

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA PPP-GNSS PARA EL
MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN PUENTES

TESIS

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN**

PRESENTADA POR:

ING. JESÚS RENÉ VÁZQUEZ ONTIVEROS

DIRECTORES

DR. GUADALUPE ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA

DR. JOSÉ RAMÓN GAXIOLA CAMACHO

Culiacán, Sinaloa, Octubre de 2019

*Dedicado a mi familia :
Mamá, Papá, Martha y Carlos*

*“No es el más fuerte de las especies el que sobrevive,
tampoco es el más inteligente el que sobrevive.
Es aquel que es más adaptable al cambio”*

El origen de las especies(1859), Charles Darwin.

Agradecimientos

En primer lugar dar las gracias de manera muy especial a mis directores de tesis, al Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra y al Dr. José Ramón Gaxiola Camacho, por la gran ayuda de dar forma y concluir este trabajo. Hago extensible mi agradecimiento también al Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez y al Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, por darme la oportunidad y confianza de haber realizado una estancia académica en el departamento de monitoreo estructural del Instituto Mexicano del Transporte.

En segundo lugar, agradecer a la administración del Posgrado en Ciencias de la Información por la ayuda que siempre me brindaron cuando tenía que resolver una incógnita referente a lo administrativo. Agradezco también al Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz por compartir una parte de sus conocimientos, al igual que a mis compañeros de posgrado que siempre me sirvieron de inspiración y de buenos momentos de conversaciones científicas☺. A todos los compañeros del departamento de monitoreo estructural del Instituto Mexicano del Transporte, les agradezco su enorme ayuda y sobre todo lo amable que fueron conmigo durante mi estancia, ya que esto ayuda a generar confianza y motivación a aprender.

Y finalmente agradezco a la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA por darme la oportunidad de estudiar una maestría en sus instalaciones, y al CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA por brindarme apoyo económico a través de una beca para llevar a cabo el trabajo de investigación redactado en este documento de Tesis.

Resumen

El uso de la tecnología de Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) ha tenido un auge en diferentes aplicaciones como es el caso del monitoreo de la salud estructural en puentes, principalmente en los cuales su geometría hace difícil la instalación de sensores. Existen diferentes métodos de procesamiento de datos GNSS, el más utilizado es el de diferencias dobles GNSS (DD-GNSS), donde se requiere de por lo menos dos receptores de orden geodésico GNSS, uno como estación de referencia y el otro como rover. Sin embargo, en ocasiones es difícil llevar a cabo este método de procesamiento de datos GNSS, para lo cual existen metodologías confiables como la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS). La técnica PPP-GNSS requiere de solamente un receptor de orden geodésico GNSS. El trabajo de investigación que se presenta en este documento se realizó para demostrar la precisión que se logra alcanzar con la técnica PPP-GNSS en el monitoreo de la salud estructural de puentes. De manera particular se evaluó la salud estructural del Puente *El Carrizo* después de haber sido rehabilitado por diversos daños ocasionados por un accidente de tráfico vehicular. Por lo cual, en esta investigación se realizaron mediciones sobre la zona rehabilitada del doble voladizo del puente *El Carrizo* con diferentes sensores: Extensómetros, inclinómetros, LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) y receptores de tecnología GNSS. Estas mediciones se llevaron a cabo durante dos pruebas de carga estáticas, donde se utilizaron dos tipos de vehículos: T3-S3 y C3, con un peso promedio de 54 y 27.5 toneladas, respectivamente. Los archivos de observación GNSS generados en ambas pruebas de carga fueron procesados en línea por el servicio CSRS-PPP de la división de estudios geodésicos de Canadá, y a los datos generados se le aplicó un filtro adaptativo para mitigar el efecto del *multipath* y salto de ciclo. Por otro lado, a través del filtro de la media móvil se extrajeron los desplazamientos semi-estáticos para una mejor representación del comportamiento de la estructura por cada prueba de carga, y de esta manera determinar los desplazamientos en la componente vertical del puente *El Carrizo*. Los desplazamientos registrados con la tecnología GNSS fueron comparados con los desplazamientos registrados con el sensor LVDT, en particular, los máximos desplazamientos registrados fueron: 7.22 mm y 10.718 mm para la primera prueba de carga con el receptor GNSS y el sensor LVDT, respectivamente. En este sentido, para la segunda prueba de carga 11.24 mm y 11.61 mm con el receptor GNSS y el sensor LVDT, respectivamente. Una vez realizadas las comparaciones de precisión con respecto a otros equipos electrónicos, se utilizaron diversos filtros para obtener el desplazamiento dinámico de la estructura. De esta manera, utilizando los datos obtenidos via GNSS, se implementaron 3 filtros pasa-altas para obtener dicho desplazamiento, siendo estos: Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II. De esta forma, una vez extraídos por

medio de los tres filtros pasa-altas, se realizó un estudio estocástico de los desplazamientos dinámicos mediante el uso de funciones matemáticas de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Para conocer los PDF_s que definen el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos, se utilizó la prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrada (χ^2). También, con el fin de comparar el grado de ajuste de algunos otros PDF_s, se estudiaron 15 de ellos. Una vez teniendo estas 15 distribuciones o PDF_s, se procedió a realizar el cálculo de probabilidad de falla (p_f) e índice de confiabilidad (β) para cada uno de los PDF_s. Dichos valores de p_f y β fueron calculados considerando diversos límites en términos de desplazamientos permisibles del puente *El Carrizo*. Obviamente, lo anterior para ambas pruebas de carga. Por último, con base en los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se pudo demostrar que la técnica PPP-GNSS representa una alternativa viable para el monitoreo de la salud de obras civiles de gran importancia como puentes, pudiendo alcanzar precisiones considerablemente confiables.

Abstract

The use of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) technology has been recently evolving in several applications related to the Structural Health Monitoring (SHM) of roads, dams, bridges, and a number of other important infrastructure. In the particular case of the SHM of bridges, it is reported in the literature that the use of GNSS technology may facilitate the calculation of structural displacements, particularly when it is difficult the installation of other sensors. In addition, displacements can be directly extracted when geodetic-grade GNSS receivers are used, eliminating several errors of the double integration of acceleration. In this way, there are many methods to obtain displacements via GNSS, one of the most common is the double difference GNSS (DD-GNSS) where at least two GNSS receivers are required; one as a reference and the other as a rover station. Unfortunately, several times, it is impossible to carry out the DD-GNSS methodology mainly because of the lack of availability and/or supervision of two GNSS receivers. As an option, the precise point positioning GNSS technique, or hereafter denoted as simply PPP-GNSS, can be implemented. The main advantage of the PPP-GNSS methodology is that it only requires one GNSS receiver to extract the displacements. However, there are still some knowledge gaps in the application of PPP-GNSS in the SHM of complex structures as bridges. In this research, the PPP-GNSS methodology is implemented in the SHM of the *El Carrizo* Bridge during its rehabilitation; after a vehicular collision provoked a fire that caused several structural damages on it. The SHM consisted in studying the rehabilitated area of the double cantilevered part of the bridge during two static load test using several sensors as strain gauges, tiltmeters, LVDT (Linear Variable Differential Transformer), and GNSS receivers. A particular emphasis was placed in the use of the GNSS receivers to extract displacements via the PPP-GNSS methodology. For the static load tests two types of vehicles were used: (1) T3-S3 (54 tons), and (2) C3 (27.5 tons), respectively. Once the displacements were extracted via PPP-GNSS, the observation files generated for both load test were processed using the CSRS-PPP online service of the geodetic division of Canada, and an adaptive filter was applied to the processed data to mitigate the effect of multipath and cycle slip. Then, to obtain semi-static displacements of *El Carrizo* Bridge in the vertical component, the moving average filter was applied to the data. To validate the accuracy of the PPP-GNSS technique, semi-static displacements obtained using the GNSS receiver are compared with the displacements reported by the LVDT sensor. In this sense, for the first load test, maximum displacements of 7.22 and 10.718 mm were reported by the GNSS receiver and LVDT, respectively, and for the second loading test, displacements of 11.24 and 11.61 mm were observed, respectively. In addition, three high-pass band filters were used to extract the dynamic behavior of the *El Carrizo* Bridge in the vertical direction: (1) But-

terworth, (2) Chebyshev type I, and (3) Chebyshev type II. Then, the Chi-squared test (X^2) was used to fit the best distribution or probability density function (PDF) of dynamic displacements for every applied filter. In addition, to study the randomness of such dynamic displacements, a probabilistic analysis was proposed to extract the risk of the structure using 15 PDF_s and calculating their probability of failure (p_f) and reliability index (β), respectively, evaluating several displacement limits for the *El Carrizo* Bridge. Obviously, values of p_f and β were calculated for every load test, respectively. Based on the results documented in this research, it was demonstrated that the PPP-GNSS methodology is very accurate and viable for the SHM of complex structures as bridges. Such a technique was demonstrated to be capable of extracting very precise displacements.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.3. Justificación	5
1.4. Área de Estudio	5
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo General	7
1.5.2. Objetivos Específicos	7
1.6. Antecedentes	8
1.7. Hipótesis	11
1.8. Esquema de la Tesis	11
2. Marco Teórico	13
2.1. Introducción	13
2.2. Los Sistemas GNSS	14
2.2.1. Segmento Espacial	14
2.2.2. Segmento de control	15
2.2.2.1. Segmento de control GPS	16
2.2.2.2. Segmento de control GLONASS	16
2.2.2.3. Segmento de control Galileo	17
2.2.2.4. Segmento de control Beidou	18
2.2.2.5. Segmento de control Quasi-Zenith	18
2.2.2.6. Segmento de control IRNSS	18
2.2.3. Segmento usuario	18
2.3. Señales GNSS	19

2.3.1.	Señal GPS	19
2.3.2.	Señal GLONASS	21
2.4.	Ecuaciones de Observación GPS	22
2.4.1.	Ecuaciones de observación de la pseudodistancia	22
2.4.2.	Ecuación de observación de la fase portadora	24
2.5.	Posicionamiento Puntual Preciso	25
2.5.1.	Modelo Matemático	25
2.5.1.1.	Combinación Libre de Ionosfera	26
2.5.1.2.	Combinación libre de geometría	27
2.5.1.3.	Combinación Wide-Lane (WL) o banda ancha	27
2.5.1.4.	Combinación Narrow-Lane (NL) o banda estrecha	27
2.5.1.5.	Combinación Melbourne-Wübbena (MW)	27
2.5.2.	Solución de Ambigüedades	28
2.5.2.1.	Retraso ionosférico y su predicción	28
2.5.2.2.	Estimación del retraso ionosférico época por época	29
2.5.2.3.	Predicción temporal del retraso ionosférico	30
2.5.3.	Rápida resolución de la ambigüedad con los retrasos atmosféricos previstos	31
2.6.	Monitoreo de deformaciones en puentes basados en GNSS	32
2.6.1.	Monitoreo de Salud Estructural (SHM)	32
2.6.2.	Métodos de determinación de la deformación	33
2.6.3.	Monitoreo de Salud Estructural mediante GNSS	34
3.	Fuentes de Error y Estrategias de Mitigación del PPP	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Fuentes de error convencionales	37
3.2.1.	Órbitas satelitales y errores de reloj	37
3.2.1.1.	Organización IGS	38
3.2.1.2.	Productos GPS precisos	39
3.2.1.3.	Productos GLONASS precisos	40
3.2.2.	Retraso Ionosférico	42
3.2.3.	Retraso Troposférico	44
3.2.4.	Desplazamiento del reloj del receptor	46
3.2.5.	Salto de ciclo (<i>Cycle slip</i>)	46
3.2.6.	Multipath y ruido de la medición	47
3.3.	Fuentes de error especiales	48
3.3.1.	Desplazamiento del Centro de Fase de la antena del Receptor y del Satélite	48
3.3.2.	Fase wind up	50
3.3.3.	Efecto relativista	51
3.3.4.	Mareas terrestres	51
3.3.5.	Carga de mareas oceánicas	52
3.3.6.	Carga atmosférica	53
3.3.7.	Efecto Sagnac	53

4. Filtros Digitales y Teoría de Probabilidad	55
4.1. Introducción	55
4.2. Filtros digitales	55
4.2.1. Tipos de filtros digitales	56
4.2.1.1. Filtro pasa baja	57
4.2.1.2. Filtros pasa alta	57
4.2.1.3. Filtro pasa banda	58
4.2.1.4. Filtro rechaza banda	58
4.3. Teoría de Probabilidad	59
4.3.1. Funciones de Densidad de Probabilidad	59
4.3.1.1. Introducción	59
4.3.1.2. Distribución normal	60
4.3.1.3. Distribución LogNormal	60
4.3.1.4. Distribución Logística	61
4.3.1.5. Distribución Log-Logística	62
4.3.1.6. Distribución Gamma	62
4.3.1.7. Distribución de Weibull	63
4.3.1.8. Distribución Gaussiana Inversa	63
4.3.1.9. Distribución Burr	63
4.3.1.10. Distribución Kernel	64
4.3.1.11. Distribución Estable	64
4.3.1.12. Distribución Birnbaum-Saunders	65
4.3.1.13. Distribución Rice	66
4.3.1.14. Distribución Nakagami	67
4.3.1.15. Valor Extremo	67
4.3.1.16. Valor Extremo Generalizado	68
4.3.2. Prueba de bondad de ajuste χ^2	68
5. Materiales y Métodos	71
5.1. Introducción	71
5.2. Receptor geodésicos GNSS	72
5.3. Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)	73
5.4. Extensómetro	74
5.5. Inclinómetro	74
5.6. Servicio Online CSRS-PPP	75
5.7. Matlab	77
5.8. Pruebas de carga sobre el puente <i>El Carrizo</i>	78
5.8.1. Introducción	78
5.8.2. Instrumentación del puente <i>El Carrizo</i>	81
5.8.3. Prueba estática de carga 1	83
5.8.4. Prueba estática de carga 2	84
5.9. Metodología para el análisis de las mediciones PPP-GNSS	85
5.9.1. Transformación de los datos crudos de las series temporales a desplazamientos aparentes	86
5.9.2. Filtro adaptativo LMS	87

5.9.3.	Desplazamientos semi-estáticos	89
5.9.3.1.	Media Móvil	90
5.9.4.	Desplazamientos dinámicos	90
5.9.4.1.	Filtros chebyshev tipo I y II	91
5.9.4.2.	Filtro Butterworth	92
5.10.	Generación de <i>PDF</i> a partir de los desplazamientos dinámicos	92
5.11.	Probabilidades de falla (p_f) a partir de desplazamientos dinámicos	93
5.12.	Índice de confiabilidad (β) a partir de la probabilidad de falla	94
5.13.	Procesamiento de las mediciones del extensómetro, inclinómetro y el LVDT	94
6.	Análisis y Resultados	97
6.1.	Introducción	97
6.2.	Resultados para la prueba de carga 1	97
6.2.1.	Desplazamientos crudos del post-procesado	97
6.2.2.	Desplazamientos aparentes	99
6.2.3.	Aplicación del filtro adaptativo-LMS	99
6.2.4.	Desplazamientos semi-estáticos	100
6.2.5.	Comparación entre las mediciones de los diferentes sensores	101
6.2.6.	Comparación entre los desplazamientos obtenidos con la tecnología GNSS y el sensor LVDT para la prueba de carga 1	102
6.2.7.	Desplazamientos dinámicos	104
6.2.8.	Comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos	105
6.2.9.	Ajuste de distribuciones	106
6.3.	Resultados para la prueba de carga 2	109
6.3.1.	Desplazamientos crudos del post-procesado	109
6.3.2.	Desplazamientos aparentes	110
6.3.3.	Aplicación del filtro adaptativo-LMS	111
6.3.4.	Desplazamientos semi-estáticos	111
6.3.5.	Comparación entre las mediciones de los diferentes sensores	112
6.3.6.	Comparación entre los desplazamientos obtenidos con la tecnología GNSS y el sensor LVDT para la prueba de carga 2	113
6.3.7.	Desplazamientos dinámicos	115
6.3.8.	Comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos	116
6.3.9.	Ajuste de distribuciones	117
6.4.	Probabilidad de falla (p_f) e índice de confiabilidad (β)	119
6.4.1.	Introducción	119
6.4.2.	Prueba de carga 1	119
6.4.3.	Prueba de carga 2	128
7.	Conclusiones y recomendaciones	137
7.1.	Conclusiones	137
7.2.	Recomendaciones y trabajos futuros	139

