REGME

La Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME) actualmente está conformada por más de 40 estaciones distribuidas a lo largo del territorio continental e insular, se encuentra administrada por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM) y forma parte de la Red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las AméricaS) Continental. La materialización, instalación y configuración ha sido desarrollada bajo estándares internacionales y nacionales establecidos por el IGM. Gran parte de las estaciones se encuentran instaladas sobre columnas de concreto de 2.0 m de alto por 0.30 m de ancho, variando en ciertos casos la altura de la columna, la mayoría se encuentran ubicadas sobre azoteas de edificios públicos (Figura 2.3) (IGM, 2016).

La primera estación de la Red REGME fue establecida en el año 2008 y se han ido incrementando gracias al apoyo de instituciones públicas y privadas. Estas estaciones capturan datos GPS y GLONASS de forma continua, en formato RINEX 2.11 en archivos de observación, navegación y meteorológicos (en aquellos sitios donde se han implementado estaciones meteorológicas) con un intervalo de grabación de 30 segundos en cada estación. En un inicio la red REGME estaba diseñada para un rango de cobertura de 100 km, pero debido a las necesidades tanto a nivel científico como usuario que requieren del uso de esta información, se ha redefinido el rango de cobertura a 50 km.

Esto ha hecho que el número de estaciones REGME hayan aumentado considerablemente en estos últimos años, teniendo actualmente 44 estaciones de monitoreo continuo (IGM, 2016). Como se mencionó anteriormente las estaciones

REGME forman parte de la Red SIRGAS Continental, lo cual contribuye a la extensión del marco de referencia SIRGAS y a la mejora del marco de referencia nacional.

Figura 2.3. Fotos de dos tipos de monumentación de las estaciones REGME. a) Monumentación sobre tejado con pilar de hormigón de 2 m de altura, estación CUEC. b) Monumentación sobre terreno, estación RIOP.

Para la instalación de las estaciones se han considerado varios criterios físicos y técnicos, entre los cuales se pueden mencionar los de mayor relevancia, como son (IGM, 2016):

- Garantizar un sitio libre de interferencias físicas (árboles, vegetación frondosa, grandes edificaciones cercanas, estructuras metálicas, etc.).
- Garantizar un sitio libre de interferencias electromagnéticas (transformadores, generadores de energía, tendido eléctrico, etc.).
- Garantizar la debida seguridad tanto a los equipos como al área de instalación.
- Garantizar en el transcurso del tiempo, la permanencia del sitio en el cual se instala la estación, por lo menos los próximos 15 años.
- Acceso a un canal de comunicación y transmisión de información, mediante una IP Pública de banda ancha. Esto sirve también para la administración y control remoto de los equipos.
- Proveer una toma de energía estabilizada.
- Realizar la construcción del monumento en base a especificaciones técnicas establecidas.

Para este estudio se obtuvo información de 33 estaciones (Figura 2.1 y 2.4), de las cuales 20 tienen datos de al menos 2 años de observación y 13 entre 0.6 a 1.8 años.

Figura 2.4. Mapa de Ecuador y ubicación de las estaciones REGME utilizadas en este estudio. Las estaciones marcadas con color verde son aquellas que tienen más de dos años de información, las de color anaranjado de 1.5 a 2 años de información y las de color rojo de 0.6 a 1.5 años de información.

En la Tabla 2.2 se presentan las estaciones REGME utilizadas en este estudio, donde se indica el identificador de la estación con su código DOMEX, datos utilizados de cada estación, fecha de inicio de operación de cada estación y fecha final de toma de datos, algunas ya no se encuentran operativas, pero poseen datos de más de dos años de observación. Información más detallada se encuentra en el Anexo A.

Tabla 2.2. Resumen de datos de las estaciones REGME utilizadas en este estudio. Las estaciones REGME aparecen con su número DOMEX. Los datos limpios es el total de datos obtenidos una vez que se han eliminado los valores atípicos. El tiempo de observación corresponde a la diferencia de las épocas del último y primer dato registrados.

Estación	Total Datos	Datos limpios	Fecha inicial	Fecha final	Tiempo de observación (años)	% de datos
ALEC 42029M001 ⁽¹⁾	615	596	09/12/2012	31/12/2014	2.06	79.26
AUCA 42017M001 ⁽²⁾	362	356	15/08/2011	26/02/2013	1.54	63.46
BAHI 42018M001 ⁽³⁾	127	125	25/08/2011	11/10/2012	1.13	30.27
CHEC 42030M001 ⁽²⁾	357	345	17/11/2012	08/12/2013	1.06	89.38
CLEC 42031M001 ⁽¹⁾	485	463	09/12/2012	21/05/2014	1.45	87.69
COEC 42023M001 ⁽¹⁾	461	451	24/11/2012	31/12/2014	2.10	58.80
CUEC 42009M001 ⁽¹⁾	1546	1472	29/10/2008	31/12/2014	6.18	65.31
CXEC 42038M001 ⁽¹⁾	272	264	06/12/2013	31/12/2014	1.07	67.69
ECEC 42027M001 ⁽¹⁾	627	610	24/11/2012	31/12/2014	2.10	79.53
EPEC 42039M001 ⁽¹⁾	291	279	22/11/2013	31/12/2014	1.11	69.06
EREC 42037M001 ⁽¹⁾	436	426	14/06/2013	31/12/2014	1.55	75.40
ESMR 42011M001 ⁽¹⁾	1681	1611	09/05/2009	31/12/2014	5.65	78.13
GYEC 42007M001 ⁽³⁾	1638	1583	05/10/2008	05/07/2014	5.75	75.42
GZEC 42032M001 ⁽¹⁾	616	596	09/12/2012	31/12/2014	2.06	79.26
IBEC 42024M001 ⁽¹⁾	704	689	25/05/2012	31/12/2014	2.60	72.53
LJEC 42010M001 ⁽¹⁾	1765	1617	19/01/2009	31/12/2014	5.95	74.45
LREC 42014M001 ⁽²⁾	219	215	25/12/2011	17/08/2012	0.65	91.10
MAEC 42013M001 ⁽¹⁾	989	957	22/07/2010	31/12/2014	4.45	58.96
MHEC 42022M001 ⁽²⁾	573	552	23/02/2012	11/02/2014	1.97	76.77
MTEC 42015M001 ⁽²⁾	276	271	11/10/2011	21/12/2012	1.20	62.01
NJEC 42028M001 ⁽¹⁾	626	607	17/11/2012	29/12/2014	2.12	78.63
PDEC 42033M001 ⁽²⁾	479	466	09/12/2012	30/12/2014	2.06	62.05
PJEC 42034M001 ⁽³⁾	444	434	24/11/2012	31/12/2014	2.10	56.58
PREC 42035M001 ⁽¹⁾	390	379	11/06/2013	31/12/2014	1.56	66.73
PTEC 42008M001 ⁽³⁾	1086	1045	31/10/2008	11/05/2013	4.53	63.22
QUEM 42020M001 ⁽¹⁾	239	231	25/12/2011	09/05/2014	2.37	26.67
QUI1 42003S003 ⁽³⁾	300	288	05/10/2008	02/08/2009	0.82	95.68
QVEC 42012M001 ⁽²⁾	900	866	20/01/2011	31/12/2014	3.95	60.10
RIOP 42006M001 ⁽¹⁾ (4)	1740	1688	05/10/2008	15/12/2014	6.20	74.62
SEEC 42036M001 ⁽¹⁾	494	481	09/12/2012	31/12/2014	2.06	63.96
SNLR 42021M001 ⁽²⁾	252	249	15/08/2011	08/09/2012	1.07	63.85
STEC 42016M001 ⁽²⁾	284	277	11/10/2011	14/08/2013	1.84	41.16
TNEC 42026M001 ⁽²⁾	841	821	12/10/2011	31/12/2014	3.22	69.81

(1) Estaciones operativas en la actualidad. (2) Estaciones en mantenimiento. (3) Estaciones no operativas. (4) Estación IGS.

En adelante nos referiremos a los nombres de las estaciones REGME sin su número DOMEX.

El alto porcentaje de pérdida de datos en algunas estaciones de monitoreo continuo se debe prácticamente a la falta de mantenimiento debido básicamente a cuestiones presupuestarias.

Con respecto a estaciones fuera del área de estudio, solamente existen dos estaciones de monitoreo continuo cercanas fuera de las fronteras de Ecuador, ubicadas en la parte sur de Colombia al norte del territorio ecuatoriano, de las cuales no se pudo tener acceso a esa información. En las fronteras que limitan con Perú no existe ninguna estación de monitoreo continuo cercanas a nuestro país, por tratarse de zonas desérticas y selváticas.

CAPÍTULO 3. PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS

Para la obtención de las coordenadas diarias de las estaciones de monitoreo continuo de la REGME se ha realizado el procesamiento de los datos GNSS (*Global Navigation Satellite System*) con el software Bernese 5.0 (Dach et al., 2007), desarrollado por el AIUB (*Astronomical Institute of the University of Bern*). Este software científico de alta precisión para el procesamiento de datos multi-GNSS es utilizado por el CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), uno de los centros de cálculo cuyas soluciones para las órbitas GNSS y parámetros de orientación de la Tierra son utilizados en la generación de los productos que distribuye el IGS (*International GNSS Service*), y es conocido a nivel internacional por su alto grado de fiabilidad en el procesamiento y ajuste de datos GNSS, dando resultados de alta exactitud y precisión (p.ej. Wallace et al., 2004; Lin K.C. et al., 2010).

En este capítulo se presenta una cronología de la evolución de los diferentes marcos de referencia en el periodo de estudio (2008-2014) y los respectivos cambios de modelos de antenas y órbitas. Se menciona el marco de referencia con el que se va a trabajar y la estrategia de procesamiento a utilizar. Además, se describen los principales factores que afectan el posicionamiento GNSS como: retardo troposférico, retardo ionosférico, efemérides o parámetros orbitales, errores del reloj del satélite y receptor, carga oceánica, variaciones de centro de fase, entre otros. Dentro de esta descripción se presentan los diferentes modelos utilizados para minimizar el efecto en el cálculo de coordenadas dentro del procesamiento GNSS. Posteriormente se realiza el análisis y recopilación de la información existente y la preparación de datos para el procesamiento y se detallan las etapas del procesamiento mediante el software Bernese 5.0 (Dach et al., 2007). Este procesamiento se realiza con datos GPS (*Global Positioning System*) y GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) de 33 estaciones REGME y 17 estaciones pertenecientes a IGS.

Previo a la presentación de los resultados se presenta la metodología para transformar las coordenadas de un sistema cartesiano global a un sistema de referencia local topocéntrico, para facilitar el estudio e interpretación de las series generadas en el procesamiento y su posterior análisis en la determinación de las velocidades e incertidumbres.

3.1. Sistemas y Marcos de Referencia usados en GNSS

Para el cálculo del movimiento de la corteza terrestre es necesario la determinación de coordenadas en un sistema de referencia terrestre convencional. El ITRS (*International Terrestrial Reference System*) es el sistema de referencia terrestre utilizado a escala internacional para aplicaciones científicas y de ingeniería de alta precisión (Boucher et al., 1996). El ITRS es un sistema ideal que cumple las siguientes condiciones:

- es un sistema geocéntrico, su origen corresponde con el centro de masas de la Tierra (incluyendo la atmósfera y los océanos)
- la base para la escala es el metro (SI)

- la orientación de sus ejes es la del sistema de referencia del BIH (*Bureau International de l'Heure*) en 1984.0. La base vectorial canónica es directa, dextrógira, ecuatorial y móvil, sólida con la Tierra, de forma que sigue sus movimientos en rotación diurna.
- la evolución en el tiempo no genera rotaciones residuales con respecto a la corteza terrestre.

El ITRS se materializa a través de las coordenadas y velocidades de una serie de estaciones distribuidas por todo el mundo, equipadas con distintas técnicas de observación espacial: VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), GPS (*Global Positioning System*) desde 1991 y DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) desde 1994. Todas ellas constituyen el Marco Internacional de Referencia Terrestre ITRF (*Internacional Terrestrial Reference Frame*), establecido y mantenido por la IERS (*Earth Rotation and Reference Systems Service*).

El ITRF proporciona un marco preciso y consistente, o datum, para referenciar posiciones en diferentes momentos y en diferentes lugares alrededor del mundo. Un objetivo primordial del ITRF (como realización del Sistema Internacional de Referencia Terrestre-ITRS), que se utiliza como marco estándar para las aplicaciones de las Ciencias de la Tierra, es asegurar la mejor exactitud posible para la definición del origen del datum (centro de masas de la Tierra incluyendo los océanos y la atmósfera), la escala y la condición NNRC (*No-Net Rotation Condition*). Para ello, seguimos los conceptos de marco de referencia establecidos desde los años ochenta por la comunidad astronómica y geodésica (Kovalevsky et al., 1989), distinguiendo entre un sistema y un marco: el primero tiene una definición teórica y es inaccesible, mientras que este último es accesible, alcanzable y perfectible a través del uso y análisis de observaciones geodésicas (Altamimi et al., 2007).

El marco de referencia en el procesado con software científico viene definido por el marco en el que se expresan las órbitas, y éstas son proporcionadas por el IGS.

El IGS tiene como principal objetivo el proporcionar un apoyo a las actividades de investigación geodésicas y geofísicas a través datos GNSS y los productos que se originan de estos. El IGS recopila, archiva y distribuye los datos de observación GNSS en un número de estaciones de seguimiento. Estos conjuntos de observaciones son utilizados por el IGS para generar productos de datos, a saber: órbitas o efemérides de satélite GNSS de alta precisión, parámetros de rotación de la Tierra, coordenadas y velocidades de estaciones IGS de rastreo, información de la ionosfera, información de la troposfera, entre otros.

Cada marco de referencia IGS tiene asociado un modelo de calibración de antenas (pcv/atx) (ver apartado 3.2.6) y un marco de referencia internacional ITRF del cual deriva. Por lo tanto, cada cambio de marco ITRF o actualización en el modelo de calibración de antenas implica un cambio de marco IGS.

El IGS contribuye, extiende y densifica el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). La realización IGS de ITRF, que amplía el número de estaciones significativamente, hace que el marco de referencia sea fácilmente accesible.

En particular, las precisiones de los productos IGS son suficientes para la mejora y extensión del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), el monitoreo de las deformaciones sólidas de la Tierra, el monitoreo de la rotación de la Tierra y las variaciones del nivel del mar, entre otras, para las determinaciones científicas de la órbita de los satélites, el monitoreo de la ionosfera, etc. (IGS, 2017).

Para entender mejor la interconexión entre IGS-ITRF y calibraciones de antena, se expone el proceso de actualización del marco IGS: la premisa básica es que el marco IGSxx es la realización del marco ITRFxx correspondiente, aplicado a la técnica GNSS, y que ambos comparten un mismo datum subyacente (Rebischung et al., 2012). A través del tiempo se han ido modificando los marcos de referencia debido a la incorporación constante de nuevas estaciones, nuevas observaciones de las estaciones ya existentes y mejora de las precisiones o nuevos métodos de procesamiento.

Dentro de nuestro periodo de estudio han existido varios cambios de marco de referencia IGS, los cuales detallaremos a continuación:

- IGS05: En noviembre de 2006, el IGS adoptó un marco de referencia basado en ITRF2005, denominado IGS, simultáneamente con el cambio de las calibraciones centrales de fase de antena relativas a absolutas (Schmid et al., 2007). Pero mientras ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) se basaba en calibraciones relativas de antenas (igs_01.pcv, Rothacher y Mader, 1996), IGS05 tenía que ser consistente con el conjunto de calibraciones absolutas adoptadas simultáneamente (igs05.atx) (Schmid et al., 2007). Para contabilizar los cambios de calibración del centro de fase de antena, las correcciones de posición para las estaciones IGS05 se derivaron del procesamiento paralelo y se aplicaron a sus posiciones ITRF2005 para formar IGS05 (Ferland, 2006). Se montaron un conjunto completo y coherente de PCVs (*Phase Center Variations*) absolutos para las antenas de seguimiento y satélite. Entre las diferencias más importantes involucradas en la implementación de los nuevos patrones absolutos, se tienen: la organización de la información de calibración utiliza el formato "ANTEX", el formato anterior no permitía las correcciones de las antenas de satélite ni las variaciones acimutales, los PCVs absolutos pueden ser reportados como funciones de acimut así como elevación, los PCVs robóticos se miden hasta 0 grados de elevación, mientras que los PCVs relativos (y PCVs absolutos derivados de ellos) generalmente se extienden solamente a 10 grados, los PCVs absolutos y los desplazamientos de fase se informan para satélites individuales y los *z-offsets* (en la dirección desde el centro satélite de masa hacia el centro de la Tierra) son específicos de satélite (Gendt y Schmid, 2005).
- IGS08: Asociado a ITRF2008 y al modelo de calibración igs08.atx (Schmid, 2011), vigente desde abril de 2011. Este nuevo modelo no supuso un cambio tan importante en cuanto a las calibraciones de antena. Las antenas de los satélites mejoran en la estimación de los PCOs (*Phase Center Offsets*) de la componente radial Z (z-PCOs) y también PCV específicos para cada tipo de satélite GLONASS (en el modelo anterior no se consideraba la constelación GLONASS, ni en antenas, satélites ni receptores). Las antenas de los receptores incluyen nuevas calibraciones absolutas antena + radomo con robot (se pasa del 62 al 69 %) se actualizan casi todas las existentes (promedio de varias calibraciones de robot, antes 1 sola) y también se añaden PCO y PCV específicos para GLONASS en algunos modelos de antena (Schmid et al., 2009).
- IGB08: Vigente desde octubre 2012, sigue asociado a ITRF2008 y al modelo igs08.atx (a partir de igs08_1707.atx) y supone solo un cambio menor en cuanto a actualizaciones de calibraciones de antena y z-PCOs de satélites (Schmid, 2012). Las razones fundamentales para esta actualización es por la existencia de un gran número de estaciones que se encontraban fuera de servicio o se habían visto afectados por discontinuidades (cambios de antena, terremotos, etc.) desde la época 2009.5, quedando inutilizables para las alineaciones de marcos de referencia operativos, ocasionando la pérdida de muchas estaciones de las cuales quedaron

solamente 50 operativas, generando grandes agujeros en América del Sur, África, y Asia del Este (Rebischung et al., 2011).

El marco ITRF2008 está referido a la época 2005.0 ($t_0=2005.0$), se basa en el reprocesamiento de todas las series de observaciones de las cuatro técnicas espaciales utilizadas (VLBI entre 1980 y 2009, GPS/GNSS entre 1997 y 2009, SLR entre 1983 y 2009, DORIS entre 1993 y 2009), de manera que utilicen estándares actuales e idénticos y el mismo software para la reducción, modelización y corrección de observaciones (modelos de troposfera e ionosfera, centros de fase de emisión de los satélites y receptores, etc.). De esta manera el marco ITRF conservará su definición a lo largo del tiempo en cuanto a origen, escala y orientación. El datum ITRF2008 se define de la siguiente manera (Altamimi, et al., 2011):

- Origen: Parámetros de traslación nulos (en la época 2005.0) y variación nula de estos parámetros entre ITRF2008 y las series SLR.
- Escala: Factor de escala nulo (para la época 2005.0) y variación nula entre ITRF2008 y las series VLBI.
- Orientación: Parámetros de rotación nulos para los ejes (en la época 2005.0) y variaciones nulas entre ITRF2008 e ITRF2005.

SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), como sistema de referencia se define idéntico al Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) y su realización es la densificación regional del marco global de referencia terrestre ITRF en América Latina y El Caribe. Las coordenadas SIRGAS están asociadas a una época específica de referencia y su variación con el tiempo es tomada en cuenta ya sea por las velocidades individuales de las estaciones SIRGAS o mediante un modelo continuo de velocidades que cubre todo el continente (SIRGAS, 2017).

La red SIRGAS de funcionamiento continuo está compuesta en la actualidad por cerca de 400 estaciones, de las cuales 59 pertenecen a la red global del IGS (Figura 3.1).

Figura 3.1. Red SIRGAS de monitoreo continuo. Los puntos rojos corresponden a las estaciones de la red global del IGS y los puntos azules a las estaciones regionales de SIRGAS (tomada de SIRGAS, 2017).

3.2. Factores que influyen en el posicionamiento GNSS

La determinación del posicionamiento por satélite conlleva obtener valores de coordenadas que están influenciadas por múltiples factores que inciden en su valor real. Los errores producidos por estos factores pueden ser modelados durante el procesamiento de los datos para tratar de minimizar su efecto en la determinación de la coordenada final obtenida.

A continuación, describiremos los principales factores que afectan el posicionamiento GNSS, así como los modelos utilizados para minimizar su efecto.

3.2.1. Refracción atmosférica

La velocidad y trayectoria o curvatura de propagación de las ondas electromagnéticas se ven alteradas por la atmósfera. Dicha alteración depende del estado físico de ésta y por tanto son diferentes para la ionosfera y la troposfera.

El retraso o aceleración de una señal electromagnética en la atmósfera es una función del índice de refracción $n=c/v$, el cual representa la relación entre la velocidad de la luz c (propagación en el vacío) y la velocidad de propagación v en la atmósfera (Seeber, 1993).

El retraso o aceleración $\delta\rho_{atm}$ de la señal es la diferencia entre la trayectoria verdadera de la onda (S) y la distancia geométrica recta (G), que hubiese recorrido la onda en el vacío, como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2. Retraso de la señal debido a efectos atmosféricos. S es la trayectoria verdadera de la onda entre el receptor y el satélite y G la distancia geométrica. Modificado de Sánchez (2008).

Este retraso o aceleración $\delta\rho_{atm}$ puede ser calculado mediante la fórmula:

$$\delta\rho_{atm} = \int (n(s) - 1)ds - (S - G) \quad (3.1)$$

3.2.1.1. Refracción troposférica

Las señales GNSS en la troposfera sufren refracción y dispersión debido a cambios de temperatura, presión y contenido de vapor de agua.

El término (S-G) es insignificante en esta capa de la atmósfera en las mediciones GNSS, ya que para ángulos de elevación mayores que 15° alcanza apenas 1 cm.

El índice de refracción es independiente de la frecuencia para las microondas entre 100 MHz y 20 GHz, es decir que la troposfera es un medio no dispersivo. El retardo para las frecuencias L1 (1575.42 MHz) y L2 (1227.60 MHz) es igual (Seeber, 1993).

De acuerdo con la ecuación (3.1) e ignorando el término (S-G), el retardo en las señales GNSS en la troposfera está dado por:

$$\delta\rho_{trp} = \int (n(s) - 1)ds \quad (3.2)$$

Introduciendo el coíndice o refractividad $N = (n-1) \cdot 10^6$ se tiene:

$$\delta\rho_{trp} = 10^{-6} \int N(s)ds \quad (3.3)$$

El coíndice N para las microondas con frecuencias entre 100 MHz y 20 GHz se divide en un término “seco” N_d (dry) y un término “húmedo” N_w (wet) (Smith y Weintraub, 1953).

$$N = N_d + N_w \quad (3.4)$$

$$N_d = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} \quad ; \quad N_w = k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \quad (3.5)$$

Donde,

P_d : es la presión parcial del aire seco en mbar.

e : es la presión parcial del vapor de agua en mbar.

T : es la temperatura en K.

k_1, k_2, k_3 : son los coeficientes empíricos (K mbar⁻¹).

Z_d, Z_w : son las comprensibilidades del aire seco y del vapor de agua, respectivamente.

La presión de vapor de agua está dada por:

$$e = \frac{H}{100} \exp(-37.2465 + 0.213166T - 0.000256908T^2) \quad (3.6)$$

H es la humedad relativa en porcentaje, P_d y T son descriptibles en términos estadísticos. El retardo total (componente húmeda más la componente seca) de la señal es de aproximadamente 2.3 m en la dirección del cenit y alrededor de 25 m en una elevación de 5°. El 90 % del retardo total corresponde a la parte seca y depende principalmente de la presión atmosférica del aire seco, la cual puede medirse sobre la superficie de la tierra y, por tanto, se facilita el modelado del retardo. El 10% restante le corresponde a la parte húmeda, con un valor máximo aproximado de 40 cm, es muy variante con respecto a la posición geográfica y cambia rápidamente con el tiempo. No se puede modelar debido a la distribución complicada y desconocida del vapor de agua en la atmósfera (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

La corrección por el retardo de la señal en la tropósfera es:

$$\delta\rho_{trp} = \delta\rho_{trp,d} + \delta\rho_{trp,w} = 10^{-6} \int N_d(s)ds + 10^{-6} \int N_w(s)ds \quad (3.7)$$

Donde $\delta\rho_{trp,d}$ y $\delta\rho_{trp,w}$ son las correcciones por el retardo de la señal en las componentes seca y húmeda, respectivamente.

El retardo troposférico depende de la longitud de la trayectoria de la señal a lo largo de la atmósfera, por tanto, es una función del ángulo cenital z y se expresa a través de una función de mapeo m_t :

$$\delta\rho_{trp}(z) = m_t \delta\rho_{trp}^0 \quad ; \quad \delta\rho_{trp}^0 = \delta\rho_{trp}^0(0) \quad (3.8)$$

En aplicaciones de alta precisión, los parámetros troposféricos son derivados directamente de las observaciones GPS. Para tal efecto, se toma un modelo como valor inicial y se determinan las correcciones correspondientes:

$$\delta\rho_{k,trp}^i(t, A, z) = \delta\rho_{apr,k}^i(z_k^i) + \delta\rho_k^0(t) m_t(z_k^i) + \delta\rho_k^n(t) \frac{\partial m_t}{\partial z} \cos A_i^k + \delta\rho_k^e(t) \frac{\partial m_t}{\partial z} \sin A_i^k \quad (3.9)$$

i : Satélite.

k : Receptor.

t : Tiempo de observación.

z_k^i, A_i^k : Ángulo cenital y acimut del satélite i , observado desde el receptor k .

$\delta\rho_{apr,k}(z_k^i)$: Retardo de la señal derivado de un modelo a priori.

$\delta\rho_k^0(t)m_t(z_k^i)$: Retardo en dirección del cenit con su respectiva función de mapeo.

$\delta\rho_k^n(t), \delta\rho_k^e(t)$: Parámetros del gradiente troposférico horizontal en dirección norte y este.

Normalmente un modelo troposférico incluye una función de mapeo, y requiere de algunos parámetros como presión atmosférica, temperatura y humedad. Estos pueden obtenerse de observaciones meteorológicas *in situ* o de un modelo global atmosférico (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

La corrección por refracción atmosférica empleada en este estudio es la determinada por Saastamoinen (1972):

$$\delta\rho_{trp}(t) = \frac{2.277 \times 10^{-3}}{\cos z} \left(P + \left\{ \frac{1255}{T} + 0.05 \right\} \cdot e - 1.16 \tan^2 z \right) \quad (3.10)$$

Los parámetros troposféricos se determinan dentro del post proceso.

3.2.1.2. Refracción ionosférica

El efecto de la ionosfera se produce por refracción cuando la señal electromagnética GNSS atraviesa la parte ionizada de la atmósfera con límites inferior y superior de unos 50 km hasta unos 1000 km de altitud, respectivamente. En esta zona los electrones libres influyen en la propagación de señales microondas que incluyen las señales GNSS (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

Las máximas perturbaciones se presentan en las zonas ecuatoriales, donde la densidad de los electrones es muy alta, y en las zonas polares donde las fuertes variaciones se producen en periodos de tiempos muy cortos. En cambio, en las latitudes medias, la ionosfera es tranquila, aunque presenta tempestades errantes (*Travelling Ionosphere Disturbances*, TID) con periodos desde unos cuantos minutos hasta aproximadamente una hora y cubrimiento geográfico de 10 km y 1000 km. La densidad de electrones aumenta con la radiación solar según la posición geográfica, los valores máximos se presentan aproximadamente a las 14 horas del tiempo local (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

La refracción ionosférica es dispersiva, lo que quiere decir que el índice de refracción depende de la frecuencia de la señal transmitida y de la densidad de electrones libres a lo largo de la trayectoria de propagación. Al trabajar con receptores GNSS de varias frecuencias, se aprovecha el hecho de que las distintas señales sufran distintos retrasos que al combinarlas se obtienen señales *L3* libres de efectos ionosféricos. Sin la corrección de este efecto, se pueden producir errores en las coordenadas de las estaciones que van de 1 a 100 m (Seeber, 2003), pero aun así considerando la combinación libre de efecto ionosférico como observable principal quedan errores que afectan a las coordenadas obtenidas.

La corrección por refracción o retardo ionosférico está dada por la integración del índice de refracción a lo largo de la trayectoria de propagación, que para las señales GPS *L1* y *L2* viene dada por Hofmann-Wellenhof et al. (2007):

$$\delta\rho_{ion} = -\alpha \frac{E}{f^2} \quad (3.11)$$

Donde f es la frecuencia y E representa la cantidad de electrones libres por metro cuadrado que se encuentran en una columna entre el satélite y el receptor, también se conoce como el contenido total de electrones TEC (*Total Electron Content*):

$$E = \int N_e(s) ds \quad (3.12)$$

El contenido total de electrones se mide en *TEC Units* (TECU = 10^{16} electrones libres por m^2). La constante α está dada por:

$$\alpha = 40.3 \times 10^{16} \text{ ms}^{-2} \text{ TECU}^{-1} \quad (3.13)$$

La corrección de distancia es negativa para las mediciones de diferencia de fase, es decir que la distancia S es más larga que la geométrica G . La variable que se modela es el TEC en la dirección del cenit, denominado contenido total de electrones vertical VTEC (*Vertical Total Electron Content, Ev*) del cual se puede determinar el TEC para cualquier ángulo de elevación mediante una función de distribución de la función de mapeo m_I .

$$E(z) = m_I(z) E_v \quad (3.14)$$

$$m_I(z) = \frac{1}{\cos z'} \quad (3.15)$$

$$\sin z' = \frac{R}{R + H} \sin z \quad (3.16)$$

En la Figura 3.3 se indica los parámetros que se utilizan para realizar la corrección a la refracción ionosférica, donde R es la distancia geocéntrica del receptor, Δz es el ángulo del centro de la Tierra, SIP es el punto sub-ionosférico, IPP el punto donde entra en la ionosfera, $H = 350$ Km (Seeber, 2003).

Figura 3.3. Parámetros utilizados en la corrección ionosférica. Adaptado de Seeber, (2003).

La corrección por refracción atmosférica (en metros) puede reescribirse como:

$$\delta \rho_{ion} = -\alpha \frac{E}{f^2} = -40.3 \frac{E}{f^2} = -40.3 \frac{E}{f^2} m_I(z) \quad (3.17)$$

$$\delta\rho_{ion} = -40.3 \frac{1}{\cos z'} \frac{Ev}{f^2} \quad (3.18)$$

En los diferentes procesamiento se aplican estrategias para minimizar el efecto de la ionosfera, como son: combinaciones lineales de las señales, aplicaciones de correcciones ionosféricas contenidas en el mensaje de navegación de los satélites y la aplicación de modelos ionosféricos del IGS (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

3.2.2. Errores en parámetros orbitales o efemérides

Corresponden a errores que se producen debido a perturbaciones en las órbitas de los satélites. Independientemente de la complejidad de las órbitas, las perturbaciones pueden ser causados por incertidumbres en el modelo de presión de radiación solar, modelo del campo gravitatorio o estimación del estado inicial (Colombo, 1984).

Un error en las efemérides del satélite afecta directamente a las mediciones de la línea base obedeciendo la siguiente ley aproximada:

$$\left| \frac{\Delta x}{l} \right| = \left| \frac{\Delta X}{d} \right| \quad (3.19)$$

donde ΔX es el error orbital del satélite, Δx es el error en la coordenada de la estación, l es la longitud de la línea de base observada y d la distancia del satélite a la estación GNSS (Berrocoso et al., 2004).

De acuerdo con Kouba (2009), la precisión de las efemérides precisas del IGS es de 2 cm para las órbitas finales. Considerando una distancia media de los satélites GPS a la Tierra de 25000 km, para una línea base de 100 km el error en las coordenadas de la estación es aproximadamente de 1 mm.

A pesar de que el error cometido con el uso de efemérides precisas es despreciable, debido a la periodicidad de las órbitas de los satélites, podrían existir variaciones estacionales en los errores que afecten a las series coordenadas e incluso a la componente anual (Ray et al., 2008).

En cuanto a las órbitas de los satélites, éstas son distribuidas por el IGS en formato SP3 (*Standar Product 3*) que se utilizan para el intercambio de información de las órbitas precisas GNSS. Cuando se utilizan diferentes órbitas en el procesamiento por cambios en los sistemas de referencia, las coordenadas resultantes deben homogenizarse a un solo marco mediante los parámetros de transformación entre cada uno de ellos, de lo contrario se originarían saltos en las series temporales en la fecha de cambio.

Una solución a este problema ha sido dada por el IGS mediante el reprocesamiento de todos los archivos históricos de efemérides para el sistema de referencia ITRF2008. Varios centros de análisis participaron del primer reprocesamiento del IGS (REPRO1) para la contribución del IGS a la realización ITRF2008 (Altamimi, et al., 2011), usando las coordenadas de estaciones ITRF2008 y las correspondientes correcciones IGS08 antex para las antenas receptoras y transmisoras. En abril de 2010 se anunciaron los resultados de la primera campaña de reprocesamiento de IGS (REPRO1) que abarca el período 1994-2007 y los archivos resultantes fueron distribuidos a los Centros de Datos Globales del IGS para el acceso de los usuarios en mayo de 2011 (Neilan et al., 2013).

A finales de 2013, los Centros de Análisis del IGS iniciaron el segundo reprocesamiento (REPRO2) de la historia completa de los datos GNSS recopilados por la red global de IGS desde 1994 de una manera totalmente coherente usando los últimos modelos y

metodología, así como la implementación del marco de referencia IGB08. Este reprocesamiento incluye también las observaciones GLONASS (Deng, et al., 2015).

Esto nos ha ayudado para utilizar las efemérides precisas del IGS en un solo marco de referencia IGB08 basado en ITRF2008 para todo el periodo de estudio (2008-2014), logrando conseguir un procesamiento uniforme.

3.2.3. Errores en el reloj (satélite y receptor)

A pesar de que los relojes de un satélite son altamente estables, los campos de corrección de reloj en el mensaje de datos de navegación se encuentran dimensionados de tal manera que la desviación entre el tiempo del satélite y el tiempo del GPS puede ser tan grande como 1 ms (ICD, 2010). Un desplazamiento de 1 ms se traduce en un error de pseudo-distancia de 300 km (Kaplan y Hegarty, 2005).

Para obtener la distancia entre el satélite y el receptor es necesario medir el tiempo de transmisión de la señal en las observaciones de código o pseudo rango y multiplicarlo por la velocidad de la luz. El reloj del satélite y el receptor deben estar sincronizados con el tiempo GPS:

$$T_r = (t_r + \delta t_r); \quad T^s = (t^s + \delta t^s) \quad (3.20)$$

donde t_r es el reloj del receptor, t^s es el reloj del satélite y δt_r y δt^s representan los errores de los relojes del receptor y satélite, respectivamente.

En los satélites, la corrección es determinada modelando la estabilidad mediante un polinomio simple:

$$\delta t^s = A_0 + A_1 t + A_2 t^2; \quad t_1 < t < t_2 \quad (3.21)$$

Donde A_0 es el bias del reloj, A_1 es la deriva y A_2 es la aceleración. Los coeficientes para el reloj de cada satélite están incluidos en el mensaje de navegación GNSS y en las efemérides IGS. En los receptores la corrección del reloj se determina a partir de las mediciones de código, mediante la solución iterativa de la ecuación de observación:

$$P_r^s = c\Delta T = c(T_r - T_s) = \rho_r^s + c\delta t_r - c\delta t^s \quad (3.22)$$

$$\rho_r^s = \sqrt{(x^s - x_r)^2 + (y^s - y_r)^2 + (z^s - z_r)^2} \quad (3.23)$$

donde T_r es el tiempo del receptor, T^s es el tiempo del satélite, c es la velocidad de la luz en el vacío; t_r y t^s es el instante en que la señal es recibida y emitida en tiempo GPS; δt_r y δt^s son los errores de los relojes de receptor y satélite; ρ_r^s es la distancia entre el satélite y el receptor, (x^s, y^s, z^s) representan la posición del satélite y (x_r, y_r, z_r) es la posición del receptor.

Es importante que los valores de δt^s y δt_r se determinen con una precisión de 10^{-9} s, tomando en cuenta que si δt_r es menor a 10^{-9} s el error en la distancia será menor a 1 m.

3.2.4. Efectos relativistas

Las teorías general y especial de la relatividad son factores a considerar en el proceso de medición de pseudo-distancia y fase de la portadora (Ashby y Spilker, 1996). La necesidad de correcciones relativistas dentro de la relatividad especial, surge cada vez que el satélite o el receptor GNSS se mueven con respecto al marco de velocidad de la luz isotrópica escogido, que en el sistema GNSS es el marco del sistema de coordenadas inerciales centrado en la tierra (*ECI-Earth-centered inertial*). La necesidad de correcciones dentro de la relatividad general surge cuando la fuente (satélite) y receptor están ubicados a diferentes potenciales gravitacionales (Kaplan y Hegarty,

2005). Para compensar estos efectos, es necesario ajustar la frecuencia del reloj satelital a 10.22999999543 MHz antes del lanzamiento. A nivel del mar, la frecuencia observada por el usuario será de 10.23 MHz, de este modo, no hay que corregir este efecto (ICD, 2010).

Cuando el satélite se encuentra en perigeo, la velocidad del satélite es más alta y el potencial gravitatorio es más bajo, haciendo que el reloj del satélite funcione más lentamente. Cuando el satélite está en apogeo, la velocidad del satélite es menor y el potencial gravitacional es más alto, lo que causa que el reloj satelital corra más rápido (Ashby y Spilker, 1996). Este efecto puede ser compensado por (ICD, 2010):

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{a} \cdot \sin E_k \quad (3.24)$$

donde F es igual a $-4.442807633 \times 10^{-10}$, e es la excentricidad orbital del satélite, a es el semieje mayor de la órbita del satélite y E_k es la anomalía excéntrica del satélite.

Este error relativista puede alcanzar hasta un máximo de 70 ns (21 m en distancia), por lo cual la corrección de este error se traducirá en una estimación más precisa del tiempo de transmisión del usuario (Seeber, 1993).

Otro error relativista se introduce a causa de la rotación de la Tierra durante el tiempo de transmisión de la señal conocido como el efecto Sagnac, cuando los cálculos de las posiciones del satélite se realizan en un sistema de coordenadas terrestres centradas en la Tierra (*ECEF-Earth-Centered, Earth-Fixed*). Durante el tiempo de propagación de la transmisión de la señal de un satélite, un reloj en la superficie de la Tierra experimentará una rotación finita con respecto a un sistema de coordenadas ECI (*Earth Centered Inertial*). Existen varios enfoques para corregir el efecto Sagnac, uno de ellos consiste en trabajar en un sistema de coordenadas ECI para cálculos de posición de satélite y de usuario (Kaplan y Hegarty, 2005).

3.2.5. Efecto multicamino (multipath)

Es uno de los errores más significativos en el proceso de medición del receptor, tanto en las mediciones de código como de fase de la portadora. Este tipo de errores varían dependiendo del entorno en el cual se coloca el receptor, el ángulo de elevación del satélite, procesamiento de la señal del receptor, patrón de ganancia de la antena y características de la señal (Kaplan y Hegarty, 2005).

Este efecto tiene lugar cuando la señal que envía un satélite se recibe por más de un camino, lo que ocurre si esta señal se refleja en alguna superficie reflectante cercana a la estación (García, 2016). En el receptor se puede presentar una superposición de la señal directa con la señal reflejada que genera un cambio en la intensidad y un desplazamiento de fase en los datos medidos (Sánchez, 2008). Un diagrama del efecto multicamino se presenta en la Figura 3.4.

Figura 3.4. Efecto multicamino. Modificada de Seeber, (2003).

Actualmente existen diferentes algoritmos que detectan cuando esto ocurre como se puede ver en (Hofmann-Wellenhof et al., 1997), sin embargo, existen otras alternativas para minimizar este error (Sánchez, 2008):

- Diseño de la antena: antenas con plato subyacente o de tipo choke-ring.
- Selección de los puntos: debe buscarse horizontes libres de obstáculos, de preferencia con cuerpos de agua lejanos, evitando además interferencias eléctricas.
- Sesiones de observación largas: se puede obtener un promedio del efecto.

Adicionalmente, se puede eliminar este efecto usando el hecho de que éste depende de satélites GNSS recibidos y que se repite periódicamente con la misma periodicidad de las órbitas de dichos satélites (Agnew y Larson, 2007).

3.2.6. Variación del centro de fase de la antena

En los satélites hay un *offset* entre el centro de fase de la antena (punto de emisión de la señal) y el centro de masas del satélite. El IGS realiza las correcciones de acuerdo al bloque del satélite al que pertenece. Es importante mencionar que en los archivos de efemérides precisas se proporcionan las coordenadas del centro de masas de los satélites, más no el centro de fase. De ahí que deben aplicarse las correcciones correspondientes.

En las antenas receptoras, las mediciones GNSS se refieren al centro de fase eléctrico de la antena, el cual no coincide con el centro mecánico. Normalmente se requieren las coordenadas de un punto materializado en la superficie terrestre.

El vector entre la materialización del punto y el centro de fase de la antena está compuesto por:

- Distancia entre la materialización y un punto tangible de la antena llamado ARP (*Antenna Reference Point*), dicha distancia es la altura instrumental.

- Distancia entre el ARP y el centro verdadero de fase (intangible) de la antena, este vector se conoce como *offset* del centro de fase.

Uno de los errores que debe evitarse es el incorrecto centrado y nivelado de la antena, ya que este error no puede corregirse posteriormente, ni por modelización sistemática ni por parametrización.

Es importante tener en cuenta que la ubicación del centro de fase cambia de un modelo a otro y además no es fijo con respecto a la geometría de la antena, éste varía en función de la dirección en que la señal GNSS llega a la antena denominado Variaciones de Centro de Fase (PCV, *Phase Center Variations*). De allí, la posición del centro de fase y sus variaciones deben conocerse con alta precisión para el adecuado procesamiento de datos GNSS. Para minimizar la influencia de las variaciones del centro de fase sobre las coordenadas se realizan las correcciones absolutas a las antenas, descritos anteriormente en el apartado 3.1. La corrección de las variaciones del centro de fase está compuesta por un *offset* medio r_0 , la variación del ángulo de elevación y el acimut del satélite (Sánchez, 2008).

3.2.7. Mareas terrestres

La Tierra se ve afectada por las mareas terrestres que comprenden tanto las cargas oceánicas como continentales, producidas por los efectos gravitatorios del Sol, la Luna y los planetas del sistema Solar. Este hecho afecta a las medidas geodésicas que se realizan en la superficie terrestre, por lo que para cálculos de alta precisión es necesario tenerlos en cuenta para su corrección y disminución en la determinación de la posición del punto. El efecto indirecto de deformación terrestre provocado por las mareas terrestres también se debe notar en las medidas GNSS, ya que cambiarán la posición del punto. Este fenómeno afectará, sobretodo, a la componente radial, es decir a la altura elipsoidal, mientras que las componentes norte y este serán tan pequeñas que pueden considerarse despreciables (Furones et al., 2003).

Durante la década de los 90 se desarrolló un gran número de nuevos atlas de mareas, principalmente para proporcionar correcciones de marea precisas para aplicaciones de altimetría satelital. Durante esta década, el grupo de mareas francés, liderado por C. Le Provost, produjo una serie de atlas de mareas de las soluciones de elementos finitos FES, (*Finite Element Solutions*), entre los cuales FES2004 se calcula a partir de las ecuaciones hidrodinámicas de marea y asimilación de datos (Lyard, et al., 2006). En este estudio se ha realizado la corrección por efectos de carga oceánica mediante la aplicación de este modelo.

3.3. Análisis y recopilación de la información existente

Previo al inicio del estudio, se analizó la información relativa a datos GNSS (observaciones, coordenadas y velocidades) perteneciente a redes de ámbito internacional, nacional y regional, tanto permanentes como temporales existentes en la zona, así como su disponibilidad y uso, estas son:

- IGS (*International GNSS Service*), Permanent Network (<http://igsceb.jpl.nasa.gov>),
- Red SIRGAS-CON (www.sirgas.org),
- Red de monitoreo continuo del Instituto Geográfico Militar de Ecuador (www.igm.gob.ec).

Además, se analizaron los trabajos desarrollados en la zona de estudio o su entorno que han utilizado datos geodésicos (GNSS) (p. ej. Trenkamp et al., 2002; Cisneros y Nocquet, 2011; Drewes et al., 2012) (ver apartado 2.2 del Capítulo 2).

Una vez estudiada la información GNSS existente en la zona de estudio, se decidió utilizar por su calidad y accesibilidad los datos de la Red GNSS de Estaciones de Monitoreo continuo del Ecuador (REGME) perteneciente al Instituto Geográfico Militar de Ecuador (IGM), de la cual se obtuvo información de 33 estaciones repartidas de forma homogénea por el territorio nacional (Figura 3.5), con datos desde el 5 de octubre de 2008, semana GPS 1500 hasta el 31 de diciembre de 2014, semana GPS 1825, tomando como periodo de estudio 2008-2014. Además, se usaron como estaciones fiduciales un total de 17 estaciones pertenecientes al IGS (Figura 3.6), con el fin de vincular la solución diaria al marco de referencia global IGS08 (ITRF2008). De estas 17 estaciones, 8 se encuentran en la placa sudamericana, 6 en la placa norteamericana, 4 en la placa del Caribe y 2 en la de Nazca (Tabla 3.1). Se seleccionaron aquellas estaciones fiduciales que cumplieron con un estricto criterio de calidad (Nocquet y Calais, 2003).

Tabla 3.1. Información sobre las estaciones IGS utilizadas en este estudio.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Elevación (m)	Ciudad	País	Placa Tectónica
BOGT	4.6400	-74.0808	2576.78	Bogotá	Colombia	SOAM (South American)
BRAZ	-15.9472	-47.8778	1106.04	Brasilia	Brasil	SOAM (South American)
BRFT	-3.8772	-38.4253	21.70	Eusebio	Brasil	SOAM (South American)
BRMU	32.3703	-64.6961	-11.60	Bermuda	Reino Unido	NOAM (North American)
CRO1	17.7567	-64.5842	-31.50	Christiansted	Islas Vírgenes	CARB (Caribbean)
GLPS	-0.7428	-90.3036	1.79	Puerto Ayora	Ecuador	NAZC (Nazca)
GOLD	35.4250	-116.8892	986.68	Goldstone	Estados Unidos	NOAM (North American)
GUAT	14.5903	-90.5200	1519.90	Guatemala	Guatemala	CARB (Caribbean)
ISPA	-27.1247	-109.3442	112.49	Isla de Pascua	Chile	NAZC (Nazca)
LPGS	-34.9067	-57.9322	29.90	La Plata	Argentina	SOAM (South American)
MANA	12.1489	-86.2489	71.00	Managua	Nicaragua	CARB (Caribbean)
MDO1	30.6803	-104.0147	2004.48	Fort Davis	Estados Unidos	NOAM (North American)
PARC	-53.1369	-70.8797	22.30	Punta Arenas	Chile	SOAM (South American)
SCUB	20.0119	-75.7622	21.90	Santiago de Cuba	Cuba	NOAM (North American)
SSIA	13.6972	-89.1161	664.40	San Salvador	El Salvador	CARB (Caribbean)
UNSA	-24.7272	-65.4075	1257.80	Salta	Argentina	SOAM (South American)
USNO	38.9189	-77.0661	48.90	Washington	Estados Unidos	NOAM (North American)

Figura 3.5. Estaciones de la Red GNSS de Monitoreo de Ecuador (REGME) utilizadas en este estudio.

Figura 3.6. Estaciones IGS utilizadas para vincular las soluciones al marco de referencia ITRF2008 (IGb08).

3.3.1. Preparación de datos

Los datos de las estaciones de monitoreo continuo de la red REGME facilitados por el Instituto Geográfico Militar de Ecuador (IGM) fueron proporcionados en archivos nativos o crudos, siendo necesario la preparación de los mismos mediante las herramientas runpkr00 y TEQC de la UNAVCO (*University Navstar Consortium*) (Estey y Meertens, 1999) para la transformación, edición y control de calidad de la información obtenida (ambos programas se pueden descargar en <https://www.unavco.org/software/data-processing/>). Estas herramientas pueden instalarse en los sistemas operativos Windows, Linux, Solaris y Mac OS. Para esta operación se optó por utilizar el sistema operativo Linux por su versatilidad para el manejo de gran cantidad de archivos, así como para la automatización del proceso por medio de scripts.

La herramienta runpkr00 permite al usuario convertir archivos .r00/.t00/.t01/.t02 registrados por los receptores GPS/GNSS Trimble a archivos .dat o .tgd, que luego pueden ser leídos por la herramienta TEQC. Esta herramienta resuelve de una manera potente y sencilla muchos problemas de pre-procesamiento con receptores de sistemas de navegación por satélite, como GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS o Galileo, sobre todo en formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*) (Gurtner & Estey, 2007), que son formatos de ficheros de texto orientados a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por estos receptores. Las tres funciones de la que recibe su nombre TEQC (Translate/Edit/Quality Check), traducción, edición y control de calidad, se pueden realizar por separado, de dos en dos, o todos juntos en una sola vez. TEQC lee archivos nativos del receptor GNSS y traduce los datos a otros formatos, crea archivos RINEX de observación (OBS), navegación (NAV) y archivos meteorológicos (MET), dependiendo si existe una estación meteorológica para este último.

En cuanto a la edición, TEQC permite al usuario editar los encabezados, corregir cualquier metadato, intervalos de rastreos, selección de observaciones, etc. Entre las principales ediciones realizadas en los archivos RINEX fue colocar el nombre de la persona responsable de la estación, la institución encargada de su funcionamiento, el nombre y código internacional de la estación, tipo y número de identificación del receptor, tipo y número de antena con su domo correspondiente y el intervalo de tiempo en segundos de la información de los datos.

Cuando se está realizando la edición se debe mantener siempre las características propias de un archivo RINEX, esto quiere decir que se deben respetar los espacios existentes, el número de caracteres, formatos, etc. Para los casos de los campos “Tipo de receptor” y “Tipo de antena + domo” se debe cumplir con los estándares establecidos por IGS para que los programas que se utilizan en el procesamiento puedan reconocerlos. Además, se optó por trabajar con archivos en intervalo de datos de 30 segundos para todas las estaciones y una máscara de elevación o ángulo de corte de 5°.

Toda la información para la edición de los metadatos RINEX se encuentra en los archivos *logfile* descargados de la página oficial de SIRGAS. Es importante recalcar que existieron algunas diferencias entre las fichas técnicas de las estaciones con los archivos *logfile* de SIRGAS, debido principalmente a que no han sido actualizados dichos ficheros, especialmente en las fechas de cambios de antena que es lo que mayormente produce saltos o discontinuidades en las series generadas. Estas inconsistencias actualmente se encuentran en su mayor parte superadas.

El control de calidad realizado por TEQC establece el estado en el que se encuentran las observaciones GNSS, indica los posibles errores que pudieran tener cada una a través

del cálculo de varios parámetros propios del proceso. Comprueba principalmente el número de saltos de ciclo, errores ionosféricos, valores *multipath* y número de épocas ideales y obtenidas las cuales permiten determinar el porcentaje medio de recepción de las observaciones. Cabe anotar que, para el presente estudio, se realizó el control de calidad completo (qc full) para todas las estaciones ya que se consideraron a la vez los archivos de observación y de navegación para este proceso.