Índice de figuras

1.1. Daño estructural del puente El Carrizo: (a) vista aérea del daño, (b) daño sobre losa de concreto y carpeta asfáltica, (c) varillas estructurales expuestas a la interperie, (d) carril dañado, (e) losa del carril dañado, y (f) vista general del daño. Fuente: <i>Periodico El Debate de Sinaloa</i>	5
1.2. Localización del puente El Carrizo: (a) vista general, (b) durante la construcción del puente y (c) localización geográfica . Fuente: Trotin <i>et al.</i> (2015).	6
1.3. Características del experimento para la evaluación del rendimiento vertical del PPP. (a) barras de acero, y (b) receptor GNSS sobre la barra voladiza . Fuente: Yigit y Gurlek (2017).	9
1.4. Puntos de inspección en el puente de Severn. Fuente: Tang <i>et al.</i> (2017).	10
1.5. Las desviaciones de PPP y DD en dirección vertical en el punto C. Fuente: Tang <i>et al.</i> (2017).	10
2.1. Satélites GNSS: GPS IIR-M (arriba a la izquierda), Glonass-M (arriba a la derecha), Galileo IOV (abajo a la izquierda) y Beidou-M (abajo a la derecha). Fuente: Sanz Subirana <i>et al.</i> (2013).	15
2.2. Segmento de control GPS . Fuente: Sanz Subirana <i>et al.</i> (2013).	16
2.3. Infraestructura terrestre de GLONASS: Centro de control del sistema (SCC), Sincronizador central (CC-M), Estaciones de telemetría, seguimiento y control (TT&C), Estación láser (LS), Estaciones de monitoreo (MS). Fuente: Sanz Subirana <i>et al.</i> (2013).	17
2.4. Estructura de la señal GPS. Fuente: Traducido al Español de (Seeber, 1993).	20
2.5. Determinación del tiempo de viaje de la señal.	23
3.1. Organización del IGS. Fuente: Traducido al Español de IGS (2008).	39
3.2. Red mundial de estaciones continuas del IGS. Fuente: IGS (2008).	39
3.3. Retraso ionosférico en la señal GNSS.	43
3.4. Efecto <i>multipath</i> en la señal GNSS.	48
3.5. Antena del Satélite. Fuente: Traducido al Español de Héroux y Kouba (2001).	49
4.1. Filtro pasa-bajas.	57
4.2. Filtro pasa-altas.	57
4.3. Filtro pasa-bandas.	58
4.4. Filtro pasa-rechazo.	58
5.1. Receptor geodésico GNSS Hi-Target V60. Fuente: <i>es. hi-target.com.cn</i>	72

5.2. Sensor LVDT instalado sobre el puente <i>El Carrizo</i>	73
5.3. Extensómetro utilizado sobre el puente <i>El Carrizo</i> . Fuente: https://bditest.com	74
5.4. Inclinómetro utilizado sobre el puente <i>El Carrizo</i> . Fuente: https://bditest.com	75
5.5. Mapa del cielo de los satélites GPS, GLONASS y BEIDOU disponibles en las mediciones GNSS que se llevaron a cabo en las pruebas de carga del día 29 de agosto de 2018.	77
5.6. DOPs de los satélites GPS y GLONASS.	77
5.7. Zona dañada del Puente <i>El Carrizo</i>	80
5.8. Diagrama de instrumentación del puente <i>El Carrizo</i>	81
5.9. Orden de posicionamiento de los vehículos para la prueba de carga 1.	83
5.10. Configuración de la prueba de carga 1.	84
5.11. Orden de posicionamiento de los vehículos para la prueba de carga 2.	84
5.12. Configuración de la prueba de carga 2.	85
5.13. Posición de los vehículos sobre el doble voladizo del puente <i>El Carrizo</i> para ambas pruebas de carga.	85
5.14. Desplazamientos crudos de la prueba de carga E2.	86
5.15. Desplazamientos aparentes de la prueba de carga E2.	87
5.16. Esquema de un filtro adaptativo LMS.	89
5.17. PDF con los límites correspondientes de los desplazamientos dinámicos.	93
5.18. Sistema de adquisición de datos para los sensores extensómetros, inclinómetros y LVDT.	95
6.1. Desplazamientos crudos de la primera prueba de carga.	98
6.2. Desplazamientos aparentes de la primera prueba de carga.	99
6.3. Mitigación del <i>multipath</i> en la serie de tiempo de los desplazamientos aparentes de la primera prueba de carga.	100
6.4. Desplazamientos semi-estáticos de la primera prueba de carga.	101
6.5. Comportamiento del puente <i>El Carrizo</i> registrado con diferentes sensores, de la primera prueba de carga.	102
6.6. Desplazamientos obtenidos de la primera prueba de carga con el sensor LVDT y el receptor GNSS.	103
6.7. Desplazamientos dinámicos extraídos con diferentes filtros de la primera prueba de carga.	104
6.8. Histogramas de los desplazamientos dinámicos obtenidos con los filtros: Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II.	106
6.9. Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Butterworth.	107
6.10. Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo II.	107
6.11. Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo I.	108
6.12. Desplazamientos crudos de la segunda prueba de carga.	109
6.13. Desplazamientos aparentes de la segunda prueba de carga.	110

6.14. Mitigación del <i>multipath</i> en la serie de tiempo de los desplazamientos aparentes de la segunda prueba de carga.	111
6.15. Desplazamientos semi-estáticos de la segunda prueba de carga.	112
6.16. Comportamiento del puente <i>El Carrizo</i> registrado con diferentes sensores de la segunda prueba de carga.	113
6.17. Desplazamientos obtenidos de la segunda prueba de carga con el sensor LVDT y el receptor GNSS.	114
6.18. Desplazamientos dinámicos extraídos con diferentes filtros de la segunda prueba de carga.	115
6.19. Histogramas de los desplazamientos dinámicos obtenidos con los filtros: Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II.	116
6.20. Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Butterworth.	117
6.21. Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo II.	118
6.22. Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo I.	118
6.23. Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones, para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Butterworth</i> en la prueba de carga 1.	122
6.24. Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}), para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Butterworth</i> en la prueba de carga 1.	123
6.25. Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones, para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Chebyshev tipo I</i> en la prueba de carga 1.	124
6.26. Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}), para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Chebyshev tipo I</i> en la prueba de carga 1.	125
6.27. Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones, para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Chebyshev tipo II</i> en la prueba de carga 1.	126
6.28. Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}), para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Chebyshev tipo II</i> en la prueba de carga 1.	127
6.29. Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Butterworth</i> para la prueba de carga 2.	131
6.30. Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}) para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro <i>Butterworth</i> para la prueba de carga 2.	132
6.31. Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo I para la prueba de carga 2.	133

6.32. Índices de confiabilidad calculados a partir de la probabilidad de falla para la prueba de carga 2. Filtro Chebyshev tipo I.	134
6.33. Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo II para la prueba de carga 2.	135
6.34. Índices de confiabilidad calculados a partir de la probabilidad de falla para la prueba de carga 2. Filtro Chebyshev tipo II.	136

Índice de tablas

2.1. Características de la señal GPS. Fuente: Seeber (1993).	20
2.2. Características de la señal GLONASS. Fuente: Sanz Subirana <i>et al.</i> (2013).	21
3.1. Exactitud de coordenadas y velocidad de los satélites GLONASS (GLONASS, 2002).	38
3.2. Órbitas satelitales GPS precisas y productos de reloj (IGS, 2008).	40
3.3. Órbitas satelitales GLONASS precisas y productos de reloj (IGS, 2008; Oley-nik <i>et al.</i> , 2001).	41
3.4. Desplazamiento del centro de fase de la antena de Satélite GPS en el marco de referencia fijo del satélite (m) (Héroux y Kouba, 2001).	49
5.1. Especificaciones técnicas del receptor GNSS Hi-Target V60. Fuente: http://www.intopcol.com	73
5.2. Características del procesado usando CSRS-PPP.	76
6.1. Correlación entre los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro para la primera prueba de carga.	105
6.2. Resumen de los desplazamientos máximos registrados con la tecnología GNSS y el sensor LVDT para ambas prueba de carga sobre el puente <i>El Carrizo</i> .108	
6.3. Correlación entre los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro para la segunda prueba de carga.	116

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Debido al desarrollo en la tecnología para el diseño de obras civiles, las estructuras se construyen hoy en día con configuraciones complejas e innovadoras. En particular, se han propuesto estructuras más delgadas, ligeras y flexibles, todo esto con el fin de que los costos de dichas obras sean menores, y dando imagen a grandes ciudades con alguna estructura emblemática, y cuidando siempre que se mantenga la seguridad de estas (Hwang *et al.*, 2012) . Sin embargo, estas obras son expuestas constantemente a diversas condiciones naturales y ambientales, donde se pueden mencionar: vientos fuertes, terremotos, huracanes, entre otros. Dichas cargas accidentales han causado colapsos estructurales de las obras como fue el caso del puente Tacoma Narrows en Estados Unidos, que colapsó 5 meses después de culminar su construcción, debido a que la frecuencia del viento sobre el puente coincidió con la frecuencia fundamental del mismo, provocando así el fenómeno de resonancia que lo hizo colapsar. Otro caso donde el fenómeno de resonancia causó daños fue sobre el puente de Broughton en Reino Unido, donde 74 soldados lo cruzaron marchando y esto provocó que la frecuencia inducida por el paso del ejercito coincidiera con la frecuencia fundamental del puente.

Por otro lado, es importante monitorear y evaluar la integridad estructural de las obras civiles. Dicha integridad estructural puede calcularse de maneras diferentes, como por ejemplo, extrayendo el desplazamiento que estas presentan. Lo anterior se justifica, debido a que los desplazamientos a corto y a largo plazo son indicadores del comportamiento de la estructura y de la integridad de la misma (Chan *et al.*, 2006). Según diversos autores, los desplazamientos de una estructura son el parámetro más relevante para monitorear (Li *et al.*, 2005). Desde tiempos pasados se han llevado a cabo diversas mediciones sobre estructuras para determinar sus desplazamientos, como fue el caso de la Torre Eiffel en el siglo XIX (Moschas y Stiros, 2011). Por lo tanto, resulta necesario contar con mediciones precisas de los desplazamientos, para así realizar una evaluación confiable de la salud en que se encuentra la obra bajo consideración.

Hoy en día, se utilizan una gran gamma de instrumentos y técnicas para registrar los desplazamientos sobre las estructuras. Por ejemplo, el acelerómetro es un instrumento muy común para el monitoreo estructural (Hong *et al.*, 2008), pero una de sus limitaciones es

que no mide los desplazamientos de manera directa, adicionalmente, dichos instrumentos tienden a desplazarse con el tiempo y no pueden detectar frecuencias de baja vibración (Roberts *et al.*, 2004). Los datos de la aceleración se pueden integrar por completo, lo que da como resultado cambios en las posiciones en términos de desplazamiento. Pero estos procesos conllevan a cierto error al momento de computar la aceleración (Roberts *et al.*, 2004). Un método más moderno para la determinación de desplazamientos estructurales, es mediante la tecnología a base de fibra óptica, siendo capaz de detectar cambios en la temperatura entre otras deformaciones sobre la estructura (Li *et al.*, 2005). Otro método de medición directa de desplazamientos, considerado como de alta precisión, es LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) (Hwang *et al.*, 2012). Por otro lado, el método que ha tenido un alza en su aplicación para el monitoreo de estructuras en tiempo real, es el relacionado con la tecnología satelital GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) (Moschas y Stiros, 2011). Uno de los primeros trabajos de monitoreo de obras civiles con la tecnología GNSS fue llevado a cabo por Lovse *et al.* (1995), donde reportó una aplicación específica del uso de receptores geodésicos GNSS para monitorear desplazamientos dinámicos de la torre Calgary en Alberta, Canadá.

Mediante la tecnología GNSS se obtienen coordenadas en las tres componentes, siendo así un instrumento potencial para el monitoreo de estructuras al medir directamente el desplazamiento. Los métodos de medición GNSS se aplican en referencia al problema a resolver. Para el monitoreo de obras de ingeniería, es necesario requerir receptores geodésicos de doble frecuencia y que el intervalo de muestreo sea a altas frecuencias (10 Hz). El método RTK-GNSS (*Real Time Kinematic-GNSS*) es muy aplicado en la mayoría de los estudios alrededor del mundo, esto debido a la alta precisión que se alcanza (nivel subcentimétrico). Los receptores GNSS examinan las distancias desde un cierto punto de la tierra a diferentes satélites pertenecientes a una constelación, midiendo el tiempo de viaje exacto de la onda electromagnética transmitida desde el satélite para obtener la información de las 3 componentes de posición (X, Y, Z) y el tiempo (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007). Sin embargo, la técnica de medición RTK-GNSS requiere un satélite más para mediciones de alta frecuencia en tiempo real (10 Hz). De manera adicional, existen bastantes causas de errores asociadas a dicho método, por ejemplo, para la dilución o pérdida de la precisión (PDOP), errores de reloj y órbita de satélites, retrasos de la ionosfera y troposfera, *multipath*, etc. (Tamura *et al.*, 2002). Estos errores son minimizados con el método de diferencias dobles (DD-GNSS). Por otro lado, en ocasiones no es posible llevar a cabo este método diferencial de medición y/o procesamiento conocido como diferencias dobles (DD-GNSS), debido a que la localización geográfica no es considerable factible para la colocación de un receptor de referencia GNSS, por lo tanto, es necesario utilizar otra técnica de medición. Una alternativa podría ser el utilizar la técnica conocida como PPP-GNSS. La metodología PPP-GNSS es un método de procesamiento de datos GNSS que utiliza un solo receptor, y con diferentes modelados de las fuentes de error puede alcanzar precisiones de hasta ± 2 mm considerando las correcciones de los errores (Bahadur y Nohutcu, 2018; Tang *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2013; Yigit y Gurlek, 2017). Se han desarrollado diferentes trabajos de investigación para la evaluación del PPP-GNSS, donde es muy utilizado en el estudio de los desplazamientos de las placas tectónicas (Marquez-Azua y DeMets, 2009). Sin embargo, este método se ha venido introduciendo como una opción al monitoreo de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés). Una de las ventajas del PPP-GNSS sobre

el DD-GNSS, es el bajo costo al implementarlo, ya que DD-GNSS requiere de por lo menos dos receptores y el PPP-GNSS, solo requiere de un receptor satelital GNSS.

En este trabajo de investigación se implementa la técnica PPP-GNSS como una alternativa para el monitoreo de la salud estructural en el puente *El Carrizo* ubicado en la autopista Mazatlán-Durango, bajo condiciones de carga conocidas. Se llevaron a cabo dos pruebas de carga sobre el doble voladizo del puente *El Carrizo*, para determinar las condiciones en las cuales se encuentra la estructura después de haber sido rehabilitada, debido al accidente ocurrido en enero de 2018. Estas pruebas de carga fueron registradas con diferentes sensores, donde uno de ellos fue un receptor geodésico GNSS de doble frecuencia. Estos sensores registraron diferentes magnitudes sobre el puente durante cada prueba de carga, siendo la magnitud de desplazamiento la de interés para este estudio. El desplazamiento ocurrido en la estructura del doble voladizo debido al peso de los camiones fue registrado con el sensor LVDT y el receptor GNSS, después estos desplazamientos fueron comparados para determinar la precisión con la cual se registrarán los desplazamientos con el sensor GNSS. A partir de los desplazamientos registrados con el receptor geodésico GNSS, se extrajeron desplazamientos dinámicos con filtros digitales pasa-altas y posteriormente, se calculó la probabilidad de falla (p_f) e índice de confiabilidad (β), considerando diferentes distribuciones de probabilidad.

1.2. Planteamiento del Problema

En la actualidad, el uso de las técnicas de monitoreo estructural de obras civiles mediante diferentes metodologías, es una prioridad para la sociedad, debido a que es necesario garantizar la seguridad de los usuarios en obras como puentes, carreteras, túneles, edificios, entre otros. También, es importante conocer cuáles son los efectos causados en las obras civiles por su interacción con el medio ambiente, fenómenos naturales o accidentes propios sobre la estructura, y con esto determinar el estado en el que se encuentra la obra y poder definir la exigencia de su mantenimiento y asimismo reestablecer el tiempo de durabilidad de ésta. Los sistemas de monitoreo a las obras civiles actuales están basados en sensores, donde estos miden diferentes magnitudes sobre la estructura como pueden ser: aceleración, tensión, vibración, desplazamientos, entre otros. Por lo tanto, es importante establecer metodologías que garanticen la obtención de estas magnitudes de manera precisa. Una de las metodologías más eficiente para determinar el desplazamiento de una obra civil, es la tecnología satelital GNSS (Li *et al.*, 2005). Donde esta nos brinda posicionamiento de manera precisa, y a partir de la posición con respecto al tiempo, se obtiene el desplazamiento, que es el de interés para esta investigación. Por lo cual, es necesario conocer una técnica factible para determinar los desplazamientos de las obras civiles usando mediciones GNSS sobre dichas obras de ingeniería. Como caso de estudio de este trabajo de investigación, se analiza el puente *El Carrizo*, perteneciente a la autopista Mazatlán-Durango. Siendo la autopista Mazatlán-Durango una de las obras públicas más grandes de la historia de carreteras en México, forma parte del eje carretero troncal Matamoros-Mazatlán. Esta carretera representa una obra de infraestructura indispensable para el desarrollo del país, particularmente de la región sur del Estado de Sinaloa; donde los sectores turísticos y comercial se han beneficiado con dicha construcción, teniendo un impacto positivo en el crecimiento económico de la zona. La autopista une los estados vecinos de Durango y Sinaloa atravesando la sierra Madre Occidental, con una distancia aproximada de 230 kilómetros. Por otro lado, debido al gran flujo diario de vehículos ligeros y pesados que circulan por la carretera, se pueden propiciar cierto tipo de accidentes de tránsito, como el ocurrido el día 12 de enero de 2018 en el kilómetro 166+500 a la altura del túnel *La Quemada* sobre el puente *El Carrizo*. En el cual se volcó un vehículo doblemente articulado que transportaba Diésel, donde uno de los remolques se incendió provocando daños graves principalmente a la estructura del puente *El Carrizo*. Los daños fueron en la losa, carpeta asfáltica, junta de calzada, tirantes, vigas, superficie de cajones principales, en interiores de dovelas y zonas de pila del puente. Este tipo de daños se ilustran en la Figura 1.1 , donde el daño mayor fue el carril derecho con dirección Mazatlán-Durango.

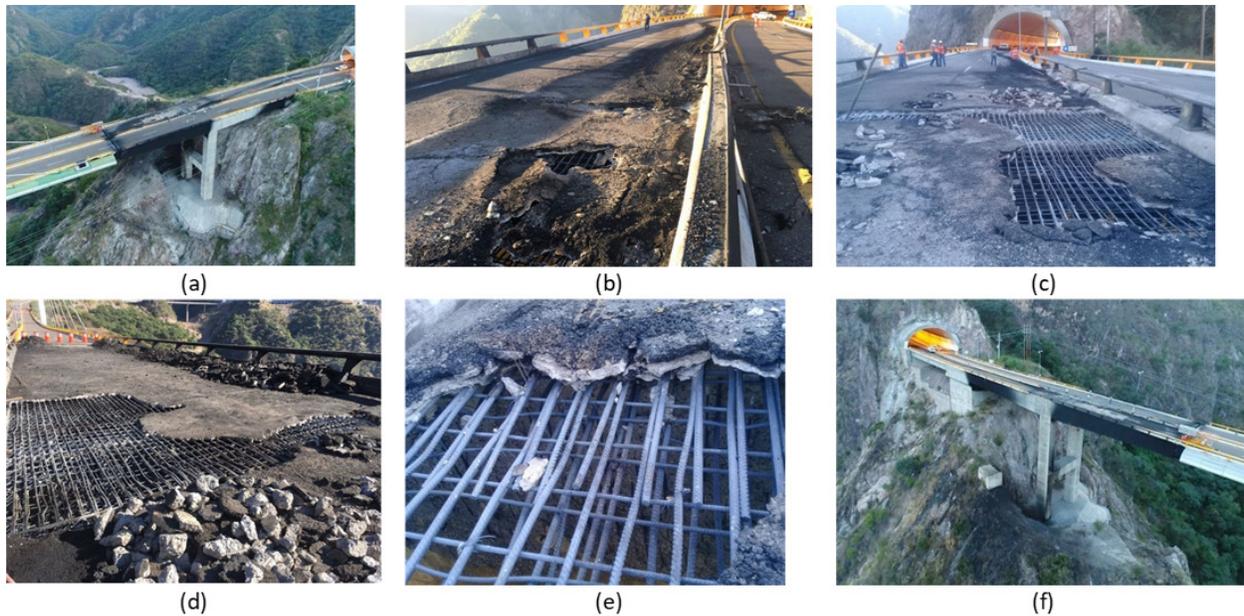


Figura 1.1: Daño estructural del puente El Carrizo: (a) vista aérea del daño, (b) daño sobre losa de concreto y carpeta asfáltica, (c) varillas estructurales expuestas a la interperie, (d) carril dañado, (e) losa del carril dañado, y (f) vista general del daño. Fuente: *Periodico El Debate de Sinaloa*.

1.3. Justificación

Los puentes son obras de ingeniería que permiten la unión de dos puntos de difícil acceso debido a la presencia de ríos, cañones, valles, carreteras, vías férreas, cuerpos de agua, entre otros obstáculos físicos que obstruyen la conexión entre dos regiones. Los puentes tienen un papel importante en el desarrollo de un país, esto debido a que la conexión entre las ciudades a nivel nacional es más corta y segura, ayudando así al comercio en el traslado de mercancía de una ciudad a otra, a través de carreteras que cruzan por regiones montañosas o por grandes obstáculos como los ríos. Otro sector que se ha beneficiado con el uso de los puentes, es el turismo. Por lo mencionado anteriormente, es importante el monitoreo de los puentes para garantizar la seguridad de los usuarios que a diario interactúan con estos, evitando del mismo modo problemas económicos por falta de conexión entre regiones. Otro aspecto que se beneficia al desarrollar monitoreos sobre puentes, es que se determina la salud estructural, sirviendo para que las instituciones encargadas tomen decisiones al evaluar la integridad estructural de un puente, y de esta manera se puedan evitar accidentes ocasionados por el mal estado estructural de dichas obras.

1.4. Área de Estudio

Al noroeste de México, en el municipio de Concordia perteneciente al Estado de Sinaloa, sobre la Sierra Madre Occidental, se localiza el puente atirantado *El Carrizo* (ver Figura 1.2). Siendo la segunda estructura más importante de la autopista Mazatlán-Durango

después del puente Baluarte. Se ubica sobre el km.162+720 de la autopista Mazatlán-Durango en las coordenadas geográficas: 23°31'4.36" N; 105°50'8.12" O y con una altura de 1920 m sobre el NMM.

El puente *El Carrizo* es una estructura con atirantado, doble voladizo y traveses tipo Nebraska. Está compuesta por dos apoyos principales: el primero es una pila central de concreto reforzado con una altura de 226 metros, que soporta a la estructura basada en dovelas metálicas, con losa de concreto para la superficie de rodamiento, utilizando el sistema en doble voladizo atirantado con 217 m de longitud. El segundo apoyo, cuenta con una altura de 70 metros, brinda soporte a la estructura que tiene como base dovelas de concreto postensado de sección cajón, construidas con el sistema de doble voladizo. De la misma manera, se tienen, tres caballetes, dos correspondientes a los accesos del puente, y otro intermedio que sirve para la construcción de un claro de 18 m, con traveses tipo Nebraska (Trotin *et al.*, 2015).

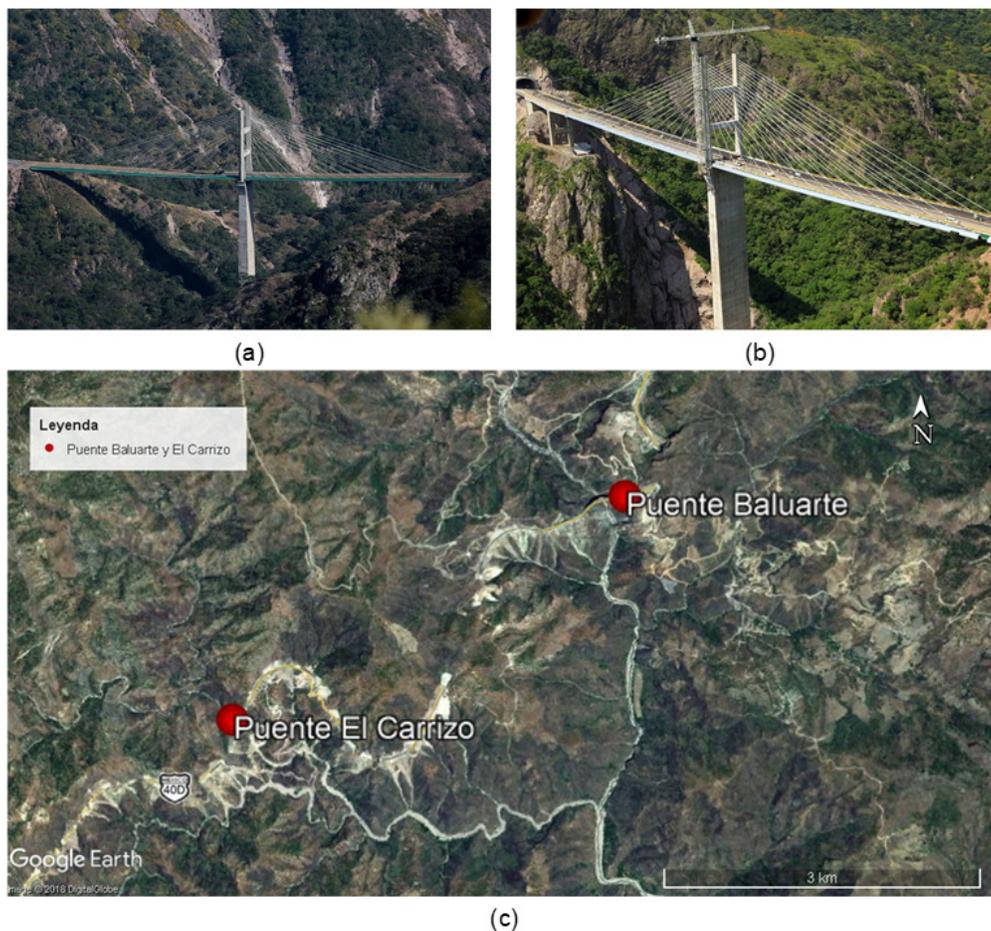


Figura 1.2: Localización del puente El Carrizo: (a) vista general, (b) durante la construcción del puente y (c) localización geográfica . Fuente: Trotin *et al.* (2015).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Implementar una metodología confiable para la determinación de desplazamientos sobre la estructura del puente *El Carrizo* durante pruebas de carga, con mediciones GNSS y procesadas a través del Servicio de Posicionamiento Puntual Preciso del Sistema de Referencia Espacial Canadiense online (CSRS-PPP, por sus siglas en inglés) por el método de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP-GNSS); determinar el grado de precisión alcanzado por este método de procesamiento de datos GNSS al ser comparado con sensores especializados en medir desplazamiento al nivel submilimétrico.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar y aplicar una metodología de medición que cuantifique los desplazamientos de manera precisa sobre el puente *El Carrizo*.
- Procesar datos GNSS de manera óptima aplicando la técnica PPP-GNSS mediante el uso de software especializado.
- Aplicar filtros durante el procesamiento de señales a las series temporales para la mitigación de los errores: *Multipath* y salto de ciclo.
- Analizar y seleccionar el filtro que mejor extraiga los desplazamientos semi-estáticos y dinámicos de las series temporales para la interpretación de los desplazamientos reales del puente.
- Analizar y comparar el comportamiento de las mediciones registradas con la tecnología PPP-GNSS y los sensores: extensómetros, inclinómetros y LVDT.
- Comparar la tecnología PPP-GNSS y el sensor LVDT al medir desplazamientos sobre el puente.
- Determinar la función de densidad de probabilidad (*PDF*) a partir de los desplazamientos dinámicos y obtener la probabilidad de falla (p_f) y el índice de confiabilidad (β) a partir de los PDF_s .

1.6. Antecedentes

Los sistemas globales de navegación satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) se introdujeron originalmente para el posicionamiento y navegación, pero debido a la alta precisión alcanzada por esta tecnología, se empezó a utilizar en diversas aplicaciones como los estudios geodésicos, geológicos y sísmicos (Larson *et al.*, 1991). Por otro lado, el éxito de los GNSS en la determinación de desplazamientos muy lentos llevó su aplicación al monitoreo de estructuras de ingeniería como las presas, para determinar los desplazamientos inducidos por la temperatura (Behr *et al.*, 1998). La aplicación de los GNSS se extendió al estudio de desplazamientos más rápidos, como los ocurridos sobre puentes (inducidos por el tráfico y el viento) y estructuras de ingeniería delgadas (inducidos por el viento). Los primeros trabajos de monitoreo estructural con la tecnología GNSS fueron desarrollados por (Ashkenazi y Roberts, 1997; Lovse *et al.*, 1995; Tamura *et al.*, 2002). Las estructuras de ingeniería son susceptibles a las deformaciones estáticas y dinámicas causadas por diferentes cargas, donde estas cargas pueden ser originadas durante pruebas de monitoreo sobre estructuras dañadas, para la verificación de respuesta ante diferentes cargas. Para esto, es necesario realizar mediciones de desplazamientos de manera precisa, que garanticen la evaluación de integridad y confiabilidad de la estructura y al mismo tiempo ayuden a la calibración de un modelo analítico. Los GNSS se han usado para monitorear las respuestas estáticas y dinámicas de las obras de ingeniería, esto debido a que tienen la ventaja de medir los desplazamientos de manera directa sin la necesidad de aplicar algún proceso matemático sobre los datos adquiridos; como es el caso de los acelerómetros, que requieren una doble integración para la obtención del desplazamiento y estos procesos matemáticos conllevan un cierto grado de error. El uso de los GNSS para el monitoreo de puentes se ha venido incrementando, esto por la necesidad de llevar a cabo monitoreos sobre la estructura de puentes, para determinar los efectos del viento y encontrar las frecuencias modales. Las precisiones alcanzadas con las mediciones GNSS han mejorado con el tiempo, iniciando con unos pocos centímetros hasta lo que ahora es en el nivel milimétrico (Meng, 2002). Meo *et al.* (2006) utilizaron el RTK-GNSS para medir bajas frecuencias de vibración, parámetros modales incluyendo frecuencias naturales, coeficientes de amortiguamiento y formas de modo de un puente colgante de tramo medio (Wilford bridge Nottingham). Ashkenazi y Roberts (1997) describen el procedimiento para monitorear el puente Humber mediante el método cinemático GPS obteniendo precisiones notables del orden de unos pocos milímetros en las tres direcciones, demostrando que este método permite la colección de datos de deflexión en tiempo real, que podrían utilizarse para determinar las características de deformación de puente.