3.4. Descripción del procesado mediante software científico Bernese 5.0

Finalmente se procesaron los datos GNSS de 33 estaciones pertenecientes a la REGME, así como 17 estaciones IGS en el periodo 2008-2014. Para ello se empleó el software científico Bernese 5.0, desarrollado por el Instituto de Astronomía de la Universidad de Berna (Dach et al., 2007). Para tal efecto se utilizó la herramienta *Bernese Processing Engine* (BPE), que permite automatizar el procesado de las observaciones. Esta herramienta resulta útil debido a que se trabajan con datos continuos y sin variaciones en las opciones del procesado. Cuando surge algún problema en el procesamiento esta herramienta muestra la línea donde ocurrió y la causa por la que se detuvo, sea por inconsistencias en los archivos o falta de información en los mismos.

La estrategia utilizada está acorde a los estándares de IGS, para ello se ha considerado:

- el movimiento periódico de las estaciones debido al efecto de carga oceánica, utilizando el modelo FES2004 proporcionado por el Observatorio Espacial Onsala de Suecia,
- efemérides precisas en el sistema de referencia IGB08 proporcionados por *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA,
- correcciones de los relojes, parámetros ionosféricos y parámetros de orientación de la Tierra (EOP, *Earth Orientation Parameters*) proporcionados por el IGS,
- correcciones absolutas en las variaciones de los centros de fase de las antenas de los satélites publicadas por el IGS, fichero IGS08 ANTEX,
- coordenadas y velocidades de las estaciones fiduciales en el sistema de referencia IGB08 al que se va a constreñir el cálculo final de coordenadas.

La campaña en este estudio concierne a los datos de cada semana GPS, con siete sesiones diarias, cada campaña contiene varios subdirectorios los cuales tienen archivos específicos necesarios para el procesamiento, dentro de los cuales se colocan los mencionados anteriormente para obtener la solución final de las coordenadas diarias con las que se van a determinar las series temporales y su posterior análisis.

La Figura 3.7 muestra en forma esquemática la estrategia de cálculo utilizada en el procesamiento total de las estaciones empleadas para este estudio.

A continuación, se describe el proceso llevado a cabo para la obtención de las soluciones finales diarias.

Figura 3.7. Esquema del procesamiento de datos GNSS con el software Bernese GPS 5.0.

3.4.1. Creación y preparación de archivos para el procesamiento de una campaña

El término “campaña” es utilizado dentro del software Bernese para agrupar un conjunto de datos que van a ser procesados, generalmente corresponde a los datos de una semana GPS. Se encuentran constituidos por directorios y subdirectorios con los datos diarios y archivos necesarios para su ejecución. Antes de cualquier procesamiento de datos la campaña tiene que ser definida, los directorios de esta tienen que ser creados y los datos tienen que ser copiados dentro de estas carpetas. La notación de cada campaña se ha designado como ECUssss, donde ssss es la semana GPS a procesar (semana GPS 1500 a 1825), dentro de este directorio se crean las siguientes carpetas: ATM, BPE, GEN, OBS, ORB, ORX, OUT, RAW, SOL y STA.

Posteriormente, procedemos a ingresar los datos de entrada necesarios para el procesamiento, que se descargan de los diferentes *ftp* de organismos que proveen esta información. Estos son:

- Los archivos de órbita, las efemérides precisas, correcciones de los relojes, parámetros ionosféricos y los parámetros de orientación de la tierra, proporcionados por el IGS: <ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/jpligsac/> y por el CODE (Center for Orbit Determination in Europe) <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>. Las órbitas de los satélites contienen la posición del satélite y la información del reloj tabulada cada 15 minutos.
- Movimiento periódico de las estaciones debido al efecto de carga oceánica, que en nuestro caso hemos modelado de acuerdo con el modelo FES2004 (Letellier et al., 2004). Los valores correspondientes son proporcionados por el Observatorio de Onsala de Suecia <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>
- Correcciones absolutas en las variaciones de los centros de fase de las antenas de los satélites publicados por el IGS, fichero IGS08 ANTEX (en <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER50/GEN/>).
- Coordenadas y velocidades de las estaciones fiduciales IGS o ITRF en el sistema de referencia al que se va a constreñir la solución final, en nuestro caso IGSb08 o ITRF2008 (época 2005.0) (vía <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER50/STA/>).

3.4.2. Transformación de los datos y órbitas de los satélites a formato Bernese

Una vez preparados los ficheros de datos (RINEX) y ficheros de entrada, y antes de comenzar con la fase de pre-procesamiento, es necesario realizar un posicionamiento puntual preciso (PPP, *Precise Point Positioning*) utilizando la información de los archivos RINEX de las estaciones a procesar para obtener las coordenadas a priori de las mismas en un orden centimétrico. En este proceso se detectan las entradas de las estaciones que faltan en los archivos de corrección de carga oceánica (.BLQ) y se genera un fichero con los nombres de las estaciones y sus abreviaturas (.ABB). Las coordenadas son extrapoladas a través del programa COOVEL desde la época de referencia (2005.0) a la época de cada día de observación, en función de las velocidades correspondientes de la estación para asegurar la coherencia con las órbitas de los satélites IGS y evitar las deformaciones de la red inducidas por las placas tectónicas en continuo movimiento. Para ello, el modelo global de velocidades usado es NNR-NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) que cumple con los convenios IERS (McCarthy y Petit, 2004).

Posteriormente, los archivos de parámetros de orientación de la Tierra, EOP, son transformados a formato BERNESE con el programa POLUPD, previo a esta conversión es necesario renombrar los archivos descargados del IGS a un nombre de archivo con una extensión por defecto IEP puesto que tienen la misma extensión predeterminada, pero en un formato diferente que los archivos EOPs internos (ERP).

Creados estos archivos entramos en la primera etapa del tratamiento de datos que consiste en la transformación de los ficheros RINEX a formatos binarios mediante la generación de cuatro archivos que contienen la cabecera del fichero RINEX para las observaciones de fase y código y sus correspondientes observaciones.

Los ficheros creados son:

- *.PZH (*Phase Zero-difference Header*), contiene la cabecera del fichero RINEX para las observaciones de fase.

- *.CZH (*Code Zero-difference Header*), contiene la cabecera del fichero RINEX para las observaciones de código.
- *.PZO (*Phase Zero-difference Observations*), contiene las observaciones de fase.
- *.CZO (*Code Zero-difference Observations*), contiene las observaciones de código.

Esta transformación la realiza el programa RXOBV3 (*Transform RINEX Observation data into Bernese files*) con el fin de disminuir el tamaño del fichero pasando la información a un formato binario para hacerlo más manejable y por consiguiente optimizar el tiempo de procesamiento.

Otra de las opciones de este programa trata de las entradas relativas a los requisitos de intensidad de señal, número de observaciones y antenas, lo cual se utiliza para eliminar datos con una baja relación señal/ruido. Las malas observaciones en los datos son identificadas y excluidas en el procesamiento posterior.

En cuanto al tratamiento de las órbitas son necesarias las efemérides precisas de los satélites, que son el resultado de la combinación de las órbitas calculadas a posteriori por los centros de análisis del IGS y tardan de 12 a 18 días en ser publicadas. Actualmente su precisión es de aproximadamente 2 cm para las efemérides finales, por lo que se considera que con esta precisión el error orbital no afecta en la determinación de las coordenadas de las estaciones (Kouba, 2009). Las extensiones de estos archivos pueden ser SP3, PRE o EPH, para el procesamiento hemos utilizado los ficheros con extensión PRE.

Las posiciones de los satélites se almacenan en un sistema de referencia terrestre fijo que determina el marco de referencia de las coordenadas finales a obtener. En nuestro caso hemos utilizado las efemérides precisas del IGS en el sistema de referencia IGB08 (ITRF2008) para obtener coordenadas finales en este marco de referencia global.

Para tener acceso a las posiciones de los satélites en cualquier época, las posiciones de los satélites deben ser interpoladas. Esto se logra ajustando un polinomio de grado suficientemente alto para obtener mayor precisión en el cálculo.

La forma óptima de interpolación es el ajuste de las posiciones tabuladas para una órbita que cumple las ecuaciones de movimiento basadas en un modelo físico de las fuerzas que actúan sobre los satélites, determinado por la expresión matemática (Kaula, 1966):

$$\ddot{\mathbf{r}} = -GM \frac{\mathbf{r}}{r^3} + \mathbf{a}(t, r, \dot{r}, p_0 + p_1 + p_2, \dots) = \mathbf{f}(t, r, \dot{r}, p_0 + p_1 + p_2, \dots) \quad (3.25)$$

donde $\ddot{\mathbf{r}}$ es el vector de aceleración relativa, GM es el producto de la constante de gravitación universal y la masa de la Tierra, r es la longitud del radio del vector geocéntrico del satélite, $\mathbf{a}$ es el término de perturbación bajo condiciones reales, que se caracteriza por tener muchos parámetros (Kaula, 1966). Los parámetros $p_0, p_1, p_2, \dots$ son estimados en el proceso de determinación de la órbita y suelen asociarse a la presión de radiación solar.

Las ecuaciones diferenciales de segundo orden en el tiempo son resueltas mediante el método de integración denominado de colocación, donde el intervalo de integración entero se divide en subintervalos de igual longitud. Para sesiones diarias se han considerado intervalos de una hora. Dentro de cada subintervalo se establece y se resuelve un problema inicial o más precisamente, se aproxima numéricamente mediante iteraciones. En los siguientes intervalos los valores iniciales en el límite del subintervalo izquierdo se calcula utilizando la solución aproximada de la solución anterior, es decir, para cada intervalo se plantea un problema de contorno.

Este enfoque es utilizado por Bernese 5.0 mediante la ejecución de dos programas a partir de los ficheros de las efemérides finales. Estos programas son: PRETAB (*Transform PREcise orbits into TABular orbits*) y ORBGEN (*Standar ORBit GENerate*) (Dach et al, 2007).

PRETAB convierte la información de la órbita precisa a formato tabular. Además, permite extraer información del reloj de los ficheros de órbitas precisas y escribirla en un archivo del reloj del satélite que se utilizará posteriormente para el procesado de las observaciones. Este programa convierte las posiciones del satélite del sistema fijo en la Tierra al sistema inercial J2000.0 (Torge, 2001), para lo que se deben utilizar los EOP.

ORBGEN genera la información de la denominada órbita estándar, que puede estar compuesta por uno o más arcos orbitales, cada uno de los cuales se caracterizan por un inicio y un tiempo de finalización. Los elementos de las órbitas tabulares consideradas son:

- Campo gravitacional de la Tierra.
- 6 elementos Keplerianos.
- Campo gravitacional del Sol, la Luna y planetas.
- Presión de radiación solar (9 coeficientes).
- Cambio del potencial gravitacional de la Tierra debido a cargas oceánicas.
- Efectos relativistas.

Cada arco estándar es una solución de las ecuaciones descritas anteriormente, caracterizado por 6 condiciones iniciales y un máximo de 9 parámetros dinámicos especificados por el usuario.

3.4.3. Pre-procesamiento

En esta etapa se chequean y preparan los datos para poder efectuar el cálculo final de las dobles diferencias para cada época y la estimación de coordenadas. Se divide en tres pasos: posicionamiento por código, generación de líneas base y corrección de pérdidas de ciclo.

Posicionamiento por código

Para esta fase se utiliza el programa CODSP (CODE Single Point Positioning and receiver clock synchronization) que permite calcular las correcciones para sincronizar los relojes del receptor con respecto al tiempo GPS. Se utilizan las observaciones de código para este caso, también las órbitas estándar e información del reloj del satélite generado por el programa PRETAB descrito anteriormente.

El error del reloj del receptor k está dado como:

$$\delta_k = t_k - t \quad (3.26)$$

donde t es el tiempo GPS de recepción de la señal y t_k es la lectura del tiempo del reloj del receptor en el momento de recibir la señal.

El error del reloj δ_k debe ser calculado con una precisión superior a 1ns, que se logra usando medidas de código de cero diferencias (un satélite, una estación) mediante el ajuste de mínimos cuadrados estándar para calcular los parámetros desconocidos; siendo ésta la tarea fundamental del programa CODSP. Por lo general este programa utiliza la combinación lineal libre de ionosfera L3, los parámetros más importantes

calculados son almacenados tanto en las observaciones de código como de fase, que se utilizarán posteriormente para el cálculo de las coordenadas.

Si no se utilizara este procedimiento el número de parámetros aumentaría considerablemente y haría el proceso más lento.

Generación de líneas base

Se realizan por medio del programa SNGDIF (*SiNGle DIFerences*) que forma líneas bases a partir de archivos de observación de cero diferencias. Las salidas son archivos de observación de una sola diferencia, es decir, crea archivos de diferencia única de dos archivos de cero diferencias. El nombre del archivo de observación de una sola diferencia se compone de las abreviaturas de dos caracteres de las dos estaciones de la línea base y la sesión de los datos sin el año. El algoritmo utilizado para la selección de la línea base es el siguiente: supongamos que m receptores se utilizan simultáneamente, supongamos además que los satélites son rastreados por todos los receptores. Tenemos por lo tanto m medidas de diferencia cero para cada satélite en cada época y cada portador. Si usamos observaciones de una sola diferencia (dos satélites, un receptor o viceversa), sólo pueden formarse $m-1$ diferencias individuales independientes. Creamos solamente un conjunto de $m-1$ líneas de base para toda la sesión y almacenamos las observaciones en los archivos de diferencia única.

En primer lugar, todas las líneas base posibles se ordenan de acuerdo con un criterio definido por el usuario, en nuestro caso hemos usado la estrategia OBS-MAX, que selecciona aquellas líneas base cuyo número de observaciones comunes es mayor sin que se consideren líneas bases de grandes longitudes. Se requiere ingresar el mínimo número de observaciones escaladas requeridas, distancia máxima en kilómetros para el conteo rápido de observación y la máxima longitud de línea base considerada en kilómetros. Se seleccionaron para este estudio 600, 1000 km y 9000 km respectivamente.

Corrección de pérdidas de ciclo

Esta tarea la realiza el programa MAUPRP (*Manual AUTomatic Pre-Processing*) que además elimina valores atípicos y agrega múltiples ambigüedades para los archivos de observación de fase. Trabaja con los archivos de información de la estación y con los archivos de observación de la línea base.

Un salto de ciclo aparece cuando el receptor pierde la señal del satélite entre dos instantes de observación consecutivos, las causas de las observaciones defectuosas y de pérdida de ciclos pueden ser debido a la presencia de obstáculos en la propagación de la señal GPS (árboles, construcciones, etc.). También porque puede existir una relación deficiente entre la señal y el ruido (errores de frecuencias muy altas) por efecto de la ionósfera, trayectorias múltiples, movimiento rápido de la antena, máscara de elevación muy baja, etc., y problemas en el software o hardware del receptor, pérdida de fluido eléctrico, apagado del receptor, funcionamiento defectuoso del oscilador de satélite, etc.

Cuando un receptor GNSS entra en operación, comienza la medición de una fracción de fase $\Delta\phi_A^j(t)$ (fracción de fase del satélite j recibido por el receptor A) y se inicializa un contador N , que aumenta en uno, cada vez que la fase cambia de 0 a 2π . La fase acumulada $\phi_A^j(t_i)$ en el instante t_i se deriva de la fracción de la fase $\Delta\phi_A^j(t)$ y del estado del contador $N_A^j(t_i)$ correspondiente al instante t_i :

$$\phi_A^j(t_i) = N_A^j(t_i) + \Delta\phi_A^j(t_i) \quad (3.27)$$

N es un número entero de longitudes de onda que es constante mientras no tenga lugar una pérdida de ciclo, caso contrario el contador debe iniciarse nuevamente y la ecuación de observación contiene un nuevo término de ambigüedades $\tilde{N}_A^j$ de forma que el salto de ciclo está dado por:

$$\Delta N_A^j = \tilde{N}_A^j - N_A^j \neq 0 \quad (3.28)$$

El programa MAUPRP revisa todas las observaciones y busca intervalos de tiempo donde se produce un salto de ciclo. Cuando es posible el programa elimina este salto calculando la diferencia descrita anteriormente y corrigiendo las observaciones a partir de t_2 . En caso de no ser posible el cálculo de esta diferencia, la observación en t_2 se marca como un valor atípico y se introduce un nuevo parámetro de ambigüedad por ciclo.

Los saltos de ciclo en las diferencias dobles (dos satélites, dos receptores) aparecen como un salto en las medidas de fase entre dos épocas consecutivas, mientras que en las diferencias triples (dos satélites, dos receptores, dos épocas) se presentan como dos valores atípicos u *outliers* como se indica en la Figura 3.8.

Figura 3.8. Representación de un salto de ciclo en las dobles (dd) y triples diferencias (dt) producido entre los instantes de tiempo t_1 y t_2 . Modificada de García (2016).

3.4.4. Procesamiento

El objetivo de esta fase es modelar los errores sistemáticos debidos a la propagación de la señal por la troposfera, estimar ambigüedades y obtener las ecuaciones normales de la observación para cada una de las sesiones que nos servirán para realizar el posterior ajuste y obtención de la solución final de campaña.

Para este fin se utiliza el programa GPSEST (*GPS parameter ESTimation program*) el cual se ejecuta varias veces con la finalidad de obtener los diferentes parámetros necesarios para llegar a determinar los resultados finales para cada estación. En la primera ejecución de este programa se procesan las diferencias dobles y ficheros de observación de fase para obtener una primera solución, utilizando la combinación libre de efecto ionosférico L3, sin considerar las ambigüedades de ciclo. Para un modelado a priori de la troposfera emplea una función de mapeo de Niell seco y para los parámetros de retraso cenital la función de mapeo de Niell húmedo (Niell, 1996).

El propósito de esta primera solución es el de calcular los residuos de las diferencias dobles de las observaciones de fase y poder chequear la calidad de los datos eliminando aquellos que tienen residuales demasiado grandes. Los residuales se guardan en un fichero para luego ser analizados por el programa RESRMS que genera estadísticas residuales donde indica los residuos post – ajuste para identificar los valores atípicos. Luego mediante el programa SATMRK se marcan las observaciones identificadas como valores atípicos para que estas no vuelvan a ser usadas posteriormente.

Una vez limpiadas las observaciones de fase se realiza la segunda ejecución del programa GPSEST, con el fin de procesar las diferencias dobles para generar las ecuaciones normales y ficheros residuales que nuevamente serán analizados por el programa RESRMS que como se indicó anteriormente generan las estadísticas residuales. Estos archivos son analizados por el programa RESCHK que es una herramienta que sirve para detectar malas estaciones en función de su rendimiento general analizando el archivo de resumen de estadísticas generado por el programa anterior. El programa RESCHK está destinado principalmente al procesamiento automatizado.

Una vez depuradas todas las observaciones se ejecuta el programa ADDNEQ2 (*ADD Normal Equations*). En esta primera ejecución realiza una combinación de sistemas de ecuaciones normales obteniéndose los primeros resultados preliminares de coordenadas de la estación, ecuaciones normales y parámetros troposféricos. Estos resultados son extraídos por el programa GPSXTR para luego realizar una selección automática de las líneas base mediante el programa BASLST, que en nuestro caso hemos escogido la longitud máxima de las líneas base como 2000 km.

En la tercera ejecución del programa GPSEST se introducen las coordenadas de la estación, las órbitas estándar GNSS, los parámetros de rotación de la Tierra, los parámetros troposféricos estimados, los modelos ionosféricos y las correcciones por carga oceánica para resolver las ambigüedades de ciclo para L1 y L2, cuyo resultado se almacena en un fichero que luego es utilizado en la determinación del resultado final. La estrategia utilizada es el método QIF (*Quasi-Ionosphere-Free*), algoritmo que resuelve las ambigüedades de L1 y L2 a partir de las observaciones de fase.

El número de ambigüedades N está asociada a los errores instrumentales del satélite y receptor, éste se presenta en la ecuación de observación completa cuya expresión matemática para una observación de fase con GPS está dada por Seeber (2003):

$$L_A^j = |r_A(t_A) - r^j(t_A - \tau_A^j)| + \delta\rho_{A,trp}^j + \delta\rho_{A,ion}^j + \delta\rho_{A,rel}^j + \delta\rho_{A,mul}^j + c\delta t_A - c\delta t^j + \lambda(N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) + \varepsilon_A^j \quad (3.29)$$

Donde

t_A = tiempo en que el receptor recibe la señal

$r_A(t_A)$ = posición del receptor en el momento que recibe la señal

$r^j(t_A - \tau_A^j) = r_j(t_j)$ = posición del satélite en el momento que emite la señal

τ_A^j = tiempo que gasta la señal en ir desde el satélite al receptor

$\delta\rho_{A,trp}^j$ = retardo de la señal en la troposfera

$\delta\rho_{A,ion}^j$ = retardo de la señal en la ionosfera

$\delta\rho_{A,rel}^j$ = efectos relativistas

$\delta\rho_{A,mul}^j$ = efecto multicamino

$c\delta t_A$ = corrección del reloj del receptor

$c\delta t^j$ = corrección del reloj del satélite

ε_A^j = errores aleatorios de medición

$\lambda = c/f$ = longitud de onda nominal

N_A^j = término de ambigüedad entre el receptor A y el satélite j

α^j = error instrumental del satélite

α_A = error instrumental del receptor

El término

$$b_A^j = \lambda(N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) \quad (3.30)$$

no contiene un número entero de ciclos o longitudes de onda. Las tres cantidades no pueden separarse en el procesamiento, siempre se calcula el término total b_A^j .

Las ambigüedades se determinan, junto con las demás incógnitas, en un ajuste preliminar. Como resultado se obtienen sus valores en números reales y toda la información de varianza-covarianza, así como los errores cuadráticos medios de las ambigüedades y las correlaciones entre ellas. Con esta información y algunos algoritmos y pruebas estadísticas se determinan los números enteros más adecuados.

Resueltas las ambigüedades en la tercera ejecución del programa GPSEST, los resultados son almacenados y extraídos por el programa GPSXTR que luego son tomados nuevamente por el programa GPSEST para realizar la última ejecución donde calcula las coordenadas para cada estación mediante un ajuste de mínimos cuadrados generando las ecuaciones normales. En este paso se constriñen las coordenadas de las estaciones IGS que se consideren de referencia, pero no se fijan, porque este constreñimiento puede ser fijado posteriormente. Las ambigüedades son eliminadas antes de la inversión de las ecuaciones normales, y en lugar de utilizar los parámetros troposféricos calculados anteriormente, se calculan nuevamente, pero con las ambigüedades ya resueltas. De esta forma se obtiene como resultado final de este proceso los parámetros troposféricos, las coordenadas finales y los ficheros de las ecuaciones normales para cada sesión.

3.4.5. Cálculo de las soluciones finales diarias

Las ecuaciones normales (NEQ) diarias se combinan para definir el marco de referencia geodésico, constreñiendo la solución final a las coordenadas de las estaciones fiduciales en el marco de referencia internacional terrestre elegido (ITRF2008 o IGB08), lo cual permite determinar primero posiciones finales diarias, parámetros troposféricos y posteriormente velocidades de las estaciones en dicho marco de referencia. Las coordenadas de las estaciones fiduciales fueron constreñidas mediante una solución de mínimo constreñimiento, sin fijar las coordenadas de ninguna estación en particular. Para ello se introducen condiciones de constreñimiento mínimo, en este caso tres parámetros de traslación, mediante la transformación de Helmert, logrando así mantener la precisión interna de la red (Hollenstein et al., 2008).

Las fases y programas utilizados en el cálculo de las soluciones finales diarias se detallan a continuación:

En primer lugar, mediante la combinación de las ecuaciones normales, se calculan los parámetros troposféricos y las coordenadas finales de cada sesión, con mínimos constreñimientos, lo que nos permite verificar la precisión interna de cada solución sin

tomar en cuenta el marco de referencia. Este proceso se realiza con el programa ADDNEQ2, que es una herramienta sofisticada para una combinación y manipulación eficientes de los resultados del análisis en el nivel de ecuaciones normales (Dach et al., 2007).

Las soluciones finales de este programa son utilizadas por el programa COMPAR cuyo propósito fundamental es comparar las coordenadas de las estaciones de una lista de archivos de coordenadas de entrada. Como resultado este programa proporciona la repetibilidad de las coordenadas de las estaciones sin aplicar ninguna transformación de las coordenadas de entrada que requieren una definición consistente del datum geodésico. La repetibilidad de las coordenadas de las estaciones permite identificar problemas con estaciones particulares. Debido a que este archivo está diseñado como un archivo de resumen semanal, el número de columnas para los indicadores mostrados está limitado a siete. Sin embargo, los números RMS se refieren a todos los archivos de coordenadas de entrada.

Para la detección de posibles errores en las coordenadas fiduciales, se ejecuta el programa HEMERT1, que verifica las estaciones mediante la aplicación de una transformación de Helmert de tres parámetros (solo traslación) entre las coordenadas IGB08 oficiales y la solución de la campaña calculada con mínimos constreñimientos, en un sistema de coordenadas locales ENU. La transformación a este sistema de coordenadas es particularmente útil para la interpretación de los parámetros de transformación entre pequeñas redes regionales y locales (Dach et al., 2007). Se establecieron también tolerancias de 10 mm y 30 mm para las componentes horizontales y verticales respectivamente, como criterio de exclusión para aquellas estaciones fiduciales que pasan este umbral. Las estaciones que están dentro de estos límites se marcan con un asterisco en el archivo de salida, que posteriormente es revisado.

Finalmente, se vuelve a ejecutar el programa ADDNEQ2 para obtener ecuaciones normales reducidas y generar los resultados finales en archivos SINEX (*Solution Independent EXchange*) (Kouba, 1996). Este formato contiene las coordenadas finales diarias de cada estación con sus respectivas precisiones (matriz varianza-covarianza), respecto al marco de referencia elegido (IGB08-ITRF2008).

3.4.6. Automatización del procesamiento con BPE (*Bernese Processing Engine*)

Bernese integra el módulo denominado *Bernese Processing Engine* (BPE) que permite la automatización del procesamiento de datos GNSS. Esta herramienta ha sido diseñada principalmente para la automatización de procesamiento de redes GNSS permanentes, es una herramienta extremadamente útil que se ha convertido en una parte muy importante del software Bernese, lo utiliza el Centro de Análisis CODE del IGS para el procesamiento de rutina de la red IGS global desde 1995.

El BPE se puede utilizar para realizar todas las tareas posibles, secuencialmente o en paralelo. Se puede definir una secuencia de procesamiento de programas que utiliza Bernese, se pueden incluir guiones que descarguen datos, realicen informes de calidad y procesen protocolos, envíen o archiven ficheros de resultados.

Además de realizar tareas secuenciales o en paralelo, se pueden utilizar otras opciones como *skip* que salta o no ejecuta determinado script de manera que estos pueden ser deshabilitados sin tener que volver a enumerarlos, o como la acción *Nextjob* que cambia la secuencia en la que se ejecutan los *scripts*.

Las tareas de procesamiento BPE son definidas por el usuario en los archivos de control de procesos PCF (*Process Control File*) (Dach et al., 2007).

El archivo de control de proceso PCF define qué scripts deben ejecutarse y en qué orden deben hacerse. Además de listar los *scripts* para ejecutar, el PCF define qué *scripts* deben esperar para que otros *scripts* puedan ejecutarse.

En este estudio se han utilizado dos ficheros PCF: el fichero PPP.PCF cuyo propósito fundamental es el de realizar un posicionamiento puntual preciso (PPP) utilizando observaciones RINEX GNSS de una serie de receptores terrestres fijos para obtener un conjunto de coordenadas de estación a un nivel centimétrico, y el fichero ECUA_RNX2SNX2.PCF que utiliza estos resultados como una información a priori para el análisis de doble diferencias de los datos de observación RINEX GNSS de una red regional. Las coordenadas de las estaciones y los parámetros troposféricos son estimados y almacenados en Bernese en formato SINEX (Kouba, 1996) para facilitar su posterior procesamiento y combinación. La solución final se encuentra en un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) , respecto al marco de referencia elegido (ITRF2008-IGb08).

3.5. Transformación a un sistema de referencia local-topocéntrico

Para un mejor análisis e interpretación de las series temporales, las coordenadas cartesianas geocéntricas globales (X, Y, Z) obtenidas como solución final en el procesado con Bernese, se convierten a coordenadas locales, respecto de un sistema de coordenadas topocéntrico, centrado en un punto de la superficie terrestre y orientado según la Figura 3.9. De esta manera, las coordenadas cartesianas geocéntricas (X, Y, Z) diarias de cada estación son convertidas a coordenadas (e, n) , componente horizontal y (u) , que define la componente vertical. Este tipo de coordenadas nos proporciona una idea más clara del comportamiento de cada serie en sus respectivas componentes. Otra ventaja importante es el hecho de trabajar con valores pequeños, ya que estas pueden ser centradas en cero, lo que facilita su estudio.

Figura 3.9. Sistema de coordenadas cartesianas globales (X, Y, Z) y topocéntricas locales (e, n, u) . Modificada de Drewes (2014).

La conversión de coordenadas se realiza de la siguiente manera.

Sean (X_i, Y_i, Z_i) para $i=1, \dots, n$, las coordenadas de una serie temporal en el sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas, se toma como coordenada de origen del sistema de referencia local de cada estación la coordenada inicial de la serie, es decir:

$$X_0 = X_1$$

$$Y_0 = Y_1$$

$$Z_0 = Z_1$$

Luego,

$$\begin{bmatrix} e_i \\ n_i \\ u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_0 & \cos\lambda_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 \cos\lambda_0 & -\sin\varphi_0 \sin\lambda_0 & \cos\varphi_0 \\ \cos\varphi_0 \cos\lambda_0 & \cos\varphi_0 \sin\lambda_0 & \sin\varphi_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

La transformación de las coordenadas iniciales (X_0, Y_0, Z_0) a coordenadas geodésicas $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$ se realiza de la forma tradicional (Heiskanen y Moritz, 1985). Así tenemos que:

$$\lambda_0 = \tan^{-1} \left(\frac{Y_0}{X_0} \right) \quad (3.32)$$

Las coordenadas φ_0 y h_0 se obtienen mediante un proceso iterativo, donde:

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{Z_0}{\rho} \right) (1 - e^2) \quad (3.33)$$

$$h_0 = \frac{\rho}{\cos\varphi_0} - N \quad (3.34)$$

Siendo $\rho = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}$ y N el radio de curvatura del primer vertical determinado por

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2\varphi_0}} \quad (3.35)$$

donde a es el semieje mayor del elipsoide de referencia y e su excentricidad.

Una vez transformadas las coordenadas cartesianas (X, Y, Z) a coordenadas locales (e, n, u) , necesitamos también transformar sus incertidumbres a este sistema mediante la fórmula general para la propagación de errores con carácter estadístico.

Sea una magnitud $z(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que depende de las magnitudes $x_1, x_2, \dots, x_n$ y $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ las respectivas desviaciones estándar en las medidas de las magnitudes $x_1, x_2, \dots, x_n$. La desviación estándar para la medida de la magnitud z será:

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial z}{\partial x_i} \right)^2 (\sigma_i)^2} \quad (3.36)$$

Por cuanto, las incertidumbres en el sistema local serán:

$$\begin{bmatrix} \sigma_e^2 \\ \sigma_n^2 \\ \sigma_u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2 \lambda_0 & \cos^2 \lambda_0 & 0 \\ \sin^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_0 & \sin^2 \varphi_0 \sin^2 \lambda_0 & \cos^2 \varphi_0 \\ \cos^2 \varphi_0 \cos^2 \lambda_0 & \cos^2 \varphi_0 \sin^2 \lambda_0 & \sin^2 \varphi_0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_x^2 \\ \sigma_y^2 \\ \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Todos estos procesos se encuentran dentro del programa desarrollado mediante *scripts* en Matlab (Anexo F) para el análisis de series temporales y cálculo de velocidades finales e incertidumbres, calculados a partir de la extracción de la información para cada estación de los archivos SINEX resultantes del procesamiento de datos GNSS.

3.6. Resultados

Los resultados para cada campaña constan de 7 archivos SINEX (Kouba, 1996) donde se encuentran las soluciones finales del procesado en el sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) en el sistema de referencia IGB08, donde además se encuentra la matriz varianza-covarianza de la solución final, junto con información correspondiente a estadísticas generales como: número de observaciones, intervalos de muestreo, grados de libertad, factor de varianza, etc. Contiene además la identificación de cada estación con número de domo, la descripción que indica el nombre y el país donde se encuentra y las coordenadas geodésicas aproximadas (φ, λ, h). Consta también el tipo de receptor, antena, domo y centro de fase.

La información más relevante de estos archivos son las coordenadas finales y sus incertidumbres asociadas a cada estación respecto al marco de referencia ITRF2008. Un extracto de un archivo SINEX con los resultados diarios se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Información obtenida de la solución final de un archivo SINEX.

+SOLUTION/ESTIMATE										
*INDEX	TYPE	CODE	PT	SOLN	REF EPOCH	UNIT	S	ESTIMATED VALUE	STD DEV	
1	STAX	ALEC	A	0001	14:202:43185	m	1	0.123323187240306E+07	.244871E-03	
2	STAY	ALEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.625543558627326E+07	.694509E-03	
3	STAZ	ALEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.243534532693720E+06	.201473E-03	
4	STAX	ANTC	A	0001	14:202:43185	m	1	0.160853857340839E+07	.287923E-03	
5	STAY	ANTC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.481637038550061E+07	.617499E-03	
6	STAZ	ANTC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.384779830049651E+07	.541169E-03	
7	STAX	BOGT	A	0001	14:202:43185	m	1	0.174439891904407E+07	.320035E-03	
8	STAY	BOGT	A	0001	14:202:43185	m	1	-.611603712495894E+07	.721665E-03	
9	STAZ	BOGT	A	0001	14:202:43185	m	1	0.512731830462603E+06	.219021E-03	
10	STAX	BRAZ	A	0001	14:202:43185	m	0	0.411501406790776E+07	.317262E-03	
11	STAY	BRAZ	A	0001	14:202:43185	m	0	-.455064162142960E+07	.405110E-03	
12	STAZ	BRAZ	A	0001	14:202:43185	m	0	-.174144383815855E+07	.219129E-03	
13	STAX	BRFT	A	0001	14:202:43185	m	0	0.498539350248564E+07	.859839E-03	
14	STAY	BRFT	A	0001	14:202:43185	m	0	-.395499344720913E+07	.727844E-03	
15	STAZ	BRFT	A	0001	14:202:43185	m	0	-.428426584366956E+06	.310888E-03	
16	STAX	BRMU	A	0001	14:202:43185	m	1	0.230470335224667E+07	.277170E-03	
17	STAY	BRMU	A	0001	14:202:43185	m	1	-.487481717467030E+07	.575756E-03	
18	STAZ	BRMU	A	0001	14:202:43185	m	1	0.339518701920497E+07	.342166E-03	
19	STAX	CHEC	A	0001	14:202:43185	m	1	0.134661034765095E+07	.245568E-03	
20	STAY	CHEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.623593011839882E+07	.528429E-03	
21	STAZ	CHEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.375237415415486E+05	.189394E-03	
22	STAX	CLEC	A	0001	14:202:43185	m	1	0.110994401580679E+07	.244223E-03	
23	STAY	CLEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.626637647958691E+07	.656894E-03	
24	STAZ	CLEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.453457438047589E+06	.207299E-03	
25	STAX	COEC	A	0001	14:202:43185	m	1	0.134994346507275E+07	.231073E-03	
26	STAY	COEC	A	0001	14:202:43185	m	1	-.623687643164568E+07	.475825E-03	
27	STAZ	COEC	A	0001	14:202:43185	m	1	0.792223548173904E+05	.184664E-03	
28	STAX	CRO1	A	0001	14:202:43185	m	0	0.260777129219185E+07	.388034E-03	
29	STAY	CRO1	A	0001	14:202:43185	m	0	-.548807661500630E+07	.705540E-03	
30	STAZ	CRO1	A	0001	14:202:43185	m	0	0.193276790763207E+07	.372474E-03	

Se ha elaborado un script en Linux (Anexo E) para extraer la información de todos los archivos SINEX diarios para cada estación durante todo el periodo de estudio, es decir desde la semana GPS 1500 hasta la semana GPS 1825.

El resultado generado es un fichero con el nombre de la estación que contiene la información consolidada de todas las coordenadas finales diarias con sus respectivas precisiones o incertidumbres y época de referencia desde el inicio de su procesamiento. Este fichero es el que hacemos referencia al final del apartado anterior (3.5).

Dentro de este proceso también se realizó la determinación de las soluciones semanales para todas las estaciones y poder contrastar con la información de las soluciones diarias, así como obtener valores de repetibilidad semanal para su posterior comparación con las precisiones cuando se obtengan los valores de las velocidades. Los valores promedio de repetibilidad y precisiones para cada estación se presentan en la Tabla 3.3

Tabla 3.3. Repetibilidad promedio y precisión de la solución semanal para cada una de las estaciones de la red REGME.

ESTACIONES	Repetibilidad Semanal				Precisión solución semanal			
	e (mm)	n (mm)	u (mm)	Promedio (mm)	σ_e (mm)	σ_n (mm)	σ_u (mm)	Promedio (mm)
ALEC	3.99	1.59	4.83	3.47	0.11	0.08	0.31	0.17
AUCA	4.04	1.55	4.81	3.47	0.13	0.09	0.31	0.18
BAHI	4.28	1.58	3.66	3.17	0.11	0.09	0.31	0.17
CHEC	4.05	1.66	4.13	3.28	0.12	0.08	0.26	0.15
CLEC	4.01	1.64	4.34	3.33	0.10	0.09	0.28	0.16
COEC	4.04	1.38	3.96	3.13	0.12	0.09	0.28	0.16
CUEC	3.20	1.32	3.30	2.60	0.10	0.08	0.25	0.14
CXEC	5.50	1.61	4.18	3.76	0.11	0.09	0.26	0.15
ECEC	3.76	1.49	4.24	3.16	0.09	0.08	0.22	0.13
EPEC	4.61	1.61	4.68	3.63	0.11	0.08	0.25	0.15
EREC	3.82	1.54	3.76	3.04	0.10	0.08	0.23	0.14
ESMR	3.42	1.39	4.03	2.95	0.10	0.08	0.26	0.15
GYEC	3.34	1.36	4.09	2.93	0.10	0.07	0.23	0.14
GZEC	4.04	1.57	4.69	3.43	0.11	0.08	0.24	0.14
IBEC	3.95	1.46	4.34	3.25	0.11	0.08	0.26	0.15
LJEC	4.58	1.62	5.99	4.06	0.10	0.08	0.24	0.14
LREC	4.01	1.60	4.63	3.41	0.10	0.07	0.23	0.14
MAEC	4.12	1.57	4.67	3.45	0.11	0.08	0.26	0.15
MHEC	3.87	1.57	4.48	3.31	0.10	0.08	0.23	0.13
MTEC	4.08	1.53	5.03	3.55	0.13	0.09	0.29	0.17
NJEC	3.92	1.47	4.25	3.21	0.10	0.08	0.23	0.13
PDEC	3.83	1.55	4.72	3.37	0.11	0.08	0.26	0.15
PJEC	3.49	1.36	3.80	2.88	0.10	0.08	0.24	0.14
PREC	3.85	1.52	4.65	3.34	0.11	0.08	0.24	0.14
PTEC	2.85	1.34	3.87	2.69	0.10	0.08	0.24	0.14
QUEM	3.04	1.33	3.11	2.49	0.20	0.11	0.45	0.26
QUI1	1.02	1.06	2.92	1.67	0.09	0.06	0.21	0.12
QVEC	4.09	1.52	4.42	3.34	0.10	0.08	0.23	0.14
RIOP	3.65	1.41	4.05	3.04	0.10	0.08	0.25	0.14
SEEC	4.26	1.52	4.06	3.28	0.09	0.08	0.22	0.13
SNLR	4.66	1.66	5.38	3.90	0.11	0.08	0.28	0.16
STEC	4.05	1.51	4.98	3.51	0.13	0.10	0.31	0.18
TNEC	4.00	1.64	4.95	3.53	0.11	0.08	0.24	0.14

Los valores más altos de repetibilidad, como era de esperarse, se encuentran en la componente vertical. La estación con el mayor promedio de repetibilidad corresponde a la estación LJEC (4.06 mm), que tiene prácticamente los valores más altos en todas las componentes y como se verá más adelante es la estación con mayor porcentaje de valores atípicos eliminados. El valor más bajo de promedio de repetibilidad semanal

corresponde a la estación QUI1 (1.67 mm) siendo una de las estaciones con menor tiempo de observación (0.82 años).

Los valores de la precisión de las soluciones semanales son prácticamente iguales para todas las estaciones. En la Tabla 3.4 se presenta el promedio general de la repetibilidad semanal de las estaciones y el promedio de las precisiones de las soluciones diarias y semanales con las que se obtuvieron las coordenadas finales. Se puede observar que las precisiones de las soluciones semanales son de 2 a 3 veces mejores que las precisiones de las soluciones diarias debido a que las soluciones semanales de las estaciones son obtenidas de la combinación de las soluciones diarias.

Tabla 3.4. Promedios de repetibilidad semanal y precisiones diarias y semanales de las coordenadas de las estaciones de la red REGME

Componente	ARCHIVO SINEX		
	Precisión solución diaria σ (mm)	Repetibilidad semanal $wrms(mm)$	Precisión solución semanal σ (mm)
<i>e</i>	0.34	3.86	0.11
<i>n</i>	0.18	1.5	0.08
<i>u</i>	0.56	4.33	0.26

Una de las ventajas en el procesamiento realizado fue la de trabajar con efemérides precisas definidas en un solo marco de referencia (IGb08) durante todo el periodo de estudio (2008-2014), lo que permitió conseguir un procesado homogéneo y así evitar las discontinuidades o saltos debido al cambio de marcos de referencia.

Las coordenadas estimadas de todos las estacopmes fiduciales involucradas son verificadas por medio de una transformación de Helmert de tres parámetros (sólo traslación). Este procesamiento nos permitió detectar que la estación IGS ANTC presentaba valores anómalos, encontrándose desplazada debido al terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010 de M_w 8.8. Esta estación se tuvo que eliminar como estación fiducial en los procesados posteriores a esta fecha.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES GNSS. CAMPO DE VELOCIDADES PARA ECUADOR

4.1. Introducción

Una serie temporal es el resultado de observar los valores de una variable a lo largo del tiempo en intervalos regulares, que pueden ser días, semanas, meses, etc. Cuando las series oscilan alrededor de una constante, es decir no muestran ninguna tendencia creciente o decreciente clara, decimos que son estables o estacionarias, y cuando tienen un comportamiento superpuesto que se repite a lo largo del tiempo se dice que son estacionales o periódicas (Peña, 2010).

El objetivo principal del análisis de series temporales es frecuentemente encontrar un modelo óptimo que describa los procesos estocásticos que se pueden haber generado en las series. Lo que usualmente se hace es separar la información de la serie de tiempo en una parte determinística llamada “señal” y otra parte estocástica conocida como “ruido”.

Las series obtenidas en este estudio corresponden a datos diarios de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) en el sistema ITRF2008 (IGb08), por lo que para facilitar su análisis e interpretación se procedió a transformar las coordenadas a un sistema de coordenadas topocéntrico local (e, n, u).

Las coordenadas de las series temporales analizadas en este trabajo, cambian con el tiempo principalmente por el movimiento de las placas tectónicas. Así mismo, éstas conllevan errores en su determinación debido a diferentes causas de tipo físico como instrumentales que en ciertos casos hace que se tengan valores anómalos respecto a los de su alrededor. Así pues, antes de realizar propiamente el análisis de las series, es necesario trabajar con series depuradas o limpias, es decir que estén libres de valores atípicos (*outliers*) y de saltos (*offsets*) que influyen en el cálculo de los parámetros a determinar, en nuestro caso las velocidades y sus incertidumbres.

La estrategia utilizada es la descomposición aditiva de las series que considera que los datos se generan como la suma de tres factores que son: la tendencia, la estacionalidad o periodicidad y el ruido. Los métodos clásicos de descomposición suponen que tanto la tendencia como la estacionalidad son deterministas y el ruido la parte aleatoria o estocástica.

El análisis del tipo de ruido es importante ya que es conocido que la correlación temporal provoca la presencia de ruido de color como lo demuestran diversos trabajos (Zhang et al., 1997; Mao et al., 1999; Williams, 2003b; Williams et al., 2004; Klos et al., 2015) y debe tenerse en cuenta en el cálculo de las velocidades que es nuestro propósito principal (García, 2016).

Existen varias investigaciones que abordan el análisis de series temporales GNSS con un enfoque que se centra en el análisis del ruido, debido a que éste produce un efecto significativo sobre la incertidumbre de las velocidades obtenidas con estas series. Así pues, es importante tener en cuenta el ruido existente en cada serie con el fin de evaluar la magnitud de su efecto en relación con las incertidumbres del parámetro a estimar.

Estudios realizados en los últimos años han determinado que las estimaciones de las coordenadas GNSS están correlacionadas con el tiempo y, bajo ese criterio, es incorrecto suponer que las observaciones obtenidas son independientes para estimar los parámetros de la serie temporal. Por tanto, el tipo de ruido asumido afecta en gran medida al cálculo de las incertidumbres.

La estimación de la incertidumbre de la velocidad fue investigada por Johnson y Agnew (1995). El estudio se realizó sobre un conjunto de datos que tuvieron la presencia de ruido rojo (*random walk*) y ruido blanco, llegando a la conclusión de que la omisión de las correlaciones temporales produce una incertidumbre de la velocidad demasiado optimista.

Zhang et al. (1997) analizaron series de tiempo continuo de 10 estaciones GPS en el sur de California con un período de 19 meses. En este estudio se obtuvieron expresiones analíticas de las incertidumbres asociadas con el ruido de color rojo. Usando la estimación de máxima verosimilitud (MLE, *Maximum Likelihood Estimation*) concluyeron que el ruido en los datos se traduce mejor como una combinación de ruido blanco y ruido rosa (*flicker noise*) y el uso de la potencia espectral, el tipo de ruido se caracterizó como un ruido gaussiano fraccionario (índice espectral entre 0 y -1), con un índice espectral medio de -0.4.

Posteriormente Mao et al. (1999) desarrollaron un estudio con el fin de evaluar las características de ruido en las series temporales generadas con posiciones GPS. Se utilizaron series con datos de más de 2 años de observación de 23 estaciones GPS de monitoreo continuo distribuidas globalmente. Utilizaron el análisis espectral y MLE concluyendo que una combinación de ruido blanco y ruido rosa era el mejor modelo para representar las características de ruido en las tres componentes posicionales. Las amplitudes fueron más bajas para la componente norte y más altas para la componente vertical. Los índices espectrales determinados por Mao et al. (1999) oscilan entre -0.51 y -2.17, llegando a la conclusión de que no existe una diferencia significativa en el carácter espectral de la componente de ruido de la componente horizontal y vertical. Como se verá posteriormente, en este estudio se emplearán dos métodos, el análisis espectral y MLE para evaluar el ruido correlacionado con el tiempo en las series temporales. Se utilizó el análisis espectral para estimar el nivel de ruido, mientras que el MLE se utilizó para caracterizar las amplitudes de los procesos estocásticos espectrales con índices enteros.

Johnson y Agnew (2000) llegaron a la conclusión de que algunas estaciones mostraban un ruido rojo a bajas frecuencias en la componente horizontal. Determinaron ruido rojo en series de tiempo no muy largas, debido a que el ruido blanco tiene un factor 10 veces menor que el observado normalmente, lo cual es difícil de determinar normalmente en series cortas y con dominio de otros ruidos.

En otro estudio, Williams (2003a) muestra que en una serie temporal geodésica, además de la presencia de ruido blanco también encuentra ruido rosa y ruido rojo, acercándose el proceso al ruido rojo. La razón como fuente más probable de este ruido es la inestabilidad del soporte de la antena GPS, que cerca de la superficie se ve más afectada por fuerzas no tectónicas, tales como las condiciones meteorológicas. En este trabajo se desarrollaron algunas ecuaciones simples para calcular la incertidumbre dada por la amplitud de ruido, frecuencia de muestreo y longitud de series de tiempo.

Williams et al. (2004) evaluaron la incidencia de diferentes monumentaciones en el ruido de las series de tiempo de las estaciones GPS de monitoreo continuo. Concluyeron que el tipo de ruido generado por las monumentaciones se entiende como un proceso de ruido rojo, el cual para ser detectado se necesita de series muy largas, con el fin de

reducir el dominio de ruido rosa y permitir adecuadamente definir el ruido y los niveles correspondientes a los de índices espectrales.

Amiri-Simkooei et al. (2007) proponen una metodología para evaluar las características de ruido en series de tiempo GPS, adoptando una componente de la varianza estimada por mínimos cuadrados, que es un método para manejar cualquier tipo de ruido presente en los datos y permite obtener la matriz de covarianza de los estimadores y sus incertidumbres. Los resultados obtenidos confirmaron la presencia de señales anuales y semestrales, posiblemente relacionados con la repetición de la constelación GPS en el tiempo y despreciando el hecho de que la componente estacional conduce a una sobreestimación de la incertidumbre de la velocidad. Con respecto a las incertidumbres de las velocidades obtenidas para el procesamiento teniendo en cuenta los diferentes modelos de ruido demostraron que el uso de un modelo estocástico incorrecto puede dar lugar a diferentes precisiones. Considerar sólo el modelo de ruido blanco, conduce a resultados demasiado optimistas y emplear la combinación de ruido blanco con el ruido de color rojo da resultados menos precisos.

Rosa et al. (2010) realizaron estudios geofísicos usando desplazamiento de la superficie mediante mediciones geodésicas, determinando que éstas no solamente requieren de estimaciones precisas de la posición, sino también necesitan estimaciones de error confiables. Es evidente que, tanto en este estudio como en los anteriormente citados, el análisis del ruido no contribuye como un medio para reducirlo, sino para proporcionar incertidumbres lo más reales posibles de los parámetros a estimar.

En el presente estudio, el análisis y la determinación del tipo de ruido se realizan mediante el análisis del espectro de potencia aproximado por una ley de potencia dependiente de la frecuencia, propuesto por Agnew (1992). Además, se calculan la estacionalidad y la tendencia de cada serie. La periodicidad o estacionalidad se determina mediante el análisis espectral para series temporales con datos que no están igualmente espaciados, según el procedimiento propuesto por Lomb (1976) y la tendencia de la serie se determina utilizando regresión lineal ponderada.

Una vez obtenidos el tipo de ruido, la estacionalidad y la tendencia de la serie, se utiliza un modelo lineal donde se involucran todos estos parámetros, para posteriormente realizar un ajuste mediante mínimos cuadrados y así determinar la velocidad con su respectiva incertidumbre. Con esto conseguimos obtener velocidades más ajustadas y precisiones más realistas que las calculadas por regresión lineal mediante el ajuste a una recta considerando solamente la tendencia.

Todo este análisis se ha realizado por medio de scripts desarrollados en Matlab (Anexo F). En este programa se toma como archivo de entrada los ficheros SINEX resultantes del procesamiento GNSS descritos en el capítulo anterior, realizando todo el análisis de series temporales hasta la determinación del valor de la velocidad con sus respectivas incertidumbres. Los resultados obtenidos son contrastados con el software CATS, que utiliza la estimación de máxima verosimilitud (MLE) para la obtención de parámetros de ruido, velocidades e incertidumbres.

A continuación se desarrolla la metodología y proceso llevado a cabo para el análisis de las series temporales y la obtención del campo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador.

4.2. Análisis de series temporales

4.2.1. Detección y corrección de *outliers* y *offsets*

En el capítulo anterior se detallan varios factores que causan variaciones en la determinación final de las coordenadas y, por tanto, dispersión en las series temporales generadas. Se han descrito también los modelos, técnicas y procedimientos utilizados para minimizar estas variaciones a fin de obtener resultados más fiables que generen series de tiempo libres de efectos que no estén dentro de los fenómenos objetos de este estudio.