Sin embargo, estos estudios mencionados utilizan el posicionamiento DD-GNSS, donde se requiere de una estación de referencia con coordenadas conocidas para realizar la diferenciación entre las observaciones del receptor base con el receptor rover (Guzman-Acevedo *et al.*, 2019; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007; Vazquez B. *et al.*, 2017). Por otro lado, la técnica de DD-GNSS requiere de por lo menos dos receptores, siendo una técnica costosa y en algunas ocasiones difícil de llevar a cabo por la complejidad de ubicar a la estación de referencia. Alternativo a la técnica de DD-GNSS, está el posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS), donde se han llevado a cabo diversos estudios que han demostrado que esta técnica de posicionamiento puede alcanzar precisiones del orden milimétrico,

un ejemplo, es el trabajo realizado por Yigit y Gurlek (2017), donde llevaron a cabo un experimento para evaluar el rendimiento vertical del método de PPP cinemático de alta velocidad, se realizaron varias pruebas de oscilación utilizando tres estructuras modelo con dos antenas/receptores GNSS de doble frecuencia. Se seleccionaron tres barras planas de acero con diferentes características dinámicas para representar una viga en voladizo de tramo largo/medio/corto. Se utilizaron bloques de concreto pesados para soportar cada barra, el receptor rover se colocó sobre cada una de las 3 barras midiendo a una frecuencia de muestreo de 10 Hz. En la Figura 1.3 se observa el experimento desarrollado por (Yigit y Gurlek, 2017). El receptor GNSS que se utilizó de referencia se colocó a 15 metros de la zona del experimento, se inició a medir 30 minutos antes de iniciar con las oscilaciones de las barras para acelerar el proceso de alcanzar la solución de ambigüedad fija. Se utilizó el software Leica Geo Office 3.0 (LGO) para procesar con la técnica de DD-GNSS y el servicio de procesamiento CSRS-PPP online desarrollado por el Sistema de Referencia Espacial Canadiense para procesar con la técnica PPP-GNSS. Se realizó una comparación entre las series de tiempo obtenidas con ambas técnicas, encontrándose diferencias en el orden de ± 10 mm, tomándose como referencia las series de tiempo de la técnica de DD-GNSS. También se obtuvieron las frecuencias fundamentales de cada barra de acero, con las mediciones GNSS, demostrando así la capacidad de medir el comportamiento vertical de una estructura con el método PPP-GNSS.

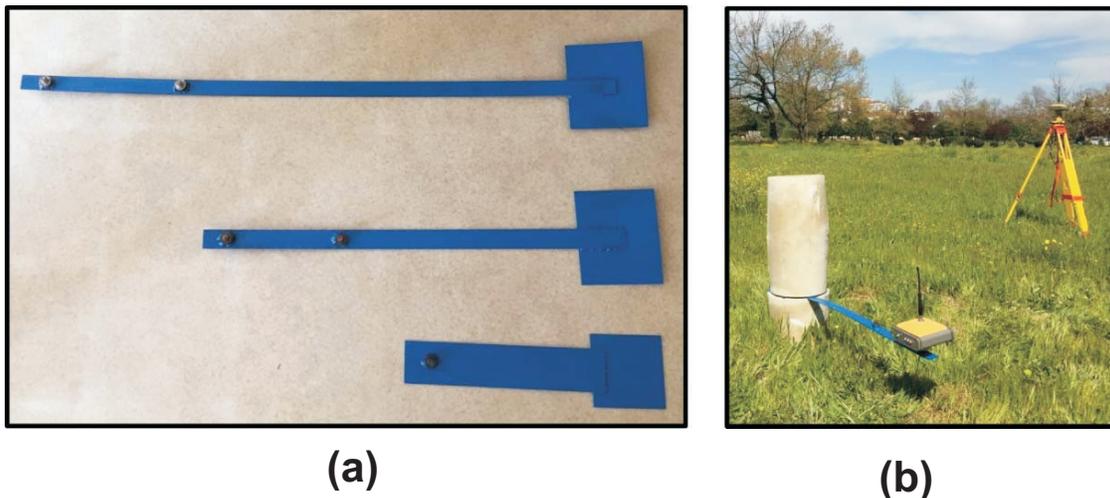


Figura 1.3: Características del experimento para la evaluación del rendimiento vertical del PPP. (a) barras de acero, y (b) receptor GNSS sobre la barra voladiza . Fuente: Yigit y Gurlek (2017).

Otro ejemplo de estudio, el cual fue desarrollado por Tang *et al.* (2017), consistió en monitorear el puente Severn utilizando la tecnología GNSS. Utilizaron 9 receptores GNSS, donde 4 receptores GNSS Leica SR530 de doble frecuencia fueron colocados sobre las torres del puente, 4 receptores GNSS doble frecuencia Leica 1200 sobre los cables en suspensión del puente y un receptor GNSS de doble frecuencia sobre un edificio cerca del puente, el cual sirvió de estación de referencia. La tasa de adquisición de datos fue de 20 Hz con una máscara de elevación de 15° . Se procesaron los datos de observación mediante

dos técnicas: diferencias dobles en relativo (DD-GNSS) y posicionamiento puntual preciso en absoluto (PPP-GNSS). Se compararon las diferencias en la componente vertical de las observaciones del punto C, correspondiente al receptor GNSS colocado sobre los cables en suspensión (ver Figura 1.4), para ambas técnicas de procesamiento: DD-GNSS y PPP-GNSS. Las diferencias se pueden ver en la Figura 1.5. Al igual que el trabajo realizado por Yigit y Gurlek (2017), se determinaron las frecuencias fundamentales de las torres y los cables en suspensión. De esta manera el trabajo de investigación de Tang *et al.* (2017) demuestra que el PPP-GNSS puede ser una alternativa para el DD-GNSS al momento de monitorear los desplazamientos verticales sobre las estructuras de puentes.

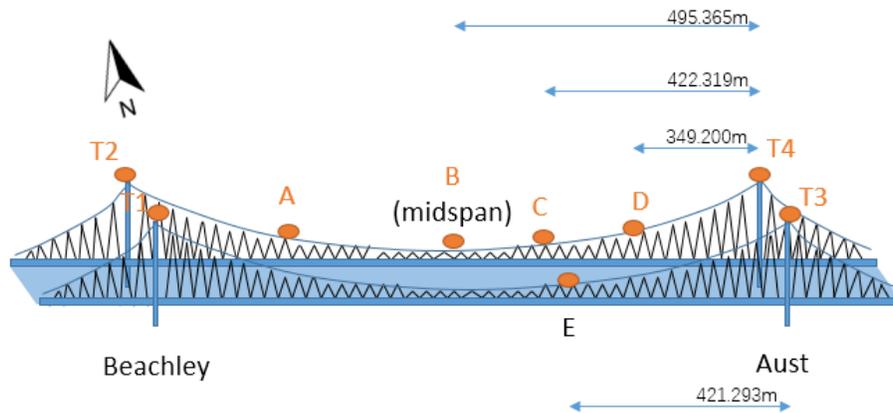


Figura 1.4: Puntos de inspección en el puente de Severn. Fuente: Tang *et al.* (2017).

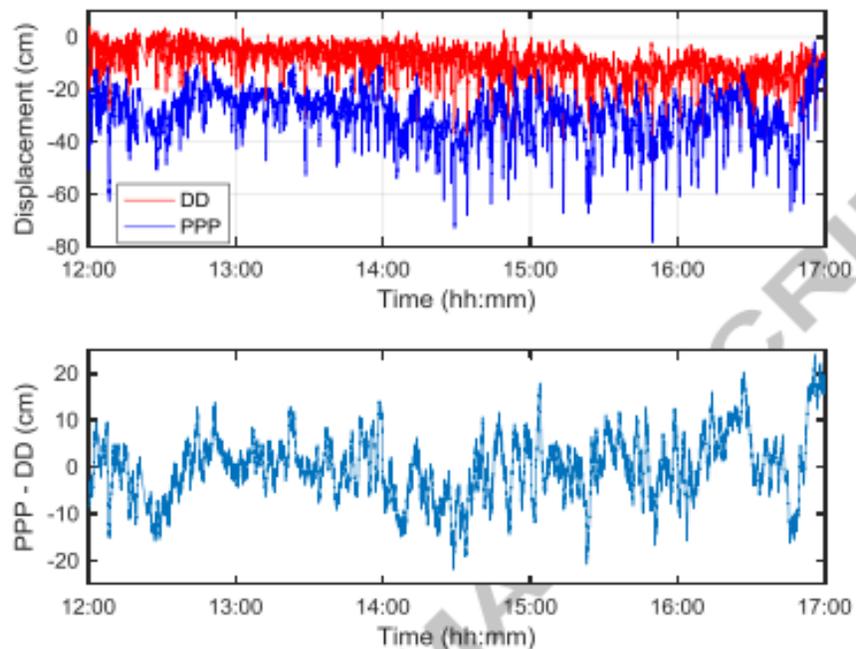


Figura 1.5: Las desviaciones de PPP y DD en dirección vertical en el punto C. Fuente: Tang *et al.* (2017).

1.7. Hipótesis

A través de observaciones satelitales por el método de posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS) y mediante un procesamiento óptimo de datos GNSS, es posible obtener precisiones subcentimétricas que permitan el monitoreo de la salud estructural en puentes.

1.8. Esquema de la Tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente manera:

- **Capítulo I** introduce a la problemática, los objetivos y la hipótesis para el trabajo de investigación descrito en este documento.
- **Capítulo II** da una descripción de los sistemas de navegación satelital actuales (GPS, GLONASS, Galileo, Compass/BeiDou, IRNSS y QZSS), de las ecuaciones de observación del método PPP y las soluciones de ambigüedad, y una introducción al monitoreo de la salud estructural con la tecnología GNSS.
- **Capítulo III** describe las fuentes de error involucradas en la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS) y como mitigarlas.
- **Capítulo IV** da una introducción a los filtros digitales, los tipos de filtros digitales y la teoría de probabilidad, al igual que, la descripción de las distribuciones de probabilidad utilizadas en este documento de investigación.
- **Capítulo V** describe los materiales y métodos utilizados para este trabajo de investigación.
- **Capítulo VI** muestra los resultados obtenidos en la investigación y sus respectivos análisis.
- **Capítulo VII** resume las conclusiones obtenidas de esta investigación y las recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Introducción

Desde tiempos remotos, el ser humano ha observado el cielo buscando respuestas a los fenómenos naturales. En la búsqueda de estas respuestas se han venido desarrollando avances en la ciencia. Donde en la actualidad se cuenta con sistemas complejos desarrollados a base de años de investigación, como es el caso del GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Donde gracias al crecimiento en el desarrollo de la electrónica y computación se ha logrado construir una tecnología que tiene diferentes funciones y aplicaciones; siendo la más importante la de ubicar un punto sobre la superficie terrestre a cualquier hora del día. El GPS es un sistema de radio-posicionamiento desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica, el cual ha tenido diferentes cambios en su funcionamiento para la mejora del posicionamiento, donde es posible alcanzar precisiones al milímetro con una metodología determinada. El GPS forma parte de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) conjuntamente con otras constelaciones de satélites, como son: GLONASS (Rusia), GALILEO (Unión Europea), COMPAS/BEIDU (China), IRNSS (Sistema Regional de Navegación por Satélite para la India) y el QZSS (Sistema Satelital Quasi-Zenith para Japón), las cuales tienen como objetivo dar posicionamiento sobre la superficie terrestre a partir de la emisión de señales electromagnéticas.

Los receptores satelitales son instrumentos que tienen la capacidad de adquirir el registro de las señales emitidas por los satélites, las cuales contienen información que permite el posicionamiento. Sin embargo, debido a que la señal emitida del satélite hacia el receptor viaja a más de 20,000 km, esta es afectada por fuentes de error, donde se mencionan las más conocidas: errores atmosféricos, errores de los relojes del receptor y del satélite, *multipath*, etc. Por lo tanto, al momento de realizar mediciones con receptores satelitales geodésicos es necesario aplicar una serie de correcciones para la mejora de la señal como es el caso de filtros o modelos proporcionados por diferentes instituciones a nivel internacional. En este capítulo se abordarán los conceptos teóricos del GPS, así como las características generales de las constelaciones citadas anteriormente.

2.2. Los Sistemas GNSS

Los *Sistemas Globales de Navegación Satelital* (GNSS) son el conjunto de constelaciones de satélites que orbitan la Tierra y tienen como función dar posicionamiento tridimensional sobre la superficie terrestre, como se mencionó en la sección anterior (Sección 2.1)(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007).

Los GNSS consisten básicamente en tres segmentos principales: el segmento espacial, que comprende los satélites; el segmento de control, que es responsable del funcionamiento correcto del sistema; y el segmento usuario, que incluyen los receptores GNSS que proporcionan posicionamiento, velocidad y tiempo preciso a los usuarios.

2.2.1. Segmento Espacial

Las funciones principales del segmento espacial son generar y transmitir señales de fase de código y portadora, y almacenar y transmitir el mensaje de navegación cargado por el segmento de control. Estas transmisiones son controladas por relojes atómicos altamente estables a bordo de los satélites. Los segmentos espaciales GNSS están formados por constelaciones con suficientes satélites para garantizar que los usuarios tengan a la vista cuatro satélites al menos simultáneamente desde cualquier punto de la superficie de la Tierra en cualquier momento.

Los satélites *GPS* están dispuestos en seis planos orbitales igualmente espaciados que rodean la Tierra, cada uno con cuatro satélites de referencia. Esta disposición de 24 satélites garantiza que haya al menos cuatro satélites a la vista desde prácticamente cualquier punto del planeta. Los satélites se colocan en una órbita de la Tierra Media (MEO), a una altitud de 20 200 km y una inclinación de 55° con respecto al Ecuador. Las órbitas son casi circulares, con una excentricidad inferior a 0.02, un eje semimayor de 26560 km y un período nominal de 11 horas, 58 minutos y 2 segundos, repitiendo la geometría cada día sideral (Sanz Subirana *et al.*, 2013). En la Figura 2.1 se muestran diferentes modelos de satélites perteneciente a varias constelaciones GNSS.

La constelación de *Beidou* (FASE III) constará de 35 satélites, incluidos 5 satélites de órbita geoestacionaria (GEO) y 30 satélites no GEO en una órbita casi circular. Los satélites que no son GEO incluyen 3 órbitas satelitales geosíncronas inclinadas (IGSO, por sus siglas en inglés), con una inclinación de aproximadamente 55° , y 27 satélites MEO que orbitan a una altitud de 21528 km en tres planos orbitales con una inclinación de aproximadamente 55° y con un período orbital de aproximadamente 12 horas y 53 minutos, repitiendo la pista de tierra cada siete días siderales. Los satélites GEO, que orbitan a una altitud de aproximadamente 35786 km, están posicionados a $58,75^\circ$ E, 80° E, $110,5^\circ$ E, 140° E y 160° E, respectivamente, y se espera que brinden un servicio de navegación global para 2020.

Los satélites de *GLONASS* se encuentran en órbita circular media a 19,100 kilómetros de altura con una inclinación de $64,8^\circ$ y un período de 11 horas y 15 minutos. Estas órbitas hacen que GLONASS sea especialmente adecuado para el uso en altas latitudes (norte o sur), donde las señales de los satélites GPS se reciben con mayor dificultad dada la menor inclinación de sus órbitas. La constelación GLONASS está distribuida en tres planos orbitales, con 8 satélites uniformemente espaciados en cada plano.

Cuando la constelación *Galileo* sea completada constará de 30 satélites (27 operacionales y 3 de repuesto). Los satélites estarán situados en órbitas inclinadas alrededor de 3 planos orbitales con una inclinación de 56° respecto al Ecuador y orbitarán a una altitud de 23,222 kilómetros, con un período orbital de 14 horas 4 minutos. El sistema funcionará en las bandas L_1 , E_5 , E_6 .

La constelación Quasi-Zenith (QZSS) es un sistema de corrección de señales de navegación global por satélite, que fue propuesto para uso complementario del GPS en Japón. Consistirá en tres satélites que se colocarán en una órbita muy elíptica. Tendrán una elevación mayor a los 70 grados durante la mayor parte del día, y de 60 durante todo el día.

El *IRNSS* consta de una constelación de siete satélites en órbitas geosincrónicas y geoestacionarias para proporcionar servicios de navegación a una extensa región comprendida por la mayor parte de Asia, Medio Oriente, África oriental y partes de Australia occidental. Tres satélites se encuentran en posiciones orbitales geoestacionarias y los cuatro restantes se encuentran en órbitas geosincrónicas con una inclinación aproximada de 29° respecto al plano del Ecuador.

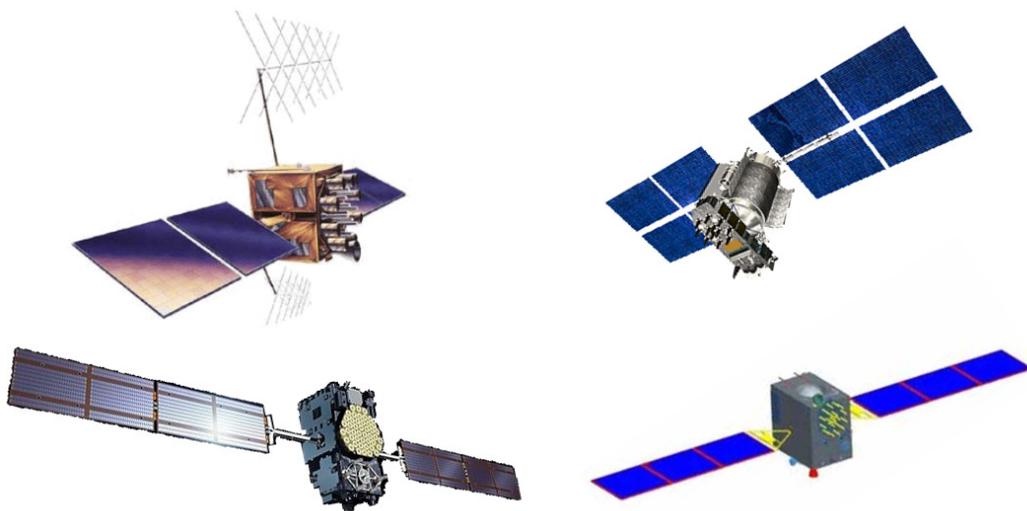


Figura 2.1: Satélites GNSS: GPS IIR-M (arriba a la izquierda), Glonass-M (arriba a la derecha), Galileo IOV (abajo a la izquierda) y Beidou-M (abajo a la derecha). Fuente: Sanz Subirana *et al.* (2013).

2.2.2. Segmento de control

El segmento de control es responsable del funcionamiento correcto del GNSS. Sus funciones básicas son: controlar y mantener el estado y la configuración de la constelación de satélites, predecir las efemérides y la evolución del reloj del satélite, para mantener la escala de tiempo GNSS correspondiente (a través de relojes atómicos) y para actualizar los mensajes de navegación para todos los satélites.

2.2.2.1. Segmento de control GPS

El segmento de control GPS se compone de una red de estaciones de monitoreo (MS), una estación de control principal (MCS) y las antenas de tierra (GA).

La estación master de control, ubicada en Colorado Springs, EE. UU. Es el núcleo del segmento de control. Es responsable de operar el sistema y proporcionar servicios de comando, control y mantenimiento al segmento espacial. Una nueva estación de respaldo, completamente funcional, conocida como la Estación de control maestra alternativa (AMCS), se estableció como parte de un plan de modernización en la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg. Las estaciones de monitoreo están distribuidas alrededor del mundo, ver Figura 2.2. Están equipadas con estándares de reloj atómico y receptores GPS para recopilar datos GPS de forma continua para todos los satélites en vista desde sus ubicaciones. Los datos recopilados se envían a la Estación de control maestra, donde se procesan para estimar las órbitas de los satélites (efemérides) y los errores de reloj, entre otros parámetros, y para generar el mensaje de navegación.

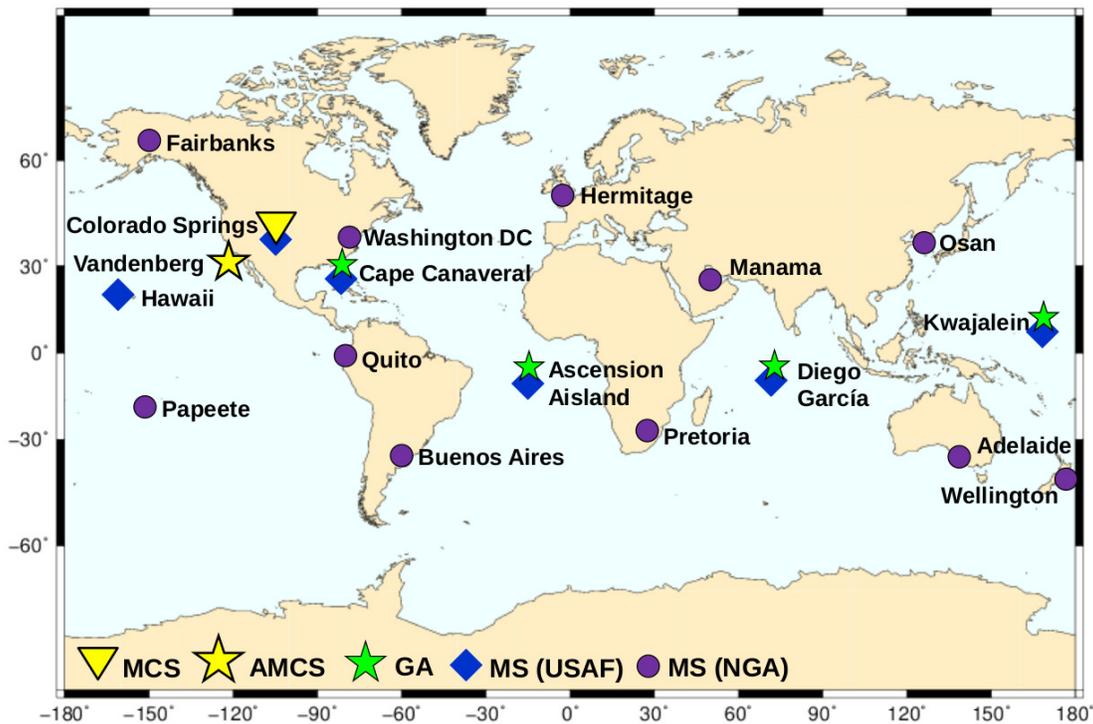


Figura 2.2: Segmento de control GPS . Fuente: Sanz Subirana *et al.* (2013).

2.2.2.2. Segmento de control GLONASS

El segmento de control GLONASS (GLONASS, 1998) comprende el Centro de Control de Sistemas (SCC), ubicado en Krasnoznamenensk (región de Moscú), la Red de Estaciones de Mando y Seguimiento, totalmente ubicadas dentro del territorio de la antigua Unión Soviética, y el Sincronizador Central (CC-M) el reloj del sistema en Schelkovo (región de Moscú).

El SCC coordina todas las funciones y operaciones a nivel del sistema. Procesa la información de las estaciones de comando y seguimiento para determinar el reloj del satélite y los estados de la órbita, y actualiza el mensaje de navegación para cada satélite. Las estaciones de comando y seguimiento comprenden una red principal de cinco estaciones de telemetría, seguimiento y control (TT &C) distribuidas en todo el territorio ruso (en San Petersburgo, Schelkovo, Yenisseisk, Komsomolsk y Ussuriysk), algunas de ellas equipadas con alcance láser (estación láser) y otras instalaciones de monitoreo (MS). Ver Figura 2.3. Esta red se complementa en el plan de modernización con MS adicionales en el territorio de la antigua Unión Soviética (Zelenchuck, Nurek, Ulan-Ude y Yakutsu).

El sincronizador Central es responsable de la escala de tiempo de GLONASS. Está conectado con el sistema de control fase que controla las señales de tiempo y fase del reloj del satélite.

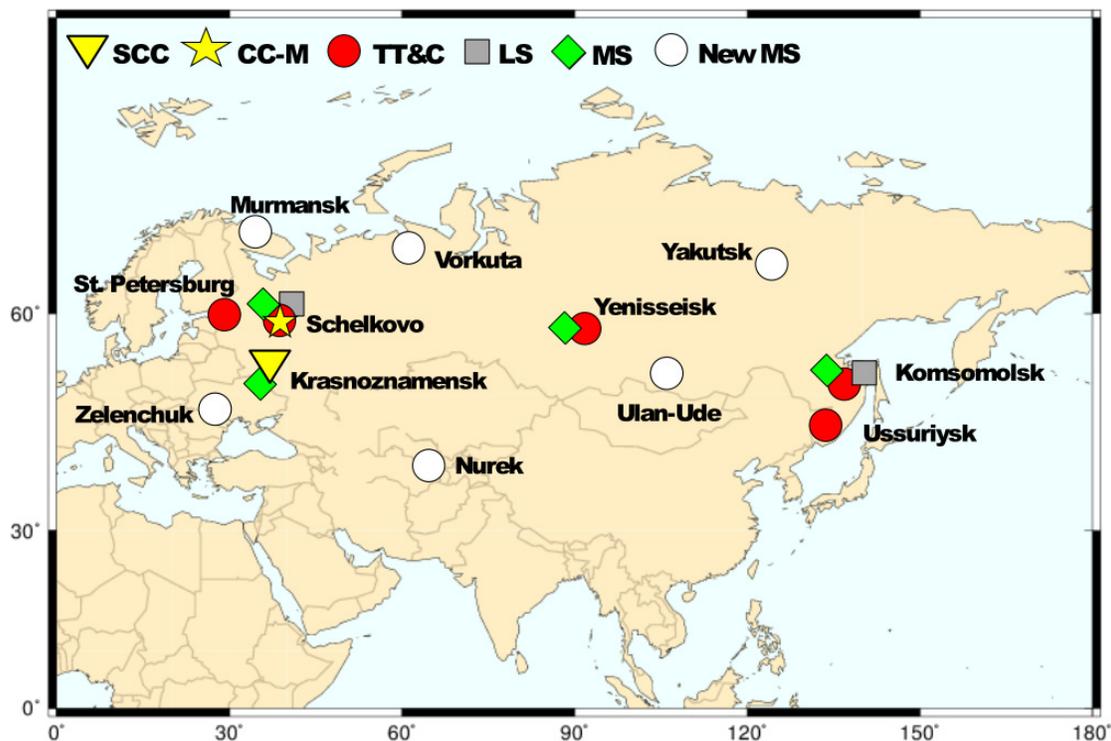


Figura 2.3: Infraestructura terrestre de GLONASS: Centro de control del sistema (SCC), Sincronizador central (CC-M), Estaciones de telemetría, seguimiento y control (TT&C), Estación láser (LS), Estaciones de monitoreo (MS). Fuente: Sanz Subirana *et al.* (2013).

2.2.2.3. Segmento de control Galileo

El segmento terrestre Galileo controla toda la constelación de satélites, las instalaciones del sistema de navegación y los servicios de difusión. El FOC (*full operational capability*) incluye dos estaciones de una red de comunicación híbrida interconecta las estaciones remotas (estaciones ULS, GSS y TT&C) con el GCC por diferentes medios de radio estándar y especial, datos por cable y enlaces de comunicación de voz, asegurando la comunicación entre todos los sitios.

Los dos GCC constituyen el núcleo del segmento de tierra. Hay dos elementos redundantes ubicados en Fucino (Italia) y Oberpfaffenhofen (Alemania). Algunas de sus funciones principales son: Determinación de la órbita y sincronización, Control de todos los satélites Galileo y carga de mensajes de datos de navegación, Supervisión y control, supervisión del rendimiento, predicción del rendimiento y funciones de gestión de mantenimiento de los elementos del segmento terrestre, Monitoreo y control de todos los elementos del segmento de tierra en tiempo real, Generación de mensajes de navegación, Cálculo del Tiempo del Sistema Galileo (GST, por sus siglas en inglés) y provisión de una referencia de tiempo coordinada confiable y estable para el sistema Galileo.

2.2.2.4. Segmento de control Beidou

Hasta el momento, el segmento de control del Beidou consiste de los siguientes elementos: una estación maestra de control que se encargará del control de la constelación de satélites y procesar las mediciones que reciben las estaciones de monitoreo para generar el mensaje de navegación, 2 estaciones de inyección de datos, que se encargan de transmitir las correcciones orbitales y el mensaje de navegación a los satélites Beidou y 30 estaciones de monitoreo, las cuales recogen datos de todos los satélites del sistema cuando pasan por sus localidades.

2.2.2.5. Segmento de control Quasi-Zenith

Cuenta con una estación maestra de control, estaciones de seguimiento, estaciones de medición de láser y monitoreo. El conjunto de estaciones de monitoreo se localizan en Asia oriental y la región de Oceanía, en Japón y Bangalore en India, Guam, Canberra en Australia, Bangkok Tailandia y Hawái en Estados Unidos.

2.2.2.6. Segmento de control IRNSS

El segmento de control de la constelación del IRNSS está compuesto por un centro de control maestro para el control de los satélites, estaciones de rastreo y determinación de la integridad de los datos.

2.2.3. Segmento usuario

El segmento usuario está compuesto por receptores GNSS. Su función principal es recibir señales GNSS, determinar pseudodistancias (y otros observables) y resolver las ecuaciones de navegación para obtener las coordenadas y proporcionar un tiempo muy preciso. Los elementos básicos de un receptor GNSS genérico son: una antena con preamplificación, una sección de radiofrecuencia, un microprocesador, un oscilador de precisión intermedia, una fuente de alimentación, algo de memoria para el almacenamiento de datos y una interfaz con el usuario. La posición calculada se refiere al centro de fase de la antena (Sanz Subirana *et al.*, 2013).

2.3. Señales GNSS

Los satélites GNSS transmiten continuamente señales de navegación a dos o más frecuencias en su mayoría en la banda L . Estas señales contienen código de rango y datos de navegación para permitir a los usuarios calcular tanto el tiempo de viaje desde el satélite al receptor como las coordenadas del satélite en cualquier época. Los principales componentes de la señal se describen a continuación¹:

- *Portadora*: Señal sinusoidal de radiofrecuencia a una frecuencia determinada;
- *Código de rango*: Secuencias de ceros y unos que permiten al receptor determinar el tiempo de viaje de la señal de radio desde el satélite al receptor. Se llaman secuencias PRN o códigos PRN.