Por tanto, una serie temporal siempre tendrá la influencia de estos factores que se verán reflejados en las series como errores aleatorios, siempre y cuando no se excedan de un valor determinado, dando lugar a valores anómalos. En las series de tiempo de datos GNSS suelen observarse dos tipos de valores anómalos: los saltos en las series (*offsets*) y los valores atípicos (*outliers*). Las observaciones afectadas por estas intervenciones pueden presentar una estructura distinta de las demás, situación que puede dar lugar a sesgar la estimación de los parámetros a obtener.

La secuencia en la que tratamos estos valores es en primer lugar detectar y corregir los *offsets*, si los hubiese, para posteriormente eliminar los valores atípicos encontrados.

Los saltos u *offsets* pueden darse debido a diferentes causas que podríamos clasificar en naturales y artificiales. Los saltos registrados en la estación por causas naturales son provocados por un movimiento real de la estación debido a terremotos. Estos movimientos muchas veces son el resultado de eventos registrados del cual se conocen su ubicación y magnitud por lo que pueden datarse y señalarse en la serie.

Son muchos los casos debido a causas artificiales, entre los principales tenemos: Cambios de antena que no han sido debidamente registrados, efectos multicamino y cambios en el procesado y en el sistema de referencia.

En este estudio la detección de *offsets* en las series temporales ha sido mediante observación visual, determinando la fecha en que ocurrió el salto. Posteriormente se contrasta con información de los *logfile* y se verifica si este evento sucedió por la manipulación de equipos o por causas naturales debido a movimientos sísmicos mediante la comprobación con el catálogo sísmico provisto por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador (Tabla 2.1).

La red REGME se encuentra asociada a la red SIRGAS, por lo que se ve en la obligación de reportar cualquier cambio que se haga, ya sea del receptor, antena o ambos, así como colocar o quitar el radomo, entre otros. Cualquier manipulación que se realice en el equipo de una estación debe ser informada mediante la actualización de los ficheros *logfile*, de forma que el usuario tenga conocimiento de estos y los tenga en cuenta al momento de preparar los ficheros previos al procesamiento de los datos.

En el periodo de datos analizado no han ocurrido eventos importantes que ocasionen desplazamientos cosísmicos significativos en las estaciones analizadas (ver Tabla 2.1). No obstante, durante la realización de este estudio, y posterior al periodo de datos analizado, tuvo lugar un evento sísmico de gran magnitud asociado con la subducción en Ecuador el día 16 de abril de 2016, con magnitud M_w de 7.8 y epicentro entre las parroquias Pedernales y Cojimés en la provincia de Manabí, ubicadas en la costa ecuatoriana (IGEPN, 2016).

El método utilizado para la corrección del *offset* se basa en calcular las tendencias de las series antes y después del *offset* mediante un ajuste de mínimos cuadrados, obteniéndose las ecuaciones de las rectas para cada lado del *offset*.

El valor de salto del *offset* corresponde a las diferencias entre los valores obtenidos al evaluarse las ecuaciones de las rectas en el tiempo donde inició el *offset*; así tenemos:

$$\Delta(t_{offset}) = y_1(t_{offset}) - y_2(t_{offset}) \quad (4.1)$$

La corrección la realizamos restando este valor a todos los datos de la serie antes del *offset*, y así finalmente tener una serie limpia o depurada para posteriormente realizar un análisis exhaustivo de ésta. El propósito de realizar el ajuste a los valores previos del *offset*, es no afectar la continuidad de la serie con los datos posteriores a nuestro periodo de estudio. Una muestra de estas series se presenta en la Figura 4.1. La no corrección de los *offsets* afecta los resultados y análisis de la serie.

En cuanto a los *outliers* o valores atípicos en las series temporales pueden existir dos tipos: aquellos en los que el dato es anómalo respecto a los de su alrededor, o también puede darse el caso en que el valor de la coordenada no sea discordante con el resto, pero el error con respecto a la tendencia de la serie sí que lo sea y en este caso también se puede considerar un valor atípico. Por tanto, para la determinación de los mismos se va a proceder a su detección utilizando para cada caso técnicas diferentes.

Cuando la serie no es estable en el tiempo, es decir, tiene tendencia creciente o decreciente, se dice que la serie es no estacionaria en el tiempo. Si la variabilidad o las autocorrelaciones cambian con el tiempo, diremos que la serie es no estacionaria en la varianza o en las autocorrelaciones. Finalmente, si la distribución de la variable en cada instante varía con el tiempo, diremos que la serie no es estacionaria en distribución. Así, los procesos no estacionarios más importantes son los procesos integrados, que tienen la propiedad que al diferenciarlos se obtienen procesos estacionarios (Peña, 2010), como en el caso de las series temporales generadas por datos obtenidos mediante técnicas GNSS.

Es evidente que nuestras series no son estables en el tiempo debido a que las coordenadas de las estaciones se encuentran sobre la superficie de la corteza en placas tectónicas que están en continuo movimiento. Éstas, en particular, tienen una tendencia creciente o decreciente, obteniéndose series no estacionarias en la media. Así pues, para no involucrar a la tendencia desde un inicio en la eliminación de los valores atípicos, recurrimos a la utilización de los procesos integrados, que para este estudio resultó ser de grado 1, donde el orden de integración es el número de diferencias necesarias para obtener un proceso estacionario.

Figura 4.1. *Offset* de la serie temporal de la estación PTEC. El eje de abscisas corresponde a la fecha de observación en años. El eje de ordenadas representa la posición de la estación, en las tres componentes (e, n, u), expresada en milímetros.

Es así que, para una serie temporal de un conjunto de observaciones, $Z_i = Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ en los instantes de tiempo t_i con $i = 1, 2, 3, \dots, N$ siendo N el tamaño muestral de la serie, el proceso integrado de orden 1 está dado por:

$$\Delta Z_i = Z_1 - Z_2, Z_2 - Z_3, Z_3 - Z_4, \dots, Z_{N-1} - Z_N \quad (4.2)$$

La Figura 4.2 muestra la serie original y la serie resultante del proceso integrado de orden 1. Se observa que estas nuevas series oscilan alrededor de una media constante, además existen algunos picos o valores más altos que el resto de la serie, son valores atípicos si sobrepasan el siguiente intervalo:

$$\overline{\Delta Z_i} \pm 3 \cdot \sigma_{\Delta Z} \quad (4.3)$$

siendo $\overline{\Delta Z_i}$ y $\sigma_{\Delta Z}$ la media y desviación estándar de los procesos integrados.

Figura 4.2. a) Serie temporal original componente este de la estación ALEC. b) Serie temporal aplicada proceso integrado de orden 1 donde los puntos rojos son datos que están fuera del intervalo $\Delta Z_1 \pm 3 \cdot \sigma_{\Delta Z}$ (intervalo marcado en línea amarilla discontinua). c) Serie depurada de valores atípicos mediante aplicación de procesos integrados. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

Una vez depurada la serie usando los procesos integrados de orden 1 o diferencias entre dos valores consecutivos, se determina la tendencia de la serie mediante regresión lineal simple y se consideran valores atípicos aquellos residuales que sobrepasen tres desviaciones estándar de los errores (Mao et al., 1999).

La Figura 4.3 indica en forma secuencial aquellos datos que son tratados como valores atípicos y eliminados en la regresión lineal cuando los residuos son mayores a $\pm 3\sigma$.

Figura 4.3. a) Serie temporal componente este de la estación ALEC depurada mediante procesos integrados b) Los datos con residuales mayores que tres veces su desviación estándar se consideran valores atípicos (intervalo marcado con línea amarilla discontinua, en rojo línea de tendencia. c) Serie depurada de valores atípicos cuando sus residuales son superiores a tres veces su desviación estándar respecto a la tendencia de la serie. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

4.2.2. Descomposición aditiva de las series temporales

Es ampliamente conocido que cualquier señal periódica está compuesta por la frecuencia principal, así como sus armónicos más altos. Debido a esto, asumimos que la serie de tiempo contiene tanto la parte determinista mediante el modelo funcional que incluye la tendencia y la estacionalidad, así como el ruido de fondo (Amiri-Simkooei et al., 2007).

Una vez eliminados y corregidos los valores atípicos y saltos se obtienen series depuradas o limpias. El propósito fundamental de este apartado es obtener modelos de las series que mejor se ajusten a ellas, tomando en consideración la tendencia, variaciones estacionales y el tipo de ruido, de tal forma que la suma de todas estas componentes represente la serie temporal real. El modelo teórico es

$$y_t = T_t + S_t + N_t \quad (4.4)$$

donde

y_t = Valor observado

T_t = Tendencia

S_t = Estacionalidad

N_t = Ruido, componente irregular, fluctuaciones aleatorias no explicadas por otros componentes.

Al introducir la estacionalidad y el tipo de ruido tendremos una mejor estimación del parámetro velocidad y su precisión. A continuación, se describe el proceso llevado a cabo para obtener el modelo propuesto.

4.2.2.1. Tendencia

La tendencia de una serie viene dada por el movimiento a largo plazo de los datos que la conforman, caracterizada por un patrón gradual y variaciones de la propia serie, que en nuestro caso se consideran como consecuencia del movimiento y deformación de la corteza terrestre que afectan al crecimiento o disminución de la misma.

Por lo general, la tendencia a largo plazo se aproxima a una línea recta que describe el movimiento de una determinada estación. El modelo funcional será:

$$T(t) = y_o + rt + \varepsilon \quad (4.5)$$

donde y_o representa la ordenada en el origen, r la pendiente, t el instante de tiempo y ε el error de ajuste. Nuestros datos corresponden a las posiciones que tienen asociadas una precisión procedente de la matriz varianza-covarianza del procesado de los datos.

Utilizamos esta precisión para obtener, mediante una regresión lineal ponderada, la tendencia de la serie donde los pesos están dados por:

$$W_i = 1/\sigma_i \quad (4.6)$$

La solución se determina utilizando un ajuste mínimo cuadrático mediante el siguiente sistema de matrices:

$$X = (A'WA)^{-1}A'WY \quad (4.7)$$

siendo X la matriz de los parámetros a determinar (y_o , r), A la matriz de los coeficientes, W matriz diagonal de pesos e Y la matriz de valores observados (Wolf y Ghilani, 1997). En la Figura 4.4 se muestra las series temporales de la estación LJEC en sus tres componentes, se puede observar que la componente este tiene una tendencia decreciente mientras que las componentes norte y vertical tienen un comportamiento creciente.

De la ecuación 4.5 sabemos que r representa el valor de la pendiente de la recta y, por ende, una primera aproximación de la velocidad. Se observa además en la Figura 4.4 que la precisión de cada punto es muy pequeña comparado con el error de ajuste que podría tener la tendencia de la serie.

Figura 4.4. Serie temporal de la estación LJEK en sus tres componentes (e, n, u), con la tendencia (en rojo). El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

Para tener una idea más clara respecto a estas precisiones se han calculado el error medio cuadrático (*rms*, *root mean square*) y el error medio cuadrático ponderado (*wrms*, *weighted root mean square*) de la regresión lineal junto con la precisión de la velocidad estimada.

Es importante tener en cuenta que el error cuadrático medio corresponde al error respecto a la recta de la regresión, su cálculo se obtiene a través de la expresión (Wolf y Ghilani, 1997):

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (4.8)$$

donde $y_i - \hat{y}_i$ son los residuos del modelo.

Para el cálculo del error medio cuadrático ponderado hemos utilizado como peso la inversa de la varianza para cada punto, estos valores se encuentran en la matriz varianza-covarianza de la solución final obtenida en el procesamiento, su cálculo viene dado por (Wolf y Ghilani, 1997):

$$wrms = \sqrt{\frac{\frac{N}{N-1} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sigma^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma^2}}} \quad (4.9)$$

Con respecto a la precisión o incertidumbre de la estimación de la velocidad, éste se hace en base al parámetro r que representa la pendiente. El error de estimación de esta pendiente es la que se expresa cuando se representa la velocidad con su precisión. El error de estimación de la pendiente que determina la velocidad está en función de la varianza residual y la varianza del término independiente, en este caso la varianza del tiempo.

La varianza residual mide la variabilidad de los puntos alrededor de la recta y se expresa como (Wolf y Ghilani, 1997):

$$s_R^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.10)$$

La varianza del término independiente está dada por:

$$s_t^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2 \quad (4.11)$$

Por tanto, el error estándar de la estimación de la velocidad es:

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{s_R}{s_t} \quad (4.12)$$

De esta expresión (4.12) se deduce que el error disminuirá si disminuye la varianza residual y se incrementan el tamaño muestral y la dispersión del tiempo.

Finalmente, la velocidad se expresa con un nivel de confianza al 95% como:

$$v \pm 1.96 * \sigma_v \quad (4.13)$$

4.2.2.2. Estacionalidad

La estacionalidad de una serie se refiere a las fluctuaciones periódicas u oscilaciones que se repiten cada cierto periodo de tiempo. La componente estacional de una serie debe recoger estas oscilaciones y deben incorporarse al modelo de las series temporales.

La importancia de modelar esta señal estacional radica en que puede afectar a los parámetros de interés estimados a partir de las series de tiempo, en particular la velocidad de la estación (Blewitt and Lavallée, 2002; Bos et al., 2008).

Para obtener la estacionalidad es necesario realizar el análisis espectral de las series de tiempo en el dominio de las frecuencias, ya que esta es una medida que sirve para representar ciclos.

El promedio estadístico de una determinada señal o tipo de señal (incluido el ruido), tal como se analiza en términos de su contenido de frecuencia, se denomina espectro. El espectro de potencia de una serie temporal describe la distribución de potencias en componentes de frecuencia que componen esa señal. Se pueden usar varios términos para referirse al espectro de potencia, uno de los más utilizados es la densidad espectral de potencia (PSD, *Power Spectral Density*). Para muestras discretas la PSD se generaliza a series de tiempo finitas como señal muestreada a intervalos discretos de tiempo en un periodo de medición neto.

Cuando se tiene el espectro de potencia, se pueden calcular varias características útiles de la señal de entrada, tales como potencia, frecuencia, armónicos y nivel de ruido.

El cálculo del espectro de potencia se realiza con los residuales de las series, es decir con la serie eliminada la tendencia. En el apartado anterior se vio cómo determinar los valores de la pendiente r y la ordenada en el origen y_o mediante el análisis de tendencia, por tanto el valor de los residuales sería:

$$v_i = y_{i\text{ obs}} - (y_o + rt_i) \quad (4.14)$$

Para determinar el espectro de potencia por medio de un periodograma para series discretas igualmente espaciadas se define la Transformada de Fourier como (Scargle, 1982):

$$P(f_n) = \frac{1}{N} \left[\left(\sum_{i=1}^N v_i \cos(2\pi i f_n) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N v_i \sin(2\pi i f_n) \right)^2 \right] \quad (4.15)$$

donde $f_n = n/T$, T es el periodo fundamental, v_i es el residuo y $n = 1, 2, \dots, N/2$.

Fourier demostró que toda función periódica puede representarse como sumas de funciones sinusoidales de distinta amplitud y frecuencia. Este resultado sugiere generalizar el análisis realizado para un ciclo permitiendo que la función periódica sea la suma de varias funciones armónicas con distintas frecuencias o periodos, por tanto, el modelado de la estacionalidad estará representado por una función armónica de periodo T . Así pues, la alternativa más simple para representar la estacionalidad como una función periódica es suponer una función armónica, como el seno y el coseno.

Este procedimiento es ampliamente utilizado cuando las series tienen datos igualmente espaciados (Mao et al., 1999). Sin embargo, nuestras series corresponden a observaciones GNSS influenciados por varios factores que producen datos anómalos los cuales deben ser eliminados previo a su análisis para que no influyan en la determinación de los parámetros a estimar. Además, hay vacíos o *gaps* en las series debido a múltiples factores como pérdida de datos o problemas en las estaciones que hacen que no tengamos información para todos los días procesados y consecuentemente no estén igualmente espaciados. Por tanto, para obtener el espectro de potencia por medio del periodograma para este caso Mao et al. (1999) recomiendan seguir el procedimiento propuesto por Lomb (1976) para series que no están igualmente espaciadas, donde se calcula mediante la inclusión del retardo τ definido por:

$$\tan(4\pi f\tau) = \frac{\sum_{i=1}^N \sin(4\pi t_i f)}{\sum_{i=1}^N \cos(4\pi t_i f)} \quad (4.16)$$

De esta ecuación se despeja el valor de τ y se reemplaza en la ecuación 4.17 para obtener los valores del espectro de potencia (Press et al., 2007).

$$P(f) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{[\sum_{i=1}^N v_i \cos(2\pi f(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2(2\pi f(t_i - \tau))} + \frac{[\sum_{i=1}^N v_i \sin(2\pi f(t_i - \tau))]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2(2\pi f(t_i - \tau))} \right\} \quad (4.17)$$

Los valores más altos del espectro de potencia representan las frecuencias y periodos predominantes, obteniendo de esta manera el periodograma de la serie en estudio.

Las variaciones estacionales están dadas por:

$$S(t) = \sum_{k=1}^p (A_k \cdot \sin(2\pi f_k t) + B_k \cdot \cos(2\pi f_k t)) + \varepsilon \quad (4.18)$$

$$A = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N v_i \cdot \sin(2\pi f t_i) \quad B = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N v_i \cdot \cos(2\pi f t_i) \quad (4.19)$$

Para el análisis de nuestras series hemos tomado hasta tres armónicos. No obstante, las velocidades estimadas no cambian significativamente si se tomaran uno o dos armónicos del periodo estacional. Los resultados presentados se basan en un solo armónico del periodo estacional preponderante ($p = 1$). La Figura 4.5 muestra la estacionalidad de la estación LJEC en cada una de sus componentes.

Figura 4.5. Serie temporal de la estación LJEC con el efecto periódico (línea roja) en sus tres componentes. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

4.2.2.3. Ruido – Análisis espectral

La comprensión del contenido del ruido es muy importante para que se puedan asignar incertidumbres realistas a los parámetros estimados en las series de tiempo. Existen varios factores que hacen difícil determinar la fuente que los genera y las incertidumbres en las observaciones GNSS.

En los últimos años se ha detectado y estudiado la correlación temporal de las coordenadas, ya que su determinación se ve afectada por numerosos efectos geofísicos y/o meteorológicos que dependen del tiempo (García, 2016). Ya algunos autores han determinado la presencia de ruido correlado con el tiempo y su efecto en la estimación de la incertidumbre en las series con observaciones GPS. Varios autores indican que éstas son subestimadas si solo se considera el ruido blanco en las series (p. ej. Johnson y Agnew, 1995; Zhang et al., 1997; Mao et al., 1999; Williams et al., 2004; Hackl et al., 2011).

El análisis espectral de una serie cronológica es el método tradicional utilizado para determinar las características de las observaciones, entre ellas la de establecer el tipo de ruido existente en cada serie mediante el estudio del espectro de potencia.

El espectro de potencia P , de muchos fenómenos geofísicos están bien aproximado por una ley de potencia dependiente de la frecuencia de la forma (Agnew, 1992):

$$P(f) = P_0 f / f_0^\alpha \quad (4.20)$$

donde f es la frecuencia temporal, P_0 y f_0 son constantes de normalización y α es el índice espectral. Por lo general el índice espectral no es un número entero y sus valores varían entre $0 < \alpha < -3$, que es el que aparece en la mayoría de los fenómenos geofísicos (Agnew, 1992). El conocimiento del índice espectral es importante porque permite identificar el tipo de ruido presente en la serie y así poder modelarlo y tenerlo en cuenta al momento de estimar las velocidades y mejorar su precisión.

El método para la obtención del valor de α es ajustando una recta $\alpha \cdot \log(P(f)) - \log(f)$, siendo la pendiente el valor correspondiente al índice espectral.

Si $-1 < \alpha < 0$ recibe el nombre de ruido gaussiano fraccionario y se suele considerar que es estacionario (Figura 4.6), es decir, sus propiedades estadísticas son invariantes con el tiempo.

Figura 4.6. Espectro de potencia de la serie para la estación ALEC e índice espectral (pendiente de la recta en rojo), que indica ruido gaussiano fraccionario.

Existen tres tipos de ruidos específicos que se encuentran dentro del estudio de series temporales en observaciones GNSS, estos son: ruido blanco (Figura 4.7), ruido de parpadeo o rosa (*flicker*) (Figura 4.8) y ruido rojo, browniano o de camino aleatorio (*random walk*) (Figura 4.9) cuando el índice espectral toma valores de 0, -1 y -2, respectivamente. A continuación, veremos las características de cada uno de ellos.

Ruido blanco: Es una señal aleatoria con una densidad espectral de potencia constante, es un caso simple de los procesos estocásticos donde los valores son independientes e idénticamente distribuidos a lo largo del tiempo con media cero e igual varianza, es decir, son señales aleatorias con muestras incorreladas en el tiempo. El ruido blanco es independiente de la frecuencia y suele asociarse al ruido del hardware y a los errores de medida. Este ruido contiene poca o ninguna información geodésica, pero su correcta caracterización estadística contribuye a innumerables aplicaciones que incluye la estimación de las incertidumbres de la velocidad (Montillet et al., 2013).

Figura 4.7. Series temporales caracterizadas por ruido blanco. Modificado de Ward y Greenwood (2007).

Ruido rosa (*flicker*): El ruido rosa, también conocido como ruido de parpadeo es una señal con espectro de potencia inversamente proporcional a la frecuencia de la señal. Su nombre proviene del hecho de que este ruido presenta características intermedias entre el ruido blanco y el ruido rojo o *random walk*. Su origen es poco claro y es el caso de la mayoría de las estaciones GNSS (Ward y Greenwood, 2007).

Figura 4.8. Series temporales caracterizadas por ruido rosa (flicker). Adaptado de Ward y Greenwood (2007).

Ruido Rojo (*random walk*): También conocido como paseo aleatorio, su densidad espectral es inversamente proporcional a f^2 , lo que demuestra que tiene más energía en las frecuencias bajas, superior incluso al ruido rosa. Este tipo de ruido se puede obtener mediante la integración del ruido blanco. Tiene como característica que al realizar un proceso integrado de orden 1 nos da como resultado un ruido blanco (Ward y Greenwood, 2007). Generalmente es causado por la inestabilidad del monumento.

Figura 4.9. Series temporales caracterizadas por ruido rojo (*random walk*). Adaptado de Ward y Greenwood (2007).

4.2.3. Resultados

4.2.3.1. Offsets y outliers

Una forma clara de identificar los *offsets* es mediante la determinación visual en el gráfico de las series temporales, para posteriormente recurrir a los archivos y obtener la fecha exacta del salto. La Figura 4.10 muestra la serie temporal de la estación PTEC afectada por un *offset* con su correspondiente corrección en todas sus componentes.

Figura 4.10. Estación PTEC corregida por *offset* en todas sus componentes. En la parte superior se encuentran las series afectadas por *offset* y en la parte inferior las series corregidas. La línea verde representa el momento en que se produjo el *offset*. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

En total, se han detectado y corregido *offsets* en 7 estaciones con valores comprendidos entre 6.4 y 10.8 mm (Tabla 4.1). La Figura 4.11 muestra todas las 7 estaciones de la red REGME que presentan *offsets*.

Tabla 4.1. Fecha y valor de los *offsets* detectados en las estaciones REGME.

ESTACIONES	FECHAS		VALORES DE <i>OFFSET</i>		
	Primer <i>Offset</i>	Segundo <i>offset</i>	e (mm)	n (mm)	u (mm)
CUEC	04-jun-13	28-dic-13	10.07	-3.52	-7.19
PDEC	24-ene-14	06-may-14	1.95	-1.65	-10.71
PJEC	19-nov-13		-8.37	1.25	0.52
PTEC	05-may-09		-3.82	-7.3	3.47
QUEM	11-jul-12		-7.38	-9.96	6.78
QVEC	08-sep-12		1.23	6.37	1.87
TNEC	25-mar-13		-0.43	10.76	-3.61

Figura 4.11. Estaciones con *offset* y *outliers*. La línea roja entrecortada representa el momento en que se produjo el *offset*, se presenta el error cuadrático medio antes de la eliminación de *outliers* y corrección de *offset* (*rms1*) y el error cuadrático medio de los datos depurados (*rms2*). El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

Los *offsets* observados en las estaciones REGME analizadas han sido en todos los casos inferiores a 1.5 cm. García (2016) considera que 2 cm es el límite para los cambios de equipo, y si el *offset* supera este valor el cálculo de la tendencia se realiza solamente con la parte más larga de la serie, antes o después del *offset*, algo que no ocurre en nuestras series. Sin embargo, al realizar nuestros cálculos se ha verificado que de no hacer esta corrección se tienen diferencias de hasta 4 mm/año en la determinación de la velocidad, especialmente en series de hasta 2 años de observación. Así pues, se han realizado las debidas correcciones descritas anteriormente, determinando de una manera visual el tiempo en el que ocurrió el salto. Trabajos recientes realizados por Gazeaux et al. (2013) demuestran que los métodos manuales, donde los desplazamientos son escogidos a mano, casi siempre dan mejores resultados que los métodos automatizados o semiautomáticos (dos métodos automatizados dan un sesgo de velocidad bastante similar que las mejores soluciones manuales).

Se han verificado los archivos *logfile* para determinar las posibles causas de los *offsets*, pero en ningún caso se han reportado cambios de antena u otro tipo de efecto importante en esas fechas. Así mismo, se han comprobado los eventos sísmicos de $M_w > 5$ y profundidad < 40 km ocurridos en el Ecuador en el periodo 2008 – 2014 (ver Tabla 2.1 en capítulo 2), no habiendo ningún evento importante cercano a las estaciones REGME analizadas en este estudio, por lo que se cree que los *offsets* observados y

corregidos pudieron ser causados por manipulación de las estaciones que no han sido debidamente notificadas.

En cuanto a los *outliers* o valores atípicos, como resultado del algoritmo de limpieza utilizado se eliminó un promedio de un 3.2% de datos de cada estación REGME (Tabla 4.2). Estos valores están acordes con el porcentaje obtenido en otros estudios, como por ejemplo Nikolaidis (2002), quien alcanzó el nivel promedio de limpieza de datos de 1-4%. El método empleado por este autor se basa en la utilización de la mediana y el rango intercuartílico (IQR) como estadísticos para determinar los valores atípicos.

De la Tabla 4.2 se observa que las estaciones LJEC y CUEC, son las estaciones con un porcentaje de eliminación de datos más altos, 8.4% y 5.8%, respectivamente. Se han verificado los archivos *logfile* y no existe correlación alguna que pueda determinar que estos valores sean por causas debidas a cambio o manipulación de equipos.

La estación LJEC también tiene los valores más altos en repetibilidad, como se mostró en la Tabla 3.3 del capítulo anterior. La estación LJEC se encuentra ubicada sobre la azotea del tercer piso del edificio del CITTE (Centro de Investigación, Transferencia de Tecnología y Extensión) de la Universidad Técnica Particular de Loja, sobre una torre de 3.30 metros de altura. Se ha verificado con datos posteriores que esta estación muestra especialmente datos anómalos en la componente este.

Tabla 4.2. Porcentaje de valores atípicos eliminados para cada estación.

ESTACIÓN	# datos originales	# datos depurados	% datos eliminados
ALEC	615	596	3.1
AUCA	362	356	1.7
BAHI	127	125	1.6
CHEC	357	345	3.4
CLEC	485	465	4.1
COEC	461	451	2.2
CUEC	1547	1458	5.8
CXEC	272	264	2.9
ECEC	627	610	2.7
EPEC	291	279	4.1
EREC	436	426	2.3
ESMR	1681	1611	4.2
Gyec	1638	1583	3.4
GZEC	616	596	3.2
IBEC	704	689	2.1
LJEC	1765	1617	8.4
LREC	219	215	1.8
MAEC	989	957	3.2
MHEC	573	552	3.7
MTEC	265	260	1.9
NJEC	626	607	3.0
PDEC	479	465	2.9
PJEC	444	434	2.3
PREC	390	379	2.8
PTEC	1086	1046	3.7
QUEM	239	228	4.6
QUI1	300	288	4.0
QVEC	900	862	4.2
RIOP	1628	1577	3.1
SEEC	494	481	2.6
SNLR	252	249	1.2
STEC	272	264	2.9
TNEC	830	809	2.5

En la Figura 4.12 se presentan las series temporales en la componente este de las estaciones LJEC, CUEC y ECEC, esta última con un porcentaje de valores atípicos de un 2.7%. Los valores atípicos de las series de las estaciones CUEC y ECEC posiblemente indican un cambio temporal, como un movimiento repentino de los monumentos geodésicos, que pronto se recuperaría. No ocurre lo mismo con la estación LJEC, donde los valores atípicos son prácticamente constantes en toda la serie analizada.

Figura 4.12. Componente de las series temporales de las estaciones LJEC, CUEC y ECEC. Proceso de depuración de las series por eliminación de valores atípicos. Los puntos rojos indican los *outliers* eliminados en la serie. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

4.2.3.2. Tendencia, estacionalidad y ruido

Tendencia

La tendencia de las series con sus incertidumbres es una primera aproximación de las velocidades a determinar. La Tabla 4.3 muestra la estimación de las velocidades de las estaciones con sus respectivas precisiones. Los valores del error medio cuadrático

(*rms*) y el error cuadrático medio ponderado (*wrms*), llamado repetibilidad, son valores de precisiones más realistas. Las diferencias encontradas entre estos dos parámetros no son significativas por ser los pesos semejantes entre sí. Los valores de *wrms* corresponden a la repetibilidad a largo plazo de la serie y está en el orden de 1.1 mm y 3.8 mm para la componente horizontal (*e*, *n*) y entre 4.1 mm y 9.7 mm para la componente vertical (*u*). Estos resultados son más conservadores y esperamos mejorar al incluir en las series temporales los parámetros de estacionalidad y el ruido.

En cuanto a las incertidumbres asociadas a la estimación de las velocidades para la componente horizontal, los valores varían entre 0.1 mm/año y 1.6 mm/año, y para la componente vertical entre 0.2 mm/año y 3.7 mm/año. Para ambas componentes los valores mayores corresponden a estaciones que tienen menos observaciones o a estaciones con mayor número de *gaps*, que producen mayor variabilidad de la variable tiempo y por ende de la estimación de la velocidad.

Tabla 4.3. Primera aproximación de las velocidades GNSS de las estaciones REGME. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (*Ve*, *Vn*, *Vu*) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año. *Rmse*, *rmsn*, *rmsu*, *wrmse*, *wrmsn* y *wrmsu*: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm.

Estación GNSS	Posición			<i>Ve</i> (mm/a)	<i>Vn</i> (mm/a)	<i>Vu</i> (mm/a)	σV_e	σV_n	σV_u	<i>rms_e</i>	<i>rms_n</i>	<i>rms_u</i>	<i>wrms_e</i>	<i>wrms_n</i>	<i>wrms_u</i>
	Long. (°E)	Lat. (°N)	Elev. (m)												
ALEC	-78.847	-2.202	2383.7	5.79	6.27	2.78	0.37	0.30	0.95	2.57	2.13	6.67	2.54	2.10	6.71
AUCA	-76.883	-0.641	313.9	-1.60	9.91	1.48	0.54	0.45	1.62	2.29	1.91	6.85	2.23	1.88	6.70
BAHI	-80.398	-0.659	53.5	5.97	18.13	-1.02	0.75	0.98	1.95	1.61	2.11	4.18	1.56	2.06	4.15
CHEC	-77.814	-0.339	1643.7	4.29	11.34	2.06	0.67	0.64	1.80	1.91	1.83	5.18	1.87	1.83	5.12
CLEC	-79.956	-4.103	2024.4	-1.56	3.68	1.80	0.51	0.43	1.39	2.34	1.96	6.33	2.31	1.95	6.34
COEC	-77.787	0.716	3657.1	5.31	11.20	2.80	0.41	0.28	0.75	2.88	1.96	5.26	2.85	1.92	5.27
CUEC	-79.003	-2.883	2631.2	-0.30	7.89	1.90	0.06	0.05	0.15	1.97	1.68	4.88	1.94	1.63	4.80
CXEC	-78.615	-0.935	2813.7	6.71	9.42	0.22	0.87	0.71	1.99	2.25	1.84	5.12	2.23	1.82	5.09
ECEC	-79.452	-0.272	284.9	12.84	14.43	-8.25	0.31	0.32	0.75	2.28	2.31	5.40	2.20	2.25	5.31
EPEC	-78.446	-0.315	2519.1	7.53	8.93	0.25	0.86	0.72	2.11	2.36	2.00	5.78	2.29	1.96	5.74
EREC	-78.651	-1.671	2801.0	4.32	5.01	0.24	0.50	0.41	1.19	2.30	1.87	5.48	2.20	1.85	5.43
ESMR	-79.724	0.935	252.9	17.13	16.07	2.89	0.06	0.06	0.17	2.07	1.91	5.82	1.99	1.83	5.75
GYEC	-79.892	-2.149	34.9	5.04	11.13	-1.54	0.08	0.12	0.18	2.97	4.15	6.38	2.79	3.84	5.83
GZEC	-78.581	-3.401	884.0	0.25	6.22	2.25	0.31	0.27	0.81	2.19	1.88	5.72	2.10	1.84	5.66
IBEC	-78.116	0.350	2246.3	4.47	12.53	-1.38	0.28	0.27	0.61	2.58	2.53	5.66	2.53	2.47	5.66
LJEC	-79.199	-3.988	2143.5	-1.07	7.76	2.40	0.09	0.05	0.25	3.36	1.84	8.87	3.38	1.79	8.89
LREC	-75.986	-1.615	206.5	-8.71	7.58	1.54	1.58	1.41	3.71	2.21	1.98	5.20	2.17	1.93	5.18
MAEC	-78.118	-2.305	1062.5	0.75	8.12	1.48	0.11	0.10	0.29	2.28	2.21	6.32	2.25	2.15	6.14
MHEC	-79.957	-3.261	55.1	3.83	9.73	-2.42	0.31	0.29	0.82	2.19	2.04	5.69	2.10	1.99	5.62
MTEC	-76.982	-2.069	301.7	-6.14	8.65	4.99	1.08	1.00	3.12	2.22	2.01	6.37	2.17	1.97	6.26
NJEC	-79.621	-2.675	51.4	5.17	5.78	1.30	0.30	0.28	0.86	2.20	2.01	6.22	2.11	1.99	6.19
PDEC	-79.131	-4.648	1143.4	1.22	6.45	5.22	0.38	0.35	1.07	2.18	1.99	6.19	2.10	1.97	6.13
PJEC	-80.425	-1.552	146.8	16.52	9.61	-4.75	0.29	0.41	0.83	1.91	2.69	5.39	1.87	2.66	5.37
PREC	-77.963	-1.708	904.4	-0.90	4.75	0.39	0.51	0.42	2.17	2.36	1.95	10.00	2.25	1.88	9.65
PTEC	-80.475	-1.058	61.3	8.46	13.64	4.02	0.14	0.09	0.25	3.14	2.11	5.52	3.10	2.06	5.46
QUEM	-78.497	-0.237	3054.7	10.50	13.51	-2.92	0.67	0.60	1.51	2.41	2.17	5.43	2.35	2.09	5.33
QUI1	-78.494	-0.215	2922.6	12.15	7.09	-9.08	0.52	0.55	2.01	1.08	1.15	4.17	1.07	1.16	4.10
QVEC	-79.470	-1.012	120.3	8.56	8.75	1.14	0.18	0.15	0.37	2.91	2.49	6.11	2.86	2.52	6.04
RIOP	-78.651	-1.651	2793.0	1.82	7.19	-0.02	0.08	0.05	0.20	2.70	2.02	7.04	2.65	1.96	6.67
SEEC	-80.904	-2.220	29.8	11.05	13.23	-0.99	0.45	0.25	0.67	3.15	1.78	4.69	3.19	1.76	4.63
SNLR	-78.847	1.293	23.1	11.15	7.69	-3.61	0.87	0.79	2.24	2.26	2.04	5.80	2.17	2.00	5.58
STEC	-78.011	-3.051	321.7	1.20	8.10	0.04	0.54	0.63	1.71	2.13	2.55	6.68	2.07	2.46	6.62
TNEC	-77.816	-0.990	547.1	-1.32	11.03	0.73	0.18	0.18	0.52	2.17	3.46	6.34	2.09	3.54	6.20

Los valores del error medio cuadrático y la repetibilidad a largo plazo corresponden al error de ajuste respecto a la recta de regresión, estas precisiones están más acordes con la repetibilidad semanal o repetibilidad a corto plazo, como lo indica la Tabla 4.4, pues es conocido que los valores de la repetibilidad son de 2 a 20 veces peores que la desviación estándar para la mayoría de las estaciones, siendo mayor para la componente vertical, que en nuestro caso es de aproximadamente 10 veces. En cambio, los valores de la precisión de las coordenadas están más acordes a la estimación de la incertidumbre de la tendencia. En la Tabla 4.4 se puede observar que la precisión de las coordenadas es prácticamente 2 veces superior que la incertidumbre de la tendencia.

Como ya se ha visto en la solución final obtenida en los ficheros SINEX (Capítulo 3), cada coordenada tiene asociado una precisión procedente de la matriz de varianza-covarianza del ajuste final de la solución diaria en el procesamiento de los datos. Estas precisiones son muy optimistas y no reflejan la verdadera dispersión debido a los errores que no se toman en cuenta en los diferentes modelos usados a lo largo del procesamiento y a los errores producidos por aquellas causas que no se pueden modelar (García, 2016). Con respecto a la incertidumbre de la tendencia, ésta depende básicamente del número de observaciones de la serie, como se explicó en el apartado 4.2.2.1.

Tabla 4.4. Precisiones promedio de las estaciones REGME.

Componente	ARCHIVO SINEX			VALORES CALCULADOS	
	Precisión solución diaria σ (mm)	Repetibilidad semanal $wrms$ (mm)	Precisión solución semanal σ (mm)	Repetibilidad a largo plazo $wrms$ (mm)	Incertidumbre de la tendencia $\pm\sigma$ (mm/a)
<i>e</i>	0.34	3.86	0.11	2.28	0.45
<i>n</i>	0.18	1.50	0.08	2.03	0.41
<i>u</i>	0.56	4.33	0.26	5.85	1.18

A modo de ejemplo, la Figura 4.13 muestra la serie temporal de la estación CUEC con la tendencia o la evolución a largo plazo, donde se indican sus valores y precisiones correspondientes.

Figura 4.13. Serie temporal de la estación CUEC en sus tres componentes (e, n, u). Se muestra la tendencia (línea roja) en cada componente, con sus valores e incertidumbres. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

Estacionalidad

La Figura 4.14 muestra los periodos predominantes de la estación CUEC donde se puede observar el pico que presenta en el periodo estacional anual (~ 365 días) en todas sus componentes.

La Tabla 4.5 muestra las frecuencias y potencias de observaciones de las estaciones REGME. Para la estación CUEC se obtienen valores de potencia de 245.32 mm^2 , 163.17 mm^2 y 4929.50 mm^2 para la componente este, norte y vertical, respectivamente. Estos valores son proporcionales a la amplitud de la onda de la serie, es decir a mayor potencia mayor amplitud de onda.

Figura 4.14. Periodos predominantes de la estación CUEC. Los valores en el eje de las abscisas corresponden al periodo (días) y el eje de las ordenadas al espectro de potencia (mm²). Los dos ejes se encuentran en escala logarítmica.

Tabla 4.5. Frecuencias y potencias de observaciones de las estaciones REGME.

EST.	Este			Norte			Up		
	Frecuencia (1/día)	P(f) (mm ²)	Amplitud (mm)	Frecuencia (1/día)	P(f) (mm ²)	Amplitud (mm)	Frecuencia (1/día)	P(f) (mm ²)	Amplitud (mm)
ALEC	0.0053	216.5366	1.18	0.0027	168.0307	1.05	0.0027	4124.8598	5.32
AUCA	0.0036	64.475	0.82	0.0053	84.4778	1.02	0.0018	2364.8762	5.82
BAHI	0.0797	19.1697	0.76	0.0024	19.6263	0.68	0.0024	97.3852	1.59
CHEC	0.0026	104.5523	1.08	0.1624	15.4592	0.42	0.0026	963.5916	3.30
CLEC	0.0019	296.6563	1.61	0.0038	95.3435	0.90	0.0038	2220.4138	4.41
COEC	0.0026	372.1104	1.94	0.0078	101.3936	0.93	0.0026	1636.8402	7.00
CUEC	0.0027	245.3209	0.81	0.0027	163.1746	0.66	0.0027	4929.5012	3.66
CXEC	0.0051	130.4177	1.36	0.0026	60.067	0.93	0.0026	665.695	3.11
ECEC	0.0052	213.767	1.16	0.0026	233.5904	1.22	0.0026	558.5794	1.96
EPEC	0.0049	166.6258	1.49	0.0025	77.1845	1.04	0.0025	729.8106	3.32
EREC	0.0035	168.6511	1.29	0.0053	108.1943	1.02	0.0018	673.8132	2.46
ESMR	0.0014	527.574	1.09	0.0005	508.6821	1.08	0.0024	4193.8698	3.21
GYEC	0.0005	2115.4158	2.23	0.0005	5931.4248	3.66	0.0005	4300.0515	3.17
GZEC	0.0053	218.8448	1.19	0.0013	82.4653	0.74	0.0027	2409.9943	4.01
IBEC	0.0011	546.6448	1.79	0.0011	878.131	2.27	0.0032	819.3617	2.20
LJEC	0.0028	1220.627	1.66	0.0014	240.7084	0.74	0.0028	13175.807	5.59
LREC	0.0042	74.9212	1.20	0.0042	59.3732	1.07	0.0042	190.2971	1.91
MAEC	0.0055	296.8769	1.09	0.0012	540.9168	1.51	0.0025	3390.792	3.60
MHEC	0.0056	153.8966	1.04	0.0056	49.0656	0.60	0.0014	748.0595	2.24
MTEC	0.0055	50.1005	0.90	0.0055	49.7549	0.90	0.0027	1001.9871	3.80
NJEC	0.0013	83.5905	0.73	0.0013	88.056	0.73	0.0129	292.5372	1.38
PDEC	0.0027	173.0216	1.22	0.0080	78.985	0.84	0.0040	1019.9025	2.98
PJEC	0.0052	70.5855	0.80	0.0013	531.2435	2.07	0.0026	1129.4379	3.25
PREC	0.0018	124.778	1.17	0.0053	53.625	0.77	0.0018	7016.0193	9.39
PTec	0.0030	2025.0044	2.72	0.0012	368.9593	1.18	0.0012	2777.2867	3.18
QUEM	0.0012	130.9386	1.13	0.0035	124.5676	1.51	0.0046	407.4283	2.66
QUI1	0.0066	21.2651	0.54	0.0166	10.2682	0.38	0.0066	408.9308	2.39
QVEC	0.0028	762.3773	1.95	0.0007	639.5389	1.56	0.0028	2281.6407	3.16
RIOP	0.0005	2024.9969	2.20	0.0010	263.1823	0.81	0.0030	5934.3779	3.78
SEEC	0.0053	545.5589	2.05	0.0172	42.4432	0.60	0.0027	682.4344	2.33
SNLR	0.0051	35.1329	0.70	0.0051	28.1343	0.70	0.0485	170.3192	1.64
STEC	0.0017	100.083	1.29	0.0017	143.3478	1.54	0.0033	949.8548	4.34
TNEC	0.0027	128.8216	0.78	0.0009	286.3724	1.19	0.0027	2466.7501	3.52

La Figura 4.15 representa de forma gráfica la estacionalidad en la estación CUEC donde se observa claramente la mayor amplitud de la componente vertical con respecto a las componentes horizontales y la estacionalidad anual como periodo predominante.

La Tabla 4.6 muestra los periodos predominantes de todas las estaciones REGME analizadas. Se puede observar que los periodos estacionales anuales son más evidentes en la componente vertical, mientras que en la componente horizontales (este y norte) se obtienen diferentes periodos estacionales ya sean anuales, semianuales (~180 días), trimestrales (~90 días), etc., y en algunos casos con otro tipo de periodicidad.

Figura 4.15. Serie temporal de la estación CUEC en sus tres componentes (e , n , u). Se muestra la estacionalidad (línea roja) en cada componente, con sus valores. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

Tabla 4.6. Periodos fundamentales y tiempos de observación de las estaciones REGME.

ESTACIÓN	Este		Norte		Vertical		Tiempo de observación
	1er Periodo Días	1er Periodo Años	1er Periodo Días	1er Periodo Años	1er Periodo Días	1er Periodo Años	Años
ALEC	188.00	0.52	376.00	1.03	376.00	1.03	2.06
AUCA	281.00	0.77	187.33	0.51	562.00	1.54	1.54
BAHI	12.55	0.03	414.00	1.13	414.00	1.13	1.13
CHEC	388.00	1.06	6.16	0.02	388.00	1.06	1.06
CLEC	530.00	1.45	265.00	0.73	265.00	0.73	1.45
COEC	384.00	1.05	128.00	0.35	384.00	1.05	2.10
CUEC	376.00	1.03	376.00	1.03	376.00	1.03	6.18
CXEC	196.00	0.54	392.00	1.07	392.00	1.07	1.07
ECEC	192.00	0.53	384.00	1.05	384.00	1.05	2.10
EPEC	203.00	0.56	406.00	1.11	406.00	1.11	1.11
EREC	283.00	0.78	188.67	0.52	566.00	1.55	1.55
ESMR	690.00	1.89	2070.00	5.67	414.00	1.13	5.65
GYEC	2100.00	5.75	2100.00	5.75	2100.00	5.75	5.75
GZEC	188.50	0.52	754.00	2.07	377.00	1.03	2.06
IBEC	952.00	2.61	952.00	2.61	317.33	0.87	2.60
LJEC	362.33	0.99	724.67	1.99	362.33	0.99	5.95
LREC	238.00	0.65	238.00	0.65	238.00	0.65	0.65
MAEC	180.44	0.49	812.00	2.22	406.00	1.11	4.45
MHEC	180.00	0.49	180.00	0.49	720.00	1.97	1.97
MTEC	182.00	0.50	182.00	0.50	364.00	1.00	1.20
NJEC	774.00	2.12	774.00	2.12	77.40	0.21	2.12
PDEC	376.00	1.03	125.33	0.34	250.67	0.69	2.06
PJEC	192.00	0.53	768.00	2.10	384.00	1.05	2.10
PREC	570.00	1.56	190.00	0.52	570.00	1.56	1.56
PTEC	330.80	0.91	827.00	2.27	827.00	2.27	4.53
QUEM	868.00	2.38	289.33	0.79	217.00	0.59	2.37
QUI1	151.00	0.41	60.40	0.17	151.00	0.41	0.82
QVEC	360.50	0.99	1442.00	3.95	360.50	0.99	3.95
RIOP	1994.00	5.46	997.00	2.73	332.33	0.91	6.20
SEEC	188.50	0.52	58.00	0.16	377.00	1.03	2.06
SNLR	196.00	0.54	196.00	0.54	20.63	0.06	1.07
STEC	600.00	1.64	600.00	1.64	300.00	0.82	1.84
TNEC	368.00	1.01	1104.00	3.02	368.00	1.01	3.22

En la Figura 4.16 se representan los resultados obtenidos para la PSD en todas las estaciones en sus tres componentes. Aquí se puede observar más claramente cómo se presenta un pico en el periodo anual en la componente vertical y en menor medida en la componente este y norte.

Figura 4.16. Densidad espectral de potencia de las estaciones REGME. El eje de las abscisas corresponde a las frecuencias (día⁻¹) y las ordenadas a la densidad espectral de potencia (mm²). Se encuentran representadas en escala logarítmica

Ruido

El método utilizado para obtener los diferentes tipos de ruido ha sido el análisis espectral para analizar los datos en el dominio de la frecuencia. Se ha utilizado la técnica propuesta por Lomb (1976) para obtener el espectro de potencia en series que

no están igualmente espaciadas y luego ajustar a una recta el logaritmo del espectro, donde el valor del índice espectral corresponde a la pendiente de la recta.

Los valores del índice espectral obtenidos para las estaciones REGME se encontraron en el rango $-1 < \alpha < 0$ (Tabla 4.7) que corresponde al ruido gaussiano fraccionario, considerado estacionario, es decir se trata de ruido sin dependencia con el tiempo.

Tabla 4.7. Valores de índice espectral de las estaciones REGME.

STATION	Este, α		Norte, α		Up, α	
ALEC	-0.51	± 0.14	-0.54	± 0.13	-0.48	± 0.14
AUCA	-0.31	± 0.18	-0.52	± 0.19	-0.29	± 0.17
BAHI	-0.60	± 0.42	-0.14	± 0.42	-0.21	± 0.42
CHEC	-0.31	± 0.27	-0.50	± 0.22	-0.47	± 0.23
CLEC	-0.50	± 0.18	-0.41	± 0.15	-0.55	± 0.17
COEC	-0.59	± 0.14	-0.52	± 0.13	-0.48	± 0.14
CUEC	-0.46	± 0.09	-0.55	± 0.09	-0.45	± 0.09
CXEC	-0.33	± 0.22	-0.64	± 0.19	-0.47	± 0.20
ECEC	-0.54	± 0.13	-0.68	± 0.13	-0.42	± 0.13
EPEC	-0.42	± 0.23	-0.61	± 0.18	-0.39	± 0.19
EREC	-0.61	± 0.15	-0.35	± 0.18	-0.52	± 0.16
ESMR	-0.48	± 0.09	-0.55	± 0.08	-0.41	± 0.09
GYEC	-0.64	± 0.08	-0.74	± 0.08	-0.47	± 0.08
GZEC	-0.41	± 0.13	-0.44	± 0.15	-0.42	± 0.14
IBEC	-0.64	± 0.13	-0.48	± 0.13	-0.64	± 0.12
LJEC	-0.60	± 0.08	-0.47	± 0.08	-0.67	± 0.08
LREC	-0.41	± 0.29	-0.38	± 0.24	-0.03	± 0.27
MAEC	-0.55	± 0.11	-0.49	± 0.11	-0.40	± 0.12
MHEC	-0.38	± 0.15	-0.41	± 0.15	-0.58	± 0.15
MTEC	-0.38	± 0.23	-0.23	± 0.23	-0.35	± 0.22
NJEC	-0.33	± 0.16	-0.31	± 0.16	-0.40	± 0.16
PDEC	-0.42	± 0.14	-0.39	± 0.14	-0.56	± 0.15
PJEC	-0.36	± 0.14	-0.67	± 0.15	-0.53	± 0.15
PREC	-0.57	± 0.17	-0.47	± 0.17	-0.71	± 0.15
PTEC	-0.63	± 0.12	-0.58	± 0.12	-0.51	± 0.13
QUEM	-0.29	± 0.20	-0.30	± 0.17	-0.25	± 0.19
QUI1	-0.49	± 0.21	-0.43	± 0.21	-0.65	± 0.22
QVEC	-0.58	± 0.14	-0.62	± 0.13	-0.47	± 0.12
RIOP	-0.52	± 0.08	-0.46	± 0.08	-0.56	± 0.09
SEEC	-0.82	± 0.15	-0.57	± 0.15	-0.47	± 0.13
SNLR	-0.42	± 0.12	-0.25	± 0.12	-0.02	± 0.12
STEC	-0.44	± 0.18	-0.58	± 0.20	-0.45	± 0.16
TNEC	-0.38	± 0.12	-0.44	± 0.12	-0.40	± 0.12

La Figura 4.17 muestra los valores de los índices espectrales para la estación CUEC en cada una de sus componentes, sus valores corresponden a ruido blanco fraccionario. El resultado para todas las estaciones se encuentra en el Anexo C.

Figura 4.17. Valores de los índices espectrales para la estación CUEC en cada una de sus componentes, sus valores corresponden a ruido blanco fraccional. Los valores de ambos ejes se encuentran en escala logarítmica. El eje de las abscisas corresponde al logaritmo de las frecuencias (dia^{-1}) y el eje de las ordenadas al logaritmo del espectro de potencia (mm^2).