2.3.1. Señal GPS

Las señales del GPS se transmiten en dos frecuencias de radio en la banda L , a las que se hace referencia como bandas L_1 y L_2 . Están polarizadas circularmente a la derecha y sus frecuencias se derivan de una frecuencia fundamental $f_0 = 10.23$ MHz, generada por los relojes atómicos a bordo.

$$\begin{array}{l} L_1 = 154 \times 10.23 \text{ MHz} = 1575.420 \text{ MHz} \\ L_2 = 120 \times 10.23 \text{ MHz} = 1227.600 \text{ MHz} \end{array}$$

Hay dos servicios disponibles en el sistema GPS actual:

- **SPS**: El servicio de posicionamiento estándar es un servicio abierto, gratuito para usuarios de todo el mundo. Es un servicio de una sola frecuencia en la banda de frecuencia L_1 .
- **PPS**: El servicio de posicionamiento preciso está restringido por técnicas criptográficas a usuarios militares y autorizados. Se proporcionan dos señales de navegación en dos bandas de frecuencia diferentes, L_1 y L_2 .

El GPS utiliza la técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*) para enviar diferentes señales en la misma frecuencia de radio, y el método de modulación utilizado es *Binary Phase Shift Keying* (BPSK). Los siguientes tipos de códigos y mensajes PRN se modulan a través de las dos portadoras (ver Figura 2.4) (En la Tabla 2.1 se resume las características de la señal GPS):

- *Código de adquisición (C/A)*, también conocido como *código civil C(t)*: esta secuencia contiene 1023 bits y se repite cada milisegundo. Luego, la duración de cada chip de código C/A es $1 \mu\text{s}$, lo que significa un ancho de chip o longitud de onda de 29.1 m. Este código está modulado solo en L_1 . El código C/A define el SPS.

¹Solo se describirán las señales correspondientes al GPS y GLONASS, debido a que solo se utilizaron estas dos constelaciones para el procesamiento de los datos GNSS de esta investigación.

- *Código de precisión, $P(t)$* : está reservado para uso militar y usuarios civiles autorizados. La secuencia se repite cada 266 días (38 semanas) y se asigna una porción semanal de este código a cada satélite, llamada secuencia PRN. Su velocidad de asillados es de 10 Mbps, lo que lleva a una longitud de onda de 29.31 m. Se modula sobre ambas portadoras L_1 y L_2 . Este código define el PPS.
- *Mensaje de navegación, $D(t)$* : se modula en ambas portadoras a 50 bps, informando sobre efemérides y desviaciones del reloj del satélite, coeficientes del modelo ionosférico y estado de la constelación, entre otra información.

Tabla 2.1: Características de la señal GPS. Fuente: Seeber (1993).

Frecuencia del reloj atómico	$f_0 = 10.23$ MHz
Frecuencia de L_1	$154 \times f_0 = 1575.420$ MHz
Longitud de onda L_1	19.03 cm
Frecuencia L_2	$120 \times f_0 = 1227.600$ MHz
Longitud de onda L_2	24.42 cm
Frecuencia del código P	$f_0 = 10.23$ MHz (Mbps)
Longitud de onda del código P	29.31 m
Período del código P	266 días, 7 días/satélite
Frecuencia del código C/A	$f_0/10 = 1.023$ MHz
Longitud de onda del código C/A	293.1 m
Período del código C/A	1 ms
Frecuencia del mensaje de navegación	50 bps
Longitud total del mensaje	12.5 min

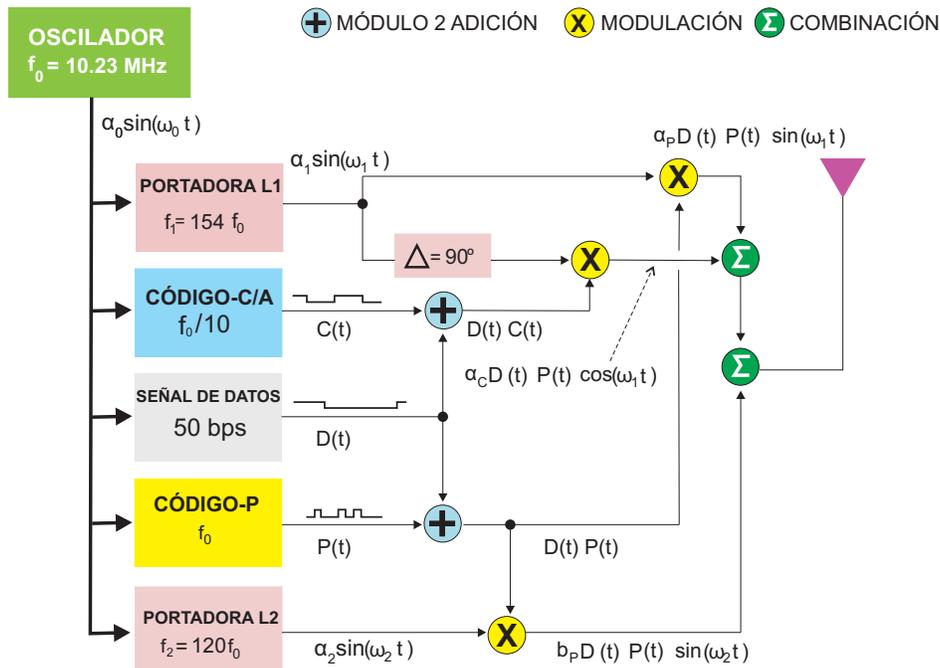


Figura 2.4: Estructura de la señal GPS. Fuente: Traducido al Español de (Seeber, 1993).

2.3.2. Señal GLONASS

Las señales de GLONASS están polarizadas circularmente hacia la derecha y centradas en dos frecuencias de radio en la banda L , aquí referidas como las bandas G_1 y G_2 . Actualmente hay dos servicios disponibles de GLONASS:

- **SPS:** El servicio de Posicionamiento Estándar (o servicio de señal de precisión estándar) es un servicio abierto, gratuito para los usuarios de todo el mundo. La señal de navegación se proporcionó inicialmente solo en la banda de frecuencia G_1 , pero desde 2004 los nuevos satélites GLONASS-M también transmiten una segunda señal civil en G_2 .
- **PPS:** El servicio de posicionamiento preciso (o servicio de señal de alta precisión) está restringido a usuarios militares y autorizados. Se proporcionan dos señales de navegación en las dos bandas de frecuencia G_1 y G_2 .

A diferencia de los satélites GPS que comparten las mismas frecuencias, cada satélite GLONASS emite a una frecuencia particular dentro de la banda. Esta frecuencia determina el número de canal de frecuencia del satélite y permite que los receptores de los usuarios identifiquen los satélites.

La frecuencia real de la transmisión de señal de GLONASS en G_1 y G_2 se puede derivar del número de canal k aplicando las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} G_1 &= 1602 + k \times 9/16 = (2848+k) \times 9/16 \text{ MHz} \\ G_2 &= 1246 + k \times 7/16 = (2848+k) \times 7/16 \text{ MHz} \end{aligned}$$

Dos códigos de rango, el C/A de adquisición aproximada (código civil abierto) y el código P (militar) preciso, se modulan en estas frecuencias junto con un mensaje de navegación. Los códigos C/A y P tienen períodos de 1 ms y 1 s, y anchos de banda de 586.7 y 58.67 m, respectivamente, y son aproximadamente dos veces más ruidosos que los de GPS. En la Tabla 2.2 se describen las características de la estructura de la señal GLONASS.

Tabla 2.2: Características de la señal GLONASS. Fuente: Sanz Subirana *et al.* (2013).

Frecuencia del reloj atómico	$f_0=0.511$ MHz
Frecuencia de G_1	$9/16(2848+k)=1602+0.5625k$ MHz
Longitud de onda G_1	18.7 cm ($k=0$)
Frecuencia G_2	$7/16(2848+k)=1246+0.4374k$ MHz
Longitud de onda G_2	24.1 cm ($k=0$)
Frecuencia del código P	$10f_0-5.11$ Mcps
Longitud de onda del código P	58.67 m
Período del código P	1 s
Frecuencia del código C/A	$f_0=0.511$ Mcps
Longitud de onda del código C/A	586.7 m
Período del código C/A	1 ms
Frecuencia del mensaje de navegación	50 bps
Longitud total del mensaje	2.5 min (sobre CA), 12 min (sobre P)

Al igual que en el GPS, el código C/A se moduló inicialmente solo en G_1 , mientras que el código militar P se modula en ambas frecuencias de portadora, G_1 y G_2 ; sin embargo, los nuevos satélites GLONASS-M (desde 2004) también transmiten la señal C/A en la banda de frecuencia G_2 . Por otro lado, y a diferencia del GPS, en GLONASS las secuencias PRN de tales códigos son comunes en todos los satélites, porque el receptor identifica al satélite por su frecuencia.

2.4. Ecuaciones de Observación GPS

En esta investigación, solo se tratarán las ecuaciones derivadas de las observaciones de pseudodistancia y de fase para el GPS.

Para el desarrollo de las ecuaciones del modelo matemático, es necesario establecer los observables que pueden ser planteados con la señal GPS. Para el caso de las observaciones de pseudodistancia, que se basan en el mensaje de código PRN en el cual está modulada la onda portadora. Para el caso de las observaciones de fase, las cuales se centran en la parte fraccional de la fase portadora y las longitudes completadas desde un tiempo que se toma como referencia t_0 y las observaciones Doppler, las cuales representan la diferencia existente entre las frecuencias nominales y las recibidas entre 2 épocas de observación (Sánchez-Alzola, 2016).

2.4.1. Ecuaciones de observación de la pseudodistancia

La *pseudodistancia* se denomina como la medida de la distancia entre el receptor y el satélite en una época de recepción y transmisión de la señal (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007). Para determinar la distancia del satélite al receptor es necesario conocer el tiempo que tarda la señal en ser recibida por el receptor y luego multiplicarlo por la velocidad de la luz². El tiempo que tarde en viajar la señal del satélite al receptor se determina con la alineación del código PRN de la señal con el código generado por el receptor (ver Figura 2.5). Por otro lado, la denominación de *pseudodistancia* es porque no es la distancia geométrica real entre el satélite y receptor, esto debido a que este cálculo de medida viene ya con errores, los cuales pueden ser: el estado del reloj del satélite y receptor, también debido a que la señal sigue una trayectoria que no es rectilínea por la interacción con el medio de propagación, y los retardos troposféricos e ionosféricos.

²La velocidad de la luz en el vacío es una constante de $c = 299792458 \frac{m}{s}$, <https://www.fisicalab.com/apartado/velocidad-luz#contenidos>

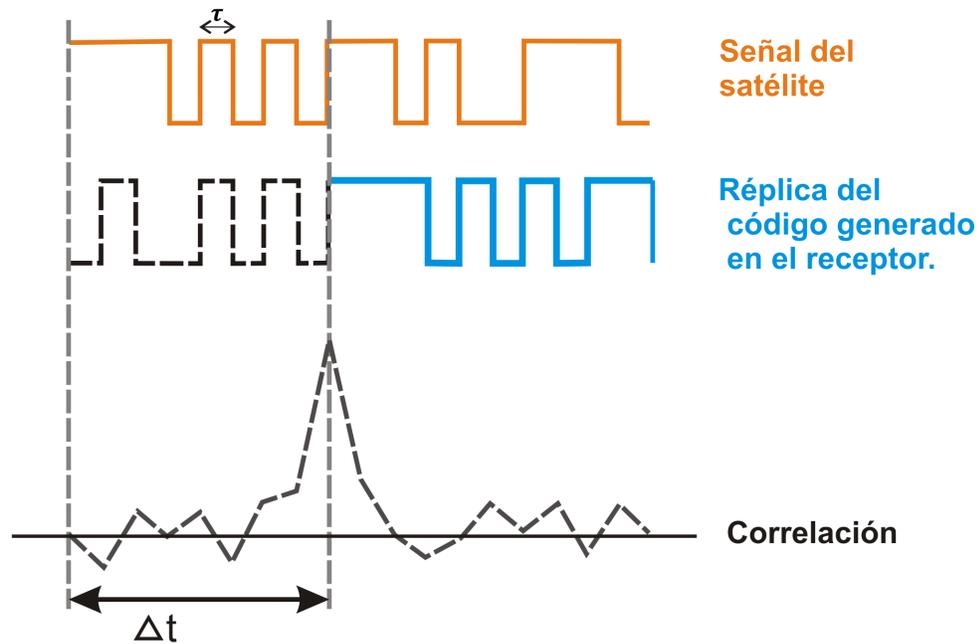


Figura 2.5: Determinación del tiempo de viaje de la señal.

Para generar el modelo matemático de la pseudodistancia se toman en cuenta dos momentos, la época de emisión de la señal desde el satélite τ_a y la época de recepción por parte del receptor τ_b . Ambas épocas deben de estar referidas al tiempo GPS, y estas épocas se miden con relojes colocados sobre el satélite y el receptor, pero lo que realmente se mide con estos relojes es la época de emisión, en la escala de tiempo del satélite $T(\tau_a)$ y la época de recepción, en la escala de tiempo del receptor $t(\tau_b)$. Sin embargo, estos relojes del satélite y receptor están afectados por degradaciones inevitables en los osciladores, por lo tanto, es necesario modelizar estos errores con unos retardos dT_τ y dt_τ , en tiempo GPS. Considerando estos retardos, la época de emisión y recepción de la señal, en escala de tiempo GPS, τ_a y τ_b resultarían:

$$\tau_a = T(\tau_a) + dT_\tau \quad \tau_b = t(\tau_b) + dt_\tau \quad (2.1)$$

Donde se despeja $T(\tau_a)$ y $t(\tau_b)$ que serían las observaciones que se tomaran en cuenta, resultando como sigue:

$$T(\tau_a) = \tau_a + dT_\tau \quad t(\tau_b) = \tau_b + dt_\tau \quad (2.2)$$

Resultando con el signo positivo, esto debido a que los errores de los relojes son variables que pueden tomar cualquier signo.

El tiempo medido entre la emisión de la señal desde el satélite hasta la recepción (Δt) sería la resta de las épocas definidas en las ecuaciones 2.2. Por lo tanto, la ecuación de observación de la pseudodistancia quedaría:

$$\Delta t = t(\tau_b) - T(\tau_a) \quad (2.3)$$

$$\Delta t = (\tau_b + dt_\tau) - (\tau_a + dT_\tau) \quad (2.4)$$

$$\Delta t = \tau_b - \tau_a + dt_\tau - dT_\tau \quad (2.5)$$

La señal sufre un retardo cuando atraviesa la atmósfera dt_{atm} , esto debido a la presencia de cuerpos reflectantes en las proximidades de la estación receptora dt_{reflex} y los que se producen en el recorrido de la señal desde el centro de la antena hasta el dispositivo electrónico dt_{recep} . De esta manera se aplican estos retardos a la ecuación de observación 2.5, quedando:

$$\Delta t = \tau_b - \tau_a + dt_\tau - dT_\tau + dt_{atm} + dt_{reflex} + dt_{recep} \quad (2.6)$$

Considerando que se desea obtener la distancia entre el receptor y el satélite, es necesario multiplicar la ecuación 2.6 por la velocidad de la luz en el vacío y tomando en cuenta que dt_{reflex} y dt_{recep} como errores aleatorios dt_{aleat} , dejando la ecuación 2.6 de la manera siguiente:

$$c\Delta t = c(\tau_b - \tau_a) + c(dt_\tau - dT_\tau) + cdt_{atm} + cdt_{aleat} \quad (2.7)$$

Recordando que τ_a y τ_b es el tiempo de emisión y recepción, respectivamente. Por lo tanto, cuando se multiplica por c , se obtiene la distancia geométrica ρ existente entre el satélite y el receptor (considerando que esta distancia no es la real, debido a las fuentes de errores que influyen en la señal). Y considerando que $c\Delta t$ es igual a la pseudodistancia y los errores atmosféricos dt_{atm} se dividen en los ionosféricos dt_{ion} y troposféricos dt_{trop} , finalmente el modelo funcional para la pseudodistancia quedaría como se expresa en la ecuación siguiente:

$$P_{L_i,r}^G = \rho_r^G + c(dt_r - dT^G) + dt_{trop,r}^G + dt_{ion,L_i,r}^G + \epsilon_{P_{L_i,r}} \quad (2.8)$$

Donde

$P_{L_i,r}^G$ = Observable de la pseudodistancia en la frecuencia L_i ;

r, G = Indica el receptor y el satélite, respectivamente ;

ρ_r^G = Distancia geométrica entre el satélite y el receptor (real);

dt_r, dT^G = Correcciones a los relojes del receptor y satélite, respectivamente;

$dt_{trop,r}^G$ = Retardo troposférico;

$dt_{ion,L_i,r}^G$ = Retardo ionosférico;

c = Velocidad de la luz en el vacío;

$\epsilon_{P_{L_i,r}}$ = Ruido aleatorio.