4.3. Obtención de velocidades

4.3.1. Mediante Estimación Mínimo Cuadrática (EMC)

Obtenidos la tendencia, estacionalidad y tipo de ruido, se introducen en el modelo general de la serie para calcular conjuntamente los parámetros de los modelos de variaciones periódicas, la tendencia de la serie y ruido, de forma que se obtiene una mejor estimación en su magnitud y precisión.

Así tenemos que al reemplazar las expresiones 4.5 y 4.18 en 4.4 obtenemos:

$$y_i = y_o + rt_i + D \cdot \sin(2\pi ft_i) + E \cdot \cos(2\pi ft_i) + \varepsilon_i \quad (4.21)$$

donde y_i corresponde a los valores observados, t_i es el tiempo y f es la frecuencia del periodo fundamental de la serie obtenida en el análisis espectral, ε_i corresponde al modelo de ruido.

Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se calculan los parámetros ordenada en el origen y_o , pendiente r y los términos sinusoidales D y E .

La solución está dada por el siguiente sistema de matrices (Zhang et al., 1997):

$$X = (A' C^{-1} A)^{-1} A' C^{-1} Y \quad (4.22)$$

donde

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & \sin(2\pi f t_1) & \cos(2\pi f t_1) \\ 1 & t_2 & \sin(2\pi f t_2) & \cos(2\pi f t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & \sin(2\pi f t_n) & \cos(2\pi f t_n) \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

$$X = \begin{pmatrix} y_o \\ r \\ D \\ E \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

Cuando el tipo de ruido se corresponde a ruido blanco, la matriz C está dada por:

$$C = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

Por cuanto C^{-1} se convertirá en la matriz de pesos del sistema de ecuaciones. Si el ruido detectado es de tipo *flicker*, la matriz C está determinada por (Zhang et al., 1997):

$$C = \left(\left(\frac{3}{4} \right)^2 \frac{(24I - J_0)}{12} \right) \left[\left(\frac{3}{4} \right)^2 \frac{(24I - J_0)}{12} \right] \quad (4.27)$$

donde J_0 se calcula de la siguiente manera:

$$J_0 = \begin{cases} 0 & ; i = j \\ \frac{\log(j-i)}{\log 2} + 2 & ; i < j \end{cases} \quad (4.28)$$

Un mayor detalle para la determinación de esta matriz para los diferentes tipos de ruido se encuentra en el apartado 4.3.2.1.

La Figura 4.18 muestra el modelo resultante de la estimación mínimo cuadrático de los valores ajustados en las tres componentes siendo más visible en aquellos datos que se encuentran con mayor dispersión, las figuras del modelo resultante de todas las estaciones se encuentran en el Anexo D.

Figura 4.18. Serie temporal de la estación CUEC en sus tres componentes (e, n, u). Los puntos negros representan los valores observados con su incertidumbre (barra negra), la línea azul la tendencia y la línea verde la estacionalidad obtenida antes del ajuste. La línea roja muestra la estacionalidad obtenida después del ajuste. El eje de abscisas corresponde al tiempo expresado en años, el eje de ordenadas representa la posición de la estación en milímetros.

Una vez realizados los ajustes descritos en el apartado anterior se obtienen las velocidades absolutas con sus respectivas precisiones (Tabla 4.8), las cuales muestran una mejora en su estimación con respecto a las velocidades obtenidas sin considerar estacionalidad (Tabla 4.3).

Tabla 4.8. Velocidades GNSS de las estaciones REGME/IGS obtenidas en este estudio con EMC incluyendo la estacionalidad y ruido blanco. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año. $wrmse$, $wrmsn$ y $wrmsu$: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm.

	Posición			V_e (mm/a)	V_n (mm/a)	V_u (mm/a)	σV_e	σV_n	σV_u	$wrmse$	$wrmsn$	$wrmsu$
	Long. (°E)	Lat. (°N)	Elev. (m)									
ALEC	-78.847	-2.202	2383.7	5.27	6.38	2.00	0.34	0.28	0.79	2.37	1.96	5.56
AUCA	-76.883	-0.641	313.9	-2.21	10.85	-3.42	0.51	0.41	1.32	2.12	1.71	5.44
BAHI	-80.398	-0.659	53.5	5.82	17.29	-3.24	0.70	0.9	1.76	1.46	1.89	3.74
BOGT	-74.081	4.640	2576.8	0.24	14.03	-33.04	0.06	0.04	0.18	2.23	1.68	6.62
BRAZ	-47.878	-15.95	1106.0	-5.68	13.25	2.30	0.09	0.06	0.23	3.33	2.34	7.54
BRFT	-38.426	-3.877	21.7	-4.28	12.99	0.62	0.09	0.06	0.20	3.30	2.35	10.21
BRMU	-64.415	32.22	-11.6	-10.17	8.87	-2.22	0.08	0.08	0.15	3.20	3.11	5.48
CHEC	-77.814	-0.339	1643.7	4.78	11.30	-1.11	0.61	0.63	1.59	1.70	1.81	4.51
CLEC	-79.956	-4.103	2024.4	-0.54	3.83	5.07	0.45	0.41	1.18	2.00	1.84	5.39
COEC	-77.787	0.716	3657.1	5.67	11.15	3.10	0.37	0.26	0.64	2.53	1.80	4.50
CRO1	-64.35	17.45	-31.5	10.29	12.65	-0.60	0.06	0.05	0.18	2.29	1.81	6.95
CUEC	-79.003	-2.883	2631.2	-0.26	7.96	1.65	0.06	0.05	0.13	1.88	1.62	4.12
CXEC	-78.615	-0.935	2813.7	4.35	9.39	-0.31	0.75	0.66	1.78	1.90	1.69	4.57
ECEC	-79.452	-0.272	284.9	12.32	14.50	-8.95	0.29	0.30	0.72	2.02	2.08	5.12
EPEC	-78.446	-0.315	2519.1	5.01	8.31	-3.16	0.71	0.67	1.92	1.90	1.81	5.22
EREC	-78.651	-1.671	2801.0	5.07	5.07	7.47	0.46	0.37	1.03	2.00	1.71	4.69
ESMR	-79.724	0.935	252.9	17.21	15.92	3.03	0.06	0.05	0.16	1.82	1.65	5.28
GLPS	-90.181	-0.444	1.8	50.77	10.62	-0.18	0.05	0.04	0.11	1.67	1.64	4.19
GOLD	-116.53	35.25	986.7	-16.25	-5.29	0.00	0.08	0.08	0.18	3.28	3.03	6.86
GUAT	-90.311	14.35	1519.9	4.10	2.36	-1.68	0.07	0.06	0.16	2.46	2.00	5.63
GYEC	-79.892	-2.149	34.9	5.90	9.45	-3.98	0.06	0.07	0.15	2.10	2.18	4.78
GZEC	-78.581	-3.401	884.0	-0.24	6.33	1.59	0.28	0.25	0.70	1.91	1.76	4.89
IBEC	-78.116	0.350	2246.3	4.94	13.08	-1.69	0.24	0.21	0.59	2.16	1.84	5.44
ISPA	-109.2	-27.07	112.5	66.58	-7.00	-0.64	0.09	0.07	0.23	2.68	1.72	8.04
LJEC	-79.199	-3.988	2143.5	-1.02	7.82	2.28	0.08	0.05	0.22	3.15	1.71	7.91
LPGS	-57.932	-34.91	29.9	-3.21	12.90	-3.80	0.12	0.12	0.31	3.04	3.16	7.58
LREC	-75.986	-1.615	206.5	-11.28	7.24	3.19	1.44	1.30	3.58	1.98	1.79	5.00
MAEC	-78.118	-2.305	1062.5	0.68	8.47	1.60	0.10	0.09	0.27	2.11	1.82	5.54
MANA	-86.146	12.09	71.0	7.12	7.02	-1.66	0.05	0.06	0.16	1.89	2.08	6.11
MDO1	-104.01	30.41	2004.5	-11.93	-9.95	3.37	0.11	0.10	0.23	2.87	2.72	6.38
MHEC	-79.957	-3.261	55.1	3.89	9.82	0.70	0.29	0.28	0.77	1.97	1.95	5.26
MTEC	-76.982	-2.069	301.7	-7.73	8.91	7.29	1.03	0.95	2.73	2.04	1.90	5.44
NJEC	-79.621	-2.675	51.4	5.57	6.80	1.36	0.29	0.26	0.85	2.04	1.87	6.11
PARC	-70.88	-53.14	22.3	4.15	11.22	-2.35	0.10	0.12	0.26	3.46	4.64	9.02
PDEC	-79.131	-4.648	1143.4	1.74	6.29	6.26	0.34	0.33	1.01	1.99	1.90	5.80
PJEC	-80.425	-1.552	146.8	16.05	9.75	-4.28	0.28	0.34	0.75	1.81	2.18	4.86
PREC	-77.963	-1.708	904.4	-1.03	4.28	13.75	0.48	0.40	1.48	2.10	1.80	6.46
PTec	-80.475	-1.058	61.3	8.22	13.79	3.41	0.11	0.09	0.22	2.41	1.93	4.96
QUEM	-78.497	-0.237	3054.7	9.48	14.38	-3.50	0.59	0.51	1.41	2.11	1.83	5.08
QUI1	-78.494	-0.215	2922.6	12.79	6.95	-11.01	0.48	0.54	1.83	0.99	1.12	3.72
QVEC	-79.47	-1.012	120.3	8.74	8.13	1.00	0.16	0.13	0.34	2.58	2.13	5.66
RIOP	-78.651	-1.651	2793.0	1.63	6.92	0.69	0.07	0.05	0.18	2.16	1.63	5.73
SCUB	-75.454	20.00	21.9	-5.84	4.82	-1.36	0.08	0.09	0.28	1.81	2.30	6.65
SEEC	-80.904	-2.220	29.8	9.85	13.14	-1.18	0.38	0.25	0.62	2.71	1.71	4.31

	Posición			Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Vu (mm/a)	σ_{Ve}	σ_{Vn}	σ_{Vu}	wrms _e	wrms _n	wrms
	Long. (°E)	Lat. (°N)	Elev. (m)									
SNLR	-78.847	1.293	23.1	10.36	8.53	-3.55	0.84	0.76	2.19	2.10	1.93	5.46
SSIA	-89.066	13.42	664.4	8.67	3.55	2.14	0.05	0.06	0.16	1.69	2.34	5.85
STEC	-78.011	-3.051	321.7	0.50	8.27	2.51	0.49	0.56	1.53	1.91	2.19	5.94
TNEC	-77.816	-0.990	547.1	-1.12	12.00	0.12	0.17	0.17	0.48	2.09	2.03	5.90
UNSA	-65.408	-24.73	1257.8	-0.42	11.63	-1.04	0.08	0.07	0.19	2.89	2.58	6.16
USNO	-77.036	38.55	48.9	-14.51	2.34	0.49	0.06	0.07	0.23	1.88	2.42	6.89

Al comparar las incertidumbres obtenidas con la primera estimación de la velocidad (Tabla 4.3) observamos que existe una mejoría en todas las componentes, con valores de 0.2 mm/año, en la componente horizontal, y 0.7 mm/año, en la componente vertical.

En cuanto a la variabilidad de las posiciones alrededor de la tendencia tenemos que los valores de los *wrms* mejoran hasta en 3 mm en la componente horizontal, principalmente en las estaciones con periodos de datos superiores a 4.5 años, como GUAT, GYEC, MANA, PTEC, RIOP, SSIA y UNSA.

Los valores de las velocidades también varían de -1.0 mm/año a 2.5 mm/año, en la componente horizontal, y de -7.0 mm/año a 5.0 mm/año en la componente vertical. Una excepción es la componente vertical de estación PREC, que varía hasta -13.4 mm/año.

La Tabla 4.9 muestra una comparación entre precisiones antes y después de considerar la estacionalidad. Como se puede apreciar hay una mejora de un 11% de media para todas las componentes.

Tabla 4.9. Comparación de precisiones antes y después de aplicar estacionalidad.

Estadísticos	Sin considerar estacionalidad	Considerando estacionalidad	Porcentaje de mejora (%)
σ_e (mm/a)	0.33	0.29	9.07
σ_n (mm/a)	0.30	0.28	8.33
σ_u (mm/a)	0.86	0.77	10.42
<i>rms_e</i> (mm)	2.58	2.32	9.98
<i>rms_n</i> (mm)	2.44	2.12	13.10
<i>rms_u</i> (mm)	6.60	5.88	10.88
<i>wrms_e</i> (mm)	2.49	2.24	10.11
<i>wrms_n</i> (mm)	2.38	2.05	13.73
<i>wrms_u</i> (mm)	6.47	5.77	10.77

La solución multianual SIR15P01 de SIRGAS (Sánchez y Drewes, 2016) tiene 22 estaciones en común con las de nuestro estudio. La Tabla 4.10 muestra una comparación de las velocidades obtenidas en este apartado (EMC con ruido blanco) con las obtenidas en la solución multianual SIR15P01. La Figura 4.19 muestra gráficamente estas diferencias.

Tabla 4.10. Comparación de las velocidades absolutas obtenidas en este estudio con EMC con ruido blanco, con la solución de SIRGAS SIR15P01. Velocidades en mm/año. Años Obs.: intervalo de tiempo de la serie temporal utilizado para calcular la velocidad en cada solución.

Est.	Solución SIR15P01				Solución EMC				Diferencias SIR15P01 - EMC		
	Ve	Vn	Vu	Años Obs.	Ve	Vn	Vu	Años Obs.	Ve	Vn	Vu
ALEC	7.60	9.30	-2.70	1.55	5.27	6.38	2.00	2.06	2.33	2.92	-4.70
AUCA	-2.30	9.50	-0.20	2.72	-2.21	10.85	-3.42	1.54	-0.09	-1.35	3.22
CLEC	-1.80	6.50	-6.20	1.55	-0.54	3.83	5.07	1.45	-1.26	2.67	-11.27
COEC	2.60	13.60	-0.50	1.55	5.67	11.15	3.10	2.10	-3.07	2.45	-3.60
CUEC	0.60	8.30	-2.10	3.99	-0.26	7.96	1.65	6.18	0.86	0.34	-3.75
ECEC	12.90	18.20	-14.20	1.55	12.32	14.50	-8.95	2.10	0.58	3.70	-5.25
EREC	3.90	7.10	-4.70	1.53	5.07	5.07	7.47	1.55	-1.17	2.03	-12.17
ESMR	16.30	16.90	0.10	4.28	17.21	15.92	3.03	5.65	-0.91	0.98	-2.93
GYEC	5.90	7.50	-5.00	3.45	5.90	9.45	-3.98	5.75	0.00	-1.95	-1.02
GZEC	-0.30	7.40	-4.60	1.53	-0.24	6.33	1.59	2.06	-0.06	1.07	-6.19
IBEC	1.80	10.20	-5.80	1.55	4.94	13.08	-1.69	2.60	-3.14	-2.88	-4.11
LJEC	-1.30	8.30	-0.50	4.98	-1.02	7.82	2.28	5.95	-0.28	0.48	-2.78
MAEC	-0.30	8.70	-0.70	3.99	0.68	8.47	1.60	4.45	-0.98	0.23	-2.30
NJEC	6.10	5.70	-6.70	1.78	5.57	6.80	1.36	2.12	0.53	-1.10	-8.06
PJEC	11.10	9.70	-9.50	1.53	16.05	9.75	-4.28	2.10	-4.95	-0.05	-5.22
PTEC	6.90	13.30	5.70	2.07	8.22	13.79	3.41	4.53	-1.32	-0.49	2.29
QUEM	6.20	10.70	-2.50	3.12	9.48	14.38	-3.50	2.37	-3.28	-3.68	1.00
QVEC	8.60	12.40	-4.60	3.99	8.74	8.13	1.00	3.95	-0.14	4.27	-5.60
RIOP	1.30	6.80	-0.70	5.08	1.63	6.92	0.69	6.20	-0.33	-0.12	-1.39
SNLR	11.00	10.60	-1.10	2.74	10.36	8.53	-3.55	1.07	0.64	2.07	2.45
STEC	-1.00	7.00	-0.60	1.65	0.50	8.27	2.51	1.84	-1.50	-1.27	-3.11
TNEC	-1.00	9.90	1.90	1.78	-1.12	12.00	0.12	3.22	0.12	-2.10	1.78

Figura 4.19. Comparación de las velocidades absolutas ITRF2008 obtenidas en este estudio con EMC con ruido blanco (en rojo), con la solución de SIRGAS SIR15P01 (en azul).

Analizando estas diferencias se puede apreciar que 14 estaciones tienen diferencias inferiores a 2 mm en la componente horizontal, estas son: AUCA, CUEC, EREC, ESMR, GYEC, GZEC, LJEC, MAEC, NJEC, PTEC, RIOP, SNLR y TNEC. El resto de estaciones tienen diferencias superiores a 2 mm y corresponden a estaciones de la solución SIR15P01 con periodos de observación menores a 1.6 años, a excepción de las estaciones PJEC y QVEC con más de 2 años de observaciones. La diferencia se debe a que en estas dos estaciones se han detectado y corregido *offsets* (ver Tabla 4.2).

En las estaciones COEC, ECEC y IBEC se obtienen diferencias de ~3 mm/año de media en valor absoluto en la componente horizontal. En este caso, los tiempos de observación de las series temporales utilizados en la solución multianual SIR15P01 son de 1.6 años, mientras que en nuestro estudio se han usado periodos de observación superiores a los 2 años de datos, siendo estos resultados más fiables.

Una excepción es la estación QUEM con diferencias de 3.3 y 3.6 mm/año para la componente este y norte, respectivamente, y una serie temporal mayor de 2 años. Si analizamos los datos de la serie temporal de esta estación (Tabla 4.1) se puede apreciar que, aunque su periodo de observación es de 2.4 años, sólo son usados un 26.7% de los datos correspondientes a este periodo (231 datos), mientras que el intervalo de tiempo utilizado para la solución SIR15P01 es de 3.1 años, por lo que se cree que los resultados obtenidos en la solución SIR15P01 podrían ser más fiables, en este caso.

Al comparar nuestras estaciones con datos menores a dos años con las estaciones de la solución SIR15P01 con más de 2.5 años de observación, como es el caso de las estaciones AUCA y SNLR, observamos que las diferencias obtenidas son pequeñas. Esto nos hace suponer que la introducción de las variaciones cíclicas, la tendencia y el ruido en series con periodos de tiempo relativamente cortos (aproximadamente dos años) hacen que mejore la estimación de los valores de la velocidad, aproximándose a valores de velocidad resultantes de series con periodos más largos.

Aunque el índice espectral obtenido en todas las series, tanto largas como cortas, muestra un tipo de ruido blanco, a modo de comprobación, se ha procedido a realizar una estimación de las velocidades e incertidumbres incluyendo ruido *flicker* (expresiones 4.27 y 4.28) en las series mediante EMC. La Tabla 4.11 y Figura 4.20 muestran los valores obtenidos en esta solución.

Tabla 4.11. Velocidades GNSS de las estaciones REGME obtenidas en este estudio con EMC incluyendo ruido *flicker*. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año.

Est. GNSS	V_e	V_n	V_u	σV_e	σV_n	σV_u
ALEC	6.57	6.90	3.46	0.19	0.16	0.50
AUCA	-0.55	10.00	-0.28	0.28	0.23	0.84
BAHI	7.48	20.20	-0.50	0.41	0.55	1.00
CHEC	3.06	10.60	4.97	0.35	0.33	0.94
CLEC	-1.15	3.02	-1.01	0.27	0.23	0.73
COEC	4.69	10.83	4.40	0.22	0.15	0.40
CUEC	0.12	7.77	0.49	0.04	0.03	0.08
CXEC	6.64	9.00	2.97	0.45	0.38	1.06
ECEC	13.34	14.65	-7.47	0.16	0.17	0.38
EPEC	7.10	8.53	1.36	0.44	0.37	1.10
EREC	3.43	4.37	3.42	0.26	0.21	0.63
ESMR	17.22	16.12	3.13	0.03	0.03	0.09
GYEC	5.68	10.56	-2.95	0.05	0.06	0.10
GZEC	0.51	5.85	1.22	0.16	0.14	0.42
IBEC	4.58	12.57	-0.85	0.15	0.14	0.31
LJEC	-1.10	7.64	2.54	0.05	0.03	0.13
LREC	-9.83	6.19	2.93	0.82	0.73	1.92
MAEC	0.96	8.61	1.68	0.05	0.05	0.15
MHEC	3.03	10.22	-2.40	0.17	0.15	0.42
MTEC	-4.36	10.02	12.19	0.58	0.52	1.66
NJEC	5.42	5.73	1.52	0.16	0.14	0.44
PDEC	1.02	5.31	-1.80	0.21	0.18	0.58
PJEC	13.26	8.38	-5.29	0.20	0.23	0.44
PREC	-0.79	4.49	0.05	0.26	0.22	1.13
PTEC	8.82	12.18	3.55	0.08	0.08	0.13
QUEM	8.80	10.93	-0.15	0.56	0.58	0.87
QUI1	11.12	7.80	-7.68	0.28	0.29	1.06
QVEC	9.72	10.68	1.67	0.09	0.09	0.20
RIOP	1.74	6.97	1.07	0.05	0.03	0.10
SEEC	11.40	12.68	-0.49	0.23	0.13	0.35
SNLR	10.47	8.37	-3.67	0.45	0.40	1.15
STEC	2.01	8.16	0.51	0.28	0.33	0.87
TNEC	-0.45	13.02	3.03	0.09	0.16	0.27

La Tabla 4.12 y Figura 4.20 muestran los valores obtenidos a partir de la comparación de las soluciones obtenidas por EMC con ruido blanco y *flicker*. Las diferencias en las velocidades se encuentran en las estaciones cuyas series tienen un periodo de datos inferiores a 2 años y/o porcentajes de datos perdidos superiores al 35%, es decir en series con menos de 300 observaciones aproximadamente (BAHI, CXEC, MTEC, EPEC, PJEC y MTEC). Las precisiones de las velocidades son más optimistas cuando se introduce al modelo el ruido *flicker*, obteniendo una relación de 1.7 veces de media en todas sus componentes (Tabla 4.12) entre las incertidumbres obtenidas con ruido blanco y *flicker*.

Tabla 4.12. Diferencia ente las velocidades de las estaciones REGME obtenidas en este estudio con EMC incluyendo ruido blanco y ruido *flicker*. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (Ve, Vn, Vu) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) obtenidas en la solución con ruido blanco y *flicker*.

Est. GNSS	Diferencia velocidades EMC ruido blanco y <i>flicker</i>			Relación entre incertidumbres EMC ruido blanco y <i>flicker</i>		
	Ve	Vn	Vu	σV_e	σV_n	σV_u
ALEC	-1.3	-0.5	-1.5	1.8	1.8	1.6
AUCA	-1.7	0.9	-3.1	1.8	1.8	1.6
BAHI	-1.7	-2.9	-2.7	1.7	1.6	1.8
CHEC	1.7	0.7	-6.1	1.7	1.9	1.7
CLEC	0.6	0.8	6.1	1.7	1.8	1.6
COEC	1.0	0.3	-1.3	1.7	1.7	1.6
CUEC	-0.4	0.2	1.2	1.5	1.7	1.6
CXEC	-2.3	0.4	-3.3	1.7	1.7	1.7
ECEC	-1.0	-0.2	-1.5	1.8	1.8	1.9
EPEC	-2.1	-0.2	-4.5	1.6	1.8	1.7
EREC	1.6	0.7	4.1	1.8	1.8	1.6
ESMR	0.0	-0.2	-0.1	2.0	1.7	1.8
GYEC	0.2	-1.1	-1.0	1.2	1.2	1.5
GZEC	-0.8	0.5	0.4	1.8	1.8	1.7
IBEC	0.4	0.5	-0.8	1.6	1.5	1.9
LJEC	0.1	0.2	-0.3	1.6	1.7	1.7
LREC	-1.5	1.1	0.3	1.8	1.8	1.9
MAEC	-0.3	-0.1	-0.1	2.0	1.8	1.8
MHEC	0.9	-0.4	3.1	1.7	1.9	1.8
MTEC	-3.4	-1.1	-4.9	1.8	1.8	1.6
NJEC	0.2	1.1	-0.2	1.8	1.9	1.9
PDEC	0.7	1.0	8.1	1.6	1.8	1.7
PJEC	2.8	1.4	1.0	1.4	1.5	1.7
PREC	-0.2	-0.2	13.7	1.8	1.8	1.3
PTEC	-0.6	1.6	-0.1	1.4	1.1	1.7
QUEM	0.7	3.5	-3.4	1.1	0.9	1.6
QUI1	1.7	-0.9	-3.3	1.7	1.9	1.7
QVEC	-1.0	-2.6	-0.7	1.8	1.4	1.7
RIOP	-0.1	0.0	-0.4	1.4	1.7	1.8
SEEC	-1.6	0.5	-0.7	1.7	1.9	1.8
SNLR	-0.1	0.2	0.1	1.9	1.9	1.9
STEC	-1.5	0.1	2.0	1.8	1.7	1.8
TNEC	-0.7	-1.0	-2.9	1.9	1.1	1.8

Figura 4.20. Diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas en este estudio con EMC incluyendo ruido blanco (en rojo) y ruido *flicker* (en negro). Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza.

4.3.2. Mediante estimación máxima verosimilitud (MLE) con el software CATS

Con el objetivo de contrastar las velocidades, incertidumbres y ruido existente en las series obtenidos en el apartado anterior, se ha realizado un nuevo cálculo utilizando para ello el software CATS (*Create and Analyze Time Series*), el cual ajusta un modelo multiparamétrico a una serie de tiempo mientras se analizan simultáneamente los residuos para evaluar el tipo y la magnitud del ruido estocástico. CATS resuelve para todos los parámetros en un procedimiento de dos partes: la función lineal que incluye una intercepción, una pendiente (velocidad) y cualquier periodicidad conocida (por ejemplo, términos anuales y semestrales), mientras que la parte no lineal permite estimar los parámetros y amplitudes de varios modelos específicos de ruido (Williams, 2008).

Para evaluar el contenido de ruido CATS puede utilizar tres métodos diferentes: (1) mediante estimación de máxima verosimilitud (MLE) (p. ej. Langbein y Johnson, 1997), (2) estimación espectral a través de MLE aproximado de Whittle en el dominio de la frecuencia (Beran, 1994) y (3) un método empírico basado en el trabajo descrito en Williams (2003a). En este caso se ha elegido la opción de Williams (2003a).

4.3.2.1. Descripción del método de máxima verosimilitud

Con el fin de medir las cantidades de ruido blanco y ruido de ley de potencia (*flicker* y *random walk*) en la serie temporal usando MLE, la función de probabilidad se maximiza ajustando la matriz de covarianza de datos. Por lo tanto (Williams, 2008):

$$lik(x, C) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}(\det C)^{1/2}} \exp(-0.5x' C^{-1}x) \quad (4.29)$$

Tomando logaritmos neperianos podemos escribirlo de la siguiente manera:

$$\ln[lik(x, C)] = -0.5[\ln(\det C) + x' C^{-1}x + N\ln(2\pi)] \quad (4.30)$$

Donde *lik* es la probabilidad, *x* el vector de datos, *C* la matriz de covarianza y *det* el determinante de la matriz. Maximizando la ecuación 4.30 obtenemos los parámetros deseados.

Cada componente de las coordenadas medidas puede ser modelada mediante una estimación lineal, tal que (Zhang et al., 1997):

$$x(t_i) = x_0 + r t_i + \varepsilon_x(t) \quad (4.31)$$

donde x_0 es la intercepción con el eje de las abscisas y *r* la velocidad, suponiendo una acumulación lineal de deformación.

En forma matricial tendremos

$$y(t) = Ax(t) + \varepsilon(t) \quad (4.32)$$

con

$$A = \begin{pmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_N \end{pmatrix}; \quad y = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}; \quad x = \begin{pmatrix} x_0 \\ r \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

El término de error se considera como una combinación lineal de una secuencia de variables aleatorias no correlacionadas, α , y una secuencia de ruido coloreado, β , tal que:

$$\varepsilon(t) = a\alpha(t) + b_k\beta(t) \quad (4.34)$$

Los coeficientes *a* y b_k son las magnitudes de ruido blanco y coloreado respectivamente. La matriz de covarianza de $C_x(t)$ está dada por:

$$C_x(t) = E\{\varepsilon^T(t)\varepsilon(t)\} = a^2I + b^2J_k \quad (4.35)$$

donde *I* es la matriz identidad y J_k la matriz de covarianza del ruido coloreado. Estas matrices tienen dimensión *N*, es decir el número total de puntos de la serie. El subíndice *k* denota el índice espectral del ruido coloreado ($k=0$ para ruido blanco, $k=1$ para ruido *flicker* y $k=2$ para ruido *random walk*).

Las matrices de covarianza para cada tipo de ruido se dan a continuación:

Para ruido blanco ($k=0$), $b_k=0$, entonces

$$C_x = a^2I \quad (4.36)$$

Es decir, la matriz covarianza es diagonal e independiente del tiempo.

Para ruido *flicker* ($k=1$), en este caso $a=0$, entonces:

$$C_x = J_1 = \left[\left(\frac{3}{4} \right)^2 \frac{(24I - J_0)}{12} \right] \quad (4.37)$$

donde los elementos (i, j) de la matriz simétrica J_0 están dados por

$$J_0 = \begin{cases} 0 & ; i = j \\ \frac{\log(j-i)}{\log 2} + 2 & ; i < j \end{cases} \quad (4.38)$$

Para ruido *random walk* ($k=2$), en este caso $a=0$, entonces:

$$C_x(t) = J_2(t) = f_s^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & 2 & \dots & 2 \\ 1 & 2 & 3 & \dots & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & 3 & \dots & N \end{pmatrix}; \quad f_s = \frac{N-1}{T} \quad (4.39)$$

donde f_s es la frecuencia de muestreo dada en año⁻¹, T es el intervalo total de observación en años y N el número de observaciones medidas.

Las Tablas 4.13 y 4.14 muestran las velocidades e incertidumbres obtenidas con MLE incluyendo ruido blanco y ruido *flicker*, respectivamente.

Tabla 4.13. Velocidades GNSS de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido blanco. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año.

Est. GNSS	V_e	V_n	V_u	σV_e	σV_n	σV_u
ALEC	6.21	6.58	1.38	0.68	0.55	1.71
AUCA	-1.52	9.97	-0.46	0.53	0.61	2.09
BAHI	6.53	18.41	-1.17	0.69	1.02	2.07
CHEC	3.94	10.66	2.99	0.85	1.06	2.62
CLEC	-1.06	3.43	-0.82	0.90	0.60	2.45
COEC	5.60	11.27	2.46	0.82	0.49	1.42
CUEC	0.49	7.58	1.31	0.23	0.13	0.38
CXEC	6.88	9.32	0.12	1.03	1.09	2.77
ECEC	13.24	14.29	-8.13	0.60	0.71	1.01
EPEC	7.35	8.72	-1.08	1.14	1.10	2.90
EREC	3.91	4.82	2.64	0.83	0.57	2.08
ESMR	17.11	16.05	2.93	0.16	0.14	0.45
GYEC	5.38	10.88	-2.60	0.29	0.38	0.46
GZEC	0.42	6.21	1.49	0.52	0.38	1.28
IBEC	4.59	12.66	-0.77	0.52	0.48	1.32
LJEC	-0.97	7.67	2.16	0.40	0.12	1.32
LREC	-8.91	7.26	1.46	1.65	1.37	2.36
MAEC	0.64	8.01	1.51	0.25	0.22	0.61
MHEC	3.25	9.82	-3.43	0.59	0.51	1.75
MTEC	-6.37	9.93	9.60	0.99	0.84	3.05
NJEC	5.29	5.74	1.65	0.56	0.44	1.61
PDEC	1.88	6.30	2.37	0.64	0.45	1.43
PJEC	11.38	10.55	-4.33	0.70	0.82	1.47
PREC	-1.16	5.04	4.82	0.86	0.57	4.20
PTEC	8.49	11.92	4.26	0.46	0.46	0.53
QUEM	6.38	7.96	1.21	1.18	1.35	1.48
QUI1	11.47	7.58	-8.84	0.75	0.73	3.52
QVEC	9.13	10.41	1.05	0.48	0.40	0.66
RIOP	1.42	6.97	1.12	0.24	0.11	0.56
SEEC	11.93	13.23	-1.15	1.48	0.45	1.08
SNLR	10.79	7.74	-3.69	0.86	0.61	1.08
STEC	1.07	8.59	-0.41	0.62	0.88	1.89
TNEC	-0.50	12.62	2.17	0.27	0.67	0.79

Tabla 4.14. Velocidades GNSS de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido *flicker*. Las componentes de velocidad este, norte y vertical (Ve, Vn, Vu) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año.

Est. GNSS	Ve	Vn	Vu	σV_e	σV_n	σV_u
ALEC	6.38	6.71	-0.33	1.45	1.23	3.73
AUCA	-0.86	10.30	-1.68	2.13	1.61	5.46
BAHI	7.59	18.39	-2.25	2.05	2.61	5.14
CHEC	3.08	9.70	6.40	2.41	2.23	6.21
CLEC	-0.75	3.04	-2.21	1.90	1.82	4.82
COEC	5.77	11.16	2.21	1.38	1.10	2.90
CUEC	0.49	7.52	1.26	0.33	0.31	0.84
CXEC	6.84	9.35	0.86	2.76	2.12	6.10
ECEC	13.58	14.10	-7.83	1.27	1.20	3.41
EPEC	7.08	8.61	-2.68	2.65	2.16	6.72
EREC	3.70	4.54	3.70	1.76	1.58	4.15
ESMR	17.10	16.07	3.00	0.40	0.37	1.12
GYEC	5.40	10.88	-3.09	0.36	0.36	1.10
GZEC	0.65	6.32	0.59	1.31	1.19	3.40
IBEC	4.66	12.64	-0.41	1.04	0.97	2.62
LJEC	-0.94	7.62	2.14	0.61	0.37	1.50
LREC	-8.76	6.02	2.60	4.76	4.35	12.57
MAEC	0.53	8.02	2.19	0.59	0.55	1.67
MHEC	3.10	10.07	-4.88	1.27	1.24	3.30
MTEC	-5.42	9.84	7.57	3.07	2.93	8.52
NJEC	5.46	5.55	2.73	1.25	1.17	3.37
PDEC	2.01	6.54	0.88	1.33	1.26	3.66
PJEC	11.49	10.65	-4.66	1.19	1.18	3.01
PREC	-1.23	5.65	5.06	1.78	1.67	5.18
PTec	8.49	11.91	3.95	0.46	0.47	1.37
QUEM	6.41	7.97	0.35	1.44	1.25	3.30
QUI1	10.81	8.34	-8.83	1.69	1.89	5.81
QVEC	9.18	10.35	-0.01	0.67	0.63	1.87
RIOP	1.27	7.02	1.42	0.44	0.39	1.17
SEEC	11.88	13.34	-1.98	1.20	1.09	2.90
SNLR	10.43	8.46	-3.07	2.98	2.84	8.37
STEC	0.90	8.54	-0.41	1.71	1.77	5.43
TNEC	-0.52	12.50	2.47	0.95	0.90	2.76

La Figura 4.21 muestra las velocidades horizontales de ambas soluciones con sus respectivas incertidumbres. La Tabla 4.15 y Figura 4.21 muestran las diferencias entre ambas soluciones MLE con distinto tipo de ruido, blanco y *flicker*. Las diferencias en las velocidades horizontales están prácticamente por debajo de 1 mm/año, siendo estas diferencias algo mayores en la componente vertical para algunas estaciones (p. ej. EPEC). Las precisiones de las velocidades son más conservadoras cuando se introduce al modelo el ruido *flicker*, obteniendo una relación de 0.5 veces de media en todas sus componentes (Tabla 4.15) entre las incertidumbres obtenidas con ruido blanco y *flicker*.

Tabla 4.15. Diferencia ente las velocidades de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido blanco y ruido *flicker*. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (Ve, Vn, Vu) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) obtenidas en la solución con ruido blanco y *flicker*.

Est. GNSS	Diferencia velocidades MLE ruido blanco y <i>flicker</i>			Relación entre incertidumbres MLE ruido blanco y <i>flicker</i>		
	Ve	Vn	Vu	σV_e	σV_n	σV_u
ALEC	-1.1	0.0	1.1	0.3	0.4	0.4
AUCA	-0.2	1.2	-1.1	0.3	0.3	0.2
BAHI	0.0	0.0	0.9	0.8	1.1	0.4
CHEC	0.4	-0.7	-0.6	0.3	0.2	0.1
CLEC	0.0	0.0	-0.7	0.4	0.5	0.5
COEC	-1.0	0.1	2.0	0.3	0.3	0.4
CUEC	0.2	0.1	0.0	0.4	0.5	0.3
CXEC	0.3	0.1	1.6	0.4	0.5	0.4
ECEC	0.7	-0.8	0.0	0.4	0.4	0.6
EPEC	0.9	1.0	-3.4	0.4	0.5	0.4
EREC	-0.7	-0.3	1.2	0.2	0.4	0.4
ESMR	0.1	-0.6	-0.2	0.5	0.3	0.8
GYEC	0.2	0.3	-1.1	0.5	0.4	0.5
GZEC	-0.1	-0.1	0.3	0.6	0.7	0.5
IBEC	-0.2	0.1	0.3	0.6	0.4	0.5
LJEC	-0.3	0.4	1.4	0.5	0.3	0.5
LREC	-0.1	-0.2	1.5	0.5	0.4	0.4
MAEC	0.0	-0.1	0.8	1.2	0.4	0.4
MHEC	0.2	-0.3	1.5	0.5	0.4	0.5
MTEC	-0.2	-0.1	1.7	0.5	0.4	0.5
NJEC	-0.2	-0.1	0.9	0.4	0.3	0.4
PDEC	-0.2	0.2	-1.1	0.4	0.4	0.5
PJEC	-0.3	0.2	-0.3	0.5	0.6	0.3
PREC	-0.1	0.0	-0.4	0.5	0.5	0.5
PTEC	0.0	0.1	-0.3	0.3	0.7	0.3
QUEM	0.0	0.1	1.1	0.7	0.6	0.4
QUI1	0.1	0.0	-0.7	0.4	0.4	0.4
QVEC	0.0	0.0	0.3	1.0	1.0	0.4
RIOP	0.0	0.1	0.1	0.7	0.4	0.5
SEEC	0.0	0.0	0.5	0.8	1.1	0.4
SNLR	0.0	0.0	-0.1	0.4	0.4	0.4
STEC	0.0	0.0	0.0	0.7	0.3	0.9
TNEC	0.2	0.0	-0.3	0.5	0.3	0.5

Figura 4.21. Diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con CATS con MLE incluyendo ruido blanco (en rojo) y ruido *flicker* (en negro). Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza.

4.3.3. Comparación de resultados

Las Tablas 4.16, 4.17 y 4.18 muestran los resultados y diferencias obtenidas entre la solución del método de Estimación Mínimo Cuadrática (EMC) y Estimación Máxima Verosimilitud (MLE) con inclusión de ruido blanco y ruido *flicker*. Las Figuras 4.22 y 4.23 muestran de forma gráfica las diferencias entre las distintas soluciones obtenidas con EMC y MLE con la inclusión de los distintos tipos de ruido. A continuación, pasaremos a analizar las diferencias obtenidas entre las distintas soluciones.

En la Tabla 4.16 y 4.17 se muestran los resultados y diferencias obtenidas a partir de EMC con inclusión de ruido blanco y MLE con ruido blanco con software CATS, tanto en valores de índice espectral, como en velocidades e incertidumbres. La Figura 4.22 muestra las diferencias en velocidad horizontal y su correspondiente incertidumbre en cada estación obtenida entre ambas soluciones.

Con respecto a los valores del índice espectral (Tabla 4.16) estos se encuentran en una proporción de 1.5 en promedio en todas las componentes respecto a la solución EMC. Esto básicamente se debe a que hemos considerado en la solución EMC el espectro de potencia que se ajusta a una ley de potencia dependiente de la frecuencia propuesto por Agnew (1992). La razón para adoptar esta forma es que una gran variedad de

fenómenos geofísicos se ajustan a ella. Sin embargo, CATS utiliza MLE que tiene una gama más amplia para el cálculo de diferentes tipos de ruido. No obstante, los resultados para ambos procedimientos dan valores de índice espectral entre 0 y -1, es decir, ruido blanco fraccionario. Para las series con periodos de observación menores de dos años este resultado era el esperado debido a que para tiempos de observación cortos el ruido blanco es la contribución de ruido dominante (Hackl et al., 2011) como ya se discutió anteriormente. Sin embargo, en las series con periodos de observación mayores a dos años se esperaba obtener otro tipo de ruido, creemos que el resultado obtenido con sólo ruido blanco se debe a la existencia de una cantidad considerable de datos perdidos o gaps. Otra posibilidad es que la estrategia de procesamiento GNSS utilizada podría estar modelando adecuadamente los errores y no contribuya al ruido en gran medida.

Tabla 4.16. Comparación de índices espectrales obtenidos a partir de EMC y MLE. Las estaciones se encuentran ordenadas en forma ascendente de acuerdo al número de observaciones. Int: Intervalo de observación en años. #obs: número de observaciones después de la eliminación de valores atípicos utilizados en la estimación de la velocidad.

Est. GNSS	ÍNDICES ESPECTRALES						OBSERVACIONES		
	Ley de potencia			MLE			Int. (años)	#obs	% GAPS
	ke	kn	ku	ke	kn	ku			
BAHI	-0.6	-0.1	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	1.13	125	69.7
LREC	-0.4	-0.4	0.0	-0.4	-0.4	-0.1	0.65	215	9.4
QUEM	-0.3	-0.3	-0.3	-0.9	-0.9	-0.6	2.37	231	73.3
SNLR	-0.4	-0.3	0.0	-0.4	-0.3	0.0	1.07	249	36.2
CXEC	-0.3	-0.6	-0.5	-0.5	-0.7	-0.6	1.07	264	32.4
MTEC	-0.4	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	1.20	271	38.1
STEC	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5	-0.7	-0.5	1.84	277	58.8
EPEC	-0.4	-0.6	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6	1.11	279	31.1
QUI1	-0.5	-0.4	-0.7	-0.6	-0.5	-0.8	0.82	288	3.8
CHEC	-0.3	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	1.06	345	10.8
AUCA	-0.3	-0.5	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	1.54	356	36.7
PREC	-0.6	-0.5	-0.7	-0.7	-0.5	-0.9	1.56	379	33.4
EREC	-0.6	-0.4	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	1.55	426	24.7
PJEC	-0.4	-0.7	-0.5	-0.8	-0.9	-0.7	2.10	434	43.4
COEC	-0.6	-0.5	-0.5	-0.8	-0.7	-0.7	2.10	451	41.2
CLEC	-0.5	-0.4	-0.6	-0.7	-0.5	-0.7	1.45	463	12.5
PDEC	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	2.06	466	38.0
SEEC	-0.8	-0.6	-0.5	-0.9	-0.6	-0.6	2.06	481	36.0
MHEC	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	1.97	552	23.2
ALEC	-0.5	-0.5	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	2.06	596	20.7
GZEC	-0.4	-0.4	-0.4	-0.6	-0.5	-0.6	2.06	596	20.7
NJEC	-0.3	-0.3	-0.4	-0.7	-0.6	-0.7	2.12	607	21.6
ECEC	-0.5	-0.7	-0.4	-0.7	-0.8	-0.5	2.10	610	20.4
IBEC	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	2.60	689	27.4
TNEC	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.9	-0.5	3.22	821	30.2
QVEC	-0.6	-0.6	-0.5	-0.9	-0.8	-0.6	3.95	866	39.9
MAEC	-0.6	-0.5	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	4.45	957	41.1
PTEC	-0.6	-0.6	-0.5	-0.9	-0.9	-0.7	4.53	1045	36.8
CUEC	-0.5	-0.6	-0.5	-0.9	-0.7	-0.7	6.18	1472	34.7
GYEC	-0.6	-0.7	-0.5	-0.9	-0.9	-0.7	5.75	1583	24.6
ESMR	-0.5	-0.6	-0.4	-0.7	-0.7	-0.7	5.65	1611	21.9
LJEC	-0.6	-0.5	-0.7	-0.9	-0.6	-0.9	5.95	1617	25.5
RIOP	-0.5	-0.5	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	6.20	1688	25.4

En cuanto a los valores de las velocidades (Tabla 4.17 y Figura 4.22) existen diferencias inferiores a 1 mm/año en casi la totalidad de las estaciones, a excepción de las estaciones LREC, QUEM, CXEC, EPEC, PJEC, ECEC y QVEC que difieren en más de 2 mm/año en algunas de sus componentes. Estas estaciones tienen series con tiempos de observación menores a dos años y/o un porcentaje de datos perdidos superior al 35%,

en estos casos no se refleja el verdadero tipo de ruido y de estacionalidad. Respecto a las incertidumbres de las velocidades (Tabla 4.17 y Figura 4.22) éstas son aproximadamente 2 veces mayores en la solución MLE, aunque ambas soluciones obtienen valores que están en torno a un valor medio de 0.5 mm/año, tanto en la componente este como en la norte. Según Williams et al. (2004) el enfoque de máxima verosimilitud produce estimaciones de velocidad y error que son “muy probablemente” mejor definidos en un sentido estadístico.

Tabla 4.17. Comparación de velocidades ITRF2008 obtenidas a partir de EMC y MLE con ruido blanco. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (Ve, Vn, Vu) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σ_{Ve} , σ_{Vn} , σ_{Vu}) obtenida en ambas soluciones (EMC/MLE).

Est. GNSS	DIFERENCIAS EMC – MLE CON RUIDO BLANCO					
	Ve	Vn	Vu	σ_{Ve}	σ_{Vn}	σ_{Vu}
ALEC	-0.9	-0.2	0.6	0.5	0.5	0.5
AUCA	-0.7	0.9	-3.0	1.0	0.7	0.6
BAHI	-0.7	-1.1	-2.1	1.0	0.9	0.9
CHEC	0.8	0.6	-4.1	0.7	0.6	0.6
CLEC	0.5	0.4	5.9	0.5	0.7	0.5
COEC	0.1	-0.1	0.6	0.5	0.5	0.5
CUEC	-0.8	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
CXEC	-2.5	0.1	-0.4	0.7	0.6	0.6
ECEC	-0.9	0.2	-0.8	0.5	0.4	0.7
EPEC	-2.3	-0.4	-2.1	0.6	0.6	0.7
EREC	1.2	0.3	4.8	0.6	0.6	0.5
ESMR	0.1	-0.1	0.1	0.4	0.4	0.4
GYEC	0.5	-1.4	-1.4	0.2	0.2	0.3
GZEC	-0.7	0.1	0.1	0.5	0.7	0.5
IBEC	0.4	0.4	-0.9	0.5	0.4	0.4
LJEC	-0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.2
LREC	-2.4	0.0	1.7	0.9	0.9	1.5
MAEC	0.0	0.5	0.1	0.4	0.4	0.4
MHEC	0.6	0.0	4.1	0.5	0.5	0.4
MTEC	-1.4	-1.0	-2.3	1.0	1.1	0.9
NJEC	0.3	1.1	-0.3	0.5	0.6	0.5
PDEC	-0.1	0.0	3.9	0.5	0.7	0.7
PJEC	4.7	-0.8	0.0	0.4	0.4	0.5
PREC	0.1	-0.8	8.9	0.6	0.7	0.4
PTEC	-0.3	1.9	-0.9	0.2	0.2	0.4
QUEM	3.1	6.4	-4.7	0.5	0.4	1.0
QUI1	1.3	-0.6	-2.2	0.6	0.7	0.5
QVEC	-0.4	-2.3	-0.1	0.3	0.3	0.5
RIOP	0.2	0.0	-0.4	0.3	0.5	0.3
SEEC	-2.1	-0.1	0.0	0.3	0.6	0.6
SNLR	-0.4	0.8	0.1	1.0	1.2	2.0
STEC	-0.6	-0.3	2.9	0.8	0.6	0.8
TNEC	-0.6	-0.6	-2.1	0.6	0.3	0.6

Figura 4.22. Diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con EMC (en rojo) y MLE (en negro) con CATS incluyendo ruido blanco. Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza.

La Tabla 4.18 y Figura 4.23 muestran la comparación entre las velocidades e incertidumbres calculadas mediante EMC con la introducción en el modelo de la tendencia, estacionalidad y ruido *flicker* frente a MLE con este mismo tipo de ruido. Las diferencias en los valores estimados para la velocidad son menores a 1 mm/año en todas las estaciones a excepción de la estación BAHÍ, QUEM y PJEC. Las diferencias máximas en valor absoluto se obtienen en la estación QUEM, 2.4 mm/año en la componente este, y en la estación PJEC, 2.3 mm/año en la componente norte. La similitud en los valores de las velocidades se debe especialmente a que tanto en la solución EMC como MLE se utiliza la misma matriz de covarianza para ruido *flicker*, descrita en la ecuación 4.30. Las precisiones en MLE son muy conservadoras con respecto a las obtenidas por EMC, su relación en promedio es 7 veces mayores que las obtenidas por EMC.

Tabla 4.18. Comparación de velocidades ITRF2008 obtenidas a partir de EMC y MLE con ruido blanco. Las diferencias de velocidad este, norte y vertical (Ve, Vn, Vu) se expresan en mm/año. La comparación de las incertidumbres se expresa como el cociente o relación entre las incertidumbres al 95% de confianza (σVe , σVn , σVu) obtenida en ambas soluciones (EMC/MLE).

Est. GNSS	DIFERENCIAS EMC – MLE CON RUIDO FLICKER					
	Ve	Vn	Vu	σVe	σVn	σVu
ALEC	0.2	0.2	3.8	0.1	0.1	0.1
AUCA	0.3	-0.3	1.4	0.1	0.1	0.2
BAHI	-0.1	1.8	1.8	0.2	0.2	0.2
CHEC	0.0	0.9	-1.4	0.1	0.1	0.2
CLEC	-0.4	0.0	1.2	0.1	0.1	0.2
COEC	-1.1	-0.3	2.2	0.2	0.1	0.1
CUEC	-0.4	0.3	-0.8	0.1	0.1	0.1
CXEC	-0.2	-0.4	2.1	0.2	0.2	0.2
ECEC	-0.2	0.6	0.4	0.1	0.1	0.1
EPEC	0.0	-0.1	4.0	0.2	0.2	0.2
EREC	-0.3	-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.2
ESMR	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
GYEC	0.3	-0.3	0.1	0.1	0.2	0.1
GZEC	-0.1	-0.5	0.6	0.1	0.1	0.1
IBEC	-0.1	-0.1	-0.4	0.1	0.1	0.1
LJEC	-0.2	0.0	0.4	0.1	0.1	0.1
LREC	-1.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2
MAEC	0.4	0.6	-0.5	0.1	0.1	0.1
MHEC	-0.1	0.2	2.5	0.1	0.1	0.1
MTEC	1.1	0.2	4.6	0.2	0.2	0.2
NJEC	0.0	0.2	-1.2	0.1	0.1	0.1
PDEC	-1.0	-1.2	-2.7	0.2	0.1	0.2
PJEC	1.8	-2.3	-0.6	0.2	0.2	0.1
PREC	0.4	-1.2	-5.0	0.1	0.1	0.2
PTEC	0.3	0.3	-0.4	0.2	0.2	0.1
QUEM	2.4	3.0	-0.5	0.4	0.5	0.3
QUI1	0.3	-0.5	1.2	0.2	0.2	0.2
QVEC	0.5	0.3	1.7	0.1	0.1	0.1
RIOP	0.5	0.0	-0.4	0.1	0.1	0.1
SEEC	-0.5	-0.7	1.5	0.2	0.1	0.1
SNLR	0.0	-0.1	-0.6	0.2	0.1	0.1
STEC	1.1	-0.4	0.9	0.2	0.2	0.2
TNEC	0.1	0.5	0.6	0.1	0.2	0.1

Figura 4.23. Diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con EMC (en rojo) y MLE (en negro) con CATS incluyendo ruido *flicker*. Las incertidumbres en ambas soluciones están expresadas al 95% de confianza.