2.4.2. Ecuación de observación de la fase portadora

Además del código, la propia fase de la portadora también se utiliza para obtener una medida de la distancia aparente entre el satélite y el receptor. Estas mediciones de fase de portadora son mucho más precisas que las mediciones de código, debido a que la frecuencia de la portadora es mayor en relación a los códigos emitidos. Por otro lado, en la medida de la fase de la portadora aparece una nueva incógnita la cual es denominada ambigüedad, representando el número de ciclos emitidos por el satélite hasta que el receptor recibe la señal, y sumando la parte fraccional de la fase quedaría el observable completo. Para determinar la distancia del satélite al receptor bastaría multiplicar la fase total de la

portadora por la longitud de onda correspondiente. Sin embargo, la ambigüedad cambia arbitrariamente cada vez que el receptor pierde la recepción de la señal, produciendo saltos o discontinuidades en el rango (Sanz Subirana *et al.*, 2013). La ecuación de observación de la fase portadora total quedaría definida de la manera siguiente:

$$\Phi_{L_i,r}^G = \rho_r^G + c (dt_r - dT^G) + \lambda_{L_i} N_{L_i}^G - dt_{ion,L_i,r}^G + dt_{trop,r}^G + \epsilon_{\Phi_{L_i,r}} \quad (2.9)$$

Donde:

$\Phi_{L_i,r}^G$ = es la observable de la fase portadora en la frecuencia L_i ;

r, G = indica el receptor y el satélite, respectivamente ;

ρ_r^G = distancia geométrica entre el receptor y el satélite (real);

dt_r, dT^G = correcciones a los relojes del receptor y satélite, respectivamente;

$dt_{trop,r}^G$ = retardo troposférico;

$dt_{ion,L_i,r}^G$ = retardo ionosférico ;

c, λ_{L_i} = velocidad de la luz en el vacío y la longitud de onda de la fase ;

$N_{L_i}^G$ = número entero de ciclos (Ambigüedad inicial);

$\epsilon_{\Phi_{L_i,r}}$ = ruido aleatorio.

2.5. Posicionamiento Puntual Preciso

El posicionamiento Puntual Preciso (PPP) es una técnica para determinar la posición de manera precisa a partir de observaciones de un único receptor GNSS. Para este caso no se aplican las diferencias de las técnicas relativas, sino que solo se consideran las correcciones al oscilador del satélite y sus efemérides orbitales como parámetros conocidos en el cálculo (Hugentobler *et al.*, 2006), utilización de las combinaciones lineales de frecuencias para corregir el retardo ionosférico, así como también información precisa sobre la orientación de la Tierra, mareas, y cargas oceánicas. Uno de los primeros trabajos de esta técnica fue desarrollado por Anderle (1976), aunque no fue hasta que Zumberge *et al.* (1997) investigó rigurosamente las ecuaciones de observación iniciales del posicionamiento GPS, que se inició de manera documentada con el uso del método PPP-GNSS.

2.5.1. Modelo Matemático

Para establecer un modelo matemático de la técnica PPP, es necesario partir de las ecuaciones de observación 2.8 y 2.9, sin embargo, a estas ecuaciones de observación es necesario agregarle variables que definan fuentes de error que se consideran mitigadas para otras técnicas de medición GNSS, como es el caso de posicionamiento diferencial (DD-GNSS). Para la técnica PPP-GNSS es necesario considerar fuentes de error como las órbitas precisas dt_{orb} (SP3), el error causado por el retraso electrónico en el receptor, que este no puede ser determinado (pero es mitigado con los parámetros de la antena al momento de realizar el postprocesamiento), sin embargo, para el retraso electrónico en los satélites es posible determinarlo, el Centro de Determinación de Órbitas en Europa (CO-

DE, por sus siglas en inglés) proporciona una serie de ficheros *DCB³ (*Differential Code Biases*) que permiten corregir el efecto diferencial entre los códigos P_1, P_2 y C_1 y de esta manera se mitiga el error de retraso electrónico de los satélites. Por lo cual, es importante incluir los términos de tendencia de código DCB y de fase correspondientes al receptor y satélite. El comportamiento de estas tendencias es diferente según sea el observable que se vaya a considerar. Para el caso del código para el satélite $b_{L_i}^G$, las DCB serían términos conocidos y proporcionados por el servicio CODE, sin embargo, para el caso de las tendencias de fase B_{L_i} , estas no son conocidas y teniendo un papel importante en el cálculo de ambigüedades. Estas últimas se denominan como sesgos fraccionales de ciclo (Fractional-Cycle Biases o FCB), y debido a que son términos que no se pueden modelar, son la base o clave para la resolución de ambigüedades en la técnica PPP. Los FCB complementarían a las ambigüedades enteras $N_{L_i,r}^G$ en el observable de fase como parte fraccional.

Tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente en 2.8 y 2.9, las ecuaciones de observación para el modelo matemático de la técnica PPP resultaría de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} P_{L_i,r}^G &= \rho_r^G + c(dt_r - dT^G) + dt_{orb}^G + dt_{trop,r}^G + dt_{ion,L_i,r}^G + (b_{L_i,r} - b_{L_i}^G) + \epsilon_{P_{L_i,r}} \\ \Phi_{L_i,r}^G &= \rho_r^G + c(dt_r - dT^G) + dt_{orb}^G + \lambda_{L_i} B_{L_i,r}^G - dt_{ion,L_i,r}^G + dt_{trop,r}^G + \epsilon_{\Phi_{L_i,r}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

siendo

$$B_{L_i,r}^G = N_{L_i,r}^G + B_{L_i,r} - B_{L_i}^G \quad (2.11)$$

A partir de las ecuaciones de observación 2.10 para la técnica PPP-GNSS es posible realizar una serie de combinaciones lineales de las observaciones de código y fase para mejorar la señal y resolver problemas comunes en la observación como los saltos de ciclo, retraso ionosférico y la geometría de los satélites (Sánchez-Alzola, 2016).

2.5.1.1. Combinación Libre de Ionosfera

Considerando las ecuaciones de observación del método PPP, es posible realizar una combinación lineal de la observación del código y fase que permita eliminar el retardo ionosférico de primer orden, que depende de la inversa del cuadrado de la frecuencia. La combinación lineal se describe a continuación⁴:

$$p_{PC} = \frac{f_1^2 p_1 - f_2^2 p_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad \Phi_{LC} = \frac{f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.12)$$

Esta combinación lineal es el método más eficiente y preciso para mitigar el efecto producido por la ionosfera sobre la señal GNSS y es aplicable cuando se realiza la técnica PPP (Zumberge *et al.*, 1997).

³Estos ficheros pueden ser descargados en la dirección <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>. Estos ficheros se denominan $DCB_{P_1-P_2}$ y $DCB_{P_1-C_1}$

⁴Para una mejor interpretación de la combinación lineal para eliminar el efecto ionosférico ver la Sección 3.2.2

2.5.1.2. Combinación libre de geometría

Cuando se realiza la combinación libre de geometría se cancela la parte geométrica de la medida sin afectar a los dependientes de la frecuencia, como son el retardo ionosférico, los retardos instrumentales, el *multipath*, el ruido y el efecto wind-up (Blewitt, 1989). La ecuación se presenta a continuación para ambas observables:

$$pP_I = p_1 - p_2 \quad \Phi_{LI} = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2.13)$$

El TEC (contenido total de electrones) de los modelos ionosféricos se suele calcular a partir de esta combinación, al igual que se puede aplicar para detectar los saltos de ciclo en la fase de la portadora (Sánchez-Alzola, 2016).

2.5.1.3. Combinación Wide-Lane (WL) o banda ancha

Esta combinación crea una señal alternativa con una longitud de onda más ancha que la señal original. Es posible detectar saltos de ciclo y fijar las ambigüedades. La siguiente ecuación representa la combinación *Wide-Lane* para código y fase:

$$pP_{LW} = \frac{f_1 p_1 - f_2 p_2}{f_1 - f_2} \quad \Phi_{LW} = \frac{f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2}{f_1 - f_2} \quad (2.14)$$

2.5.1.4. Combinación Narrow-Lane (NL) o banda estrecha

A diferencia de la combinación WL, donde se crea una señal más ancha, para el caso de la combinación NL, se crea una señal nueva con una longitud de onda más estrecha que la señal original, donde esta señal estrecha permite un menor ruido que considerando cada componente por separado, en la ecuación siguiente se describe la combinación NL:

$$pP_{NL} = \frac{f_1 p_1 + f_2 p_2}{f_1 + f_2} \quad \Phi_{LN} = \frac{f_1 \Phi_1 + f_2 \Phi_2}{f_1 + f_2} \quad (2.15)$$

La ventaja de esta combinación sobre las otras, es que reduce el ruido presente en el observable de código en la combinación *Melbourne-Wubben*, que se utiliza para estimar la ambigüedad de tipo WL.

2.5.1.5. Combinación Melbourne-Wübbena (MW)

En Melbourne (1985) y Wubben (1985) se describe esta combinación para la frecuencia L_3 , donde utiliza los observables de código y fase y las combinaciones WL y NL en conjunto para eliminar el efecto ionosférico, la geometría, osciladores y troposfera, donde las siguientes ecuaciones describen la combinación:

$$\Phi_{L3} = \Phi_{LW} - pP_{NL} \quad (2.16)$$

$$\Phi_{L3} = \frac{f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 p_1 + f_2 p_2}{f_1 + f_2} \quad (2.17)$$

Al considerar las combinaciones WL y NL en la combinación MW es posible tener dobles beneficios, donde uno es que la combinación WL cuenta con una longitud de onda de mayor magnitud que la señal individual (u original), creando un aumento en el espacio de las ambigüedades y con la combinación NL el ruido medio es reducido en las observaciones de código (Blewitt, 1990). Para el método de procesamiento puntual preciso (PPP-GNSS) es indispensable utilizar esta combinación al igual que la de la ionosfera libre para mejorar el tratamiento de la señal y para la estimación de las FCB (*Fractional Cycle Biases*) y ambigüedades enteras en la solución del posicionamiento.

2.5.2. Solución de Ambigüedades

La resolución de ambigüedad entera en el posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS) puede disminuir el tiempo de inicialización y reinicialización, y las soluciones de PPP-GNSS. Con ambigüedad fija también son más confiables y precisas que las soluciones de PPP-GNSS con ambigüedad ambigua. Sin embargo, las interrupciones de la señal son inevitables en aplicaciones prácticas. Dichas interrupciones de señal pueden causar la discontinuidad del arco de fase de la portadora, lo que introduce nuevas ambigüedades enteras. Por lo cual, tomará aproximadamente 15 minutos de seguimiento continuo a un número razonable de satélites para corregir nuevas ambigüedades enteras .

En Li *et al.* (2014) se describe un método para corregir rápidamente la ambigüedad en PPP-GNSS, donde se evita un tiempo de reinicialización largo. En primer lugar, Li *et al.* (2014) estimaron los retrasos atmosféricos época por época a partir de soluciones de PPP-GNSS fijadas por ambigüedad antes de que se produjera la brecha de datos o los saltos de ciclo, luego aplicaron un procedimiento de paseo aleatorio (*random walk*) para predecir con precisión los retrasos atmosféricos durante un corto período de tiempo. Los retrasos atmosféricos previstos se pueden utilizar para corregir las observaciones que sufren interrupciones de la señal. Finalmente, las nuevas ambigüedades pueden ser fijadas con una estrategia distinta de resolución de ambigüedad en cascada *WL-LX-L3* (aquí LX denota cualquiera de L_1, L_2).

2.5.2.1. Retraso ionosférico y su predicción

Reducir o eliminar los retrasos atmosféricos es importante para la resolución de ambigüedades. Estos retrasos deben ser lo más mínimos posible para resolver las ambigüedades de manera confiable. Al ignorar la órbita de satélite y los errores de reloj, la ecuación de observación de fase simplificada se puede escribir de la siguiente manera:

$$\Phi_{L_i,r}^G = \rho_r^G - dt_{ion,L_i r}^G + dt_{trop,r}^G + B_{L_i,r} + B_{L_i}^G + \lambda N_r^G + \epsilon_r^G \quad (2.18)$$

donde el superíndice G se refiere a un satélite dado, y el subíndice r se refiere a un receptor dado (al igual que en las ecuaciones 2.10). Para esta ecuación, $\Phi_{L_i,r}^G$ podrían ser observaciones de fase originales o una combinación de observaciones de fase, como L_1, L_2 o combinación WL. $B_{L_i,r}$ son las compensaciones fraccionarias no calibradas (UFO_S , por sus siglas en inglés) relacionadas con el receptor, $B_{L_i}^G$ son las UFO_S relacionadas con el satélites, N es la ambigüedad entera ZD (Zero-difference), $\epsilon_{L_i,r}^G$ es el ruido de observaciones.

Debido a la existencia de las UFO_S que se originan en el receptor y en el satélite, durante mucho tiempo solo se pueden arreglar las ambigüedades de doble diferenciación entre los satélites y los receptores. En los recientes últimos años, se demostró que los UFO_S de los satélites podrían estimarse a partir de una red de referencia y aplicarse a otras estaciones para solucionar la ambigüedad entera en el modo PPP-GNSS (Ge *et al.*, 2008). Por lo tanto, PPP-GNSS con arreglo de ambigüedad entera requiere no solo la órbita satelital precisa y las correcciones de reloj satelital, sino también el producto UFO_S . Dado que el retraso troposférico se puede estimar con precisión mediante la introducción del parámetro de retardo del trayecto cenital (ZPD, por sus siglas en inglés) en PPP-GNSS, el retraso ionosférico es el sesgo restante que se debe considerar cuidadosamente (Jin *et al.*, 2010). En las siguientes secciones, se desarrollará una manera de estimar el retraso ionosférico preciso de las épocas en las que se han corregido las ambigüedades y luego predecirlo de manera correcta para llenar el vacío de datos.