La Figura 4.24a-b muestra de forma gráfica el vector diferencia entre las velocidades horizontales de las estaciones REGME obtenidas con EMC y MLE, con ruido blanco (Figura 4.24a) y ruido *flicker* (Figura 4.12b).

Figura 4.24. Diferencias en velocidad horizontal en cada estación REGME obtenida entre las distintas soluciones calculadas. a) Diferencias entre las soluciones EMC y MLE con ruido blanco. b) Diferencias entre las soluciones EMC y MLE con ruido *flicker*.

Una vez analizados los valores de las velocidades con sus respectivas incertidumbres, mediante las soluciones EMC y MLE con ruido blanco y ruido *flicker*, se ha determinado que el valor de las velocidades no varía significativamente en la mayoría de las estaciones entre las diferentes estimaciones, especialmente en aquellas estaciones que tienen series con más de dos años de observación. Las diferencias se deben principalmente al tipo de estacionalidad ingresado para cada caso. El software CATS ajusta mediante la inclusión de estacionalidades anuales y semianuales, mientras que en este estudio se ingresan las estacionalidades obtenidas en cada serie, sean anuales, semianuales o de cualquier otro tipo; razón por la cual en la mayoría de las estaciones con menos de dos años se presentan las mayores diferencias.

Cabe recalcar que las velocidades obtenidas para nuestras estaciones se realizaron mediante estimación mínimo cuadrática utilizando ruido blanco, debido a que este tipo de ruido estuvo presente en todas las series y en todas las componentes.

No obstante, las incertidumbres de las velocidades obtenidas por MLE en este estudio son demasiado conservadoras con respecto a las obtenidas con EMC (2 a 7 veces mayores). Davis et al. (2003) afirman que el enfoque MLE produce estimaciones de error de velocidad que puede ser excesivamente conservadoras para muchas estaciones. Por este motivo, consideramos que para una mejor estimación de las incertidumbres obtenidas en la solución EMC, se multiplicarán por un factor de escala de 2, lo que nos dará la incertidumbre final de cada componente de velocidad en la solución EMC.

4.4. Campo de velocidades de la corteza para Ecuador

Las velocidades finales en este estudio corresponden a las obtenidas mediante la solución EMC con la inclusión de tendencia, estacionalidad y ruido blanco propuesto en el apartado anterior, con los valores de sus incertidumbres multiplicados por un factor de escala de 2. La Tabla 4.19 muestra las velocidades absolutas ITRF2008 y sus incertidumbres (al 95%) definitivas que determinan el campo de velocidades de Ecuador y servirán para definir el modelo de velocidades de la corteza que mejor se ajuste en Ecuador (Capítulo 5). Las Figuras 4.25 y 4.26 muestran el campo de velocidades horizontal y vertical, respectivamente, respecto al marco de referencia ITRF2008 con sus incertidumbres (al 95% de confianza).

Tabla 4.19. Velocidades ITRF2008 de las estaciones REGME e información relacionada. Los componentes de velocidad este, norte y vertical (V_e , V_n , V_u) y las incertidumbres al 95% de confianza (σV_e , σV_n , σV_u) se expresan en mm/año. $wrmse$, $wrmns$ y $wrm su$: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm. Periodo Obs.: periodo de observación de la serie temporal en año decimal. #Obs: número de observaciones después de la eliminación de valores atípicos utilizados en la estimación.

Est. GNSS	Posición			V_e	V_n	V_u	σV_e	σV_n	σV_u	$wrmse$	$wrmns$	$wrm su$	Periodo Obs.	#obs
	Long. (°E)	Lat. (°N)	Elev. (m)											
ALEC	-78.847	-2.202	2383.7	5.27	6.38	2.00	0.68	0.56	1.58	2.37	1.96	5.56	2.06	596
AUCA	-76.883	-0.641	313.9	-2.21	10.85	-3.42	1.02	0.82	2.64	2.12	1.71	5.44	1.54	356
BAHI	-80.398	-0.659	53.5	5.82	17.29	-3.24	1.40	1.80	3.52	1.46	1.89	3.74	1.13	125
CHEC	-77.814	-0.339	1643.7	4.78	11.30	-1.11	1.22	1.26	3.18	1.70	1.81	4.51	1.06	345
CLEC	-79.956	-4.103	2024.4	-0.54	3.83	5.07	0.90	0.82	2.36	2.00	1.84	5.39	1.45	463
COEC	-77.787	0.716	3657.1	5.67	11.15	3.10	0.74	0.52	1.28	2.53	1.80	4.50	2.10	451
CUEC	-79.003	-2.883	2631.2	-0.26	7.96	1.65	0.12	0.10	0.26	1.88	1.62	4.12	6.18	1472
CXEC	-78.615	-0.935	2813.7	4.35	9.39	-0.31	1.50	1.32	3.56	1.90	1.69	4.57	1.07	264
ECEC	-79.452	-0.272	284.9	12.32	14.50	-8.95	0.58	0.60	1.44	2.02	2.08	5.12	2.10	610
EPEC	-78.446	-0.315	2519.1	5.01	8.31	-3.16	1.42	1.34	3.84	1.90	1.81	5.22	1.11	279
EREC	-78.651	-1.671	2801	5.07	5.07	7.47	0.92	0.74	2.06	2.00	1.71	4.69	1.55	426
ESMR	-79.724	0.935	252.9	17.21	15.92	3.03	0.12	0.10	0.32	1.82	1.65	5.28	5.65	1611

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES GNSS.
CAMPO DE VELOCIDADES PARA ECUADOR

Est. GNSS	Posición			Ve	Vn	Vu	σ_{Ve}	σ_{Vn}	σ_{Vu}	wrmse	wrmsn	wrmsu	Periodo Obs.	#obs
	Long. (°E)	Lat. (°N)	Elev. (m)											
GYEC	-79.892	-2.149	34.9	5.90	9.45	-3.98	0.12	0.14	0.30	2.10	2.18	4.78	5.75	1583
GZEC	-78.581	-3.401	884	-0.24	6.33	1.59	0.56	0.50	1.40	1.91	1.76	4.89	2.06	596
IBEC	-78.116	0.35	2246.3	4.94	13.08	-1.69	0.48	0.42	1.18	2.16	1.84	5.44	2.60	689
LJEC	-79.199	-3.988	2143.5	-1.02	7.82	2.28	0.16	0.10	0.44	3.15	1.71	7.91	5.95	1617
LREC	-75.986	-1.615	206.5	-11.28	7.24	3.19	2.88	2.60	7.16	1.98	1.79	5.00	0.65	215
MAEC	-78.118	-2.305	1062.5	0.68	8.47	1.60	0.20	0.18	0.54	2.11	1.82	5.54	4.45	957
MHEC	-79.957	-3.261	55.1	3.89	9.82	0.70	0.58	0.56	1.54	1.97	1.95	5.26	1.97	552
MTEC	-76.982	-2.069	301.7	-7.73	8.91	7.29	2.06	1.90	5.46	2.04	1.90	5.44	1.20	271
NJEC	-79.621	-2.675	51.4	5.57	6.80	1.36	0.58	0.52	1.70	2.04	1.87	6.11	2.12	607
PDEC	-79.131	-4.648	1143.4	1.74	6.29	6.26	0.68	0.66	2.02	1.99	1.90	5.80	2.06	466
PJEC	-80.425	-1.552	146.8	16.05	9.75	-4.28	0.56	0.68	1.50	1.81	2.18	4.86	2.10	434
PREC	-77.963	-1.708	904.4	-1.03	4.28	13.75	0.96	0.80	2.96	2.10	1.80	6.46	1.56	379
PTEC	-80.475	-1.058	61.3	8.22	13.79	3.41	0.22	0.18	0.44	2.41	1.93	4.96	4.53	1045
QUEM	-78.497	-0.237	3054.7	9.48	14.38	-3.50	1.18	1.02	2.82	2.11	1.83	5.08	2.37	231
QUI1	-78.494	-0.215	2922.6	12.79	6.95	-11.01	0.96	1.08	3.66	0.99	1.12	3.72	0.82	288
QVEC	-79.47	-1.012	120.3	8.74	8.13	1.00	0.32	0.26	0.68	2.58	2.13	5.66	3.95	866
RIOP	-78.651	-1.651	2793	1.63	6.92	0.69	0.14	0.10	0.36	2.16	1.63	5.73	6.20	1688
SEEC	-80.904	-2.22	29.8	9.85	13.14	-1.18	0.76	0.50	1.24	2.71	1.71	4.31	2.06	481
SNLR	-78.847	1.293	23.1	10.36	8.53	-3.55	1.68	1.52	4.38	2.10	1.93	5.46	1.07	249
STEC	-78.011	-3.051	321.7	0.50	8.27	2.51	0.98	1.12	3.06	1.91	2.19	5.94	1.84	277
TNEC	-77.816	-0.99	547.1	-1.12	12.00	0.12	0.34	0.34	0.96	2.09	2.03	5.90	3.22	821

Figura 4.25. Campo de velocidades horizontales ITRF2008 para Ecuador, obtenido a partir del análisis de las series temporales de las estaciones REGME por estimación mínimo cuadrática (EMC) y ruido blanco. Elipses de error al 95% del nivel de confianza.

Figura 4.26. Campo de velocidades verticales ITRF2008 para Ecuador, obtenido a partir del análisis de las series temporales de las estaciones REGME por estimación mínimo cuadrática (EMC) y ruido blanco. Incertidumbres al 95% del nivel de confianza.

4.4.1. Campo de velocidades relativo a la placa Sudamérica

Para una mejor interpretación de las velocidades obtenidas en el apartado anterior, éstas fueron transformadas de ITRF2008 a un marco de referencia fijo en la placa Sudamérica (SOAM). Para ello se ha utilizado la velocidad angular de la placa SOAM con respecto a ITRF2008, obteniendo unos nuevos valores para el polo ITRF2008/SOAM (-20.41°N , -127.84°E , $0.128^{\circ}/\text{Ma}$) a partir de la inversión (Goudarzi et al., 2014) de 5 estaciones IGS repartidas por la placa Sudamérica, estas son BRAZ, BRFT, LPGS, PARC (Figura 4.27). En este marco las cinco estaciones elegidas muestran residuos por debajo de 1.5 mm/año . Este polo difiere del obtenido por Sánchez y Drewes (2016), debido principalmente a la diferencia en el número de estaciones utilizadas y su distribución dentro de la placa sudamericana. Sin embargo, las diferencias obtenidas en sus velocidades respecto a un SOAM utilizando uno u otro polo son inferiores a 0.3 mm/año en la componente horizontal, despreciable teniendo en cuenta las incertidumbres obtenidas en las velocidades.

Figura 4.27. Velocidades horizontales ITRF2008 de las estaciones IGS utilizadas en este estudio, con elipses de error al 95% de confianza. Las estaciones utilizadas para definir el marco de referencia sudamericano son: BRAZ, BRFT, LPGA, PARC y UNSA.

El campo de velocidad de Ecuador (33 estaciones REGME) y las 17 velocidades de las estaciones IGS fueron transformados de ITRF2008 a un marco de referencia fijo en la placa SOAM, utilizando para ello los valores indicados anteriormente. Se ha seguido el procedimiento descrito por Goudarzi et al. (2014) para la determinación del polo de Euler ITRF2008/SOAM y su aplicación a las velocidades ITRF2008 y obtención de velocidades respecto a SOAM fija.

La Figura 4.28 muestra nuestro campo de velocidades actual en un marco de referencia Sur América fijo, la elipse de confianza del 95% se representa en la punta de cada vector de velocidad. Los resultados se obtienen utilizando el supuesto de velocidades constantes entre los siete años (2008-2014). Las velocidades y sus incertidumbres se proporcionan en la Tabla 4.20.

Figura 4.28. Campo de velocidad horizontal GNSS (vectores rojos) de las estaciones REGME/IGS respecto al marco de referencia fijo en Suramérica (SOAM). Elipses de error al 95% de confianza. El recuadro superior muestra la velocidad horizontal GNSS de la estación GLPS localizada en la placa de Nazca. Las líneas negras delinean las principales estructuras tectónicas. El límite entre el Bloque Norandino (BNA) y la placa sudamericana (SOAM) está definido por el Sistema Mayor Dextral de los Andes. Las líneas negras finas delinear el mapa de las fallas (Egüez, et al., 2003). Las líneas discontinuas azules muestran los perfiles A-A' y B-B' que se utilizarán para proyectar las velocidades (apartado 4.5.3). BNA - Bloque Norandino, Placa SOAM - Placa América del Sur.

Tabla 4.20. Velocidades GNSS de las estaciones REGME / IGS relativas a la placa sudamericana e información relacionada. Los componentes de velocidad del GNSS del este, norte y vertical (V_E , V_N , V_{UP}) y las incertidumbres al 95% de confianza (σ_{V_E} , σ_{V_N} , $\sigma_{V_{UP}}$) se expresan en mm / año; $wrms$ E, $wrms$ N y $wrms$ Up: repetibilidad a largo plazo para las componentes este, norte y vertical en mm.

Estac. GNSS	Long. (°E)	Lat. (°N)	Alt. (m)	V_E	V_N	V_{UP}	σ_{V_E}	σ_{V_N}	$\sigma_{V_{UP}}$	$wrms$ E	$wrms$ N	$wrms$ Up
ALEC	-78.847	-2.202	2383.7	9.90	-3.70	2.00	0.68	0.56	1.58	2.37	1.96	5.56
AUCA	-76.883	-0.641	313.9	2.70	0.50	-3.42	1.02	0.82	2.64	2.12	1.71	5.44
BAHI	-80.398	-0.659	53.5	10.70	7.50	-3.24	1.40	1.80	3.52	1.46	1.89	3.74
BOGT	-74.081	4.640	2576.8	5.80	3.30	-33.04	0.12	0.08	0.36	2.23	1.68	6.62
BRAZ	-47.878	-15.948	1106	-1.50	0.10	2.30	0.18	0.12	0.46	3.33	2.34	7.54
BRFT	-38.426	-3.877	21.7	0.70	-0.40	0.62	0.18	0.12	0.40	3.30	2.35	10.21
BRMU	-64.415	32.221	-11.6	-2.80	-3.10	-2.22	0.16	0.16	0.30	3.20	3.11	5.48
CHEC	-77.814	-0.339	1643.7	9.70	1.10	-1.11	1.22	1.26	3.18	1.70	1.81	4.51

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES GNSS.
CAMPO DE VELOCIDADES PARA ECUADOR

Estac. GNSS	Long. (°E)	Lat. (°N)	Alt. (m)	V _E	V _N	V _{Up}	σ_{v_e}	σ_{v_n}	σ_{v_U}	<i>wrms</i> E	<i>wrms</i> N	<i>wrms</i> Up
CLEC	-79.956	-4.103	2024.4	3.80	-6.10	5.07	0.90	0.82	2.36	2.00	1.84	5.39
COEC	-77.787	0.716	3657.1	10.70	0.90	3.10	0.74	0.52	1.28	2.53	1.80	4.50
CRO1	-64.350	17.453	-31.5	16.80	0.70	-0.60	0.12	0.10	0.36	2.29	1.81	6.95
CUEC	-79.003	-2.883	2631.2	4.30	-2.10	1.65	0.12	0.10	0.26	1.88	1.62	4.12
CXEC	-78.615	-0.935	2813.7	9.20	-0.70	-0.31	1.50	1.32	3.56	1.90	1.69	4.57
ECEC	-79.452	-0.272	284.9	17.20	4.50	-8.95	0.58	0.60	1.44	2.02	2.08	5.12
EPEC	-78.446	-0.315	2519.1	9.90	-1.80	-3.16	1.42	1.34	3.84	1.90	1.81	5.22
EREC	-78.651	-1.671	2801	9.80	-5.00	7.47	0.92	0.74	2.06	2.00	1.71	4.69
ESMR	-79.724	0.935	252.9	22.30	6.00	3.03	0.12	0.10	0.32	1.82	1.65	5.28
GLPS	-90.181	-0.444	1.8	55.70	2.50	-0.18	0.10	0.08	0.22	1.67	1.64	4.19
GOLD	-116.532	35.253	986.7	-4.60	-7.90	0.00	0.16	0.16	0.36	3.28	3.03	6.86
GUAT	-90.311	14.353	1519.9	11.50	-5.80	-1.68	0.14	0.12	0.32	2.46	2.00	5.63
GYEC	-79.892	-2.149	34.9	10.50	-0.50	-3.98	0.12	0.14	0.30	2.10	2.18	4.78
GZEC	-78.581	-3.401	884	4.20	-3.80	1.59	0.56	0.50	1.40	1.91	1.76	4.89
IBEC	-78.116	0.350	2246.3	10.00	2.90	-1.69	0.48	0.42	1.18	2.16	1.84	5.44
ISPA	-109.204	-27.073	112.5	65.20	-11.30	-0.64	0.18	0.14	0.46	2.68	1.72	8.04
LJEC	-79.199	-3.988	2143.5	3.30	-2.20	2.28	0.16	0.10	0.44	3.15	1.71	7.91
LPGS	-57.932	-34.907	29.9	-1.80	0.40	-3.80	0.24	0.24	0.62	3.04	3.16	7.58
LREC	-75.986	-1.615	206.5	-6.50	-3.30	3.19	2.88	2.60	7.16	1.98	1.79	5.00
MAEC	-78.118	-2.305	1062.5	5.30	-1.70	1.60	0.20	0.18	0.54	2.11	1.82	5.54
MANA	-86.146	12.086	71.0	14.10	-1.90	-1.66	0.10	0.12	0.32	1.89	2.08	6.11
MDO1	-104.005	30.405	2004.5	-1.50	-15.30	3.37	0.22	0.20	0.46	2.87	2.72	6.38
MHEC	-79.957	-3.261	55.1	8.30	-0.10	0.70	0.58	0.56	1.54	1.97	1.95	5.26
MTEC	-76.982	-2.069	301.7	-3.10	-1.40	7.29	2.06	1.90	5.46	2.04	1.90	5.44
NJEC	-79.621	-2.675	51.4	10.10	-3.20	1.36	0.58	0.52	1.70	2.04	1.87	6.11
PARC	-70.880	-53.137	22.3	1.30	0.00	-2.35	0.20	0.24	0.52	3.46	4.64	9.02
PDEC	-79.131	-4.648	1143.4	6.00	-3.70	6.26	0.68	0.66	2.02	1.99	1.90	5.80
PJEC	-80.425	-1.552	146.8	20.80	-0.10	-4.28	0.56	0.68	1.50	1.81	2.18	4.86
PREC	-77.963	-1.708	904.4	3.70	-5.90	13.75	0.96	0.80	2.96	2.10	1.80	6.46
PTEC	-80.475	-1.058	61.3	13.00	4.00	3.41	0.22	0.18	0.44	2.41	1.93	4.96
QUEM	-78.497	-0.237	3054.7	14.40	4.20	-3.50	1.18	1.02	2.82	2.11	1.83	5.08
QUI1	-78.494	-0.215	2922.6	17.70	-3.20	-11.01	0.96	1.08	3.66	0.99	1.12	3.72
QVEC	-79.470	-1.012	120.3	13.60	-1.90	1.00	0.32	0.26	0.68	2.58	2.13	5.66
RIOP	-78.651	-1.651	2793.0	6.30	-3.20	0.69	0.14	0.10	0.36	2.16	1.63	5.73
SCUB	-75.454	20.004	21.9	1.60	-5.80	-1.36	0.16	0.18	0.56	1.81	2.30	6.65
SEEC	-80.904	-2.220	29.8	14.50	3.40	-1.18	0.76	0.50	1.24	2.71	1.71	4.31
SNLR	-78.847	1.293	23.1	15.50	-1.50	-3.55	1.68	1.52	4.38	2.10	1.93	5.46
SSIA	-89.066	13.415	664.4	15.90	-4.80	2.14	0.10	0.12	0.32	1.69	2.34	5.85
STEC	-78.011	-3.051	321.7	5.00	-1.90	2.51	0.98	1.12	3.06	1.91	2.19	5.94
TNEC	-77.816	-0.990	547.1	4.70	-2.20	0.12	0.34	0.34	0.96	2.09	2.03	5.90
UNSA	-65.408	-24.728	1257.8	1.50	-0.20	-1.04	0.16	0.14	0.38	2.89	2.58	6.16
USNO	-77.036	38.551	48.9	-5.40	-8.00	0.49	0.12	0.14	0.46	1.88	2.42	6.89

Nuestro campo de velocidades horizontal es consistente con otros obtenidos en estudio previos (Trempekamp et al., 2002; Nocquet et al., 2014; Sánchez and Drewes, 2016). Se han comparado nuestras velocidades con las obtenidas por Nocquet et al. (2014) en las 7 estaciones comunes en ambos estudios, obteniendo diferencias inferiores a 1.4 mm/año de media para la componente horizontal (Tabla 4.21 y Figura 4.29). La máxima diferencia se encuentra en la estación GYEC con -2.9 mm/año y 3.9 mm/año en la componente este y norte, respectivamente.

Tabla 4.21. Comparación de velocidades fijas al marco de referencia Sur América obtenidas en este estudio y las obtenidas por Nocquet et al. (2014). Las velocidades se expresan en mm/año.

Estación	λ (°)	φ (°)	Noquet et al., 201456		Este estudio		Noquet et al., 2014 - Este Estudio	
			Ve	Vn	Ve	Vn	Ve	Vn
AUCA	-76.88	-0.64	1.90	-1.92	2.70	0.50	-0.80	-2.42
CUEC	-79.00	-2.88	4.37	-2.75	4.30	-2.10	0.07	-0.65
ESMR	-79.72	0.93	21.68	5.35	22.30	6.00	-0.62	-0.65
GYEC	-79.89	-2.14	7.59	3.38	10.50	-0.50	-2.91	3.88
LJEC	-79.19	-3.98	4.33	-2.67	3.30	-2.20	1.03	-0.47
RIOP	-78.65	-1.65	4.75	-4.28	6.30	-3.20	-1.55	-1.08
SNLR	-78.84	1.29	16.20	-0.79	15.50	-1.50	0.70	0.71

Figura 4.29. Comparación de velocidades obtenidas en este estudio (Tabla 4.20) y velocidades en Ecuador de Nocquet et al. (2014) respecto a la placa de América del Sur fija.

Además, nuestras velocidades se han comparado con el modelo de velocidades para América del Sur, VEMOS2015 (*Velocity Model of South America 2015*) (Sánchez y Drewes, 2016) (Tabla 4.22 y Figura 4.30), obtenido a partir de la solución multianual SIR15P01 de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), encontrando diferencias que no superan los 2 mm/año de media en la componente horizontal. Como se puede apreciar en la Figura 4.30 las mayores diferencias se encuentran en las estaciones situadas en la zona de deformación del Sistema Mayor

Dextral (SMD) de los Andes, límite entre el Bloque Norandino y la placa sudamericana. Creemos que esto puede ser debido a que el modelo no registra adecuadamente el comportamiento de las estaciones situadas en la zona de deformación entre ambos bloques.

Destaca la diferencia máxima en la estación ESMR, situada en la costa al norte, con -9.1 mm/año y -0.6 mm/año en la componente este y norte, respectivamente. Creemos que esto es debido a que esta estación podría estar registrando deformación previa al terremoto de abril de 2016, que el modelo VEMOS 2015 no puede reflejar.

Tabla 4.22. Comparación de velocidades fijas al marco de referencia Sur América obtenidas en este estudio y las interpoladas con el modelo de velocidades VEMOS2015. Las velocidades se expresan en mm/año.

Estación	λ (°)	ϕ (°)	VEMOS 2015		Este estudio		VEMOS2015 - Este estudio	
			Ve	Vn	Ve	Vn	Ve	Vn
ALEC	-78.8474	-2.2022	10.1	2.6	9.9	-3.7	0.2	6.3
AUCA	-76.8827	-0.6408	2.8	-0.3	2.7	0.5	0.1	-0.8
BAHI	-80.3979	-0.6589	11.6	4.0	10.7	7.5	0.9	-3.4
CHEC	-77.8144	-0.3393	2.6	-0.3	9.7	1.1	-7.1	-1.4
CLEC	-79.9556	-4.1031	6.1	-3.0	3.8	-6.1	2.3	3.1
COEC	-77.7870	0.7161	10.3	3.3	10.7	0.9	-0.5	2.3
CUEC	-79.0025	-2.8833	5.5	-1.7	4.3	-2.1	1.2	0.4
CXEC	-78.6148	-0.9352	8.4	2.4	9.2	-0.7	-0.7	3.1
ECEC	-79.4519	-0.2718	10.9	4.4	17.2	4.5	-6.4	-0.1
EPEC	-78.4463	-0.3149	6.2	1.6	9.9	-1.8	-3.7	3.4
EREC	-78.6512	-1.6712	8.6	2.2	9.8	-5.0	-1.2	7.2
ESMR	-79.7244	0.9346	13.2	5.4	22.3	6.0	-9.1	-0.6
GYEC	-79.8919	-2.1494	11.5	3.1	10.5	-0.5	1.0	3.6
GZEC	-78.5811	-3.4012	5.6	-1.9	4.2	-3.8	1.3	1.9
IBEC	-78.1157	0.3502	6.1	1.4	10.0	2.9	-3.9	-1.5
LJEC	-79.1985	-3.9883	6.1	-1.7	3.3	-2.2	2.7	0.5
LREC	-75.9857	-1.6148	2.4	-0.4	-6.5	-3.3	8.9	2.9
MAEC	-78.1180	-2.3046	4.6	-0.6	5.3	-1.7	-0.7	1.1
MHEC	-79.9573	-3.2608	5.6	-2.7	8.3	-0.1	-2.8	-2.6
MTEC	-76.9824	-2.0691	3.0	-0.3	-3.1	-1.4	6.1	1.1
NJEC	-79.6208	-2.6752	7.4	-0.6	10.1	-3.2	-2.7	2.6
PDEC	-79.1313	-4.6476	6.6	-1.6	6.0	-3.7	0.6	2.2
PJEC	-80.4252	-1.5524	11.9	3.6	20.8	-0.1	-8.8	3.7
PREC	-77.9633	-1.7078	3.5	-0.5	3.7	-5.9	-0.2	5.5
PTEC	-80.4746	-1.0580	11.8	3.7	13.0	4.0	-1.3	-0.3
QUEM	-78.4973	-0.2371	6.7	1.9	14.4	4.2	-7.7	-2.4
QUI1	-78.4936	-0.2152	6.6	1.9	17.7	-3.2	-11.1	5.0
QVEC	-79.4696	-1.0123	11.2	3.5	13.6	-1.9	-2.4	5.4
RIOP	-78.6511	-1.6506	8.6	2.2	6.3	-3.2	2.2	5.4
SEEC	-80.9040	-2.2196	11.8	2.9	14.5	3.4	-2.7	-0.5
SNLR	-78.8470	1.2925	12.9	4.2	15.5	-1.5	-2.7	5.7
STEC	-78.0105	-3.0508	5.1	-2.8	5.0	-1.9	0.1	-0.9
TNEC	-77.8164	-0.9900	3.0	-0.3	4.7	-2.2	-1.8	1.9

Figura 4.30. Comparación de velocidades obtenidas en este estudio (Tabla 4.20) y las obtenidas por interpolación con el modelo de velocidades VEMOS2015 (Sánchez y Drewes, 2016) respecto a la placa de América del Sur fija.

4.5. Discusión y conclusiones

4.5.1. Estacionalidad

De acuerdo a la Tabla 4.5 los valores obtenidos en amplitud en la componente vertical son de 1 a 7 veces mayores que la componente horizontal. Estudios realizados por Amiri-Simkooei et al. (2007) en series temporales de 10 años, con registros diarios de un conjunto de 71 estaciones con distribución global concluyeron que, para cualquier modelo de ruido, los componentes horizontales tienen menor amplitud de ruido que el componente vertical en el orden de un factor entre 2 y 4.

Como la estacionalidad o periodicidad de las estaciones se muestra más claramente en la componente vertical, se ha tomado esta componente para clasificar las estaciones en tres categorías de acuerdo a su periodicidad:

1. **Movimiento periódico del suelo no modelado:** En esta categoría se encuentran las series con estacionalidad anual y semianual, se refiere a que el sitio se está moviendo periódicamente (Amiri-Simkooei et al., 2007). Las señales anuales y semianuales, por ejemplo, pueden ser especificadas en esta categoría. Con excepción de algunos componentes, se pueden ver señales tanto anuales como semianuales en la serie. En nuestro caso se hace más evidente en la componente

vertical. Las estaciones con estacionalidad anual son: ALEC (1.03 años), BAH1 (1.13 años), CHEC (1.06 años), COEC (1.05 años), CUEC (1.03 años), CXEC (1.07 años), ECEC (1.05 años), EPEC (1.11 años), ESMR (1.13 años), GZEC (1.03 años), IBEC (0.87 años), LJEC (0.99 años), MAEC (1.11 años), PDEC (1.03 años), PJEC (1.05 años), RIOP (1.03 años), SEEC (1.03 años), STEC (0.92 años), TNEC (1.08 años). Las estaciones que tienen estacionalidad semianual son: CLEC (0.73 años), LREC (0.65 años), QUEM (0.59 años), QUI1 (0.41 años).

2. Variación periódica de las series temporales estimadas: Corresponden a estaciones que aparentemente se mueven en forma periódica. Los errores sistemáticos periódicos no modulados (por ejemplo, las mareas) presentes en una estación producirán efectos sistemáticos periódicos más espurios en las series temporales resultantes (Penna y Stewart, 2003; Stewart et al., 2005; Amiri-Simkooei et al., 2007). Dentro de esta categoría se encuentran las series: AUCA (1.54 años), EREC (1.55 años), MHEC (1.97 años), MTEC (1.20 años), NJEC (0.21 años), PREC (1.56 años), SNLR (0.06 años).
3. Las variaciones periódicas que se encuentran correlacionadas con los años de observación: En esta categoría se encuentran las estaciones que tiene como primer periodo fundamental a la mitad del tiempo de observación o al tiempo total de observación, dentro de esta categoría se encuentran las estaciones: GYEC (periodo y años de observación = 5.75 años), PTEC (periodo = 2.27 años; años de observación = 4.53 años); QVEC (periodo y años de observación = 3.95 años). El segundo periodo fundamental para estas estaciones corresponde a tiempos más cortos, así tenemos para GYEC (1.92 años), PTEC (0.91 años); QVEC (1.32 años).

No se han podido determinar diferencias significativas de variaciones cíclicas entre estaciones que se encuentran en las diferentes regiones naturales (Costa, Sierra y Amazonía).

4.5.2. Ruido

Varios autores sugieren que el ruido blanco y ruido rosa dominan el espectro de ruido de coordenadas GPS para las series temporales y en una pequeña cantidad el ruido browniano (Zhang et al., 1997; Mao et al., 1999; Williams, 2003b; Williams et al., 2004; Klos et al., 2015). Sin embargo, nuestros resultados arrojan ruido gaussiano fraccionario (índice espectral entre 0 y -1) en todas las estaciones y en todas las componentes. Se esperaba encontrar al menos ruido rosa, puesto que las series tienen periodos de observación que van de 2 a 7 años. Además 26 estaciones se encuentran en las azoteas de edificios públicos y 7 sobre el terreno, sin embargo, no se encontró ninguna correlación del tiempo de observación, el ruido y la ubicación de las estaciones. La serie de tiempo con las posiciones GPS tienen un comportamiento no lineal complejo y, por lo tanto, el modelo estadístico de la serie de tiempo es más complicado que el simple ruido blanco. Por tanto, suponemos que el valor de ruido obtenido no refleja el verdadero tipo de ruido existente, debido principalmente a los gaps encontrados en cada serie. Por ejemplo, las estaciones CUEC, ESMR, GYEC, LJEC, PTEC y RIOP inician sus operaciones en los años 2008 y 2009 pero tienen de 22% a 37% de pérdida de datos. La estación LREC tiene 8% de pérdida de datos, pero es una serie muy corta (menos de dos años de observación). Los índices espectrales determinados por Zhang et al. (1997) a partir del análisis de 10 estaciones con mediciones diarias en 1.6 años de observación varían entre -0.05 y -0.52 con un promedio de -0.40. Se ha demostrado que para tiempos de observación cortos el ruido

blanco es la contribución de ruido dominante, mientras que para las observaciones más largas es el ruido browniano (Hackl et al., 2011).

Para las estaciones con mayor tiempo de observación se verifica que la componente norte es más ruidosa que las demás componentes, en general, la componente horizontal tiene una mayor magnitud de ruido que la componente vertical. Para zonas menos complejas tectónicamente se encontraron que las componentes horizontales eran menos ruidosas que la componente vertical (Amiri-Simkooei et al., 2007).

La Tabla 4.23 presenta el análisis de varianza comparando los valores de índice espectral de todas las estaciones de las diferentes componentes, el resultado obtenido ($F < F$ crítico) indica que estadísticamente no existen diferencias significativas entre ellas

Tabla 4.23. Análisis de varianza de valores de índice espectral (e, n, u).

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.0268	2	0.0134	0.6982	0.4999	3.0911
Dentro de los grupos	1.8463	96	0.0192			
Total	1.8732	98				

Mao et al. (1999) utilizaron series de tiempo de posiciones diarias de 23 estaciones globalmente distribuidas con 3 años de datos, los índices espectrales determinados varían entre -0.51 y -2.17 y llegaron igualmente a la conclusión de que no existe una diferencia significativa en la naturaleza espectral del ruido en la componente norte, este y vertical. Además, determinaron que se podían estimar índices confiables de series temporales de 2 años o más.

4.5.3. Campo de velocidades

Nuestro campo de velocidades proporciona una evidencia clara de la deformación cortical que actualmente se está produciendo en Ecuador, lo que implica una actividad continua en la zona de subducción y sobre las fallas regionales. La dirección dominante (hacia el este) del movimiento de la convergencia de las placas de Nazca y América del Sur (Figura 2.1) proporciona la principal fuerza motriz responsable de la deformación cortical en Ecuador y se observa como la característica más destacada en nuestro campo de velocidad. Como era de esperar, las velocidades observadas alcanzan sus valores más altos a lo largo de la costa, con una tasa máxima en ESMR de ~23 mm/año. Se observa una notable disminución de las velocidades hacia el este, alcanzando valores cercanos a cero (estadísticamente insignificante al nivel de confianza del 95%), al este del Sistema Mayor Dextral de los Andes. Destaca el cambio en las orientaciones de las velocidades, observando un giro de NE-ENE a SE de norte a sur.

La característica más predominante de nuestras velocidades, respecto al marco de referencia Sur América fijo, es el movimiento dominante hacia el este y el decrecimiento de las velocidades hacia el interior.

Se identificaron tres grupos principales de estaciones con comportamiento aproximadamente homogéneo (Figura 4.28):

1. El grupo de velocidades situadas en la zona oriental del país, al Este del Sistema Mayor Dextral de los Andes, caracterizado por velocidades pequeñas, entre 2.7 y 3.4 mm/año. Teniendo en cuenta la incertidumbre horizontal media de estas velocidades (~1.4 mm/año), podemos decir que su movimiento es

prácticamente solidario con la placa Suramérica. Entre este grupo, destaca el comportamiento anómalo de la estación LREC, con una velocidad horizontal de 7.3 mm/año. Dado el corto intervalo de tiempo de la serie temporal de esta estación (0.6 años) (Tabla 2.2), creemos que no es suficiente para obtener resultados concluyentes.

2. El grupo de estaciones situadas en el Bloque Norandino (BNA) (parte oriental del país), con una velocidad media de 16.8 mm/año y una orientación media de $80^\circ \pm 12^\circ$ (E-ENE). Las estaciones de la costa muestran una componente este muy significativa, lo que sugiere que parte de la velocidad de la placa Nazca es transferida directamente a la placa continental superior. Este grupo de estaciones muestra claramente el escape del bloque Norandino hacia el NE (Trenkamp et al., 2002; Nocquet et al., 2014) debido, entre otros factores, a la oblicuidad de la convergencia de la placa de Nazca. Dentro de este grupo de estaciones destaca el comportamiento anómalo de la estación BAHI, con una velocidad y orientación claramente menor a la del grupo, debido también a una serie temporal demasiado corta (1.1 años) (Tabla 2.2).
3. El grupo de estaciones situadas en la parte central del país, sobre la cordillera de los Andes y entorno al Sistema Mayor Dextral de los Andes, muestra velocidades intermedias, con valores que varían desde los 11 mm/año y orientación 75° (E-ENE), en las estaciones del norte, a los 4 mm/año y orientación 120° (ESE-SE), en las estaciones del sur. Estas estaciones están localizadas dentro una amplia zona de deformación que sirve de transición entre el movimiento del bloque Norandino y la placa Sudamérica (Trenkamp et al., 2002). Dentro de estas estaciones destaca el comportamiento anómalo con respecto a las estaciones cercanas (QUEM) de la estación QUI1, sólo operativa un corto intervalo de tiempo (0.8 años) (Tabla 2.2), por lo que es evidente una estimación poco fiable de su velocidad. También resulta anómala la diferencia de velocidades entre las estaciones cercanas RIOP y EREC, con orientaciones idénticas (117°), pero magnitudes diferentes, 7.1 mm/año y 11.0 mm/año, respectivamente. Observando las series temporales de ambas estaciones (Tabla 2.2) se comprueba que la estación RIOP tiene una serie larga de 6.2 años, mientras que EREC empieza a operar en 2013, por lo que su serie es de tan sólo 1.5 años, por lo que resulta más fiable la estimación de velocidad de la estación RIOP.

También se pueden identificar tres grupos de estaciones de acuerdo a la dirección de estas:

1. Las estaciones que se encuentran con acimuts hasta 90° , dirección NE-E aproximadamente, están ubicadas en la parte norte y occidental del país. Las estaciones que se encuentran cercanas a la zona de subducción les corresponden los valores más altos en magnitud. Las que se encuentran en la región amazónica tienen magnitudes de velocidades que van decreciendo conforme se alejan de la zona de subducción
2. Las estaciones con acimuts entre 90° y 180° , dirección ESE-SE, se encuentran en la región interandina y en las estribaciones de la cordillera de los Andes con velocidades medias de 10 mm/año, están ubicadas desde la parte central norte hasta la parte central del país. Desde la parte central del país hasta el sur se encuentran las que tienen menores valores de magnitud de velocidades y pertenecen al Bloque Inca con velocidades medias de 6 mm/año.
3. El tercer grupo corresponde a dos estaciones con acimuts entre 180° y 250° ,

dirección SO, ubicadas en la parte oriental del país, cercanas a la placa sudamericana estable con magnitud pequeña para la estación MTEC (3.4 mm/año) y magnitud media para la estación LREC (7.3 mm/año).

Para cuantificar mejor las velocidades y comprender cómo se incorpora la deformación dentro del área de estudio, se analizan las velocidades proyectadas a lo largo de dos perfiles perpendiculares a la orientación principal del Sistema Mayor Dextral de los Andes (Figuras 4.28 y 4.31a-b). La Figura 4.31a-b representa las componentes de la velocidad paralela a la dirección del perfil (puntos negros) y normal (triángulos) trazadas en función de la distancia a lo largo del perfil.

El perfil A-A' (Figura 4.28) es perpendicular al Sistema Mayor Dextral de los Andes con un acimut de 120° . Las velocidades proyectadas paralelas a la dirección del perfil (puntos negros en la Figura 4.31a) muestran un decrecimiento progresivo de 14 ± 0.5 mm/año, desde las estaciones situadas en la costa (ESMR y SNLR) hasta las estaciones situadas en el interior del país (AUCA), detrás de la cordillera de los Andes y supuestamente en la parte estable de la placa Sudamericana. Eso indica que las estaciones cercanas a la costa se están moviendo más rápidamente que las situadas en el interior, mostrando una tasa de compresión de -0.04 (mm/año)/km. Esta compresión o acortamiento principalmente se está acomodando en el conjunto de fallas que forma el Sistema Mayor Dextral de los Andes. Las velocidades normales a la dirección del perfil (triángulos en la Figura 4.31a) muestran un comportamiento más aleatorio. No obstante, se distinguen tres grupos de velocidades normales; (1) las situadas en el interior del BNA con componentes normales mayores de 14.4 ± 0.5 mm/año de media, a excepción de la estación SNLR con una componente normal menor (6.5 ± 1.1 mm/año), esta diferencia probablemente es debida a la distancia de esta estación a la fosa. (2) las situadas próximas al límite del BNA (entorno al Sistema Mayor Dextral) en los Andes, con componentes normales entre los 10.8 ± 0.7 mm/año y 3.4 ± 0.9 mm/año, y (3) las situadas tras la cordillera de los Andes en la placa suramericana, con velocidades normales muy pequeñas, 1.1 ± 0.4 mm/año de media. La variación máxima de la componente normal de la velocidad en este perfil muestra un movimiento lateral diestro de 14 ± 0.5 mm/año entre las estaciones ESMR (en la costa) y AUCA (en el interior).

El perfil B-B' (Figure 4.28) es perpendicular al Sistema Mayor Dextral de los Andes a una latitud de -2.25° con un acimut de 100° (Figure 4.28). Las velocidades paralelas a la dirección del perfil (puntos negros en la Figura 4.31b) muestran un comportamiento más aleatorio, con magnitudes que van desde los 20.5 ± 0.2 mm/año de la estación PJEK situada en el BNA, cerca de la costa, a -2.8 ± 0.9 mm/año de la estación MTEC situada en el interior, en la placa Sudamérica. Las estaciones situadas en el BNA tienen componentes paralelas mayores, con un valor medio de 13.1 ± 0.2 mm/año. Las estaciones situadas al este del límite del BNA, entorno al Sistema Mayor Dextral de los Andes, presentan una velocidad paralela media de 6.1 ± 0.2 mm/año. Claramente nuestras velocidades paralelas también muestran compresión o acortamiento en la dirección del perfil con una tasa de 15.0 ± 1.0 mm/año, entre la estación SEEC y MTEC, lo que implica una tasa de compresión de -0.04 (mm/año)/km, igual que la estimada en el perfil del norte (A-A'). La componente normal (triángulos en la Figura 4.27b) en este perfil es mucho menor que la observada en las estaciones del norte (perfil A-A'). Se distinguen dos bloques de estaciones: (1) Aquellas que están situadas en el BNA, con componentes normales mayores y positivas, con un valor medio de 3.1 mm/año ± 0.2 mm/año, decreciendo de 6.2 ± 0.1 mm/año, de las estaciones situadas en la costa, a 0.5 ± 0.2 mm/año, en las estaciones situadas en el interior del bloque (QVEC). (2) Las estaciones situadas en la zona de los Andes tienen una componente normal con un

valor medio de -2.4 ± 0.3 mm/año, siendo mayor, hasta -5.3 ± 0.5 mm/año, en las estaciones situadas al SE (estaciones PDEC, CLEC, LJEC, GZEC), estaciones con una velocidad en dirección $\sim 130^\circ$ ($\sim$ SE) respecto a Sudamérica fija. Dada su situación, magnitud y orientación estas estaciones posiblemente pertenezcan al denominado bloque INCA (Nocquet et al., 2014) o bloque PERU (Sánchez y Drewes, 2016).

Figura 4.31. Topografía y velocidades GNSS respecto a Sudamérica fija proyectadas a lo largo de dos perfiles (ver Figura 4.28). Se representan gráficamente las componentes de velocidad del perfil paralela (círculos negros) y normal (triángulos) con su barra de error al 95% de nivel de confianza, en función de la distancia a lo largo del perfil. Las líneas verticales discontinuas muestran la ubicación de las estructuras principales del Sistema Mayor Dextral de los Andes (área sombreada). BNA - Bloque Norandino. Placa SOAM - Placa sudamericana.

Una de nuestras estaciones analizadas está localizada en la plaza de Nazca, la estación IGS de las Islas Galápagos (GLPS), con velocidad horizontal 55.8 ± 0.1 mm/año y dirección prácticamente Este (87.4°) (Tabla 4.20 y Figura 4.28), coherente con el movimiento relativo hacia el este de la placa Nazca respecto a Suramérica fija (Trenkamp et al., 2002; Sánchez y Drewes, 2016).

Aunque este estudio no aborda las tasas de deformación vertical, los resultados obtenidos para las velocidades verticales (Figura 4.26) muestran claramente elevación en las estaciones situadas en la zona de transición entre el límite del bloque Norandino y la placa Sudamericana (estaciones situadas sobre los Andes), lo cual es coherente con un régimen de transpresión, que produciría la elevación de esta zona. Las estaciones situadas en la costa, más cercanas a la fosa (ESMR, PTEC) registran elevaciones de $\sim 3 \pm 0.2$ mm/año lo cual es coherente con el acoplamiento de la zona de subducción, sin embargo, la estación SEEC, situada a unos 50 km de la fosa, registra una ligera subsidencia de -1.2 ± 0.6 mm/año, lo cual es coherente con un acoplamiento más débil y superficial (entre 0 y 15 km) en esta zona, tal y como sugieren Chlieh et al., 2014.

4.5.4. Interpretación Tectónica

La distribución de la velocidad y la deformación corresponde claramente con el deslizamiento lateral-lateral transpresivo de las fallas de inmersión hacia el oeste del Sistema Mayor Dextral de los Andes y el movimiento del Bloque Norandino hacia NNE con respecto a la placa Sudamericana, tal y como proponen otros autores (e.g. Pennington, 1981, Trenkamp et al., 2002).

Las velocidades GPS de las estaciones REGME son consistentes con la rápida subducción de la placa de Nazca y la cresta asísmica de Carnegie en la fosa de Ecuador bajo la placa estable de América del Sur y muestran que la dirección de este movimiento es oblicua al margen Colombia-Ecuador (Figura 4.28). Esto produce un acortamiento en los Andes prácticamente perpendicular a la fosa, y un escape del Bloque Norandino en dirección noreste paralelo a la fosa (Trenkamp et al., 2002; Nocquet et al., 2014).

Aunque hay pocas estaciones REGME en la costa, el movimiento de estas estaciones sugiere que parte de la velocidad de la placa Nazca es transferido directamente a la placa continental. No obstante, aunque la dirección de estas velocidades es coherente con la dirección de la subducción de la placa de Nazca, claramente muestran una magnitud menor a la de dicha placa, lo que sugiere que también podrían estar registrando el acortamiento o comprensión permanente asociado a las fallas activas del Sistema Mayor Dextral de los Andes situadas a más de cien kilómetros al este.

Destaca el movimiento registrado por la estación ESMR, cercana al epicentro del terremoto ocurrido en abril de 2016 de M_w 7.8, con una componente este claramente mayor (22.3 ± 0.1 mm/año). Creemos que esto es debido a que esta estación podría estar registrando deformación previa al terremoto de abril de 2016, dado que esta estación se encuentra sobre una zona de aspereza acoplada (Chlieh et al., 2014), podría estar acumulando mayor deformación previa al terremoto de 2016.

La variación máxima de la componente perpendicular a la orientación de las principales fallas del Sistema Mayor Dextral de los Andes al norte de Ecuador (Figura 4.31a) muestra un movimiento lateral diestro máximo de 14 ± 0.5 mm/año (entre las estaciones ESMR, en la costa, y AUCA, en el interior). Esto es coherente con el movimiento hacia el NNE relativo a la placa Suramericana del Bloque Norandino y está de acuerdo con el trabajo de Tibaldi y Leon (2000) que estiman una tasa de deslizamiento lateral-derecho para el Sistema Mayor Dextral de los Andes de 15-16 mm/año en el norte de Ecuador. Al sur de Ecuador, la componente perpendicular al Sistema disminuye (Figura 4.31b), estimando un valor máximo de 8.5 ± 0.4 mm/año. Estos resultados son coherentes con la diferencia de comportamiento de la subducción ecuatoriana, tal y como indican Chlieh et al. (2014), con un acoplamiento es más débil y superficial (0-15 km) al sur de Ecuador y un incremento del acoplamiento hacia el norte en la zona donde ocurrieron los mega-terremotos de subducción del último siglo (estrellas en la Figura 2.1).

Además, las estaciones situadas al sur de Ecuador presentan un componente norte negativa, en dirección SE, lo que muestra que estas estaciones presentan un comportamiento claramente distinto, fuera del bloque Norandino, pudiendo estar localizadas en el bloque Inca de Perú, tal y como sugiere Nocquet et al. (2014).

CAPÍTULO 5. MODELO DE VELOCIDADES

5.1. Introducción

Para la determinación del modelo de velocidades para Ecuador se cuenta con el campo de velocidades obtenido a partir del procesamiento y análisis de las series temporales de 33 estaciones de monitoreo continuo de la red REGME (Capítulo 4). Además, para tener una mayor cobertura, se utilizarán 131 velocidades de las estaciones pasivas de la red RENAGE obtenidas del portal del Instituto Geográfico Militar del Ecuador (Cisneros y Nocquet, 2011; IGM, 2016).

De este conjunto de datos, finalmente se seleccionaron 29 velocidades de estaciones de monitoreo continuo REGME y 75 velocidades de estaciones pasivas RENAGE. Además, para la validación y comprobación de los modelos se utilizaron 16 estaciones pasivas. Los criterios de selección para las estaciones de monitoreo continuo se basaron en el tiempo de observación de la serie y en el porcentaje de datos perdidos y para las estaciones pasivas la selección se realizó de acuerdo al valor de las incertidumbres y al contraste con las estaciones activas más cercanas.

El modelo de velocidades que describa mejor el campo de velocidades obtenido debe considerar las variaciones espaciales de las mismas, por cuanto una solución totalmente determinística a nuestro problema no sería lo más conveniente. El determinismo se refiere a que para la estimación de valores en puntos no muestreados solamente basta considerar la distancia a los puntos medidos más no sus correlaciones espaciales.

Los métodos deterministas son marcados por el hecho de que ponderan la proximidad espacial de los puntos muestreados a los puntos a estimar. Sólo estas distancias influyen en el cálculo de los valores estimados. Contrariamente a ello, los métodos probabilísticos adicionalmente consideran las relaciones correlativas espaciales entre los puntos muestreados, es decir que consideran la existencia de autocorrelaciones espaciales entre los puntos muestreados y de ello deducen que estas autocorrelaciones espaciales también deben ser válidas para los valores de los puntos a estimar.

Otra diferencia esencial, es que los métodos deterministas calculan la similitud de puntos vecinos solamente con la ayuda de funciones matemáticas. En cambio, los métodos probabilísticos efectúan una deducción de las superficies de interpolación basada en presunciones estadísticas, además determinan superficies de estimación y las superficies de error correspondientes. En los métodos deterministas de interpolación no existen estimaciones de errores por cuanto estos son muy triviales a diferencia de los métodos probabilísticos. Otro factor a considerar es que básicamente los métodos deterministas se emplean mejor para variables fijas mientras los métodos probabilísticos para variables aleatorias. En nuestro caso, dado que los factores que afectan los valores de las velocidades son numerosos, ampliamente desconocidos en detalle e interactúan con una complejidad que no podemos desentrañar, podemos considerar que los resultados están afectados por errores considerados aleatorios.

Debido a que nuestro interés es describir cuantitativamente cómo las velocidades varían espacialmente y estimar o predecir sus valores en sitios no muestreados, así como también estimar los errores de predicción para poder juzgar qué confianza

depositar en ellas, hemos considerado a los modelos con enfoque probabilístico y estocásticos como los más adecuados para nuestro propósito. Teniendo en cuenta esto, para este estudio se seleccionaron dos métodos de interpolación con estas características: estimación o predicción por Kriging y Mínimos Cuadrados Colocación. En este capítulo se describen ambos métodos, así como los resultados obtenidos y su comparación.

5.2. Selección de las velocidades a utilizar

Entre los parámetros a considerar para la selección de las estaciones REGME se ha tenido en cuenta el tiempo de observación, el porcentaje de valores perdidos y la proximidad a cada estación. En vista de esto se han descartado para el modelo las estaciones BAHÍ, EREC, QUEM y QUI1 pertenecientes a la red REGME. La estación BAHÍ no ha sido considerada por tener un número muy reducido de observaciones y un alto porcentaje de saltos, además se tienen valores de velocidades de algunas estaciones de la red pasiva cercanas que pueden sustituirla. Las estaciones QUEM, QUI1 y EPEC se encuentran muy cercanas entre sí, y sus valores difieren en todas sus componentes. La estación QUEM tiene más de dos años de observación, sin embargo, es la estación que tiene el mayor porcentaje de valores perdidos (73.3%). La estación QUI1 tiene menos de un año de observación. Teniendo en cuenta esto, de esas tres estaciones se ha elegido la estación EPEC. La estación EREC tampoco se ha considerado porque se encuentra muy cercana a la estación RIOP, estación IGS con más de 6 años de observaciones. Finalmente se han considerado 29 velocidades de las estaciones REGME de monitoreo continuo para la estimación del modelo de velocidades.

Los valores de las velocidades de la red RENAGE (Anexo B) estaban expresados en un sistema cartesiano geocéntrico global por lo que ha sido necesaria la transformación a un sistema de referencia local, como las obtenidas para las estaciones de la red REGME.

Tabla 5.1. Estaciones de la red REGME-RENAGE a ser utilizadas para la modelización.

Ord.	Red	ESTACIONES	Posición		Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Vu (mm/a)	σ_{Ve} (mm/a)	σ_{Vn} (mm/a)	σ_{Vu} (mm/a)
			Long. (°E)	Lat. (°N)						
1	REGME	ALEC	-78.8474	-2.2022	5.27	6.38	2.00	0.68	0.56	1.58
2	REGME	AUCA	-76.8827	-0.6408	-2.21	10.85	-3.42	1.02	0.82	2.64
3	REGME	CHEC	-77.8144	-0.3393	4.78	11.30	-1.11	1.22	1.26	3.18
4	REGME	CLEC	-79.9556	-4.1031	-0.54	3.83	5.07	0.90	0.82	2.36
5	REGME	COEC	-77.7870	0.7161	5.67	11.15	3.10	0.74	0.52	1.28
6	REGME	CUEC	-79.0025	-2.8833	-0.26	7.96	1.65	0.12	0.10	0.26
7	REGME	CXEC	-78.6148	-0.9352	4.35	9.39	-0.31	1.50	1.32	3.56
8	REGME	ECEC	-79.4519	-0.2718	12.32	14.50	-8.95	0.58	0.60	1.44
9	REGME	EPEC	-78.4463	-0.3149	5.01	8.31	-3.16	1.42	1.34	3.84
10	REGME	ESMR	-79.7244	0.9346	17.21	15.92	3.03	0.12	0.10	0.32
11	REGME	GYEC	-79.8919	-2.1494	5.90	9.45	-3.98	0.12	0.14	0.30
12	REGME	GZEC	-78.5811	-3.4012	-0.24	6.33	1.59	0.56	0.50	1.40
13	REGME	IBEC	-78.1157	0.3502	4.94	13.08	-1.69	0.48	0.42	1.18
14	REGME	LJEC	-79.1985	-3.9883	-1.02	7.82	2.28	0.16	0.10	0.44
15	REGME	LREC	-75.9857	-1.6148	-11.28	7.24	3.19	2.88	2.60	7.16
16	REGME	MAEC	-78.1180	-2.3046	0.68	8.47	1.60	0.20	0.18	0.54
17	REGME	MHEC	-79.9573	-3.2608	3.89	9.82	0.70	0.58	0.56	1.54
18	REGME	MTEC	-76.9824	-2.0691	-7.73	8.91	7.29	2.06	1.90	5.46
19	REGME	NJEC	-79.6208	-2.6752	5.57	6.80	1.36	0.58	0.52	1.70
20	REGME	PDEC	-79.1313	-4.6476	1.74	6.29	6.26	0.68	0.66	2.02
21	REGME	PJEC	-80.4252	-1.5524	16.05	9.75	-4.28	0.56	0.68	1.50
22	REGME	PREC	-77.9633	-1.7078	-1.03	4.28	13.75	0.96	0.80	2.96
23	REGME	PTEC	-80.4746	-1.0580	8.22	13.79	3.41	0.22	0.18	0.44
24	REGME	QVEC	-79.4696	-1.0123	8.74	8.13	1.00	0.32	0.26	0.68

Ord.	Red	ESTACIONES	Posición		Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Vu (mm/a)	σ_{Ve} (mm/a)	σ_{Vn} (mm/a)	σ_{Vu} (mm/a)
			Long. (°E)	Lat. (°N)						
25	REGME	RIOP	-78.6511	-1.6506	1.63	6.92	0.69	0.14	0.10	0.36
26	REGME	SEEC	-80.9040	-2.2196	9.85	13.14	-1.18	0.76	0.50	1.24
27	REGME	SNLR	-78.8470	1.2925	10.36	8.53	-3.55	1.68	1.52	4.38
28	REGME	STEC	-78.0105	-3.0508	0.50	8.27	2.51	0.98	1.12	3.06
29	REGME	TNEC	-77.8164	-0.9900	-1.12	12.00	0.12	0.34	0.34	0.96
30	RENAGE	AHUA_GPS	-77.5500	-1.0610	-0.38	8.46	11.11	1.18	0.43	2.01
31	RENAGE	ALAM_GPS	-80.0252	-4.0198	0.39	7.26	-31.08	6.36	2.41	11.91
32	RENAGE	ALTA_GPS	-78.0961	1.2469	1.81	15.34	-10.38	8.22	3.09	16.54
33	RENAGE	AREN_GPS	-80.0685	-3.5591	1.56	8.21	-6.55	2.14	0.88	4.47
34	RENAGE	AYAN_GPS	-80.7569	-1.9885	8.53	12.18	4.03	2.54	1.00	5.52
35	RENAGE	BALZ_GPS	-79.9086	-1.3675	6.31	11.88	-57.25	4.95	1.98	10.35
36	RENAGE	CABP_GPS	-80.4287	-0.3865	12.88	12.31	0.60	1.17	1.03	1.90
37	RENAGE	CAJA_GPS	-79.2370	-2.7531	0.47	8.07	-4.65	1.27	0.54	2.50
38	RENAGE	CASI_GPS	-78.4802	-0.0366	6.75	11.59	-8.71	2.73	1.09	5.48
39	RENAGE	CHIS_GPS	-80.7284	-1.0531	11.21	15.25	-0.73	0.84	0.42	1.26
40	RENAGE	CHON_GPS	-78.4632	-1.4331	1.27	9.30	10.70	1.13	0.43	1.72
41	RENAGE	CNJO_GPS	-76.8447	0.2381	-1.60	9.23	24.52	1.90	0.76	3.71
42	RENAGE	CORA_GPS	-79.0792	-1.1381	2.36	10.56	7.84	2.21	0.87	4.26
43	RENAGE	CUEL_GPS	-78.5328	0.3895	8.00	8.66	16.00	1.94	0.77	3.90
44	RENAGE	DESV_GPS	-79.9240	-1.0405	6.35	12.56	0.50	1.00	0.44	2.15
45	RENAGE	FLFR_GPS	-79.8427	-0.3574	10.44	10.86	4.97	1.20	0.84	2.10
46	RENAGE	HENO_GPS	-76.6490	-0.1319	-1.57	8.61	20.34	2.21	0.77	4.26
47	RENAGE	HONA_GPS	-79.1599	-3.4765	-0.71	7.17	6.18	0.80	0.43	1.58
48	RENAGE	HSPR_GPS	-78.8502	-0.3515	7.49	10.88	1.41	1.26	0.53	1.89
49	RENAGE	JUJA_GPS	-79.5539	-1.8943	5.03	11.49	21.48	1.73	0.66	3.33
50	RENAGE	LACH_GPS	-78.4200	0.1610	5.02	11.80	3.32	6.72	2.63	13.36
51	RENAGE	LATA_GPS	-78.6265	-0.8139	4.69	10.45	10.14	0.59	0.32	1.00
52	RENAGE	LGCB_GPS	-79.5753	0.3821	12.11	12.45	3.14	1.01	0.53	1.64
53	RENAGE	LIMO_GPS	-76.6205	-0.4033	-0.42	11.32	29.27	3.23	1.08	4.88
54	RENAGE	LITA_GPS	-78.2187	0.7263	7.03	12.00	-4.96	2.73	1.49	5.47
55	RENAGE	LITS_GPS	-78.4480	0.8702	8.24	11.68	-2.50	0.78	0.33	1.48
56	RENAGE	LUMD_GPS	-77.3222	0.0083	-1.28	9.64	-0.33	1.27	0.44	2.50
57	RENAGE	MARI_GPS	-76.2951	-0.0496	-2.78	8.62	-0.52	7.81	3.05	14.28
58	RENAGE	MEND_GPS	-78.3196	-2.7175	0.20	7.29	5.20	1.29	0.54	2.60
59	RENAGE	MIGU_GPS	-79.0395	-1.7034	3.50	10.02	1.87	1.44	0.65	2.88
60	RENAGE	MINA_1PS	-80.2788	-0.9632	5.67	12.62	-2.76	1.76	0.67	4.04
61	RENAGE	MOCA_GPS	-79.5091	-1.1871	5.14	11.84	1.89	1.29	0.54	2.60
62	RENAGE	MORU_GPS	-78.4591	-0.7253	4.10	11.19	-2.48	1.03	0.53	1.73
63	RENAGE	NARI_GPS	-79.5365	-3.1413	-1.01	8.52	-7.99	1.41	0.55	2.68
64	RENAGE	PAM1_GPS	-78.2090	-0.0797	3.83	11.69	-1.55	0.95	0.33	1.85
65	RENAGE	PAPA_GPS	-78.1405	-0.3809	5.55	12.39	55.01	0.80	0.33	1.58
66	RENAGE	PASO_GPS	-77.2610	1.2160	0.87	16.39	0.46	4.55	1.66	9.31
67	RENAGE	PDNS_GPS	-79.9910	0.1114	13.93	14.20	1.83	1.18	0.73	2.01
68	RENAGE	POSO_GPS	-80.2434	-2.7102	3.36	8.74	-7.88	6.61	2.57	15.52
69	RENAGE	PPRT_GPS	-80.2165	-0.1253	15.40	15.75	-2.61	1.01	0.53	1.64
70	RENAGE	PROG_GPS	-80.3654	-2.4108	5.43	12.00	-0.63	0.97	0.43	1.95
71	RENAGE	PTGL_GPS	-80.0304	0.7815	18.95	14.11	-0.73	1.30	0.64	2.09
72	RENAGE	PUEB_GPS	-79.5307	-1.5589	5.68	10.10	3.51	1.33	0.55	2.80
73	RENAGE	PUYO_GPS	-78.0640	-1.5048	-0.97	6.94	17.88	1.27	0.54	2.50
74	RENAGE	QNDE_GPS	-79.4755	0.3275	10.87	11.12	-1.56	0.95	0.43	1.85
75	RENAGE	QUI1_GPS	-78.4936	-0.2152	7.21	10.86	-0.74	0.44	0.21	0.73
76	RENAGE	REVE_GPS	-77.5268	-0.0473	-1.50	7.39	-4.24	0.95	0.43	1.85
77	RENAGE	RVRD_GPS	-79.3851	1.0676	16.19	14.29	2.57	1.32	0.54	2.19
78	RENAGE	SACH_GPS	-78.4588	-0.6448	3.56	10.11	2.14	1.11	0.43	1.62
79	RENAGE	SBAR_GPS	-77.5248	0.6463	0.49	12.56	-5.56	1.24	0.44	2.31
80	RENAGE	SFCO_GPS	-78.7012	1.0915	7.26	13.56	-8.35	7.60	2.88	15.94
81	RENAGE	SIBU_GPS	-76.9432	1.1978	3.62	12.98	-12.60	9.03	3.30	17.61
82	RENAGE	SOZO_GPS	-79.7924	-4.3338	-1.65	6.87	1.28	1.36	0.53	1.88
83	RENAGE	SRAM_GPS	-79.5607	-0.6100	8.24	11.27	-2.60	5.46	2.10	11.47

Ord.	Red	ESTACIONES	Posición		Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Vu (mm/a)	σ_{Ve} (mm/a)	σ_{Vn} (mm/a)	σ_{Vu} (mm/a)
			Long. (°E)	Lat. (°N)						
84	RENAGE	SROQ_GPS	-76.2238	-0.4538	-5.37	12.45	24.84	4.47	2.02	7.18
85	RENAGE	TAMB_GPS	-78.4011	-0.6872	3.29	10.29	3.22	1.01	0.33	1.64
86	RENAGE	TAMI_GPS	-77.3585	1.5875	0.38	15.32	-1.72	8.82	3.09	17.04
87	RENAGE	TORR_GPS	-79.1318	-2.0860	3.24	10.35	-4.49	0.97	0.43	1.95
88	RENAGE	TOTO_GPS	-78.6728	-2.2569	0.69	6.78	-0.03	0.76	0.32	1.38
89	RENAGE	TUMA_GPS	-78.7541	1.8114	8.23	14.92	-9.41	4.21	1.66	9.06
90	RENAGE	TURI_GPS	-78.5764	-0.3679	9.96	10.12	11.45	5.54	2.10	11.35
91	RENAGE	UNGU_GPS	-78.5572	-0.2374	7.28	10.38	-1.14	1.31	0.55	2.70
92	RENAGE	YAU_S_GPS	-78.7315	-2.6913	1.07	7.88	-6.41	1.12	0.44	2.23
93	RENAGE	ZAMO_GPS	-78.9320	-4.0548	-0.01	7.17	4.23	0.65	0.32	1.30
94	RENAGE	ZHUD_GPS	-79.0059	-2.4613	1.28	7.63	-3.67	0.95	0.43	1.85

Para la selección de las estaciones pasivas que van a formar parte para la obtención del modelo, se han considerado los valores de las incertidumbres, la contrastación con estaciones de monitoreo continuo más cercanas y la proximidad entre cada una de ellas. Las estaciones con incertidumbres mayores a 9.1 mm en la componente este y 3.6 mm para la componente norte no han sido consideradas para la realización del modelo, debido a que estaciones con incertidumbres mayores a las citadas anteriormente corresponden a valores atípicos dentro del conjunto de datos para cada componente. Del resultado de este análisis se han tomado 65 estaciones de la RENAGE, que junto con las 29 de la REGME, han dado un total de 94 estaciones para la modelización (Tabla 5.1) y 16 estaciones de la RENAGE para la validación (Tabla 5.2). Para la selección de las 16 estaciones de validación se ha considerado la distribución geográfica y la redundancia de las observaciones, de tal forma que no se desaproveche información, es decir se realizó una selección mediante muestreo estratificado ponderado. La Figura 5.1 muestra la distribución espacial de las 94 estaciones REGME y RENAGE para la modelización (en rojo y negro, respectivamente) y las 16 estaciones RENAGE (en azul) que se van a usar para la validación.

Tabla 5.2. Estaciones utilizadas para la validación del modelo.

Ord.	Red	ESTACIONES	Posición		Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Vu (mm/a)	σ_{Ve} (mm/a)	σ_{Vn} (mm/a)	σ_{Vu} (mm/a)
			Long. (°E)	Lat. (°N)						
1	RENAGE	3009_GPS	-79.6265	0.9890	14.63	15.33	-0.69	0.63	0.32	1.20
2	RENAGE	AU14_GPS	-76.8867	-0.7301	-2.06	8.85	6.30	1.58	0.65	3.06
3	RENAGE	CAME_GPS	-78.5063	-0.6797	5.04	10.72	-2.32	1.28	0.43	1.99
4	RENAGE	CONE_GPS	-78.4137	-0.6600	3.15	10.35	-2.51	0.73	0.42	1.18
5	RENAGE	CORE_GPS	-78.5241	-0.3278	5.67	10.74	6.91	1.82	0.67	3.82
6	RENAGE	GONZ_GPS	-79.4307	-4.2264	-0.70	6.79	3.43	1.00	0.44	2.15
7	RENAGE	IGMV_GPS	-78.4936	-0.2151	7.65	8.62	33.53	1.95	0.77	4.00
8	RENAGE	IGNA_GPS	-78.7519	-0.4509	6.00	11.15	25.11	0.93	0.43	1.75
9	RENAGE	JERU_GPS	-78.3580	-0.0056	4.71	11.94	-14.55	0.74	0.32	1.28
10	RENAGE	LCOL_GPS	-79.2037	-0.2499	8.38	11.71	-3.30	0.97	0.43	1.95
11	RENAGE	MIRA_GPS	-78.5089	-0.2704	5.29	10.21	-6.49	1.88	0.76	3.61
12	RENAGE	MUIS_GPS	-80.0238	0.6045	15.21	13.96	-5.18	0.65	0.32	1.30
13	RENAGE	SALN_GPS	-80.9908	-2.1862	8.85	12.26	-0.20	1.57	0.84	2.44
14	RENAGE	SANL_GPS	-78.8285	1.2815	9.28	8.94	-12.82	7.47	2.77	15.77
15	RENAGE	TOLA_GPS	-79.0454	1.2103	11.28	10.73	-11.01	0.95	0.43	1.85
16	RENAGE	TULC_GPS	-77.7053	0.8120	2.79	12.20	-1.11	1.10	0.44	2.13

Figura 5.1. Distribución espacial de las 94 estaciones REGME y RENAGE que se van a usar en la modelización (en rojo y negro, respectivamente) y las 16 estaciones RENAGE (en azul) que se van a usar para la validación.

5.3. Método geoestadístico Kriging

La palabra estimación es utilizada exclusivamente para inferir sobre parámetros fijos pero desconocidos, mientras que predicción es reservada para inferencia sobre cantidades aleatorias. Sin embargo, en geoestadística casi siempre es llamada estimación por razones explicadas por Matheron (1989), es por esto que en este estudio utilizaremos los dos términos de forma intercambiable.

La estimación es la tarea para la cual la geoestadística fue desarrollada inicialmente y se llama generalmente Kriging, en honor de D. G. Krige, un geólogo sudafricano cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizadas en la década de los cincuenta, permiten considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial (Webster y Oliver, 2007).

Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización de la varianza de predicción, proporcionando una solución al problema de estimación basado en un modelo continuo de variación espacial estocástica. Hace el mejor uso de los conocimientos existentes teniendo en cuenta la forma en que una propiedad varía en el espacio a través de la correlación espacial de los datos.

Kriging cubre una gama de métodos de predicción espacial, entre los que tenemos:

- El Kriging ordinario de una sola variable, es el método más robusto y el más utilizado, se aplica cuando no se conoce la media.

- El Kriging simple, se utiliza cuando se conoce la media de la variable y ésta es constante para cualquier punto en el área de estudio. Esta técnica es poco utilizada ya que usualmente no conocemos este valor. Normalmente se aplica en otras formas como el Kriging indicador y el Kriging disyuntivo en el que los datos se transforman para tener medias conocidas.
- El Kriging lognormal es un Kriging ordinario de los logaritmos de los valores medidos. Se utiliza para datos fuertemente sesgados positivamente que se aproximan a una distribución lognormal.
- El Kriging universal reconoce las componentes no-estacionarias deterministas y aleatorias en una variable. Estima la tendencia en el primero y el variograma de este último, y recombina los dos para la predicción.
- El Cokriging ordinario es la extensión del Kriging ordinario de una sola variable a dos o más variables. Debe haber alguna correogionalización entre las variables para que sea rentable. Es particularmente útil si algunas propiedades que se pueden medir a bajo costo en muchos sitios están correlacionadas espacialmente con una o más que son costosas de medir y se miden en muchos menos sitios. Nos permite estimar la propiedad más escasamente muestreada con mayor precisión mediante Cokriging usando la información espacial de la más densamente medida (Webster y Oliver, 2007).

La estimación o predicción mediante el método Kriging abarca tres etapas que son:

- Análisis exploratorio de datos
- Análisis estructural o modelación de las funciones de correlación
- Predicción

5.3.1. Análisis exploratorio de datos

Seleccionadas las estaciones para la modelización procedemos con el análisis exploratorio de datos mediante estadísticos descriptivos tales como: media, mediana, varianza, coeficientes de asimetría, curtosis, gráficos de caja y gráficos de normalidad. Es importante este análisis para determinar valores atípicos y establecer si algunos supuestos de la teoría geoestadística son válidos o para definir que procedimiento de predicción es el más conveniente utilizar.

En la Tabla 5.3 presentamos los principales estadísticos descriptivos de todas las componentes.

Tabla 5.3. Estadísticos descriptivos de las velocidades.

	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Vu (mm/a)
Media	4.26	10.37	1.33
Error típico	0.56	0.28	1.21
Mediana	3.99	10.37	0.64
Desviación estándar	5.41	2.72	11.72
Varianza de la muestra	29.29	7.39	137.29
Curtosis	0.52	-0.46	10.89
Coeficiente de asimetría	0.33	0.11	-0.12
Rango	30.24	12.56	112.25
Mínimo	-11.28	3.83	-57.25
Máximo	18.96	16.39	55.01
Suma	400.42	974.56	125.08
Cuenta	94.00	94.00	94.00

Se observa que los valores de la componente norte tienen menor variabilidad, mientras que la componente vertical la más alta. La variabilidad de los datos permite en un primer vistazo determinar cuales tendrán un menor error de predicción (Webster y Oliver, 2007).

Debido a que los valores de las componentes este y norte cuentan con coeficientes de asimetría y curtosis entre ± 0.5 , se deduce que tienen una distribución de los datos aproximada a la normal (Webster y García, 2005). No ocurre así con la componente vertical con un valor de curtosis de 10.89 que determina una alta concentración de los datos en la región central de la distribución. Esto también se puede verificar a través de los gráficos QQ-plot (Figura 5.2) donde observamos la no normalidad de la componente vertical, así mismo podemos apreciar que la componente norte es la que mejor se ajusta a una distribución normal. Este criterio es de suma importancia ya que en cuanto los datos se aproximan a una distribución normal se obtienen mejores estimaciones en la predicción.

Figura 5.2. Gráficos QQ-plot para los valores de velocidades en los tres componentes.

Otra alternativa es la prueba de Kolmogórov-Smirnov, que es una prueba no paramétrica para verificar la normalidad de una distribución (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Prueba de Kolmogórov-Smirnov para una sola muestra. Las velocidades se encuentran en mm/a.

		Ve	Vn	Vu
Número de datos		94	94	94
Parámetros normales ^{a,b}	Media	4.23	10.37	1.33
	Desviación Estándar	5.53	2.72	11.72
Diferencias más extremas	Absoluta	0.09	0.08	0.19
	Positiva	0.08	0.08	0.19
	Negativa	-0.09	-0.05	-0.16
Z de Kolmogórov-Smirnov		0.88	0.74	1.86
Significación Asintótica (bilateral)		0.42	0.64	0.002

a. La distribución de contraste es normal

b. Se han calculado a partir de los datos

En la Tabla 5.4 comprobamos el nivel de significación asintótica, si es menor que 0.05 la distribución no es normal, si es mayor que 0.05 la distribución es normal. En este caso la distribución no es normal para la componente vertical (nivel de significación 0.002).

En muchos casos, las distribuciones están lejos de ser normales, y estas desviaciones de la normalidad dan lugar a estimaciones inestables y hacen que tanto la inferencia como la interpretación sean menos ciertas de lo que de otra manera podrían ser.

Otros gráficos importantes son los histogramas y diagramas de caja (Figura 5.3) que sirven para obtener un panorama general de la distribución de los datos, estos últimos además nos indican los valores anómalos o atípicos que no necesariamente deben ser eliminados.

Figura 5.3. Histogramas y diagramas de caja de las velocidades en las tres componentes. Los histogramas de las tres componentes se encuentran en diferentes escalas horizontales y verticales.

En nuestro caso tenemos dos valores anómalos para la componente este. El primer valor atípico se trata de una estación de monitoreo continuo (Punto 15) correspondiente a la estación LREC ($V_e = -11.28 \pm 2.88$ mm/año) que se encuentra en el extremo oriental del país (Figura 5.4), del que no se tienen valores cercanos para comprobar su velocidad. El otro corresponde a una estación pasiva (Punto 71) identificada como la estación PTGL ($V_e = 18.95 \pm 1.30$ mm/año) con valores de

velocidad acordes a los de su contorno. Esta estación se encuentra en el extremo noroccidental de la zona en estudio (Figura 5.4). Creemos que los valores de la estación PTGL antes de ser tomados como errores de medición, pueden ser estimados como un reflejo del comportamiento espacial del movimiento complejo de la corteza terrestre en la zona, por cuanto se ha decidido considerarla. La estación LREC se la incluye debido a que no hay estaciones cercanas para contrastarla o para poder sustituirla.

Figura 5.4. Ubicación de las estaciones con valores atípicos.

El problema de la alta variabilidad de los datos en la componente vertical se refleja en la presencia de un gran número de datos atípicos, por cuanto las predicciones en esta componente no serán buenas.

La determinación de los valores atípicos se considera importante dentro del análisis geoestadístico, porque hay ciertos modelos utilizados que son muy sensibles a estos valores (Webster y Oliver, 2007), por tanto, hay que tener especial cuidado en las predicciones realizadas cerca de estos puntos.

Un gráfico importante es el de dispersión tanto para la detección de relaciones entre variables como para la identificación de tendencias, puesto que esto sería una de las condiciones que determinaría el método Kriging a utilizarse (Figura 5.5).

Figura 5.5. Gráficos de dispersión de valores de velocidad respecto a las coordenadas geográfica. a) Componente este, b) Componente norte, c) Componente up.

Los gráficos de dispersión de la Figura 5.5 respecto a las coordenadas longitud y latitud permiten apreciar una tendencia de la velocidad en las componentes este y norte a lo largo de estas direcciones, lo que hace suponer que el valor promedio de la misma no es constante en toda la región. La componente vertical no presenta tendencia y existen algunos valores apartados del valor promedio.

De los diferentes métodos descritos en el apartado 5.3, el más adecuado cuando existe tendencia en los datos es el Kriging Universal, que será utilizado para las componentes este y norte.

5.3.2. Análisis estructural o modelación de las funciones de correlación

Dado que la geoestadística trata de un conjunto de datos espaciales como una muestra de la realización de un proceso aleatorio, nuestro resumen debe incluir la correlación espacial, que será analizada en este apartado.

Esta etapa concierne a la modelación de la correlación de los datos, los mismos que deben corresponder a variables de tipo regionalizada y cumplir con la hipótesis de estacionariedad. Los fundamentos básicos se indican a continuación.

5.3.2.1. Variable regionalizada

Cuando la variable medida en el espacio presenta una estructura de correlación se denomina variable regionalizada. Se la define como un proceso estocástico con dominio contenido en un espacio euclidiano d -dimensional R^d , tal que $\{Z(x): x \in D \subset R^d\}$, en donde $Z(x)$ es la variable medida en el sitio x de la región D en estudio, es decir, el conjunto de valores reales de $Z(x)$ que comprenden la realización de la función aleatoria se conoce como variable regionalizada (Giraldo et al., 2000). Los valores de las variables regionalizadas, por otro lado, tienden a estar relacionados. En general, los valores en dos lugares próximos entre sí son similares, mientras que los de lugares más separados son menos semejantes.

En nuestro caso $Z(x)$ representa la velocidad de las estaciones en cada una de sus componentes.

5.3.2.2. Estacionariedad de segundo orden

Al asumir estacionariedad de las variables nos referimos a que los indicadores estadísticos y distribución de frecuencias son invariables a la traslación. Es decir, para todo incremento h , la distribución probabilística de $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ es la misma a un valor h de distancia $Z(x_1+h), Z(x_2+h), \dots, Z(x_n+h)$, lo que hace posible realizar inferencias estadísticas de la variable.

Se dice que $Z(x)$ es estacionario de segundo orden si cumple:

$$E [Z(x)] = m(x) = m ; m \in R, \quad \forall x \in D \subset R^d \quad (5.1)$$

$$COV [Z(x), \quad Z(x+h)] = C(h) < \infty \quad (5.2)$$

Es decir, que el valor esperado de la variable es finito y constante para todos los puntos en el dominio y para toda pareja $\{Z(x), Z(x+h)\}$ la covarianza existe y es función única de la distancia h .

5.3.2.3. Estacionariedad débil o intrínseca

Matheron (1963) desarrolló la hipótesis de estacionariedad intrínseca. Debido a que en muchos de los fenómenos físicos la varianza no es finita, esta hipótesis asume que los incrementos $[Z(x+h) - Z(x)]$ son estacionarios:

1. La esperanza de los incrementos es cero, debido a que $Z(x)$ tiene esperanza finita y constante para todo punto en el dominio.

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (5.3)$$

2. La varianza del incremento está definida y es función única del vector de separación h .

$$V[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (5.4)$$

$$E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2\gamma(h) \quad (5.5)$$

Cuando una variable regionalizada es estacionaria fuerte entonces también será estacionaria débil o intrínseca. En casos prácticos es compleja la determinación de estacionariedad debido a que en el campo espacial existen múltiples direcciones y por tanto se asume que en todas estas el fenómeno es estacionario. Cuando la correlación espacial no depende de la dirección se dice que el fenómeno es isotrópico caso contrario es anisotrópico.

5.3.2.4. Funciones de correlación espacial

Para determinar la dependencia espacial entre los datos medidos de una variable se pueden usar las siguientes funciones de correlación espacial: variograma o semivariograma, covariograma y correlograma.

- Variograma o semivariograma.

Como se mencionó anteriormente, la estacionariedad débil asume que la varianza de los incrementos de una variable regionalizada era finita, denominando a esta función como variograma. De la ecuación 5.5 despejamos el valor de $\gamma(h)$.

$$\gamma(h) = \frac{E[Z(x+h) - Z(x)]^2}{2} \quad (5.6)$$

Que expresado en sumatoria nos da

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n} \quad (5.7)$$

Esta función se la conoce como semivariograma, donde $Z(x)$ es el valor de la variable en un sitio x , $Z(x+h)$ es otro valor muestral separado del anterior una distancia h y n es el número de parejas que se encuentran separados por dicha distancia.

- Covariograma.

La función de covarianza muestral entre parejas de observaciones que se encuentran a una distancia h se calcula empleando la formula clásica de la covarianza muestral por:

$$C(h) = \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x+h) - m) \cdot (Z(x) - m)}{n} \quad (5.8)$$

donde m representa el valor promedio en todo punto de la región de estudio y n es el número de parejas de puntos que se encuentran a una distancia h .

La relación entre el covariograma y el semivariograma está dado por:

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \quad (5.9)$$

- Correlograma.

Asumiendo que el fenómeno es estacionario y estimando la varianza de la variable regionalizada a través de la varianza muestral, se tiene que el correlograma muestral está dado por:

$$r(h) = \frac{COV(Z(x+h), Z(x))}{S_{x+h}S_x} = \frac{C(h)}{S_x^2} = \frac{C(h)}{C(0)} \quad (5.10)$$

Si el fenómeno cumple con el supuesto de estacionariedad se pueden emplear cualquiera de estas tres funciones de correlación espacial. Sin embargo, en la práctica frecuentemente es más utilizado el semivariograma porque no requiere realizar estimación de parámetros como el caso de las otras funciones (Webster y Oliver, 2007), por tanto, nos enfocaremos al estudio de esta función de forma más detallada.

5.3.2.5. Semivariograma experimental y teórico

El semivariograma experimental se obtiene a través del cálculo de las funciones de semivarianza para varios valores de h . Debido a la irregularidad del muestreo y a la distancia de los sitios muestreados se determinan intervalos de $\{[0, h], [h, 2h], [2h, 3h], \dots\}$ para obtener el semivariograma experimental, del cual se toma el promedio de las distancias para cada intervalo con su correspondiente valor de semivarianza. La determinación del valor de h puede afectar el semivariograma resultante, por lo que se debe elegir con cuidado. Si h es pequeño, entonces puede haber pocas comparaciones en cada intervalo, dando lugar a un semivariograma experimental que parece errático. Si, por otra parte, h es grande entonces es probable que haya pocas estimaciones y el detalle se pierda. Como nuestros datos están presentes en una distribución espacialmente irregular, utilizamos el criterio de Johnston et al. (2001) quienes indican que el número aproximado de intervalos es 12 y una distancia promedio $\bar{h}$ determinado por la ecuación:

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (5.11)$$

donde A es el área de investigación y n el número de puntos medidos.

Como se verá más adelante, para la solución del problema de la predicción es necesario conocer la estructura de correlación de los datos para cualquier distancia entre los diferentes puntos dentro del área de estudio. El semivariograma experimental se ha obtenido solamente para algunos promedios de distancias, por lo que si requerimos su valor para cualquier distancia es necesario tener un modelo teórico de semivarianza que se ajuste lo más posible al semivariograma experimental obtenido con los datos muestrales. Todos los modelos de semivariograma tienen tres parámetros comunes que son: efecto pepita o *nugget* (C_0), meseta o *sill* (C_1) y alcance o *range* (a), como se muestra en la Figura 5.6.

Figure 5.6. Parámetros de un modelo de semivariograma teórico. La línea continua roja representa el semivariograma teórico, mientras que los puntos azules representan el semivariograma experimental.

El efecto pepita es la discontinuidad puntual en el origen y puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma por cuanto este valor no debe exceder el 50% del valor de la meseta. La meseta representa la cota superior del semivariograma y el rango la distancia a partir del cual dos observaciones son independientes.

En la Tabla 5.5 se presentan los modelos teóricos más comunes de semivariograma con su respectiva expresión matemática.

Tabla 5.5. Modelos teóricos de semivariogramas.

Modelo	Expresión
Circular	$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{2C_0 + C_1}{\pi} \left[\frac{h}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a}\right)^2} + \arcsin \frac{h}{a} \right] & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (5.12)$
Esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (5.13)$
entaesférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{15}{8} \left(\frac{h}{a}\right) - \frac{5}{4} \left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{3}{8} \left(\frac{h}{a}\right)^5 \right] & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases} \quad (5.14)$

Modelo	Expresión
Cuadrático racional	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \frac{19 \left(\frac{h}{a}\right)^2}{1 + 19 \left(\frac{h}{a}\right)^2} \quad \text{para todo } h \quad (5.15)$
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad \text{para todo } h \quad (5.16)$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right] \quad \text{para todo } h \quad (5.17)$
Estable	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^\theta} \right] \quad \text{para todo } h, \quad 0 < \theta \leq 2 \quad (5.18)$

Los modelos descritos anteriormente son los más utilizados y están teóricamente fundamentados. Nuestra tarea ahora es adaptarlos a los valores experimentales y seleccionar el modelo más adecuado. Debido a que la elección de modelos y su adaptación a los datos siguen siendo uno de los temas más controvertidos en la geoestadística, hemos adoptado las recomendaciones dadas por Webster y Oliver (2007) mediante un procedimiento que incorpora inspección visual y ajuste estadístico, que describimos a continuación.

Primero obtenemos el valor de h para determinar los diferentes intervalos de distancia $\{[0, h], [h, 2h], [2h, 3h], \dots\}$ y para cada intervalo obtenemos el correspondiente valor de semivarianza mediante la ecuación 5.7. Para el eje de las abscisas del semivariograma experimental se toman el promedio de distancias para cada intervalo, luego con estos valores trazamos el semivariograma experimental. A continuación, elegimos, de los modelos teóricos mencionados anteriormente, uno o más que mejor se ajusten y con suficiente detalle para respetar las principales tendencias de los valores experimentales que deseamos representar. A continuación, ajustamos a cada modelo a su vez mediante mínimos cuadrados, es decir, minimizando las sumas de cuadrados, entre los valores experimentales y teóricos. Finalmente, inspeccionamos el resultado gráficamente trazando el modelo teórico ajustado en el mismo par de ejes que el semivariograma experimental. Luego elegimos entre ellos al que tiene el menor error cuadrático medio. Otro método para juzgar la bondad de un modelo es la validación cruzada para cada punto muestreado. Estos dos criterios se tomarán en cuenta para la selección final del modelo mediante la técnica Kriging. En el apartado 5.3.3.2 se explica detalladamente cómo se realiza la validación cruzada.

5.3.2.6. Resultados

Aplicando la ecuación 5.11, donde $A \approx (5^\circ)^2$ y $n = 94$ datos, obtenemos un valor aproximado de $\bar{h} \approx 0.40^\circ$. Este valor nos sirve como punto de partida para obtener un valor donde el número de pares tenga mayor representatividad para todos los intervalos. Es decir, que no haya intervalos donde el número de pares sea demasiado pequeño y otros con valores muy altos. Como criterio de selección de h seleccionamos aquellos en el que el número de pares tenga menor dispersión.

Tabla 5.6. Variabilidad del Número de pares para cada valor de h .

$h(^{\circ})$	Desviación Estándar
0.42	319.98
0.41	302.97
0.40	292.37
0.39	283.38
0.38	272.35
0.37	263.53
0.36	267.71
0.35	279.67

La Tabla 5.6 nos indica que para un valor de $h=0.37$ se tiene mayor uniformidad en el número de pares para cada intervalo. En la Tabla 5.7 se presenta los números de pares para este valor de h .

Tabla 5.7. Numero de pares para los diferentes intervalos con $h=0.37^{\circ}$.

Intervalos	# Pares
0-h	142
h-2h	498
2h-3h	694
3h-4h	886
4h-5h	1028
5h-6h	1048
6h-7h	886
7h-8h	798
8h-9h	692
9h-10h	532
10h-11h	480
>11h	872

Una vez obtenido el semivariograma experimental se comparan con los diferentes semivariogramas teóricos descritos anteriormente. En la Figura 5.7 se tienen los semivariogramas que mejor se ajustan a los semivariogramas experimentales en las tres componentes.

Figura 5.7. Modelos de semivariogramas teóricos ajustados al semivariograma experimental para las tres componentes (e , n , u).

En la Figura 5.7 se observa que para la componente horizontal (e , n) los modelos de semivariograma teóricos de mejor ajuste son los modelos Estable y Esférico, para la componente vertical en cambio, no se aprecia un buen ajuste en ninguno de los modelos.

La Tabla 5.8 presenta los valores correspondientes a los errores cuadráticos medios resultantes al comparar los diferentes semivariogramas teóricos con los semivariogramas experimentales. Para las componentes horizontales los que tienen menor error cuadrático medio son los modelos Estable y Esférico lo cual corrobora lo observado visualmente en la figura anterior.

Tabla 5.8. Valores de los parámetros de los semivariogramas teóricos con su correspondiente valor de error cuadrático medio. Las variables en estudio se encuentran en mm/año.

Modelo	<i>Ve</i>					<i>Vn</i>					<i>Vu</i>
	<i>C₀</i>	<i>C₁</i>	<i>a</i>	Θ	<i>rms</i>	<i>C₀</i>	<i>C₁</i>	<i>a</i>	Θ	<i>rms</i>	<i>rms</i>
Circular	0.00	41.60	4.65		2.77	0.00	10.80	4.65		0.77	14.46
Estable	1.16	48.00	4.02	1.89	0.86	1.78	12.00	5.00	1.89	0.36	13.95
Esférico	0.00	48.2	5.03		1.43	0.00	13.02	5.44		0.40	15.79
Pentaesférico	0.00	42.35	4.65		1.98	0.00	10.80	4.65		0.62	16.41
Exponencial	0.00	42.80	4.65		2.78	0.00	11.20	4.65		0.70	18.26

En la componente vertical se muestran valores muy altos de *rms* para todos los modelos debido a que no hay un ajuste claro. El menor valor de *rms* corresponde al semivariograma Estable que en la figura anterior se presenta como una línea horizontal roja. Este tipo de modelo se lo conoce como Modelo de Independencia o “Pepita Puro” y es indicativo de carencia de correlación espacial entre las observaciones de las variables, razón por lo cual no se tendrá en cuenta para la modelización en esta componente.

En cuanto a la elección final del modelo debemos tener en cuenta que además del ajuste, debemos realizar la verificación mediante validación cruzada, por tanto, elegimos los modelos de semivariogramas Estable y Esférico.

5.3.3. Predicción

La predicción mediante Kriging requiere del conocimiento del modelo del semivariograma que mejor describa la estructura de correlación de los datos y del método a utilizar. Para el primer caso se escogieron dos modelos para verificarlos mediante validación cruzada y para el segundo, se obtuvo mediante el análisis exploratorio de datos en base a estadísticos descriptivos descritos en el apartado 5.3.1, especialmente por presentar tendencia en los datos. El método escogido para este estudio es el Kriging Universal y sobre el cual se va a realizar el desarrollo teórico para su respectiva aplicación. La información utilizada se encuentra en Giraldo et al. (2000) y en Webster y Oliver (2007).

5.3.3.1. Estimación de ponderaciones por medio de la función de semivarianza

El método Kriging Universal propone que el valor de la variable puede predecirse como una combinación lineal de las *n* variables aleatorias así:

$$Z^*(x_0) = \sum \lambda_i Z(x_i) \quad (5.19)$$

donde $Z(x_i)$ son los valores medidos y λ_i los pesos o ponderaciones de los valores originales.

Cuando los datos se caracterizan por presentar una tendencia, es frecuente descomponer la variable $Z(x)$ como la suma de la tendencia, tratada como una función determinística, más una componente aleatoria estacionaria de media cero. Es decir:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon(x) \quad (5.20)$$

Con $E(\varepsilon(x)) = 0$, $V(\varepsilon(x)) = \sigma^2$ y por consiguiente $E(Z(x)) = m(x)$.

La tendencia se puede expresar mediante:

$$m(x) = \sum_{i=1}^p a_i f_i(x) \quad (5.21)$$

Las funciones determinísticas $f_i(x)$ son conocidas y *p* es el número de términos empleados para ajustar $m(x)$.

El predictor Kriging Universal será insesgado si:

$$E(Z^*(x_0)) = m(x_0) \quad (5.22)$$

Reemplazando 5.19, 5.20 y 5.21 y desarrollando en 5.22 tenemos:

$$E\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)\right) = m(x_0) \quad (5.23)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i m(x_i)\right) = m(x_0) \quad (5.24)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \left(\sum_{j=1}^p a_j f_j(x_i)\right) = \sum_{j=1}^p a_j f_j(x_0) \quad (5.25)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i f_j(x_i) = \sum_{j=1}^p f_j(x_0) \quad (5.26)$$

Luego, tenemos que para obtener los pesos se debe minimizar la varianza del error de predicción con la condición de insesgamiento descrito en 5.26.

La varianza de predicción, se describe como:

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) \quad (5.27)$$

$Z^*(x_0)$ es el valor calculado en el punto donde no hubo medición y $Z(x_0)$ el valor real de la variable en dicho punto.

Se tiene que:

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) = E(Z^*(x_0) - Z(x_0))^2 \quad (5.28)$$

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) = E\left(\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (m(x_i) - \varepsilon(x_i))\right) - (m(x_0) - \varepsilon(x_0))\right)^2 \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) \\ = E\left(\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (m(x_i) - m(x_0))\right) + \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (\varepsilon(x_i) - \varepsilon(x_0))\right)\right)^2 \end{aligned} \quad (5.30)$$

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) = E\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (\varepsilon(x_i) - \varepsilon(x_0))\right)^2 \quad (5.31)$$

Desagregando las componentes de la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j E(\varepsilon(x_i) \varepsilon(x_j)) \\
 &\quad - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i E(\varepsilon(x_i) \varepsilon(x_0)) + E(\varepsilon(x_0))^2
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

Donde por notación

$$E(\varepsilon(x_i) \varepsilon(x_j)) = COV(\varepsilon(x_i), \varepsilon(x_j)) = C_{ij} \tag{5.33}$$

$$E(\varepsilon(x_0))^2 = \sigma^2 \tag{5.34}$$

Reemplazando 5.33 y 5.34 en 5.32 tenemos:

$$V(Z^*(x_0) - Z(x_0)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sigma^2 \tag{5.35}$$

Para poder minimizar esta función sujeta a la condición de insesgamiento dada en la ecuación 5.26 es necesario utilizar el método de multiplicadores de Lagrange. Así tenemos:

$$\sigma_{lu}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} + \sigma^2 + \sum_{j=1}^p \mu_j \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i f_j(x_i) - f_j(x_0) \right] \tag{5.36}$$

Reemplazando la ecuación 5.9 en 5.33 para dejar en términos de la función de semivarianza resulta:

$$\sigma_{lu}^2 = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma_{ij} + 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} + \sigma^2 + \sum_{j=1}^p \mu_j \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i f_j(x_i) - f_j(x_0) \right] \tag{5.37}$$

Siguiendo el procedimiento acostumbrado para obtener valores extremos de una función, se deriva e iguala a cero, en este caso con respecto a $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$ y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{ij} + \sum_{k=1}^p \mu_k f_k(x_i) = \gamma_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{5.38}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j f_k(x_j) = f_k(x_0) \quad k = 1, 2, \dots, p \tag{5.39}$$

Que en términos matriciales resulta:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & f_{11} & \cdots & f_{p1} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & f_{12} & \cdots & f_{p2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & f_{1n} & \cdots & f_{pn} \\ f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{p1} & f_{p2} & \cdots & f_{pn} & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ f_{10} \\ \vdots \\ f_{p0} \end{pmatrix} \quad (5.40)$$

Para simplificar podemos emplear la siguiente expresión:

$$[\gamma_{ij}] \cdot [\lambda] = [\gamma_{i0}] \quad (5.41)$$

Finalmente los pesos λ_i se obtendrían resolviendo el sistema matricial, así tenemos:

$$[\lambda] = [\gamma_{ij}]^{-1} \cdot [\gamma_{i0}] \quad (5.42)$$

Como queda expresado las matrices de los semivariogramas se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va hacer la predicción.

La varianza de predicción del Kriging Universal está dada por:

$$\sigma_{lu}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} + \sum_{k=1}^p \mu_k f_1(x_0) \quad (5.43)$$

5.3.3.2. Validación del Kriging

Para la selección del semivariograma teórico elegimos entre los diferentes tipos de modelos aquellos cuyas desviaciones al cuadrado fueron las más bajas, de los cuales resultaron elegidos los semivariogramas Esférico y Estable, con menor variación para este último. Pero este criterio no es suficiente para considerarlo como el mejor.

Una forma de elegir entre los modelos competidores es usarlos para el método de Kriging y ver lo bien que se ajustan en los distintos puntos estimados. Para esto hemos seleccionado un conjunto de 16 estaciones que no han entrado en la determinación del modelo y las hemos utilizado para la validación y verificación.

Otra forma de validación o verificación, que también se ha usado, es mediante el proceso conocido como validación cruzada. Este método de validación consiste en excluir la observación de uno de los n puntos muestrales y con los $n-1$ valores restantes y el modelo de semivariograma escogido predecir el valor de la variable en el lugar del punto que se excluyó. Si el modelo de semivarianza escogido describe bien la estructura de correlación espacial, entonces la diferencia entre el valor predicho y el observado debe ser pequeña. Esto se realiza para cada uno de los puntos muestrales, obteniendo n errores de predicción, que mediante el criterio del menor error cuadrático medio se determinará el método más óptimo.

5.3.3.3. Resultados

A continuación, presentamos en la Tabla 5.9 las predicciones realizadas para las estaciones utilizadas para la validación.

Tabla 5.9. Estimación en los puntos de validación utilizando Kriging Universal con modelos de semivariograma Esférico y Estable. Las velocidades se encuentran en mm/año y las incertidumbres están calculadas al 95% de confianza.

Ord.	ESTACIONES	Posición		VALIDACIÓN		K. ESFÉRICO				K. ESTABLE			
		Long. (°E)	Lat. (°N)	Ve	Vn	Ve	Vn	σ_e	σ_n	Ve	Vn	σ_e	σ_n
1	3009_GPS	-79.627	0.989	14.63	15.33	16.88	15.42	0.30	0.15	17.06	15.82	0.22	0.27
2	AU14_GPS	-76.887	-0.730	-2.06	8.85	-2.52	10.67	0.31	0.15	-2.59	10.74	0.22	0.27
3	CAME_GPS	-78.506	-0.679	5.04	10.72	4.29	10.57	0.21	0.10	4.29	10.73	0.22	0.27
4	CONE_GPS	-78.414	-0.660	3.15	10.35	3.43	10.23	0.15	0.08	3.27	10.07	0.22	0.27
5	CORE_GPS	-78.524	-0.327	5.67	10.74	7.70	9.51	0.20	0.10	7.77	9.35	0.22	0.27
6	GONZ_GPS	-79.431	-4.226	-0.70	6.79	-0.93	7.01	0.44	0.22	-1.38	7.25	0.24	0.27
7	IGMV_GPS	-78.494	-0.215	7.65	8.62	7.21	10.86	0.01	0.00	7.21	10.86	0.22	0.27
8	IGNA_GPS	-78.752	-0.450	6.00	11.15	7.82	10.55	0.31	0.16	8.45	10.71	0.22	0.27
9	JERU_GPS	-78.358	-0.005	4.71	11.94	5.17	11.75	0.28	0.14	5.03	11.93	0.22	0.27
10	LCOL_GPS	-79.204	-0.249	8.38	11.71	10.18	12.59	0.41	0.21	10.20	13.10	0.23	0.27
11	MIRA_GPS	-78.509	-0.270	5.29	10.21	6.98	9.85	0.18	0.09	6.93	9.78	0.22	0.27
12	MUIS_GPS	-80.024	0.604	15.21	13.96	17.53	14.20	0.38	0.19	17.51	14.04	0.23	0.27
13	SALN_GPS	-80.991	-2.186	8.85	12.26	10.19	13.23	0.32	0.16	10.56	13.44	0.23	0.27
14	SANL_GPS	-78.829	1.281	9.28	8.94	10.03	9.00	0.15	0.08	9.99	8.84	0.22	0.27
15	TOLA_GPS	-79.045	1.210	11.28	10.73	12.28	11.01	0.39	0.20	12.95	9.91	0.23	0.27
16	TULC_GPS	-77.705	0.812	2.79	12.20	3.85	12.36	0.33	0.16	4.15	12.25	0.22	0.27

Los valores en general muestran una buena aproximación en todos los puntos estimados utilizando los dos métodos Kriging seleccionados. Esto demuestra que la selección de los modelos de semivariogramas con sus respectivos parámetros ha sido determinada en forma adecuada. Para establecer en este caso cual sería el más óptimo de entre los métodos seleccionados calculamos el error cuadrático medio (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Error cuadrático medio de los puntos de validación utilizando Kriging Universal con modelos de semivariograma Esférico y Estable en sus dos componentes.

Modelo	<i>Ve (mm/a)</i>	<i>Vn (mm/a)</i>
	<i>rms</i>	<i>rms</i>
Esférico	1.37	0.88
Estable	1.54	0.98

De acuerdo a los valores de los *rms* calculados se distingue que el mejor corresponde al modelo Esférico para ambas componentes en la predicción de los puntos de validación.

A continuación, presentamos en la Tabla 5.11 los estadísticos obtenidos de aplicar la validación cruzada a los modelos de semivariograma Esférico y Estable.

Tabla 5.11. Valores de estadísticos para los modelos Esférico y Estable en sus dos componentes en la verificación por validación cruzada.

Modelo	<i>Ve (mm/a)</i>		<i>Vn (mm/a)</i>	
	<i>rms</i>	σ^2 de Predicción	<i>rms</i>	σ^2 de Predicción
Esférico	1.76	5.19	1.81	1.26
Estable	2.01	1.82	2.44	1.78

Los valores de *rms* favorecen al modelo Esférico para ambas componentes, sin embargo, se observa que la varianza de predicción en la componente este para el modelo Esférico es muy alto, lo que se debe básicamente a que el ajuste al semivariograma experimental era menor que el semivariograma estable.

Para obtener los resultados de estos modelos se ha desarrollado un programa en

Matlab para la estimación por el método Kriging (Anexo G). Se pueden introducir las coordenadas de un conjunto de puntos donde se desea conocer el valor de la velocidad, o ingresar los datos punto por punto. Los datos de entrada son las coordenadas geodésicas longitud y latitud en grados sexagesimales en formato decimal.

Los modelos determinados sirven igual para calcular las velocidades relativas a la placa Sudamérica fija, puesto que la correlación espacial de las velocidades es la misma.

Los resultados se calcularon en base a una malla de puntos de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran las mallas obtenidas para los modelos Kriging Universal con semivariogramas estable y esférico respectivamente, en coordenadas absolutas. Las Figuras 5.10 y 5.11 muestran las mallas para ambos modelos relativos a la placa Sudamérica fija.

Figura 5.8. Malla $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging estable. En rojo las velocidades de las 94 estaciones dato con sus incertidumbres al 95%. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.

Figura 5.9. Malla 0.25°x0.25° de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging esférico. En rojo las velocidades de las 94 estaciones dato con sus incertidumbres al 95%. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.

Figura 5.10. Malla 0.25°x0.25° de velocidades de la corteza relativas a Sudamérica fija en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging estable. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.

Figura 5.11. Malla $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ de velocidades de la corteza relativas a Sudamérica fija en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Kriging esférico. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.

5.4. Método de Mínimos Cuadrados Colocación

El modelo general de Mínimos Cuadrados Colocación (MCC) constituye un caso muy general de mínimos cuadrados, su característica principal es que además de los parámetros y errores de observación, permite estimar otras cantidades aleatorias de gran interés en muchos problemas geodésicos (Sevilla, 1987).

Esta técnica utiliza métodos estadísticos para su sustento teórico, las observaciones son variables aleatorias y las varianzas de estas variables aleatorias comprenden el modelo estocástico.

5.4.1. Ajuste por mínimos cuadrados. Modelos matemáticos de ajustes

El modelo matemático pretende expresar la relación existente entre observaciones y los parámetros o incógnitas del ajuste. Un modelo matemático aplicado a la solución de problemas consta de: parámetros que son las incógnitas que se desea determinar, observables que son las magnitudes que se pueden obtener mediante equipos de medición, y funciones o relaciones funcionales que son establecidas entre parámetros y observaciones.

Se puede escribir un modelo como:

$$L_a = F(X_a) \quad (5.39)$$

donde F es un conjunto de funciones, X_a son los parámetros ajustados entre sí, no observables y L_a son los valores ajustados, es decir son las variables aleatorias del problema y que linealmente se expresa como:

$$AX_a = L_a \quad (5.40)$$

donde A es la matriz de diseño o de coeficientes del modelo o como la matriz de derivadas parciales del modelo, las derivadas parciales se calculan con los valores aproximados de los parámetros X_0 que son función de las observaciones aproximadas L_0 mediante la ecuación:

$$L_0 = F(X_0) \quad (5.41)$$

La matriz A se define como:

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} |X_0 \quad (5.42)$$

La solución para los parámetros ajustados es:

$$X_a = X_0 + X \quad (5.43)$$

Donde X es el vector de las correcciones de los parámetros del modelo y se obtiene mediante el método de mínimos cuadrados mediante la ecuación:

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (5.44)$$

L es el vector de diferencia entre el vector de las observaciones aproximadas L_0 y el vector de las observaciones L_b , de forma que:

$$L = L_0 - L_b \quad (5.45)$$

Los valores de L_a no coinciden con los observables o valores medidos L_b , a esta diferencia se le conoce como error de observación, luego tenemos que:

$$L_a = L_b + V \quad (5.46)$$

Por tanto, un observable, independientemente si se mida o no, en su forma más general se puede considerar por una parte determinística, que es el valor esperado del observable, y una parte aleatoria, que es propio del fenómeno a estudiar y no tiene nada que ver con el error de observación. Entonces se puede escribir:

$$L_a = L_b + r + s \quad (5.47)$$

donde r es el error aleatorio de medida (ruido) y s es la parte aleatoria propia del campo en el que se realiza un experimento (señal).

Ahora la parte completa aleatoria del observable llamado residual (v), está constituido por el ruido y la señal.

$$v = r + s \quad (5.48)$$

El ruido lo constituye cantidades aleatorias estadísticamente independientes de esperanza matemática cero, las señales son cantidades aleatorias estadísticamente dependientes de media cero. Al repetir varias observaciones en un mismo punto los valores del ruido serán distintos y su esperanza matemática será $E\{r\} = 0$, pero la señal en ese punto siempre será la misma $E\{s\} = s$, la señal cambiará cuando el punto de observación no sea el mismo y en todo el espacio su media será $M\{s\} = 0$, lógicamente se puede tomar que $M\{r\} = r$ (Moritz, 1980).

Así tenemos que, un modelo matemático para un fenómeno que involucra variables aleatorias se encuentra constituido de dos partes: el modelo funcional y el modelo estocástico. A continuación, vamos a explicar brevemente cada uno de ellos y a desarrollar la metodología del método de Mínimos Cuadrados Colocación según la descripción de Sevilla (1987).

5.4.2. Modelo funcional

Si el sistema no contiene ningún elemento aleatorio es un sistema determinístico. En este tipo de sistema las variables de salidas e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Es decir, las relaciones funcionales entre las variables del sistema están perfectamente definidas. Permite determinar las propiedades físicas o geométricas del problema y genera funciones que relacionan parámetros con los observables.

En el modelo funcional de colocación además de los parámetros y los errores de observación se incluye la parte aleatoria de esperanza matemática igual a cero que son el ruido y la señal ya antes definidos.

Para un modelo explícito como el descrito en (5.39) su forma lineal se escribe:

$$Ax + L = V \quad (5.49)$$

Entonces se tiene que:

$$Ax + L = s + r \quad (5.50)$$

donde r es el error aleatorio de medida al que se lo define como ruido, y s se llama señal y es la otra parte aleatoria propia del campo donde se realiza el experimento, independiente del método y equipo de medida.

Se supone que se tiene n observaciones L_b y por lo tanto la misma cantidad de ruidos y señales en los puntos de observación y u parámetros con la condición de que $n > u$ para que haya superabundancia de datos, además deseamos también estimar señales sin correlación con el ruido en puntos donde necesitamos hacer la estimación.

Por cuanto, el primer paso en el método de Mínimos Cuadrados Colocación es determinar una función matemática que mejor se ajuste a los datos observados en función de sus coordenadas. Actualmente existen muchos programas para obtener estos resultados. En este trabajo se lo ha realizado mediante el software Matlab con la herramienta *cftool*. Obtenido este modelo funcional se reemplazan las coordenadas de cada uno de los puntos observados y se obtienen los valores de L_a ajustados de la función.

Con los valores de L_a calculados y los valores de L_b observados obtenemos el error de observación V , dado por la expresión 5.46.

5.4.3. Modelo estocástico

Como se ha dicho, las observaciones son variables aleatorias y las varianzas de estas variables aleatorias comprenden el modelo estocástico. El modelo estocástico entra en el ajuste para introducir información sobre la calidad de las observaciones y la posible correlación entre ellas (Leick, 1995). Esto se lleva a cabo mediante la matriz de varianza-covarianza de las observaciones (Tiberius et al., 1999).

La matriz varianza - covarianza se encuentra dada por:

$$\hat{C} = V \cdot V^T \quad (5.51)$$

La matriz de covarianza de las observaciones, se puede descomponer en covarianzas de las señales y ruidos:

$$\hat{C} = C_{ss} + C_{rr} = C_{L_b L_b} \quad (5.52)$$

Esta matriz de covarianza corresponde solamente a valores entre los sitios muestreados, por tanto, hay que determinar una función de covarianza para cualquier punto dentro del área de estudio. Siendo esto la parte más delicada al aplicar MCC, debido a que las funciones de covarianza son desconocidas y deben aproximarse mediante covarianzas calculadas. Las funciones de las covarianzas constituyen el modelo teórico que representa las covarianzas estimadas en puntos discretos a partir de los datos observados, esta función debe ser definida positiva, se la supone isótropa y depende de la distancia entre los diferentes puntos.

A continuación, describiremos cómo se obtiene esta función denominada matriz de covarianza empírica (Sevilla, 1987).

Matriz de covarianza empírica

Para obtener una estimación empírica de la función covarianza, se toma la distancia máxima de las observaciones y se divide en intervalos de distancias Δd de tal forma que estén suficientemente representados, se realiza una clasificación de los datos para $d, 2d, 3d, \dots$. Para determinar el valor de Δd se tomó el criterio de Johnston et al. (2001) reflejado en la ecuación 5.11 cuyo valor es de 0.4° .

Los valores puntuales para cada distancia se calcularon mediante la siguiente expresión:

$$d_k = (2k + 1)\Delta d, \quad k = 0, 1, \dots \quad (5.53)$$

Entonces el intervalo a considerar para calcular los diferentes valores de covarianza está dado por:

$$d_k - \Delta d < \text{Dist}_{ij} < d_k + \Delta d \quad \text{con } i < j \quad (5.54)$$

Así el valor de la covarianza es el promedio de todas las covarianzas dentro de ese intervalo, entonces tenemos:

$$C(d_k) = \frac{1}{n_k} \sum_{ij} V_i V_j \quad (5.55)$$

Para calcular la covarianza cuando $d=0$ es decir en el mismo punto, se tiene:

$$C(0) = \frac{1}{n} \sum_i^n (V_i)^2 \quad (5.56)$$

Como deseamos obtener el valor de esta función de covarianza para cualquier distancia del área de muestreo, se debe representar gráficamente y ajustar mediante regresión lineal a un tipo de función específica, ya sea de tipo polinómica o parabólica y luego ajustar sus parámetros mediante mínimos cuadrados (Figura 5.12).

Figura 5.12. Matriz de covarianza empírica. Los puntos azules corresponden al promedio de los valores de covarianza dentro de cada intervalo y la línea roja al modelo funcional de la covarianza empírica.

La función resultante nos sirve para determinar la matriz C_{zs} para los puntos en los que queremos hacer la predicción, es decir, calcular $C(d_z)$.

La matriz de covarianza del ruido se obtiene por la precisión de las medidas, se expresa como:

$$C_{rr} = \sigma_0^2 I \quad (5.57)$$

Donde I es la matriz identidad y σ_0^2 es la varianza de la unidad de peso de las observaciones.

Finalmente, la matriz de covarianzas de las observaciones queda expresadas como:

$$\hat{C} = C_{L_b L_b} = C_{ss} + C_{rr} = C(d) + \sigma_0^2 I \quad (5.58)$$

En forma matricial se escribe:

$$\hat{C}(d_{ij}) = \begin{bmatrix} C(0) & C(d_{12}) & \cdots & C(d_{1n}) \\ C(d_{21}) & C(0) & \cdots & C(d_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(d_{n1}) & C(d_{n2}) & \cdots & C(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_0^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_0^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_0^2 \end{bmatrix} \quad (5.59)$$

De esto se verifica que las varianzas en el mismo punto miden señal y ruido, mientras las covarianzas entre distintos puntos se considera solamente la señal.

5.4.4. Predicción de la señal completa

El método de colocación es invariante frente a transformaciones lineales de los datos o de los resultados, pues dicho método tiene como base la teoría de mínimos cuadrados donde tal aserto se verifica.

En este caso la solución de los parámetros es semejante a la de mínimos cuadrados dada en la ecuación 5.44, donde en lugar de la matriz de peso se utiliza la matriz de covarianza empírica.

$$X_{MCC} = -(A^T \hat{C}^1 A)^{-1} (A^T \hat{C}^{-1} L_{MCC}) \quad (5.60)$$

Las señales para las observaciones se calculan mediante:

$$s = C_{ss} \hat{C}^{-1} V \quad (5.61)$$

Análogamente se puede estimar las señales para cualquier otro punto no observado:

$$z = C_{zs} \hat{C}^{-1} V \quad (5.62)$$

Con estas señales se realiza el filtrado en los n puntos de observación originales aplicando la siguiente ecuación:

$$L_s = L_0 - AX - s \quad (5.63)$$

En las nuevas observaciones L_s , ya no aparecen los errores de observación debido a que se ha realizado el filtrado, y nos permite calcular un nuevo vector que los denominaremos L_{MCC} aplicando la ecuación 5.45 y esta se aplica en la ecuación 5.60.

Para la predicción en puntos no muestreados se utiliza los valores de la señal z , determinados en la ecuación 5.62 junto con los valores de los parámetros ajustados mediante colocación mínimo cuadrática X_{MCC} , obtenidos en la ecuación 5.60 mediante la siguiente ecuación:

$$L_z = L_{0z} - BX_{MCC} - z \quad (5.64)$$

Donde B es la matriz de diseño o de coeficientes del modelo correspondiente a los puntos a predecir y L_{0z} el vector de observaciones aproximadas de dichos puntos.

Por tanto, la determinación de los parámetros X es un problema de ajuste, la de la señal z en puntos distintos a los de observación una predicción y la eliminación del ruido un problema de filtrado. La combinación en un solo procedimiento del ajuste, la predicción (interpolación o extrapolación) y el filtrado constituye el problema de colocación general (Moritz, 1980).

5.4.5. Estimación de la precisión a posteriori

La solución por Mínimos Cuadrados Colocación realiza una estimación lineal insesgada de los parámetros y señales que puede obtenerse con los datos del problema en el sentido de que es una estimación lineal insesgada de mínima varianza. La matriz de la covarianza error de los k puntos a estimar, que nos dará la precisión de los puntos restituidos allí, la obtenemos mediante la siguiente expresión dada por Sevilla (1987).

$$E_{kk} = C_{zz} - C_{zs} \hat{C}^{-1} C_{sz} + (C_{zs} \hat{C}^{-1} A - B) E_{xx} (C_{zs} \hat{C}^{-1} A - B)^T \quad (5.65)$$

Donde

$$E_{xx} = (A^T \hat{C}^{-1} A)^{-1} \quad (5.66)$$

5.4.6. Resultados

Se presenta a continuación los modelos funcionales analizados para determinar cuál de ellos se ajusta mejor a los datos en estudio mediante el método Mínimos Cuadrados Colocación. Para la obtención de estos modelos se utilizó la herramienta *cftool* de Matlab. Nos permite obtener los resultados del ajuste y los parámetros con un nivel de confianza del 95%, además indica si el modelo matemático seleccionado está bien o mal condicionado.

El mal condicionamiento de un sistema es inducido por pequeñas variaciones en los valores de las matrices que intervienen en el ajuste lo que provocaría tener un determinante pequeño y una matriz inversa grande que influiría en la inferencia de los resultados.

Así tenemos que para la componente este hemos utilizado funciones de tercer grado y para la componente norte la función utilizada es de segundo grado, el criterio de selección de estas funciones es el que tenga mayor coeficiente de determinación R^2 y que se encuentren bien condicionadas.

En la Figura 5.13 se presenta la función matemática que mejor se adapta a los datos de la componente este, con $R^2 = 0.8775$, que viene dada por:

$$f(\lambda, \theta) = -370.7 - 5 \cdot \lambda - 54 \cdot \varphi - 0.7 \cdot \lambda \cdot \varphi + 2 \cdot \varphi^2 + 0.04 \cdot \lambda \cdot \varphi^2 - 0.15 \cdot \varphi^3 \quad (5.67)$$

Figura 5.13. Función polinómica para la componente este.

En la Figura 5.14 tenemos la función matemática que mejor se adapta a los datos de la componente norte, con $R^2 = 0.6655$, que viene dada por:

$$f(\lambda, \theta) = 2302.0 + 29.3 \cdot \lambda + 6.7 \cdot \varphi + 0.07 \cdot \lambda \cdot \varphi + 0.4 \cdot \varphi^2 \quad (5.68)$$

Figura 5.14. Función polinómica para la componente norte.

Con estos modelos funcionales y mediante el proceso descrito en el apartado anterior se tienen las siguientes matrices de covarianzas empíricas para las componentes este y norte (Figura 5.15). El criterio utilizado para determinar los intervalos de distancia es el mismo utilizado para la obtención de los semivariogramas experimentales (ver ecuación 5.11).

Figura 5.15. Función de covarianza empírica para las componentes este y norte. Los puntos azules corresponden al promedio de los valores de covarianza dentro de cada intervalo y la línea roja al modelo funcional de la covarianza empírica.

Para la componente este se tiene una matriz de covarianza empírica determinada por la función:

$$C(d) = -0.060 \cdot d^3 + 0.747 \cdot d^2 - 2.650 \cdot d + 2.439 \quad (5.69)$$

Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.6683$.

Mientras que para la componente norte la matriz de covarianza empírica está dada por la función:

$$C(d) = -0.018 \cdot d^3 + 0.300 \cdot d^2 - 1.336 \cdot d + 1.483 \quad (5.70)$$

Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.4126$.

Una vez obtenidas las matrices de covarianza empírica se determinaron las estimaciones para los puntos de validación y sus incertidumbres, mediante las ecuaciones 5.60 hasta la ecuación 5.64. En la Tabla 5.12 se presentan las predicciones de dichos puntos.

Tabla 5.12. Estimación en los puntos de validación utilizando Mínimos Cuadrados Colocación

Ord.	ESTACIONES	Posición		VALIDACIÓN		MCC			
		Long. (°E)	Lat. (°N)	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)	σ_{ve} (mm/a)	σ_{vn} (mm/a)
1	3009_GPS	-79.627	0.989	14.63	15.33	16.76	14.80	0.30	0.22
2	AU14_GPS	-76.887	-0.730	-2.06	8.85	-2.47	10.30	0.29	0.22
3	CAME_GPS	-78.506	-0.679	5.04	10.72	4.39	10.37	0.31	0.24
4	CONE_GPS	-78.414	-0.660	3.15	10.35	3.79	10.43	0.32	0.24
5	CORE_GPS	-78.524	-0.327	5.67	10.74	7.36	10.05	0.32	0.24
6	GONZ_GPS	-79.431	-4.226	-0.70	6.79	-0.72	6.74	0.26	0.20
7	IGMV_GPS	-78.494	-0.215	7.65	8.62	6.90	10.48	0.32	0.24
8	IGNA_GPS	-78.752	-0.450	6.00	11.15	7.53	10.49	0.29	0.22
9	JERU_GPS	-78.358	-0.005	4.71	11.94	5.39	11.38	0.30	0.23
10	LCOL_GPS	-79.204	-0.249	8.38	11.71	10.01	12.00	0.27	0.21
11	MIRA_GPS	-78.509	-0.270	5.29	10.21	7.02	10.19	0.32	0.24
12	MUIS_GPS	-80.024	0.604	15.21	13.96	17.45	14.42	0.28	0.21
13	SALN_GPS	-80.991	-2.186	8.85	12.26	9.73	13.26	0.30	0.22
14	SANL_GPS	-78.829	1.281	9.28	8.94	9.85	10.95	0.32	0.23
15	TOLA_GPS	-79.045	1.210	11.28	10.73	12.06	12.02	0.27	0.21
16	TULC_GPS	-77.705	0.812	2.79	12.20	3.55	12.69	0.29	0.22

Los valores en general muestran una buena aproximación en todos los puntos estimados, la selección de los modelos funcionales y la función de covarianza empírica han sido seleccionadas adecuadamente. La Tabla 5.13 presenta los valores de los errores cuadráticos medios para las dos componentes obtenidas a partir de los datos de validación.

Tabla 5.13. Error cuadrático medio de la validación para Mínimos Cuadrados Colocación.

Modelo	Ve (mm/a)	Vn (mm/a)
	<i>rms</i>	<i>rms</i>
MCC	1.22	0.95

A continuación, presentamos en la Tabla 5.14 los estadísticos obtenidos de aplicar la validación cruzada mediante MCC para las dos componentes.

Tabla 5.14. Valores de estadísticos para el modelo MCC en sus dos componentes para validación cruzada.

Modelo	Ve (mm/a)		Vn (mm/a)	
	<i>rms</i>	σ^2 de Predicción	<i>rms</i>	σ^2 de Predicción
MCC	1.70	2.30	1.73	1.39

Para obtener los resultados de estos modelos se han desarrollado dos programas en Matlab para la estimación por el método Mínimos Cuadrado Colocación (Anexo H). En uno de ellos se introducen las coordenadas de un conjunto de puntos donde se desea conocer el valor de la velocidad, en el otro se introducen los datos punto por punto. Los datos de entrada son las coordenadas geodésicas longitud y latitud en grados sexagesimales en formato decimal.

Los resultados se calcularon en base a una malla de puntos de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Las Figuras 5.16 y 5.17 muestran las mallas obtenidas para el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación, en coordenadas absolutas y relativas a la placa Sudamérica fija, respectivamente.

Figura 5.16. Malla $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación. En rojo las velocidades de las 94 estaciones dato con sus incertidumbres al 95%. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.

Figura 5.17. Malla 0.25°x 0.25° de velocidades de la corteza relativas a Sudamérica fija en Ecuador, obtenida mediante el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación. En negro las velocidades predichas en la malla con sus incertidumbres al 95%.

5.5. Discusión y conclusiones

Para determinar un modelo que mejor se ajuste al movimiento de la corteza terrestre en Ecuador, se han utilizado dos técnicas geoestadísticas de predicción en puntos no muestreados: Kriging y Mínimos Cuadrados Colocación, en la Tabla 5.15 se presenta un compendio de los resultados presentados por los dos métodos.

Tabla 5.15. Valores de estadísticos para las distintas técnicas utilizadas en la verificación por validación cruzada.

MODELO	Ve (mm/a)		Vn (mm/a)	
	rms	Varianza de Predicción	rms	Varianza de Predicción
K. U. Esférico	1.76	5.18	1.81	1.24
K. U. Estable	2.01	1.50	2.44	1.63
MCC	1.70	2.30	1.73	1.39

Primeramente, realizamos un análisis de los métodos Kriging utilizados en la modelización. De la Tabla 5.15 observamos que los valores de estos estadísticos nos indican que el modelo esférico se ajusta mejor en la componente norte con los valores más bajos de *rms* y varianza de predicción. Para la componente este el modelo estable tiene menor valor en la varianza de predicción, pero con un valor más alto en error cuadrático medio. Se revisó cada uno de los valores estimados por validación cruzada en donde las mejores aproximaciones en casi la totalidad de los datos los tiene el modelo esférico, salvo en el punto 15 donde se encuentra un valor atípico en la zona de frontera del área de estudio, que hace que se disparen los valores de los estadísticos, especialmente la varianza de predicción. Lo que significa que en la técnica Kriging los semivariogramas teóricos que mejor se ajusten a los semivariogramas experimentales tienen menor varianza de predicción, no así mejor estimación.

Para la componente este los modelos Kriging Esférico y MCC tiene mejores valores en la predicción de los puntos con *rms* = 1.76 mm/año y *rms* = 1.70 mm/año respectivamente, en comparación con el modelo Estable que tiene un *rms* = 2.01mm/año. Sin embargo, su precisión es mejor porque presenta un menor valor en la varianza de predicción.

Para la componente norte igualmente los modelos Kriging Esférico y MCC tienen mejores valores en las predicciones con *rms* = 1.81 mm/año y *rms* = 1.73 mm/año respectivamente, frente al modelo Kriging Estable que tiene un *rms* = 2.44 mm/año. En esta componente el modelo Kriging Esférico y MCC tienen mejores precisiones con respecto al modelo Kriging Estable.

En la Tabla 5.16 se presentan los resultados de las predicciones en los puntos utilizados para validación, se observa que en la componente este el método que mejor realiza la predicción es el método de MCC. Para la componente norte se puede comprobar que los valores de predicción son muy similares para ambas técnicas de Kriging.

Tabla 5.16. Comparación de las distintas técnicas utilizadas con los datos de validación. Las velocidades se encuentran en mm/año.

Ord.	ESTACIONES	Posición		VALIDACIÓN		MCC		K. ESFERICO		K. ESTABLE	
		Long. (°E)	Lat. (°N)	Ve	Vn	Ve	Vn	Ve	Vn	Ve	Vn
1	3009_GPS	-79.627	0.989	14.63	15.33	16.76	14.80	16.86	15.39	17.05	15.82
2	AU14_GPS	-76.887	-0.730	-2.06	8.85	-2.47	10.30	-2.62	10.64	-2.63	10.73
3	CAME_GPS	-78.506	-0.679	5.04	10.72	4.39	10.37	4.29	10.57	4.29	10.73
4	CONE_GPS	-78.414	-0.660	3.15	10.35	3.79	10.43	3.43	10.23	3.27	10.07
5	CORE_GPS	-78.524	-0.327	5.67	10.74	7.36	10.05	7.70	9.51	7.77	9.35
6	GONZ_GPS	-79.431	-4.226	-0.70	6.79	-0.72	6.74	-0.80	6.86	-1.32	7.18
7	IGMV_GPS	-78.494	-0.215	7.65	8.62	6.90	10.48	7.21	10.86	7.21	10.86
8	IGNA_GPS	-78.752	-0.450	6.00	11.15	7.53	10.49	7.83	10.55	8.45	10.71
9	JERU_GPS	-78.358	-0.005	4.71	11.94	5.39	11.38	5.17	11.75	5.04	11.93
10	LCOL_GPS	-79.204	-0.249	8.38	11.71	10.01	12.00	10.19	12.61	10.20	13.09
11	MIRA_GPS	-78.509	-0.270	5.29	10.21	7.02	10.19	6.98	9.85	6.93	9.78
12	MUIS_GPS	-80.024	0.604	15.21	13.96	17.45	14.42	17.49	14.21	17.55	14.07
13	SALN_GPS	-80.991	-2.186	8.85	12.26	9.73	13.26	9.67	13.16	10.44	13.42
14	SANL_GPS	-78.829	1.281	9.28	8.94	9.85	10.95	10.03	9.01	9.99	8.84
15	TOLA_GPS	-79.045	1.210	11.28	10.73	12.06	12.02	12.26	11.00	12.95	9.90
16	TULC_GPS	-77.705	0.812	2.79	12.20	3.55	12.69	3.81	12.39	4.15	12.25

Los errores cuadráticos medios de estos resultados para cada método se presentan en la Tabla 5.17 donde se corrobora lo dicho anteriormente.

Tabla 5.17. Errores cuadráticos medios (en mm/año) obtenidos de los datos de validación en las diferentes modelos de predicción espacial.

Modelo	<i>rms</i> v_e	<i>rms</i> v_n
Colocación	1.22	0.95
Kriging Esférico	1.37	0.88
Kriging Estable	1.54	0.98

Como conclusión podemos decir que entre los modelos Kriging que mejor se ajustan al campo de velocidad de la corteza terrestre para Ecuador se tiene el Método de Kriging Universal utilizando un modelo de semivariograma Esférico, de acuerdo a los valores validados y a los respectivos estadísticos utilizados.

En cuanto a la comparación entre las técnicas de Mínimos Cuadrados Colocación y Kriging Universal con semivariograma Esférico, los estadísticos favorecen al método de Mínimos Cuadrados Colocación. Sin embargo, se ha procedido a verificar los resultados de estas dos técnicas con datos formados por una malla de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ encontrando diferencias menores a 1 mm (Figura 5.18).

Figura 5.18. Malla $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ con las diferencias entre las velocidades absolutas obtenidas con el modelo de Kriging Esférico y el modelo de Mínimos Cuadrado Colocación.

El modelo de velocidad horizontal calculado por los enfoques de Mínimos Cuadrados Colocación y Kriging proporcionan un modelo de deformación continua sobre la corteza terrestre de Ecuador. Estos modelos pueden ser mejorados mediante la inclusión de más observaciones en el espacio y en el tiempo.

La componente de velocidad vertical no se incluyó en el modelo, ya que su modelización no pudo realizarse debido a que no se encontró correlación alguna entre sus datos. Es conocido que las alturas determinadas mediante procesamiento GNSS son hasta tres veces menos precisas que las coordenadas horizontales principalmente por la configuración del sistema. Existen otros factores que afectan a su determinación como son la refracción atmosférica, variaciones del centro de fase de las antenas, etc., que están altamente correlacionadas con esta componente.

Por último, se ha hecho una comparación de los tres modelos obtenidos en el presente trabajo (Kriging estable, Kriging esférico y Mínimos Cuadros Colocación) con el modelo VEMOS2015 (Sánchez y Drewes, 2016) utilizando para ello una malla de $1^\circ \times 1^\circ$ (resolución en la que se publica el modelo VEMOS2015). Las Figuras 5.19 y 5.20 muestran las velocidades obtenidas en cada uno de estos modelos en la malla indicada, en velocidades absolutas y relativas, respectivamente. Como se puede apreciar los tres modelos obtenidos en el presente estudio obtienen valores muy parecidos. Las diferencias mayores con el modelo VEMOS2015 se obtienen en la zona noreste y este, zonas con mayor deformación tectónica local.

Figura 5.19. Malla $1^\circ \times 1^\circ$ de velocidades absolutas de la corteza en Ecuador obtenidas con el modelo Kriging Esférico (rojo), Mínimos Cuadrado Colocación (azul) y VEMOS2015 (negro) (Sánchez y Drewes, 2016).

Figura 5.20. Malla 1°x 1° de velocidades relativas de la corteza en Ecuador obtenidas con el modelo Kriging Esférico (rojo), Mínimos Cuadrado Colocación (azul) y VEMOS2015 (negro) (Sánchez y Drewes, 2016).

Para tomar una decisión al respecto sobre el modelo a seleccionar presentamos algunas ventajas y desventajas de las técnicas de predicción espacial utilizadas en este estudio (Tabla 5.18).

Tabla 5.18. Ventajas e inconvenientes de las técnicas de predicción espacial utilizadas en este estudio: Kriging y Colocación Mínimo Cuadrática.

MODELO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
KRIGING	<p>Los semivariogramas resumen las relaciones espaciales de los datos.</p> <p>La suma de los pesos obtenidos es igual a uno, de forma que la esperanza del predictor es igual a la esperanza de la variable (Requisito de insesgamiento)</p> <p>Mejor estimador lineal insesgado</p> <p>Minimiza la varianza del error de predicción.</p>	<p>La fiabilidad del variograma experimental se ve afectada no sólo por la distribución estadística de los datos, sino también por el tamaño de la muestra (o su inversa, la densidad de los datos) y la configuración o diseño de la muestra.</p> <p>Si las observaciones tienen diferentes precisiones, estas no se consideran en el momento de la predicción.</p> <p>El modelo de semivariograma teórico de mejor ajuste al semivariograma experimental no necesariamente es el que mejor predice (comparación mediante validación cruzada).</p> <p>El semivariograma teórico determinado representará peor a los bordes de la zona de la que provienen los datos</p>
MÍNIMOS CUADRADOS COLOCACIÓN	<p>Realiza una mejor predicción de acuerdo a la comparación realizada con los valores para la verificación y mediante validación cruzada.</p> <p>La distribución de los datos no tiene que responder a esquemas establecidos.</p> <p>El método de colocación en sí mismo ofrece la posibilidad de filtrado de observaciones.</p> <p>Mejor estimador lineal insesgado</p> <p>Minimiza la varianza del error de predicción</p>	<p>Se debe tener especial cuidado en no escoger funciones o matrices mal condicionadas.</p> <p>Una de las partes más delicadas es la determinación de la función de covarianza empírica.</p> <p>La función de covarianza determinada representará peor a los bordes de la zona de la que provienen los datos</p>

Con lo expuesto anteriormente se ha decidido utilizar el método de Mínimos Cuadrados Colocación, basado en el hecho que realiza una mejor predicción tanto para los valores de verificación como por los resultados obtenidos en la validación cruzada, además en este estudio las desventajas son menores que los métodos Kriging utilizados.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES FINALES.

LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo de investigación se inicia con la adquisición de datos GNSS de las estaciones que conforman la Red GNSS de Monitoreo Continuo de Ecuador (REGME), para su posterior procesamiento mediante el software Bernese 5.0 calcular las soluciones finales diarias que finalmente generan series temporales de las posiciones diarias de cada estación.

Se realizó un análisis exhaustivo de las series de tiempo donde se consideró la descomposición de las mismas en tendencia, estacionalidad y tipo de ruido para poder estimar con mayor fiabilidad las velocidades de cada una de las estaciones.

Con estas velocidades y la inclusión de algunas estaciones de la Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE) sirvieron para determinar un modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador, lo que ha permitido conocer características importantes dentro del área de estudio y sacar algunas conclusiones significativas y futuras líneas de investigación.

A continuación, presentamos las conclusiones más relevantes.

6.1. Procesamiento de datos GNSS

Para obtener soluciones fiables utilizando procesamiento GNSS mediante software científico, es necesario seguir todas las recomendaciones dadas por las instituciones internacionales en cuanto a estrategia y modelos a utilizar. Una de las mayores dificultades encontradas en este estudio ha sido las inconsistencias encontradas en los archivos *logfiles* entre las diferentes instituciones encargadas de proveerlas. Es de suma importancia la actualización de los archivos *logfiles* con información veraz, para no tener dificultades en trabajos futuros. Esto se evidencia cuando en la serie temporal existen saltos u *offset* que no han sido generados por causas naturales como movimientos sísmicos, estos efectos se dan especialmente cuando hay un cambio de antena y no ha sido reportado en el *logfile* correspondiente.

Otro aspecto importante es trabajar con efemérides precisas definidas en un solo marco de referencia para obtener un procesado homogéneo y evitar discontinuidades o saltos en las soluciones finales, con esto se mejoraría los parámetros a estimar dentro de cualquier estudio que involucre el conocimiento de la determinación precisa de las coordenadas de las estaciones.

La estrategia de procesamiento utilizada en este estudio se rige a lo establecido por el IGS con pequeñas modificaciones. Se sugiere probar con otra estrategia de procesamiento, así como otros modelos para la corrección debido a variaciones troposféricas, carga oceánica, etc., y realizar la comparación entre diferentes estrategias debido a que puede haber otros modelos que se ajusten mejor al área de estudio.

Se realizó el procesamiento tanto para obtener soluciones diarias como semanales para poder realizar una comparación en cuanto a precisiones. Se observaron que los valores

de la precisión de las soluciones semanales son prácticamente iguales para todas las estaciones, siendo las precisiones de las soluciones semanales de 2 a 3 veces mejores que las precisiones de las soluciones diarias debido a que las soluciones semanales de las estaciones son obtenidas de la combinación de las soluciones diarias.

Los valores más altos de repetibilidad se encuentran en la componente vertical. La estación con el mayor promedio de repetibilidad corresponde a la estación LJEC (4.06 mm), que tiene prácticamente los valores más altos en todas las componentes y es la estación con mayor porcentaje de valores atípicos eliminados. El valor más bajo de promedio de repetibilidad semanal corresponde a la estación QUI1 (1.67 mm) siendo una de las estaciones con menor tiempo de observación (0.82 años).

Las coordenadas estimadas de las estaciones fiduciales se verificaron por medio de una transformación de Helmert de tres parámetros, lo que permitió detectar que la estación ANTC presentaba valores anómalos, encontrándose desplazada debido al terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010. Esta estación fue eliminada para los procesos posteriores a esta fecha.

6.2. Análisis de Series Temporales

El análisis de series temporales se realizó en base a soluciones diarias con el fin de obtener mayor información acerca del comportamiento de cada estación. Sin embargo, en este estudio también se determinaron soluciones semanales y valores de repetibilidad semanal para comparar especialmente las precisiones de cada solución.

Una vez que se han generado las soluciones diarias del procesamiento y se transforman a un sistema local para obtener las series temporales, es necesario realizar las correcciones de *offset* si las hubiere y la eliminación de valores anómalos. Se han aplicado dos métodos de eliminación de valores atípicos: primero mediante la aplicación de los procesos integrados que detectan los valores atípicos de dos observaciones consecutivas, algunos de estos valores generalmente no son visibles en la serie porque se encuentran dentro de la tendencia de la misma y luego considerando la tendencia de la serie y eliminando todos aquellos que se encuentren fuera del rango establecido, generalmente tres desviaciones estándar. Se ha observado que la estación LJEC es la que presenta mayor porcentaje de valores atípicos eliminados, esta estación se encuentra ubicada sobre la azotea del tercer piso del edificio del Centro de Investigación, Transferencia de Tecnología y Extensión de la Universidad Técnica Particular de Loja, sobre una torre de 3.30 metros de altura. Se ha procedido a verificar con datos posteriores que esta estación muestra datos anómalos especialmente en la componente este.

La detección y corrección de los *offsets*, así como la eliminación de los valores atípicos encontrados en las series influyen de manera importante en la determinación de los parámetros en estudio, en nuestro caso la estacionalidad, tendencia, tipo de ruido, velocidad e incertidumbre.

En cuanto a los valores obtenidos en la estacionalidad se observó que los valores en la componente vertical son de 1 a 7 veces mayores en amplitud que la componente horizontal. Estudios realizados por Amiri-Simkooei et al. (2007) en series temporales de 10 años con registros diarios, de un conjunto de 71 estaciones con distribución global concluyeron que, para cualquier modelo de ruido, los componentes horizontales tienen menor amplitud de ruido que el componente vertical en el orden de un factor entre 2 y 4.

Como la estacionalidad o periodicidad de las estaciones se muestra más claramente en la componente vertical, se ha tomado ésta componente para clasificar las estaciones en tres categorías de acuerdo a su periodicidad: (1) Movimiento periódico del suelo no modelado: en esta categoría se encuentran las series con estacionalidad anual y semianual, se refiere a que el sitio se está moviendo periódicamente (Amiri-Simkooei et al., 2007). Dentro de esta categoría se encuentran la mayoría de las estaciones con un total de 20 sitios. (2) Variación periódica de las series temporales estimadas: corresponden a estaciones que aparentemente se mueven en forma periódica, pero son producto de errores sistemáticos como el efecto marea que producen series temporales con falsos efectos sistemáticos (Penna y Stewart, 2003; Stewart et al., 2005; Amiri-Simkooei et al., 2007). Dentro de esta categoría se encuentran 7 estaciones. (3) Las variaciones periódicas que se encuentran correlacionadas con los años de observación: en esta categoría se encuentran las estaciones que tiene como primer periodo fundamental a la mitad del tiempo de observación o al tiempo total de observación, dentro de esta categoría se encuentran un total de 6 estaciones.

No se han podido determinar diferencias significativas de variaciones cíclicas entre estaciones que se encuentran en las diferentes regiones naturales (Costa, Sierra y Amazonía).

Tanto la determinación de la estacionalidad como el tipo de ruido se realiza mediante análisis espectral, es decir en el dominio de las frecuencias. Debido a una mezcla de efectos, es difícil determinar la fuente del ruido y la exactitud de las series de tiempo GNSS. La comprensión del contenido del ruido es muy importante para que se puedan asignar incertidumbres realistas a los parámetros estimados a partir de ellos.

Varios autores sugieren que el ruido blanco y ruido rosa dominan el espectro de ruido de coordenadas GNSS para las series temporales y en una pequeña cantidad el ruido browniano (Zhang et al., 1997; Mao et al., 1999; Williams, 2003b; Williams et al., 2004; Ray et al., 2008; Klos et al., 2015). Sin embargo, nuestros resultados arrojan ruido gaussiano fraccionario en todas las estaciones y en todas las componentes. Se esperaba obtener al menos ruido rosa, puesto que las series tienen periodos de observación que van de 2 a 7 años. Además 26 estaciones están ubicadas en las azoteas de edificios públicos y 7 sobre el terreno, sin embargo, no se encontró ninguna correlación del tiempo de observación, el ruido y la ubicación de las estaciones.

La serie de tiempo con las posiciones GPS obtenidas tienen un comportamiento no lineal complejo y, por lo tanto, el modelo estadístico de la serie de tiempo es más complejo que el simple ruido blanco. Por ende, suponemos que el valor de ruido obtenido no refleja el verdadero tipo de ruido existente, debido principalmente a los gaps encontrados en cada serie. Esta es una desventaja importante en nuestro estudio, lo que significa que la longitud total de la serie no es lo suficientemente larga o está con demasiados valores perdidos dentro de ella que no nos permiten detectar algunos modelos de ruido específicos sobre otros ruidos. Como resultado los parámetros en estudio como la tendencia, estacionalidad, tipo de ruido y velocidades finales pueden estar sesgados. Sin embargo, esto no ocurre con todas las series temporales de las estaciones analizadas, lo que nos llevaría a concluir que la no existencia de otro tipo de ruido se deba a que la estrategia de procesamiento utilizada modele adecuadamente los errores y no contribuya al ruido en gran medida o a la eliminación de valores atípicos mediante los procesos integrados.

Los índices espectrales determinados por Zhang et al. (1997) analizados en 10 estaciones con mediciones diarias en 1.6 años de observación varían entre -0.05 y -0.52 con un promedio de -0.40. Se ha demostrado que para tiempos de observación cortos el

ruido blanco es la contribución de ruido dominante, mientras que para las observaciones más largas es el ruido browniano (Hackl et al., 2011).

Para las estaciones con mayor tiempo de observación se verifica que la componente norte es más ruidosa que las demás componentes. En general, la componente horizontal tiene una mayor magnitud de ruido que la componente vertical. Para zonas menos complejas tectónicamente se encontraron que las componentes horizontales eran menos ruidosas que la componente vertical (Amiri-Simkooei et al., 2007).

En la comparación de los valores de los índices espectrales de todas las estaciones en sus tres componentes no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ellas. Mao et al. (1999) utilizaron series de tiempo de posiciones diarias de 23 estaciones globalmente distribuidas con 3 años de datos, los índices espectrales determinados varían entre -0.51 y -2.17 y llegaron igualmente a la conclusión de que no existe una diferencia significativa en la naturaleza espectral del ruido en la componente norte, este y vertical.

Una vez obtenidos la tendencia, estacionalidad y tipo de ruido se han considerado todos estos parámetros para realizar un ajuste de mínimos cuadrados y obtener las velocidades finales con sus respectivas incertidumbres. Al comparar las incertidumbres con la primera estimación de la velocidad observamos que existe una mejoría en todas las componentes en la determinación de estos parámetros, con valores que van hasta 0.2 mm/año, en la componente horizontal, y 0.7 mm/año, en la componente vertical. En cuanto a la variabilidad de los puntos alrededor de la tendencia tenemos que los valores de los *wrms* mejoran hasta en 3 mm en la componente horizontal en algunas estaciones. Los valores de las velocidades también varían entre -1.0 a 2.5 mm/año en la componente horizontal y -7.0 mm/año a 5.0 mm/año en la componente vertical. Una comparación entre precisiones antes y después de considerar la estacionalidad y ruido se observa una mejora de 11% de media para todas las componentes.

Una observación importante se dio al comparar nuestras estaciones con datos menores a dos años con las estaciones de la solución SIR15P01 con más de 2.5 años de observación, observamos que las diferencias obtenidas son pequeñas. Esto nos hace suponer que la introducción de las variaciones cíclicas, la tendencia y el ruido en series con periodos de tiempo relativamente cortos (aproximadamente dos años) hacen que mejore la precisión y los valores de la velocidad, aproximándose a valores de velocidad resultantes de series con periodos más largos.

Las velocidades obtenidas por estimación mínimo cuadrática (EMC) introduciendo tendencia, estacionalidad y ruido fueron contrastadas con las calculadas con el software CATS que utiliza el método de máxima verosimilitud (MLE).

Una vez analizados los valores de las velocidades con sus respectivas incertidumbres, mediante las soluciones EMC y MLE con ruido blanco y ruido *flicker*, se ha determinado que el valor de las velocidades no varía significativamente entre las diferentes estimaciones en aquellas estaciones que tienen series con más de dos años de observación.

No obstante, las incertidumbres de las velocidades obtenidas por MLE en este estudio son demasiado conservadoras con respecto a las obtenidas con EMC (2 a 7 veces mayores). Davis et al. (2003) afirman que el enfoque MLE produce estimaciones de error de velocidad que puede ser excesivamente conservadoras para muchas estaciones. Por este motivo, consideramos que para una mejor estimación de las incertidumbres obtenidas en la solución EMC, se multiplicarán por un factor de escala de 2, lo que nos dará la incertidumbre final de cada componente de velocidad en la

solución EMC. Por lo tanto, hemos seleccionado las velocidades obtenidas en la solución EMC con ruido blanco e incertidumbres multiplicadas por un factor 2 de escala.

6.3. Campo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador

Con los valores finales de las velocidades y las incertidumbres de todas las estaciones se obtuvo el campo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador, el cual que nos proporciona una evidencia clara de la deformación cortical que actualmente se está produciendo en Ecuador, lo que implica una actividad continua sobre las fallas regionales.

La característica más predominante de nuestras velocidades, respecto al marco de referencia Sur América fijo, es el movimiento dominante hacia el este y el decrecimiento de las velocidades hacia el interior.

Aunque este estudio no aborda las tasas de deformación vertical, los resultados obtenidos para las velocidades verticales muestran claramente elevación en las estaciones situadas en la zona de transición entre el límite del bloque Norandino y la placa Sudamericana (estaciones situadas sobre los Andes), lo cual es coherente con un régimen de transpresión, que produciría la elevación de esta zona. Las estaciones situadas en la costa, más cercanas a la fosa (ESMR, PTEC) registran elevaciones de $\sim 3 \pm 0.2$ mm/año lo cual es coherente con el acoplamiento de la zona de subducción, sin embargo, la estación SEEC, situada a unos 50 km de la fosa, registra una ligera subsidencia de -1.2 ± 0.6 mm/año, lo cual es coherente con un acoplamiento más débil y superficial (entre 0 y 15 km) en esta zona, tal y como sugieren Chlieh et al. (2014).

Destaca el movimiento registrado por la estación ESMR, cercana al epicentro del terremoto ocurrido en abril de 2016 de M_w 7.8, con una componente este claramente mayor (22.3 ± 0.1 mm/año). Creemos que esto es debido a que esta estación podría estar registrando deformación previa al terremoto de abril de 2016, dado que esta estación se encuentra sobre una zona de aspereza acoplada (Chlieh et al., 2014), podría estar acumulando mayor deformación previa al terremoto de 2016.

Además, las estaciones situadas al sur de Ecuador presentan un componente norte negativa, en dirección SE, lo que muestra que estas estaciones presentan un comportamiento claramente distinto, fuera del bloque Norandino, pudiendo estar localizadas en el bloque Inca de Perú, tal y como sugiere Nocquet et al., 2014.

6.4. Modelo de velocidades de la corteza terrestre para Ecuador

Una vez obtenidas las velocidades en las diferentes estaciones, nuestro propósito es describir cuantitativamente cómo las velocidades varían espacialmente y estimar o predecir sus valores en sitios no muestreados mediante modelos que mejor se ajusten al comportamiento del movimiento de la corteza terrestre en nuestra zona de estudio. Para ello hemos probado con dos técnicas de interpolación ampliamente utilizadas como son: Mínimos Cuadrados Colocación y Kriging.

Dentro del análisis Kriging, se seleccionó la técnica de Kriging Universal debido a que los datos presentaban tendencia. Una vez seleccionado el tipo de Kriging se determinó que los modelos que presentaban mejor ajuste a los semivariogramas experimentales eran los modelos de semivariograma Esférico y Estable. De estos dos modelos el que mejor se ajustaba al semivariograma experimental era el semivariograma Estable; sin embargo, de los estadísticos obtenidos, el modelo Esférico realiza una mejor predicción de acuerdo a la comparación realizada con los valores para la verificación y mediante

validación cruzada. Además, se verificó que este modelo es sensible en el cálculo de las estimaciones cercanas a los valores que presentaban datos extremos.

De esto se concluye que para los valores del campo de velocidades obtenidos en este estudio el modelo de semivariograma teórico de mejor ajuste al semivariograma experimental no necesariamente es el que mejor predice.

Del análisis mediante la técnica MCC se comprueba que presentan valores muy aproximados a los valores de verificación y mediante validación cruzada, se obtuvieron mejores estadísticos que en el método Kriging especialmente en los valores de velocidad de la componente Este, donde se utilizó una función de covarianza empírica de tercer orden.

La modelización para la componente vertical no se pudo realizar por no encontrarse una estructura de correlación en sus datos, siendo esta componente la que se obtiene con menor precisión y fiabilidad en el procesamiento GNSS, especialmente por la configuración del sistema.

Con lo expuesto anteriormente se ha decidido utilizar el método de Mínimos Cuadrados Colocación, basado en el hecho que realiza una mejor predicción tanto para los valores de verificación como por los resultados obtenidos en la validación cruzada.

El modelo de velocidad horizontal propuesto proporciona un modelo de deformación continua sobre la corteza terrestre de Ecuador. Este modelo puede ser mejorado mediante la inclusión de más observaciones en el espacio y en el tiempo.

Líneas futuras de investigación

Como líneas futuras de investigación se propone generar métodos o técnicas de filtrado que eliminen o al menos reduzcan el ruido presente en las series temporales. Todos los trabajos previos no presentan una solución a este problema, se estudia y analiza para proporcionar las incertidumbres del parámetro de una forma más realista. Es importante profundizar en este estudio porque clasifica y cuantifica las componentes del ruido, lo que nos puede proporcionar indicios sobre la fuente del ruido y ayudar a aumentar la exactitud y precisión de los datos.

En el presente estudio se ha utilizado la combinación de dos técnicas de eliminación de valores atípicos cuyo resultado ha sido analizado para obtener el tipo de ruido de la serie depurada. Otra línea de investigación es la determinación del tipo de ruido utilizando por separado diferentes técnicas de eliminación de valores atípicos y determinar sus características e influencias de cada una de ellas.

Las velocidades calculadas en el presente estudio han sido determinadas considerando un comportamiento lineal en el movimiento de la corteza terrestre. Una posible línea de investigación sería analizar las series para obtener velocidades considerando comportamientos no lineales.

La estrategia de procesamiento utilizada se rige a lo establecido por el IGS con pequeñas modificaciones, se sugiere probar con otra estrategia de procesamiento, así como otros modelos para la corrección debido a variaciones troposféricas, carga oceánica, etc., y determinar el tipo de ruido objeto de estudio en esta investigación.

Por último, el modelo de velocidades obtenido puede ser mejorado una vez que las series temporales sean más largas y se mejore la estimación de la velocidad y su incertidumbre, así como el número de estaciones REGME aumente, fundamentalmente en la zona costera y oriental del país.

REFERENCIAS

- Agnew, D. C. (1992). The time-domain behavior of power-law noises. *Geophysical research letters*, 19(4), 333-336.
- Agnew, D. C., & Larson, K. M. (2007). Finding the repeat times of the GPS constellation. *GPS solutions*, 11(1), 71-76.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., & Boucher, C. (2007). ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9).
- Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457-473.
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C. J. M., & Teunissen, S. P. (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7). DOI: 10.1029/2006JB004913.
- Ashby, N., & Spilker, J. J. (1996). Introduction to relativistic effects on the Global Positioning System. *Global Positioning System: Theory and applications.*, 1, 623-697.
- Beran, J. (1994). *Statistics for long-memory processes* (Vol. 61). CRC press.
- Berrocoso, M., Ramírez, M. E., Pérez-Peña, A., Enríquez-Salamanca, J. M., Fernández-Ros, A., & Torrecillas, C. (2004). *El sistema de posicionamiento global*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cadiz.
- Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7). DOI: 10.1029/2001JB000570.
- Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2008). Fast error analysis of continuous GPS observations. *Journal of Geodesy*, 82(3), 157-166. DOI: 10.1007/s00190-007-0165-x.
- Boucher, C., Altamimi, Z., Feissel, M., & Sillard, P. (1996). Results and analysis of the ITRF94. *IERS Technical note*, 20.
- Bourdon, E., Eissen, J. P., Gutscher, M. A., Monzier, M., Hall, M. L., & Cotten, J. (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3), 123-138.
- Chlieh, M., Mothes, P. A., Nocquet, J. M., Jarrin, P., Charvis, P., Cisneros, D., ... & Vallée, M. (2014). Distribution of discrete seismic asperities and aseismic slip along the Ecuadorian megathrust. *Earth and Planetary Science Letters*, 400, 292-301.
- Chunga, K., Michetti, A., Pazmiño, N., Martillo, C., Romero, A., Quiñonez, M., Gruppo di Geologia Ambientale (2009). Estimación de máximos niveles de sismicidad para el litoral ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos, sismológicos y sismotectónicos. *International Journal: Oro y Petróleo* 19: 46-57.

- Chunga, K., Quiñónez, M.F., Huamán, F., Besenzon, D., Mulas, M., Garcés, D., Larreta, E., Gorshkov, A., & Michetti, A.M. (2016). Geología de Terremotos y Tsunamis. Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Cisneros, D., & Nocquet, J. M. (2011). Campo de velocidades del Ecuador, obtenido a través de mediciones de campanas GPS de los últimos 15 años y medidas de una red GPS permanente. *Revista Geoespacial*, 9, 30-49.
- Collot J. Y., Michaud F., Alvarado A., Marcaillou B., Sosson M., Ratzov G., Pazmino A. (2009). Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: Implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. En: *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 47-74. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Colombo, O. L. (1984). The global mapping of gravity with two satellites. *Rijkscommissie voor Geodesie*.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. & Meindl, M., (2007). Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute. University of Berne.
- Davis, J. L., Bennett, R. A., & Wernicke, B. P. (2003). Assessment of GPS velocity accuracy for the Basin and Range Geodetic Network (BARGEN). *Geophysical research letters*, 30(7).
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical research letters*, 21(20), 2191-2194.
- Deng, Z., Gendt, G., & Schöne, T. (2015). Status of the IGS-TIGA Tide Gauge Data Reprocessing at GFZ. In *IAG 150 Years* (pp. 33-40). Springer International Publishing.
- Dixon, T. H., Miller, M., Farina, F., Wang, H., & Johnson, D. (2000). Present-day motion of the Sierra Nevada block and some tectonic implications for the Basin and Range province, North American Cordillera. *Tectonics*, 19(1), 1-24. DOI: 10.1029/1998TC001088.
- Drewes, H., & Heidbach, O. (2005). Deformation of the South American crust estimated from finite element and collocation methods. *A Window on the Future of Geodesy*, 544-549.
- Drewes, H., & Heidbach, O. (2012). The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. In *Geodesy for Planet Earth* (pp. 657-664). Springer Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-642-20338-1_81
- Drewes, H., O. (2014). Curso Sistemas de Referencia. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI, International Association of Geodesy – IAG, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas – SIRGAS.
- Dumont, J. F., Santana, E., Vilema, W., Pedoja, K., Ordóñez, M., Cruz, M., ... & Zambrano, I. (2005). Morphological and microtectonic analysis of Quaternary deformation from Puna and Santa Clara Islands, Gulf of Guayaquil, Ecuador (South America). *Tectonophysics*, 399(1), 331-350.
- Egbue, O., & Kellogg, J. (2010). Pleistocene to present North Andean "escape". *Tectonophysics*, 489(1), 248-257. DOI: 10.1016/j.tecto.2010.04.021.

- Egüez, A., Alvarado, A., & Yepes, H. (2003). Mapa de fallas y pliegues cuaternarias de Ecuador y regiones oceánicas adyacentes. US Geological Survey-Escuela Politécnica Nacional, Programa Internacional de la Litosfera, Grupo de Trabajo II-2. OFR, 03-289.
- Espinoza, J. (1992). Terremotos tsunamigénicos en el Ecuador.
- Estey, L. H., & Meertens, C. M. (1999). TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS solutions*, 3(1), 42-49.
- Ferland, R. (2006). Proposed IGS05 realization. IGS mail, 5447.
- Furones, Á. M., Julián, A. B. A., & Devesa, J. P. (2003). Correcciones por efecto de marea a observables geodésicos y gravimétricos de Alta precisión. *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 20(118), 56-64.
- García, L., (2016) Análisis de series temporales en estaciones permanentes GPS. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Matemáticas. Madrid, España
- Gazeaux, J., Williams, S., King, M., Bos, M., Dach, R., Deo, M., ... & Teferle, F. N. (2013). Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2397-2407.
- Gendt, G., & Schmid, R. (2005). Planned changes to IGS antenna calibrations, IGSMAIL-5189.
- Giraldo, R., Troncoso, W., Mancera, J., & Méndez, N. (2000). Geoestadística: una herramienta para la modelación en estuarios. *Rev. Acad. Col. Cienc*, 24(90), 60-72.
- Goudarzi, M. A., Cocard, M., & Santerre, R. (2014). EPC: Matlab software to estimate Euler pole parameters. *GPS solutions*, 18(1), 153-162.
- Goyes P. (2009). Fondos Marinos de Soberanía y Jurisdicción del Ecuador. En: *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 131-149. ISBN: 978-9978-92-737-3.
- Guillier B., Chatelain J. L., Jaillard E., Yepes H., Poupinet G., Fels J. F. (2001). Seismological evidence on the geometry of the Orogenic System in central-northern Ecuador (South America). *Geophysical Research Letters*. 28 (19): 3749-3752.
- Gurtner, W., & Estey, L. (2007). The Receiver Independent Exchange Format-Version 3.00. Central Bureau of the EUREF Permanent Network (EPN),[online] Available at: <ftp://epncb.oma.be/pub/data/format/rinex300.pdf> [Accessed on January 2008].
- Gutscher M A, Malavielli J, Lallemand S, Collot J (1999) Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters* 168: 255-270. DOI: 10.1016/S0012-821X(99)00060-6.
- Hackl, M., Malservisi, R., Hugentobler, U., & Wonnacott, R. (2011). Estimation of velocity uncertainties from GPS time series: Examples from the analysis of the South African TrigNet network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B11). DOI: 10.1029/2010JB008142.
- Hayes G. P., Wald D. J., Johnson R. L. (2012). Slab1. 0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research*. 117: 1-15, doi: 10.1029/2011JB008524.

- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1985). Geodesia física.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. Global positioning system: Theory and practice. 1997.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2007). GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.
- Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., & Kahle, H. G. (2008). Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003. *Tectonophysics*, 449(1), 17-40.
- ICD, G. (2010). Navstar GPS space segment/navigation user interfaces, interface specification. IS-GPS-200E.
- IGEPN (2016) Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional. <http://www.igepn.edu.ec>.
- IGM (2016) Instituto Geográfico Militar del Ecuador. GeoPortal. <http://www.geoportaligm.gob.ec/>
- IGS (2017) International GNSS Service. <http://www.igs.org/>
- Johnson, H. O., & Agnew, D. C. (1995). Monument motion and measurements of crustal velocities. *Geophysical Research Letters*, 22(21), 2905-2908.
- Johnson, H., and D. Agnew (2000) “Correlated noise in geodetic time series.” U.S Geological Survey FTR-1434-HQ-97-GR-03155.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivorunchko, K. a. N. Lucas (2001): Using ArcGis eostatistical Analyst. Manual de usuario de ESRI, Redlands.
- Kaniuth K, Drewes H, Tremel H, Stuber K, Kahle H-G, Geiger A, Hernandez JN, Hoyer MJ, Wildermann E (2002a). Interseismic, co-seismic and post-seismic deformations along the South American-Caribbean plate boundary from repeated GPS observations in the CASA project. Proceedings of the IAG Symposium “Recent crustal deformations in South America and surrounding area”, Santiago, Chile
- Kaplan, E., & Hegarty, C. (2005). Understanding GPS: principles and applications. Artech house.
- Kaula, W. M. (1966). Theory of Satellite Geodesy. Blaisdell Puplishing Company, Waltham, Massachusetts. Toronto. London. Republished, 2000 by Dover Puplications. Inc. Mineola, New York.
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., & Brooks, B. (2001). An integrated crustal velocity field for the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(11).
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauria, E., & Fortes, L. P. S. (2003). The Nazca–South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 125-131.
- Khazaradze, G., & Klotz, J. (2003). Short-and long-term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6).
- Klos, A., Bogusz, J., Figurski, M., & Kosek, W. (2015). Noise analysis of continuous GPS time series of selected EPN stations to investigate variations in stability of monument types. In VIII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy (pp. 19-26). Springer International Publishing.

- Klotz, J., Khazaradze, G., Angermann, D., Reigber, C., Perdomo, R., & Cifuentes, O. (2001). Earthquake cycle dominates contemporary crustal deformation in Central and Southern Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3), 437-446.
- Kovalevsky, J. (1989). In J. Kovalevsky, II Mueller, and B. Kolaczek, editors. *Reference Frames in Astronomy and Geophysics*. Kluwer.
- Kouba, J. (1996, March). SINEX–Solution-Independent Exchange Format Version 1.00. In *Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop*, Silver Spring, Maryland, USA, IGS Central Bureau, JPL, Pasadena, California, USA.
- Kouba, J. (2009). Testing of global pressure/temperature (GPT) model and global mapping function (GMF) in GPS analyses. *Journal of Geodesy*, 83(3), 199-208.
- Langbein, J., & Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B1), 591-603.
- Leick, A. (1995). *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Letellier, T., Lyard, F., & Lefevre, F. (2004, November). The new global tidal solution: FES2004. In *Proceeding of the Ocean Surface Topography Science Team Meeting*, St. Petersburg, Florida (pp. 4-6).
- Lin, K. C., Hu, J. C., Ching, K. E., Angelier, J., Rau, R. J., Yu, S. B., ... & Huang, M. H. (2010). GPS crustal deformation, strain rate, and seismic activity after the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B7).
- Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, 39(2), 447-462.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5-6), 394-415. DOI: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- Mao, A., Harrison, C. G., & Dixon, T. H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B2), 2797-2816. DOI: 10.1029/1998JB900033.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic geology*, 58(8), 1246-1266.
- Matheron, G. (1989). *Estimating and choosing. An essay on probability in practice*. Translated from the French and with a preface by AM Hasofer.
- McCarthy, D. D., & Petit, G. (2004). IERS conventions (2003). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) (Germany).
- Mendoza, C., & Dewey, J. W. (1984). Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958, and 1979: Implications for barrier models of earthquake rupture. *Bulletin of the seismological society of America*, 74(2), 577-593.
- Michaud F., Pazmiño N., Collot J. Y. (2009). El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): Posible Origen por disolución submarina. En: *Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 29-45. ISBN-978-9978-92-737-3.

- Montillet, J. P., Tregoning, P., McClusky, S., & Yu, K. (2013). Extracting white noise statistics in GPS coordinate time series. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(3), 563-567.
- Moritz, H. (1980). Advanced physical geodesy. *Advances in Planetary Geology*, 1.
- Neilan, R., Fisher, S., Khachikyan, R., Ceva, J., Craddock, A., Donnelly, N.,... & Walia, G. (2013). IGS technical report 2012 Central Bureau. International GNSS Service, 13.
- Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2), 3227-3246. DOI: 10.1029/95JB03048.
- Nikolaidis, R (2002). Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System. Ph.D. thesis, University of California.
- Nocquet, J. M., & Calais, E. (2003). Crustal velocity field of Western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. *Geophysical Journal International*, 154(1), 72-88. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.01935.x.
- Nocquet, J., Mothes, P., Alvarado, A. (2009) Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. In: Collot J, Sallares V, Pazmiño N (eds) *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador*, 1st edn. Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador, pp 83-94.
- Nocquet, J. M., Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Mothes, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., ... & Martin, X. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nat Geosci*, 7(4), 287-291.
- Ortiz, O., (2013) *Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en Ecuador*. Tesis de Master, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid – España
- Parra, H., (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Madrid - España.
- Pedoja K., Dumont J. F., Ortlieb L. (2009). Levantamiento Cuaternario costero del Arco de Talara (Ecuador y norte del Perú): cuantificaciones con las secuencias de terrazas marinas. En: *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 107-129. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Penna, N. T., & Stewart, M. P. (2003). Aliased tidal signatures in continuous GPS height time series. *Geophysical Research Letters*, 30(23). 2184, doi:10.1029/2003GL018828.
- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770.
- Peña, D. (2010). *Análisis de series temporales*. Madrid – España. Alianza Editorial S.A.
- Petrovski, I. G., & Tsujii, T. (2012). *Digital satellite navigation and geophysics: A practical guide with GNSS signal simulator and receiver laboratory*. Cambridge University Press.

- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). Numerical recipes third edition: the art of scientific computing. Cambridge University Press, 32, 10013-2473.
- Ray, J., Altamimi, Z., Collilieux, X., & van Dam, T. (2008). Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. *GPS solutions*, 12(1), 55-64.
- Rebischung, P., Schmid, R., & Ray, J. (2011). Upcoming switch to IGS08/igs08. atx. IGSMail-6354.
- Rebischung, P., Griffiths, J., Ray, J., Schmid, R., Collilieux, X., & Garayt, B. (2012). IGS08: the IGS realization of ITRF2008. *GPS solutions*, 16(4), 483-494.
- Rosa, G., J. Monico, and J. Chaves (2010) "Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para detecção, remoção e recuperação de efeitos sazonais." *Boletim de Ciências Geodésicas*, Vol.16, Nº1, pp. 51-72.
- Rothacher, M., & Mader, G. (1996). Combination of antenna phase center offsets and variations: antenna calibration set IGS01. IGS Central Bureau/University of Berne, Switzerland.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique* (1946-1975), 105(1), 279-298.
- Sánchez, L., & Drewes, H. (2016). Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*. DOI: 10.1016/j.jog.2016.06.005.
- Sánchez, L. (2008). Introducción al uso del Software Bernese. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut DGFI. Munich, Alemania.
- Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *The Astrophysical Journal*, 263, 835-853.
- Schmid, R., Steigenberger, P., Dach, R., Schmitz, M., Dilssner, F., & Hugentobler, U. (2009, December). Interactions of the IGS reprocessing and the IGS antenna phase center model. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 01).
- Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, Ge M, Rothacher M (2007) Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *J Geod* 81(12):781-798. doi:10.1007/s00190-007-0148-y
- Schmid, R. (2011). Upcoming switch to IGS08/igs08. atx-Details on igs08. atx. IGSMail-6355, IGS Central Bureau, Pasadena.
- Schmid R (2012) igs08_1707.atx: Update including JPSREGANT subtype calibrations & R743.IGSMail-6662, IGS Central Bureau, Pasadena
- Seeber, G. (1993). *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. New York, NY: Walter De Gruyter.
- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*. Walter De Gruyter.
- Sevilla, M. J. (1987). Colocación mínimos cuadrados. CSIC-UCM-Instituto de Astronomía y Geodesia (IAG).
- SIRGAS (2017). Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. <http://www.sirgas.org>.

- Smith, E. K., & Weintraub, S. (1953). The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the IRE*, 41(8), 1035-1037.
- Specht, C., Nowak, A., Koc, W., & Jurkowska, A. (2011). 10 Application of the Polish Active Geodetic Network for Railway Track Determination. *Transport Systems and Processes: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 77.
- Stewart, M. P., N. T. Penna, and D. D. Lichti (2005), Investigating the propagation mechanism of unmodelled systematic errors on coordinate time series estimated using least squares, *J. Geod.*, 79, 479 – 489, doi:10.1007/s00190-005-0478-6.
- Tibaldi, A., & Leon, J. R. (2000). Morphometry of late Pleistocene-Holocene faulting and volcanotectonic relationship in the southern Andes of Colombia. *Tectonics*, 19(2), 358-377.
- Tiberius, C., Jonkman, N., & Kenselaar, F. (1999). COLUMNS-INNOVATION: THE STOCHASTICS OF GPS OBSERVABLES. *GPS World*, 10(2), 49-55.
- Tierra, A. R. (2016). Prediction 3-D Velocity for Ecuador by Artificial Neural Network RBF. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1), 386-390.
- Torge, W. (2001). *Geodesy*. Third completely revised and extended edition.
- Trenkamp R, Kellogg J, Freymuller J, Mora H (2002) Wide plate margin deformation, South Central America and Northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 157–171. DOI: 10.1016/S0895-9811(02)00018-4
- Wallace, L. M., Stevens, C., Silver, E., McCaffrey, R., Lorantung, W., Hasiata, S., ... & Taugaloidi, J. (2004). GPS and seismological constraints on active tectonics and arc-continent collision in Papua New Guinea: Implications for mechanics of microplate rotations in a plate boundary zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B5).
- Ward, L., & Greenwood, P. (2007). 1/f noise. *Scholarpedia*, 2, 1537.
- Webster, A. L., & García, Y. M. (2005). *Estadística aplicada a los negocios y la economía*.
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.
- Williams, S. D. P. (2003a). The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series. *Journal of Geodesy*, 76(9), 483-494.
- Williams, S. D. (2003b). Offsets in global positioning system time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6).
- Williams, S. D., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R. M., Prawirodirdjo, L., Miller, M. & Johnson, D. J. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B3). DOI:10.1029/2003JB002741.
- Williams, S. D. (2008). CATS: GPS coordinate time series analysis software. *GPS solutions*, 12(2), 147-153.
- Witt C., Bourgois J., Michaud F., Ordoñez M., Jiménez N., Sasson M. (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the North Andean block tectonic escape. *Tectonics*. 25 (TC3017): 1-22. doi: 10.1029/2004TC001723.

- Witt, C., & Bourgois, J. (2009). Relaciones entre la evolución de la cuenca del Golfo de Guayaquil-Tumbes y el escape del Bloque Nor-Andino. In: Collot J, Sallares V, Pazmiño N (eds) *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador*, 1st edn. Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador, pp 95-106.
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (1997). *Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS*. Wiley-Interscience.
- Ye, L., Kanamori, H., Avouac, J. P., Li, L., Cheung, K. F., & Lay, T. (2016). The 16 April 2016, M W 7.8 (M S 7.5) Ecuador earthquake: A quasi-repeat of the 1942 M S 7.5 earthquake and partial re-rupture of the 1906 M S 8.6 Colombia–Ecuador earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 454, 248-258.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J.,... & Behr, J. (1997). Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 18035-18055. DOI: 10.1029/97JB01380.

ANEXO A: Detalle de las estaciones de la Red REGME

NOMBRE	ID ..	NÚMERO DOMINIERS	Posición		PROVINCIA	CIUDAD	SITIO	TIPO DE MONUMENTACIÓN	ANTENA		RECEPTOR
			Long. (°E)	Lat. (°N)					MODELO	CUPULA (RADOME)	
ALAUSÍ	ALEC	42029M001	-78.847	-2.202	CHIMBORAZO	ALAUSÍ	GAD ALAUSÍ	Pilar de concreto de 2.00 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-V2). La estación se encuentra ubicada en el tercer piso de las instalaciones del GADM de Alausí.	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NET R9
AUCA	AUCA	42017M001	-78.883	-0.641	FRANCISCO DE ORELLANA	AUCA	TERMINAL PETROECUADOR	La estación se encuentra empotrada en el terreno sobre una estructura piramidal de acero de 15 m de largo y concreto en sus bases, el centrado forzoso de la antena se acorta en la parte superior de la pirámide. La estación se encuentra ubicada en el campamento AUCA de Petroproducción, ubicada a 40 Km de la ciudad de El Caca	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETRS
BAHÍA	BAHI	42018M001	-80.398	-0.659	MANABÍ	BAHÍA DE CARAQUEZ	UNIVERSIDAD CA TOLUCA	Estructura piramidal de acero inoxidable. La base de la antena se coloca encima de un perno. La estación está ubicada en el quinto piso de las instalaciones de la Universidad de Bahía de Caraquez	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETRS
EL CHACO	CHEC	42030M001	-77.814	-0.339	NAPO	EL CHACO	EDIFICIO GESTION AMBIENTAL	Pilar de concreto de 2.00 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGE-v1). La estación se encuentra ubicada en el edificio de Gestión Ambiental de El Chaco.	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NET R9
CELICA	CLEC	42031M001	-79.956	-4.103	LOJA	CELICA	GAD CELICA	Pilar de concreto de 2.00 m de alto y 0.40 m de ancho. En el centro de la columna se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-V2). La estación se encuentra ubicada en el edificio del Municipio de la ciudad de Celica	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NET R9
CUEVA DE OSOS	COEC	42023M001	-77.787	0.716	CARCHI	TULCAN	CUEVA OSOS	La estación se encuentra empotrada sobre el terreno en una estructura piramidal de acero inoxidable, diseñada por el IGEPN. La estación se encuentra ubicada en el sitio Cueva de Osos a 5 Km de la ciudad de Tulcán	TRM 5597.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NET R9
CUENCA	CUEC	42009M001	-79.003	-2.883	AZUAY	CUENCA	ETAPA	Torre de acero de 3.30m. de altura, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGE-v1). La estación se encuentra ubicada en el primer piso del edificio ETAPA en la ciudad de Cuenca	GNSS CHOKO	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9
COTOPAXI	CXEC	42038M001	-78.615	-0.935	COTOPAXI	LATACUNGA	GADP COTOPAXI	Pilar de concreto de 2.5 m de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso (Igm-V2). La estación se encuentra ubicada en la azotea del edificio del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Cotopaxi	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NETR9
EL CARMEN	ECEC	42027M001	-79.452	-0.272	MANABÍ	EL CARMEN	GAD CARMEN	Columna de concreto de 0.40m x 0.40m, altura 2.00m en cuyo centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-V2). La estación se encuentra ubicada en el cuarto piso del edificio de la Municipalidad de El Carmen	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NET R9
ESC. POLIT. EJERCITO	EPEC	42039M001	-78.446	-0.315	PICHINCHA	SANGOLQUI	UNIV. FUERZAS ARMADAS-ESPE	Pilar de hormigón construido en la parte superior del edificio de tres pisos con dispositivo de centrado forzoso en la parte superior. La estación está instalada en el edificio de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NETR9
EMP. ELÉCTRICA RIOBAMBA	EREC	42037M001	-78.651	-1.671	CHIMBORAZO	RIOBAMBA	EERSA RIOBAMBA	Pilar de hormigón construido en la parte superior del edificio de cuatro pisos con dispositivo de centrado forzoso en la parte superior. La estación se encuentra ubicada en el edificio de la Empresa Eléctrica Regional de Riobamba.	TRM 5797.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9
ESMERALDAS	ESMR	42011M001	-79.724	0.935	ESMERALDAS	ESMERALDAS	TERMINAL OCP	Estructura piramidal de acero inoxidable de 100m de altura. La base de la antena se coloca 0.84 m. verticalmente por encima de un perno. La estación se encuentra ubicada en la terminal de OCP, a unos 5 km del mar y a 15 km de la ciudad de Esmeraldas.	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETRS
GUAYAQUIL	Gyec	42007M001	-79.892	-2.149	GUAYAS	GUAYAQUIL	IGM REGIONAL	Pilar de concreto de 3.80m de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGV1). La estación se encuentra ubicada en el tercer piso del edificio del Patronato de Consejo Provincial de Imbabura.	TRM 59800.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9
GUALAQUZA	GZEC	42032M001	-78.581	-3.401	MORONA SANTIAGO	GUALAQUZA	MUNICIPIO GUALAQUZA	piso del edificio del Instituto Espacial Ecuatoriano, en la ciudad de Guayaquil	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NET R9
IBARRA	IBEC	42024M001	-78.116	0.35	IMBABURA	IBARRA	PATRONATO GPI	Pilar de concreto de 2.00 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-V2). La estación se encuentra ubicada en la azotea del Municipio de Gualaquiza.	TRM 59800.00	SCS	TRIMBLE NET R9
LOJA	LJEC	42010M001	-79.999	-3.988	LOJA	LOJA	UTPL	Pilar de concreto de 2.00 m de alto, con dispositivo de centrado forzoso (CF-IGM-IBGE-v1). La estación se encuentra ubicada en el tercer piso de las instalaciones del CITES-UTPL	TRM 59800.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NET R9
LOROCACHI	LREC	42014M001	-75.986	-1.615	PASTAZA	LOROCACHI	BS48 SANGAY	Se encuentra en el terreno sobre una estructura piramidal de acero inoxidable. La base de la antena se coloca encima de un perno. La estación se encuentra ubicada en el Batallón de Selva No. 48 Sangay.	LEIA T504GG	LEIS	LEICA GRX200GG PRO

ANEXO A: Continuación...

NOMBRE	ID..	NÚMERO DOMINIERS	Posición			PROVINCIA	CIUDAD	SITIO	TIPO DE MONUMENTACIÓN	ANTENA		RECEPTOR
			Long. (°E)	Lat. (°N)	Elev. (m)					MODELO	CUPULA (RADOME)	
MACAS	MAEC	4203M001	-78,18	-2,305	1022,5	MORONA SANTIAGO	MACAS	GADPMS	Pilar de concreto de 2,00m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGE-v1). Se encuentra instalada en el tercer piso del edificio del Gobierno Provincial de la ciudad de Macas.	TRM 59800.00	SCIS	TRIMBLE NET R9
MACHALA	MHEC	42022M001	-79,957	-3,261	55,1	ELORO	MACHALA	GAD ELORO	Pilar de concreto de 2,00 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGE-v1). La estación se encuentra ubicada en la terraza del edificio del Gobierno Autónomo Provincial de El Oro.	TRM 59800.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NET R9
MONTALVO	MTEC	4203M001	-76,982	-2,069	3017	PASTAZA	MONTALVO	BS49CAPT. CHIRBOGA	Se encuentra en el terreno sobre un pilar de concreto de 2,00m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGE-v1). La estación se encuentra ubicada en el Batallón BS-49 Capitán Chiriboga.	LEIA T504GG	LEIS	LEICA GRX200GGPRO
NARANJAL	NJEC	42028M001	-79,621	-2,675	514	GUAYAS	NARANJAL	GAD NARANJAL	Columna de concreto de 0,25 m de largo x 0,25 m de ancho, altura 2,30 m y con una loseta de 0,40x0,40x1 m de espesor en cuyo centro se encuentra el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). La estación se encuentra ubicada en el techo del edificio de eventos frente al edificio principal del Municipio de Naranjal.	TRM 59800.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NET R9
PALANDA	PDEC	42033M001	-79,831	-4,648	143,4	LOJA	PALANDA	BODEGAS MUNICIPD	Se encuentra en el terreno sobre un pilar de concreto de 4,60 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). La estación se encuentra ubicada en la azotea de la Casa de la Cultura del Municipio de Palanda.	TRM 59800.00	SCIS	TRIMBLE NETR9
PAJÁN	PJEC	42034M001	-80,425	-1,552	146,8	MANABI	PAJAN	GAD PAJAN	Pilar de concreto de 2,00 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). Se encuentra ubicada en el segundo piso del edificio de la Municipalidad de Paján.	TRM 59800.00	SCIS	TRIMBLE NET R9
PALORA	PREC	42035M001	-77,963	-1,708	904,4	MORONA SANTIAGO	PALORA	CASA DE LA CULTURA PALORA	Pilar de concreto de 2,00 m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). La estación se encuentra ubicada en la azotea de la Casa de la Cultura del Municipio de Palora.	TRM 59800.00	SCIS	TRIMBLE NETR9
PORTOVIEJO	PTEC	42008M001	-80,475	-1,058	613	MANABI	PORTOVEJO	COMIL7GRAD MIGUEL ITURRALDE	Pilar de concreto de 2,00 m de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). La estación se encuentra ubicada en el tercer piso del edificio administrativo del COMIL No.7 Grad. Miguel Iturralde en la ciudad de Portoviejo.	TRM 59800.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NET R9
PUENGASÍ	QUEM	42020M001	-78,497	-0,237	3054,7	PICHINCHA	QUITO	EMAAPQ	La antena se encuentra instalada sobre un sistema de centrado Forzoso de acero inoxidable, tipo USGS U.S. Geological Survey. La estación se encuentra ubicada en una estructura de concreto de 15 m de altura, en la empresa EM AAPQ. Puengasi en la ciudad de Quito.	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9
QUITO	QUII	42003S003	-78,494	-0,25	2922,6	PICHINCHA	QUITO	IGM QUITO	Torre de acero de 3,00m. de altura. La estabilidad de la estructura está garantizada por la presencia de tensores en los cuatro lados de la torre. La estación se encuentra ubicada en la azotea del edificio principal del Instituto Geográfico Militar en la ciudad de Quito.	ASH700936B_M	SNOW	ASSTECH Z-XIS
QUEVEDO	QVEC	4202M001	-79,47	-10,12	420,3	LOS RIOS	QUEVEDO	UTEQ	Pilar de concreto de 3,80 m de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). La estación se encuentra ubicada en el tercer piso en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Campus Universitario "Ing. Manuel Hanz" Km 15 Via Sto. Domingo	TRM 59800.00	SCIS	TRIMBLE NET R9
RIOBAMBA	RIOP	42006M001	-78,651	-1,651	2793	CHIMBORAZO	ROBAMBA	BCB 11 GALAPAGOS	Molón de concreto empotrado en el terreno con las siguientes dimensiones: Base Superior, inferior, Altura: 0,52m. Se encuentra ubicada en la cabecera N.E. de la pista de aterrizaje, en el aeródromo de la Brigada de Caballería Blindada No. 11 Galapagos.	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9
SANTA ELENA	SEEC	42036M001	-80,904	-2,22	29,8	SANTA ELENA	LIBERTAD	INST. OCEANOGRAFICO DE LA ARMADA	Estructura de acero inoxidable de 2,00m. de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (IGM-v2). La estación se encuentra ubicada en la terraza del Laboratorio Oceanico de la Armada, a 400 m del mareógrafo de la Libertad, provincia de Santa Elena	TRM 59800.00	SCIS	TRIMBLE NET R9
SAN LORENZO	SNLR	4202M001	-78,847	1293	23,1	ESMERALDAS	SAN LORENZO	ARMADA	Se encuentra en el terreno sobre una estructura piramidal de acero inoxidable de 150m de altura. La base de la antena se coloca encima de un perno. La estación se encuentra ubicada en las instalaciones de la Armada en la ciudad de San Lorenzo	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9
SANTIAGO	STEC	4203M001	-78,011	-3,051	3217	MORONA SANTIAGO	SANTIAGO	BS61SANTIAGO	Se encuentra en el terreno sobre un pilar de concreto de 2,00 m de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso: (CF-IGM-IBGE-v1). La estación se encuentra ubicada en el Batallón de Selva No. 61 "Santiago"	LEIA T504GG	LEIS	LEICA GRX200GGPRO
TENA	TENA	42026M001	-77,816	-0,99	547,1	NAPO	TENA	GADP NAPO	Estructura mixta de acero y concreto, de 6,00 m de alto, en el centro se encuentra empotrado el dispositivo de centrado forzoso. La estación se encuentra ubicada en la azotea del edificio que pertenece al Consejo Provincial del Tena. La estabilidad de la estructura se encuentra garantizada con la presencia de cables tensores ubicados en cada esquina.	TRM 4249.00	Ninguno (NONE)	TRIMBLE NETR9

ANEXO B: Coordenadas, velocidades y precisiones de la Red RENAGE

ESTACIONES	X (m)	Y (m)	Z (m)	vx (m/a)	vy (m/a)	vz (m/a)	svx (m/a)	svy (m/a)	svz (m/a)
3009_GPS	1148305,688	-6272976,994	109354,156	0,0142	0,0036	0,0153	0,0004	0,0013	0,0003
AHUA_GPS	1374894,774	-6227472,317	-117323,962	0,0016	-0,0109	0,0087	0,0008	0,0022	0,0004
ALAM_GPS	1102306,520	-6267609,676	-444220,214	-0,0052	0,0308	0,0067	0,0041	0,0129	0,0022
ALTA_GPS	1315523,735	-6240479,344	137882,857	-0,0001	0,0108	0,0152	0,0051	0,0178	0,0028
ANCO_GPS	1008515,367	-6292663,112	-257526,191	0,0047	-0,0001	0,0130	0,0009	0,0025	0,0005
AREN_GPS	1097953,009	-6270610,951	-393307,662	0,0003	0,0069	0,0081	0,0013	0,0048	0,0008
AU14_GPS	1447002,379	-6211591,096	-80727,714	-0,0009	-0,0064	0,0090	0,0010	0,0033	0,0006
AUCA_GPS	1447466,348	-6211636,026	-70859,994	-0,0037	0,0008	0,0075	0,0009	0,0035	0,0009
AYAN_GPS	1023876,148	-6291584,878	-219837,691	0,0091	-0,0022	0,0123	0,0015	0,0059	0,0009
BALZ_GPS	1117263,507	-6277741,998	-151195,546	-0,0041	0,0576	0,0109	0,0030	0,0111	0,0018
BILB_GPS	1271497,263	-6250483,173	-160004,221	-0,0036	-0,0045	0,0069	0,0009	0,0030	0,0007
BUFE_GPS	1163484,495	-6270490,501	-96980,392	-0,0003	0,0141	0,0118	0,0036	0,0109	0,0018
CABP_GPS	1060520,480	-6289331,368	-42733,721	0,0127	0,0019	0,0123	0,0008	0,0021	0,0010
CAJA_GPS	1190521,277	-6262902,580	-304509,411	-0,0004	0,0048	0,0080	0,0008	0,0027	0,0005
CAME_GPS	1271548,715	-6253386,552	-75202,671	0,0045	0,0034	0,0107	0,0009	0,0022	0,0004
CAPA_GPS	1055618,399	-6290067,697	-40786,088	0,0200	0,0068	0,0130	0,0012	0,0049	0,0004
CASI_GPS	1274466,935	-6253122,060	-4045,836	0,0050	0,0100	0,0114	0,0017	0,0059	0,0010
CATE_GPS	1279936,923	-6251109,875	22,937	0,0081	-0,0111	0,0093	0,0013	0,0048	0,0007
CHIS_GPS	1027491,110	-6294072,997	-116441,801	0,0109	0,0030	0,0152	0,0006	0,0014	0,0004
CHON_GPS	1275781,313	-6250090,290	-158520,053	0,0032	-0,0101	0,0095	0,0008	0,0019	0,0004
CLPI_GPS	1180486,095	-6259533,544	-359832,773	0,0020	-0,0102	0,0054	0,0029	0,0113	0,0018
CNJO_GPS	1451665,828	-6210980,214	26329,595	0,0028	-0,0243	0,0097	0,0012	0,0040	0,0007
CONE_GPS	1281808,598	-6252066,689	-73023,438	0,0026	0,0032	0,0103	0,0005	0,0013	0,0004
CORA_GPS	1208411,062	-6262932,007	-125872,527	0,0037	-0,0071	0,0107	0,0014	0,0046	0,0008
CORE_GPS	1269576,198	-6253619,113	-36268,782	0,0068	-0,0056	0,0109	0,0011	0,0041	0,0006
CUEC_GPS	1215704,330	-6255712,186	-318818,945	0,0004	-0,0034	0,0071	0,0007	0,0020	0,0006
CUEL_GPS	1268386,055	-6252652,294	43087,551	0,0107	-0,0142	0,0089	0,0012	0,0042	0,0007
CUER_GPS	1157791,037	-6266886,550	-260746,400	-0,0015	0,0133	0,0127	0,0011	0,0042	0,0007
DAUL_GPS	1107455,883	-6277833,810	-207462,773	0,0024	0,0219	0,0128	0,0044	0,0123	0,0020
DESV_GPS	1115752,765	-6279047,224	-115050,110	0,0063	0,0009	0,0126	0,0006	0,0023	0,0004
ELCH_GPS	1347468,451	-6235674,126	-36993,920	-0,0007	-0,0006	0,0102	0,0006	0,0020	0,0004
ESMR_GPS	1137650,223	-6275257,474	103347,702	0,0145	0,0024	0,0154	0,0005	0,0012	0,0004
FLFR_GPS	1124843,057	-6278445,862	-39524,351	0,0111	-0,0028	0,0109	0,0008	0,0023	0,0008
FRAN_GPS	1211186,875	-6256114,497	-332581,978	-0,0037	0,0003	0,0119	0,0022	0,0086	0,0015
GONZ_GPS	1167141,837	-6255085,081	-467068,385	-0,0001	-0,0034	0,0069	0,0006	0,0023	0,0004
GPH1_GPS	1116025,358	-6272423,963	-302554,730	0,0027	-0,0045	0,0107	0,0017	0,0067	0,0010
GUAQ_GPS	1151778,650	-6260056,529	-423315,432	-0,0025	-0,0132	0,0039	0,0029	0,0102	0,0017
GUAY_GPS	1114881,157	-6275609,104	-233719,507	-0,0020	0,0172	0,0124	0,0046	0,0110	0,0021
GYEC_GPS	1118628,434	-6274783,815	-237610,245	0,0042	0,0018	0,0139	0,0007	0,0018	0,0007
HENO_GPS	1472874,853	-6206011,146	-14584,859	0,0021	-0,0201	0,0090	0,0014	0,0046	0,0007
HONA_GPS	1197782,504	-6255217,588	-384330,724	0,0004	-0,0061	0,0073	0,0005	0,0017	0,0004
HSPR_GPS	1233613,658	-6258993,267	-38879,825	0,0076	0,0002	0,0109	0,0009	0,0021	0,0005
HUAC_GPS	1347493,136	-6234958,820	-78220,166	0,0008	-0,0029	0,0082	0,0008	0,0025	0,0005
HUAM_GPS	1277109,422	-6249244,216	-201808,654	0,0141	-0,0617	0,0011	0,0089	0,0139	0,0034

ANEXO B: Continuación...

ESTACIONES	X (m)	Y (m)	Z (m)	vx (m/a)	vy (m/a)	vz (m/a)	svx (m/a)	svy (m/a)	svz (m/a)
IGMV_GPS	1272868,525	-6252770,097	-23800,267	0,0135	-0,0315	0,0092	0,0012	0,0043	0,0007
IGNA_GPS	1244443,826	-6257344,304	-49874,600	0,0104	-0,0234	0,0116	0,0006	0,0019	0,0004
JER1_GPS	1287539,775	-6249171,196	-598,862	-0,0132	0,0832	0,0116	0,0015	0,0056	0,0009
JERU_GPS	1287539,567	-6249170,279	-623,789	0,0020	0,0154	0,0117	0,0005	0,0014	0,0003
JICA_GPS	1117215,663	-6274499,693	-251144,758	0,0040	0,0003	0,0128	0,0012	0,0048	0,0008
JUJA_GPS	1155803,705	-6269043,906	-209422,666	0,0088	-0,0200	0,0119	0,0011	0,0036	0,0006
LACH_GPS	1280823,909	-6250783,216	17809,586	0,0055	-0,0022	0,0119	0,0042	0,0144	0,0024
LATA_GPS	1258247,972	-6255142,642	-90040,693	0,0064	-0,0090	0,0106	0,0004	0,0011	0,0003
LCOL_GPS	1194824,398	-6265695,128	-27631,836	0,0076	0,0050	0,0117	0,0006	0,0021	0,0004
LGCB_GPS	1154082,000	-6272876,101	42246,299	0,0124	-0,0007	0,0125	0,0007	0,0018	0,0005
LIBE_GPS	1007439,565	-6293276,334	-245319,827	0,0074	0,0022	0,0105	0,0014	0,0055	0,0010
LIMO_GPS	1475928,264	-6205128,775	-44591,873	0,0048	-0,0287	0,0118	0,0023	0,0054	0,0010
LITA_GPS	1302374,685	-6244301,793	80318,945	0,0060	0,0064	0,0119	0,0017	0,0059	0,0014
LITS_GPS	1277255,041	-6248860,977	96232,590	0,0076	0,0041	0,0116	0,0005	0,0016	0,0003
LJEC_GPS	1192829,013	-6252161,653	-440799,166	0,0000	-0,0039	0,0060	0,0027	0,0063	0,0007
LUMD_GPS	1400034,874	-6223696,023	923,230	-0,0014	0,0003	0,0096	0,0008	0,0027	0,0004
MACH_GPS	1109230,593	-6270567,267	-359891,488	0,0012	0,0040	0,0095	0,0015	0,0061	0,0009
MALD_GPS	1226753,212	-6257952,245	118319,169	0,0040	0,0143	0,0093	0,0066	0,0235	0,0040
MANT_GPS	1033767,585	-6292977,171	-103559,543	-0,0229	0,2123	0,0161	0,0026	0,0098	0,0016
MARI_GPS	1511193,566	-6196844,080	-5485,130	-0,0029	0,0002	0,0086	0,0051	0,0155	0,0028
MEND_GPS	1289928,452	-6239578,373	-300396,579	0,0011	-0,0050	0,0074	0,0008	0,0028	0,0005
MIGU_GPS	1212639,484	-6261523,719	-188397,167	0,0038	-0,0010	0,0101	0,0009	0,0031	0,0006
MINA_1PS	1076923,262	-6286229,381	-106506,360	0,0050	0,0040	0,0126	0,0010	0,0043	0,0006
MIRA_GPS	1271253,584	-6253369,090	-29914,668	0,0040	0,0075	0,0101	0,0012	0,0039	0,0007
MIRD_GPS	1199117,387	-6264593,101	-64440,957	-0,0071	0,0529	0,0149	0,0020	0,0057	0,0011
MOCA_GPS	1161097,337	-6270253,812	-131256,546	0,0054	-0,0007	0,0119	0,0008	0,0028	0,0005
MONT_GPS	1435985,580	-6210458,641	-228555,540	-0,0018	-0,0042	0,0094	0,0012	0,0040	0,0007
MORU_GPS	1276822,618	-6252936,695	-80254,633	0,0036	0,0034	0,0112	0,0007	0,0019	0,0005
MUIS_GPS	1104889,620	-6281366,603	66841,946	0,0140	0,0081	0,0139	0,0004	0,0014	0,0003
MULM_GPS	1267251,244	-6252924,756	-159056,405	0,0128	-0,0792	0,0084	0,0009	0,0033	0,0005
NARI_GPS	1157313,728	-6266564,376	-347396,612	-0,0025	0,0078	0,0084	0,0009	0,0029	0,0005
OYAM_GPS	1290816,975	-6248789,238	-22499,467	0,0097	-0,0443	0,0195	0,0085	0,0275	0,0048
PAJA_GPS	1060203,869	-6287184,575	-171829,195	0,0341	-0,1579	0,0077	0,0019	0,0077	0,0012
PAM1_GPS	1304158,194	-6247566,263	-8818,505	0,0035	0,0024	0,0117	0,0006	0,0020	0,0003
PANE_GPS	1270194,015	-6253432,512	-25342,643	0,0009	0,0063	0,0140	0,0111	0,0258	0,0069
PAPA_GPS	1311403,539	-6244951,946	-42137,565	0,0153	-0,0529	0,0133	0,0005	0,0017	0,0003
PASO_GPS	1406730,582	-6222414,285	134506,098	0,0009	0,0000	0,0164	0,0028	0,0100	0,0015
PDNS_GPS	1108559,539	-6281190,005	12322,991	0,0140	0,0010	0,0142	0,0008	0,0022	0,0007
PINT_GPS	1287975,201	-6249910,945	-46481,164	0,0077	-0,0083	0,0141	0,0041	0,0137	0,0022
POSO_GPS	1079666,046	-6278935,023	-299565,774	0,0019	0,0085	0,0086	0,0037	0,0165	0,0023
PPRT_GPS	1083820,024	-6285437,760	-13856,086	0,0146	0,0056	0,0157	0,0007	0,0018	0,0005
PROG_GPS	1066545,262	-6282722,884	-266495,564	0,0052	0,0018	0,0120	0,0006	0,0021	0,0004
PTEC_GPS	1055320,808	-6289193,957	-116986,481	0,0081	-0,0012	0,0130	0,0031	0,0044	0,0020
PTGL_GPS	1104165,626	-6281502,633	86418,461	0,0185	0,0044	0,0141	0,0009	0,0023	0,0006

ANEXO B: Continuación...

ESTACIONES	X (m)	Y (m)	Z (m)	vx (m/a)	vy (m/a)	vz (m/a)	svx (m/a)	svy (m/a)	svz (m/a)
PTQT_GPS	1189482,792	-6266393,360	13600,771	0,0097	0,0077	0,0096	0,0019	0,0071	0,0015
PUEB_GPS	1158544,030	-6269684,778	-172351,549	0,0062	-0,0023	0,0102	0,0008	0,0030	0,0005
PUYO_GPS	1318892,486	-6239145,656	-166400,353	0,0022	-0,0176	0,0073	0,0008	0,0027	0,0005
QNDE_GPS	1165008,600	-6270855,013	36218,288	0,0104	0,0037	0,0111	0,0006	0,0020	0,0004
QUEM_GPS	1272483,466	-6252975,339	-26224,311	0,0078	0,0026	0,0114	0,0007	0,0017	0,0004
QUI1_GPS	1272867,367	-6252772,139	-23801,703	0,0069	0,0022	0,0109	0,0003	0,0008	0,0002
REDO_GPS	1321839,768	-6243514,986	33681,689	-0,0427	0,2079	0,0094	0,0022	0,0073	0,0012
RETU_GPS	1278253,725	-6250662,523	-160615,182	0,0078	-0,0112	0,0093	0,0018	0,0065	0,0008
REVE_GPS	1377878,814	-6229006,783	-5227,601	-0,0023	0,0040	0,0073	0,0006	0,0020	0,0004
RIOB_GPS	1261675,980	-6252281,354	-188115,749	-0,0059	0,0450	0,0075	0,0025	0,0094	0,0014
RIOP_GPS	1255144,973	-6253609,449	-182569,792	-0,0005	-0,0006	0,0057	0,0004	0,0013	0,0002
RVRD_GPS	1174706,431	-6267955,817	118045,836	0,0163	0,0006	0,0143	0,0009	0,0024	0,0005
SABA_GPS	1082557,676	-6282352,838	-203529,682	0,0022	0,0110	0,0109	0,0008	0,0029	0,0005
SACH_GPS	1276850,821	-6252888,061	-71341,379	0,0039	-0,0013	0,0102	0,0008	0,0018	0,0004
SALN_GPS	998058,983	-6294989,811	-241683,615	0,0086	0,0020	0,0123	0,0011	0,0027	0,0008
SANL_GPS	1235438,798	-6255768,132	141687,282	0,0068	0,0144	0,0087	0,0045	0,0169	0,0025
SBAR_GPS	1378283,330	-6229799,247	71487,922	-0,0006	0,0058	0,0125	0,0008	0,0025	0,0004
SCHA_GPS	1444310,762	-6212704,127	-36097,907	-0,0079	0,0098	0,0091	0,0028	0,0068	0,0013
SEVG_GPS	1103684,429	-6281112,971	-107676,793	0,0061	0,0015	0,0097	0,0018	0,0072	0,0015
SFCO_GPS	1249432,462	-6253463,029	120683,467	0,0056	0,0098	0,0134	0,0046	0,0171	0,0026
SIBU_GPS	1441097,410	-6213947,388	132475,573	0,0013	0,0133	0,0128	0,0057	0,0190	0,0030
SNLR_GPS	1233412,563	-6256121,719	142907,634	0,0107	-0,0015	0,0089	0,0013	0,0045	0,0013
SNTI_GPS	1323179,412	-6230532,017	-337061,158	-0,0003	-0,0026	0,0068	0,0011	0,0023	0,0005
SOZO_GPS	1127380,138	-6260958,366	-478884,854	-0,0014	-0,0014	0,0069	0,0010	0,0021	0,0005
SRAM_GPS	1155634,282	-6272347,420	-67447,272	0,0076	0,0042	0,0112	0,0033	0,0123	0,0019
SROQ_GPS	1518830,878	-6194692,591	-50177,778	-0,0009	-0,0252	0,0129	0,0031	0,0079	0,0019
STAA_GPS	1064869,708	-6287318,598	-130769,783	0,0040	0,0005	0,0121	0,0007	0,0019	0,0004
TAMB_GPS	1283160,323	-6251690,682	-76036,676	0,0038	-0,0024	0,0103	0,0007	0,0018	0,0003
TAMI_GPS	1395589,803	-6222318,455	175544,968	0,0000	0,0020	0,0153	0,0056	0,0184	0,0028
TETE_GPS	1485449,075	-6203026,488	19560,696	0,0042	0,0332	0,0102	0,0063	0,0105	0,0018
TIP1_GPS	1520829,684	-6194390,649	21586,653	-0,0207	0,0219	0,0099	0,0068	0,0143	0,0028
TOLA_GPS	1211778,784	-6260546,700	133814,379	0,0091	0,0130	0,0105	0,0006	0,0020	0,0004
TORR_GPS	1202278,033	-6262084,606	-230702,458	0,0024	0,0052	0,0103	0,0006	0,0021	0,0004
TOTO_GPS	1252505,862	-6252757,329	-249641,159	0,0007	0,0003	0,0068	0,0005	0,0015	0,0003
TULC_GPS	1358654,213	-6234130,637	89827,593	0,0025	0,0018	0,0122	0,0007	0,0023	0,0004
TUM1_GPS	1243246,811	-6252583,912	200291,586	0,0064	0,0110	0,0148	0,0025	0,0097	0,0015
TUMA_GPS	1243245,798	-6252584,968	200266,580	0,0064	0,0110	0,0148	0,0025	0,0097	0,0015
TURI_GPS	1263890,971	-6254888,117	-40699,597	0,0118	-0,0093	0,0103	0,0034	0,0122	0,0019
UNGU_GPS	1266063,347	-6254832,195	-26259,678	0,0069	0,0026	0,0104	0,0008	0,0029	0,0005
YAUS_GPS	1245686,478	-6251910,265	-297651,230	-0,0001	0,0066	0,0078	0,0007	0,0024	0,0004
ZAGR_GPS	1259566,223	-6252744,580	-211006,085	-0,0480	0,2351	0,0155	0,0041	0,0116	0,0019
ZAMO_GPS	1221570,866	-6244846,718	-448051,280	0,0007	-0,0040	0,0072	0,0004	0,0014	0,0003
ZHUD_GPS	1215792,884	-6258150,930	-272196,409	0,0006	0,0040	0,0076	0,0006	0,0020	0,0004

ANEXO C: Índice espectral de las estaciones REGME e IGS. Las líneas azul, verde y amarilla representan los periodos anual, semianual y trimestral, respectivamente.

ANEXO C: Continuación...

ANEXO C: Continuación...

ANEXO C: Continuación...

ANEXO C: Continuación...

ANEXO C: Continuación...

ANEXO C: Continuación...

ANEXO D: Descomposición de las series temporales de las estaciones REGME/IGS. Los valores en las abscisas corresponden a la fecha de observación en años. Los puntos negros representan los valores observados, la línea roja la tendencia y la línea verde la estacionalidad.

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO D: Continuación...

ANEXO E: Scripts en Linux para extraer información de cada estación del archivo Sinex.

```
#!/bin/bash/

c=1500
while [ $c -lt 1826 ]; do

cd /media/marco/DATOS/GPSDATA/ECU$c/SOL/

grep "STAX QUEM" ECU"$c".SNX > aaa1
grep "STAY QUEM" ECU"$c".SNX > aaa2
grep "STAZ QUEM" ECU"$c".SNX > aaa3
cat aaa? > ECU"$c".oo
rm -f aaa*

mv /media/marco/DATOS/GPSDATA/ECU$c/SOL/ECU"$c".oo /media/marco/DATOS/DATASEM/
let c=$c+1
done

cd /media/marco/DATOS/DATASEM/
cat ECU????.oo > F
rm -f ECU*.★
# Para eliminar columnas de caracteres y dejar solamente datos

awk '{ $1 = ""; $2 = ""; $3 = ""; $4 = ""; $5 = ""; $7 = ""; $8 = ""; print > "F2" }' F

sed 's/:/ /g' F2 > QUEM

rm -f F★
```


ANEXO F: Scripts en Matlab denominado “Series.m”.

ANEXO G: Scripts en Matlab denominado “ModeloKriging.m”.

ANEXO H: Scripts en Matlab denominado “ModeloMCC.m”.