2.5.2.2. Estimación del retraso ionosférico época por época

Siempre que (al final de la etapa de inicialización) las ambigüedades de los enteros ZD (Zero-difference) se hayan corregido con éxito, las coordenadas y la ZPD (retardo del trayecto cenital) con cm (incluso mm) de precisión se pueden obtener con las observaciones de los GNSS recopiladas durante la etapa de inicialización en el PPP-GNSS. Esto significa que todos los parámetros se conocen con precisión en la ecuación 2.18, excepto $dt_{ion,L_i,r}^G$. Por lo tanto, es sencillo calcular el retardo ionosférico de diferencia cero (ZD, por sus siglas en inglés) con precisión a partir de la siguiente ecuación:

$$dt_{ion,L_i,r}^G = \rho_r^G - \Phi_{L_i,r}^G + dt_{trop,r}^G + B_{L_i,r} + B_{L_i}^G + \lambda N_r^G + \epsilon_r^G \quad (2.19)$$

La precisión del retraso ionosférico ZD (Zero-difference) estimado depende de la calidad de los UFO_S estimados. En términos generales, la calidad de los UFO_S estimados a partir de una red de referencia debería ser alta, ya que las observaciones de las estaciones de referencia tienen una redundancia considerable y una alta calidad. Los UFO_S de NL (Narrow-Lane) se estiman principalmente mediante el uso de fases portadoras, su precisión puede ser de hasta una décima parte de la longitud de onda de NL (Narrow-Lane). Los UFO_S de WL (Wide-Lane) se derivan tanto de pseudo-rangos como de fases portadoras utilizando la combinación *Melbourne-Wübbena* (Wübbena, 1985), su precisión podría ser aproximadamente una décima parte de la longitud de onda de WL (Wide-Lane). Esto es suficiente para la resolución de la ambigüedad de WL (Wide-Lane), pero el error de los UFO_S de WL (Wide-Lane) causará un sesgo en la estimación del retraso ionosférico. Afortunadamente, no tendrá ningún efecto en la subsiguiente predicción y posicionamiento de la ionosfera.

Suponiendo que los UFO_S del receptor y el satélite están sesgados con $Bias_r$, $Bias^G$, respectivamente, BB_r^G denota la suma de las UFO_S de los satélites y receptores estimados, B_r^G denota el valor de verdad. Se tiene:

$$\widehat{B}_r^G = B_r^G + Bias_r + Bias^G \quad (2.20)$$

Siendo $dt_{ion,r}^G$ el verdadero valor del retraso ionosférico, $dt dt_{ion,r}^G$ denota el retraso ionosférico estimado sesgado por error de UFO_S . Tenemos,

$$\widehat{dt_{ion,r}^G} = dt dt_{ion,r}^G + Bias_r + Bias^G \quad (2.21)$$

Como los UFO_S son muy estables durante un período de tiempo corto (varios minutos), $Bias_r$ y $Bias^G$ se pueden considerar como una constante de tiempo durante un corto período de tiempo para permitir el modelado ionosférico temporal. Como producto final del usuario, la observación de la ecuación 2.18 se utiliza, y el $Bias^G$ en el retraso ionosférico previsto será compensado por $Bias^G$ en UFO_S debido a su tamaño igual y signo opuesto en la ecuación 2.18. Mientras tanto, el efecto de la $Bias_i$ parte de la corrección de la ionosfera estimada, siendo la misma para todos los satélites visibles en el producto final del usuario. Puede ser absorbido por el parámetro del reloj del receptor. Por lo tanto, tal sesgo sistemático en los retrasos ionosféricos estimados causados por el error de las UFO_S de WL, no tiene influencia en la resolución de ambigüedad y el procesamiento de posicionamiento.

2.5.2.3. Predicción temporal del retraso ionosférico

En la sección anterior se determinó la época precisa del retardo ionosférico por época a partir de las observaciones de ZD (Zero-difference). El retraso troposférico también se puede estimar con precisión en PPP-GNSS. Por lo tanto, los retrasos atmosféricos en cada época están disponibles después de la inicialización. Dai *et al.* (2003) han realizado numerosos estudios sobre la correlación temporal de los errores atmosféricos y han propuesto métodos factibles para modelar y predecir los retrasos atmosféricos con el proceso de paseo aleatorio (random walk) o la función de ajuste lineal. Una estrategia de ponderación debe emplearse de acuerdo con la latencia temporal de la predicción. Para una serie de correlaciones temporales, su función de autocorrelación se puede expresar como función del intervalo de tiempo τ (Gelb, 1979):

$$f(\tau) = \sigma_1^2 \bullet e^{|\tau|/T} \quad (2.22)$$

donde T representa el tiempo de correlación de primer orden, σ_1^2 es la varianza. Denotando el intervalo de tiempo como τ , la predicción de cantidades dadas se expresa como (Gelb, 1979):

$$dt_{ion,t_{kk+1}} = e^{|\tau|/T} \bullet dt_{ion,t_{kk}} + \omega_t, \quad \omega_t \sim N(0, \sigma_{\omega_t}^2) \quad (2.23)$$

donde la varianza del error de predicción ω_t es:

$$\sigma^2(\tau)_{\omega_t} = \sigma^2 \bullet (1 - e^{-2|\tau|/T}) \quad (2.24)$$

La función de ponderación relacionada con el ángulo de elevación también se tiene en cuenta, donde E es el ángulo de elevación del satélite:

$$p(E) = \begin{cases} 1, & E \geq 30 \\ 2 \sin(E), & 5 \leq E < 30 \\ 0, & E < 5 \end{cases} \quad (2.25)$$

2.5.3. Rápida resolución de la ambigüedad con los retrasos atmosféricos previstos

Como se mencionó en la sección anterior, el retraso ionosférico ZD (Zero-difference) y el retraso troposférico podrían derivarse de épocas fijas previas después de la inicialización. Los retrasos atmosféricos se pueden predecir mediante el uso de un proceso aleatorio (explicado en la sección 2.5.2.3). Las correcciones atmosféricas previstas se pueden aplicar para corregir las observaciones de la fase de la portadora ZD (Zero-difference). Inmediatamente después de los vacíos de datos, las observaciones de la fase de la portadora ZD (Zero-difference) corregidas podrían emplearse para implementar la resolución de ambigüedad rápida. Por lo tanto, el tiempo de reinicialización se puede acortar. Para esta sección, se desarrollará la estrategia de resolución de ambigüedad en cascada $WL-LX-L3$ (LX representa cualquiera de L_1, L_2) para obtener una solución fija en PPP-GNSS.

En primer lugar, la ambigüedad de WL se corrige con la ayuda de las correcciones de atmósfera previstas. La ambigüedad de WL es relativamente fácil de arreglar ya que su longitud de onda es muy larga (86.3 cm). Observación de fase de banda ancha (LW) Φ_{WL} y observaciones de pseudo-distancia de banda ancha (LW) P_{WL} se utilizan para la resolución de ambigüedad de WL , los errores ionosféricos y troposféricos se corrigen utilizando las correcciones atmosféricas previstas. En segundo lugar, la ambigüedad NL podría derivarse de la combinación L_3 y fijarse con la restricción de una solución fija WL . Si la ambigüedad NL no se puede arreglar, entonces se empleará L_1 o L_2 para la resolución de ambigüedades con la ayuda de las correcciones atmosféricas previstas y la información de solución fija WL . Finalmente, L_3 se reconstruye para su posicionamiento final ya que la combinación libre de ionosfera no se verá afectada por el error ionosférico residual.

Existen varios enfoques para hacer válidas las ambigüedades enteras resueltas, tales como R -ratio (Euler y Schaffrin, 1991), W -ratio (Wang *et al.*, 1998), así como la basada en la abertura entera R -ratio, y métodos W -ratio (Verhagen y Teunissen, 2006).

2.6. Monitoreo de deformaciones en puentes basados en GNSS

2.6.1. Monitoreo de Salud Estructural (SHM)

El proceso de implementación de una estrategia de detección de daños para la infraestructura de ingeniería aeroespacial, civil y mecánica se conoce como **Monitoreo de Salud Estructural** (*SHM*, por sus siglas en inglés) (Li *et al.*, 2008). Aquí el daño se define como un cambio en el material y/o propiedades geométricas de estos sistemas, incluidos los cambios en las condiciones de contorno y la conectividad del sistema, que afectan negativamente el rendimiento del sistema. El proceso de identificación de daños generalmente se estructura en los siguientes pasos.

- Detección de daños, donde se identifica la presencia de daños.
- Ubicación del daño, donde se determina la ubicación del daño.
- Tipificación de daños, donde se determina el tipo de daño.
- Extensión del daño, donde se evalúa la severidad del daño.

El proceso de SHM implica la observación de un sistema a lo largo del tiempo utilizando mediciones de respuesta dinámica muestreadas periódicamente desde una serie de sensores, la extracción de características sensibles al daño de estas mediciones y el análisis estadístico de estas características para determinar el estado actual del estado del sistema. Para el SHM a largo plazo, la salida de este proceso es información actualizada periódicamente con respecto a la capacidad de la estructura para realizar su función prevista a la luz del inevitable envejecimiento y degradación que resultan de los entornos operativos. Después de eventos extremos, como terremotos o cargas explosivas, el SHM se utiliza para la detección rápida de condiciones y tiene como objetivo proporcionar, en tiempo casi real, información confiable sobre la integridad de la estructura.

El problema del SHM se puede abordar en el contexto de un paradigma de reconocimiento de patrones estadísticos (Teferle *et al.*, 2002). En este paradigma, el proceso puede dividirse en cuatro pasos: (1) Evaluación operativa, (2) Adquisición y limpieza de datos, (3) Extracción de características y compresión de datos, y (4) Desarrollo de modelos estadísticos para la discriminación de características.

Cuando se intenta aplicar este paradigma a los datos de las estructuras del mundo real, rápidamente se hace evidente que la capacidad de limpiar, comprimir, normalizar y fusionar los datos para tener en cuenta la variabilidad operativa y ambiental que es un problema clave de implementación al abordar los pasos 2-4 de este paradigma. Estos procesos pueden implementarse a través de hardware o software y, en general, se utilizará una combinación de estos dos enfoques.

Uno de los métodos de extracción de características más comunes se basa en la correlación de las cantidades medidas de respuesta del sistema, como la amplitud o frecuencia de vibración, con las observaciones de primera mano del sistema degradante (Li *et al.*, 2008).

Otro método para desarrollar características para la identificación de daños es aplicar fallas de ingeniería, similares a las que se esperan en condiciones de operación reales, a los sistemas y desarrollar una comprensión inicial de los parámetros que son sensibles al daño esperado. El sistema defectuoso también se puede usar para validar que las mediciones de diagnóstico son lo suficientemente sensible como para distinguir entre las características identificadas del sistema dañado y no dañado.

La implementación operativa y las tecnologías de medición de diagnóstico necesarias para realizar SHM producen más datos que los usos tradicionales de la información de dinámica estructural (Kashima *et al.*, 2001; Meo *et al.*, 2002). Una condensación de los datos es ventajosa y necesaria cuando se prevén comparaciones de muchos conjuntos de características obtenidas durante la vida útil de la estructura. Además, debido a que los datos se adquirirán de una estructura durante un período de tiempo prolongado y en un entorno operacional, se deben desarrollar técnicas robustas de reducción de datos para conservar la sensibilidad de las características a los cambios estructurales de interés en presencia de variabilidad ambiental y operativa. Para ayudar aún más en la extracción y el registro de los datos de calidad necesarios para realizar el SHM, la importancia estadística de las características debe caracterizarse y utilizarse en el proceso de condensación. Los elementos del sistema SHM incluyen:

- *Estructura, sensores, sistemas de adquisición de datos, mecanismo de transferencia y almacenamiento de datos, gestión de datos e interpretación y diagnóstico de datos: (1) Identificación del sistema, (2) Actualización del modelo estructural, (3) Evaluación del estado estructural, (4) Predicción de la vida útil restante.*

2.6.2. Métodos de determinación de la deformación

La determinación de las deformaciones se han clasificado tradicionalmente en dos métodos; métodos analíticos o teóricos y métodos experimentales. Para los métodos analíticos, existen varios modelos geométricos y de energía para calcular la deflexión de estructuras, algunos de estos modelos solo son adecuados para calcular un componente de deflexión particular en un punto individual, mientras que otros pueden usarse para calcular deflexiones en varios puntos simultáneamente. Cada modelo tiene sus limitaciones, ventajas y desventajas.

Para los métodos experimentales, las técnicas de medición y la instrumentación para el monitoreo geométrico de las deformaciones se han clasificado tradicionalmente en dos grupos según los dos grupos principales de profesionales que utilizan las técnicas:

- a Levantamiento geodésico, que incluye el Sistema de Posición Global (GPS), Fotogrametría de rango cercano, levantamiento terrestre (nivelación, teodolito, estación total, escáner de láser e interferómetro de línea de base muy larga) y rango láser satelital. Estos siempre estuvieron contaminados por la refracción atmosférica, lo que limita su precisión de posicionamiento de + 1 ppm a + 2 ppm de la distancia. La llegada de la tecnología GPS ha facilitado el monitoreo estructural automatizado con información de posición precisa directa en tiempo real (coordenadas en tres dimensiones o componentes de línea de base). Con las ventajas de la tecnología GPS y

otras nuevas tecnologías de sensores, además de los avances actuales en la flexibilidad computacional de las computadoras de escritorio, las posibilidades de los sistemas automatizados de procesamiento inteligente de señales y monitoreo de la salud estaban hoy al alcance. Numerosos estudios de viabilidad han confirmado que los sistemas de monitoreo de hardware y software basados en GPS pueden desempeñar un papel en el monitoreo de estructuras hechas por el hombre. Por lo tanto, para tales propósitos, la tecnología GPS también tiene algunas limitaciones si se usa de forma aislada de otros sensores. En consecuencia, algunos estudios han identificado recientemente los beneficios complementarios de la integración del posicionamiento GPS con sensores adicionales. Por ejemplo, Meng (2002) ha llevado a cabo una serie de pruebas de un sistema integrado de GPS / acelerómetro. Su trabajo demostró que la integración de los dos subsistemas de sensores era posible y que resulta en un sistema que resuelve las deficiencias de cada subsistema, además de proporcionar niveles más altos de control de calidad.

b Mediciones geotécnicas estructurales de deformaciones locales utilizando medidores de inclinación, medidores de tensión, extensómetros y medidores de unión, etc. Además, otros sensores y técnicas de medición de desplazamiento que pueden aplicarse a la monitorización estructural. Algunos de los más comunes incluyen:

- *Acelerómetro*: estos son dispositivos para medir la velocidad de cambio de la aceleración del punto. Por lo tanto, las mediciones requieren una doble integración para llegar a los valores de desplazamiento. Se pueden encontrar varios informes de estudios sobre el monitoreo estructural con tales dispositivos en las referencias.
- *Interferometría láser*: estos pueden determinar las distancias precisas del interferómetro mediante el uso de sensores monocromáticos de radiación y fibra óptica donde se detectan electro-ópticamente los cambios en la longitud de la fibra óptica.
- *Transductores de presión dinámica*: comparan la presión medida con la presión atmosférica. Transductor de presión dinámica cae en la clase de transductores de desplazamiento.

Cada tipo de medidas tiene sus propias ventajas e inconvenientes. Los levantamientos geodésicos, a través de una red de puntos interconectados por mediciones de ángulo y distancia, suelen proporcionar una redundancia de observaciones suficiente, para la evaluación estadística de su calidad y para la detección de errores. Proporcionan información global sobre el comportamiento del objeto deformable, mientras que las mediciones geotécnicas proporcionan información muy localizada y, con mucha frecuencia, localmente perturbada sin ninguna verificación.

2.6.3. Monitoreo de Salud Estructural mediante GNSS

Los GNSS se han demostrado frecuentemente como una herramienta de monitoreo y vigilancia. El uso de RTK-GNSS tiene muchas aplicaciones, incluyendo su uso para monito-

rear la desviación de grandes estructuras. Esta información puede ser de vital importancia para los ingenieros estructurales en la evaluación de la integridad estructural.

Los GNSS son ampliamente utilizados para monitorear erupciones de volcanes (Rizos *et al.*, 2000), movimientos de la corteza (Hudnut *et al.*, 2001), movimientos verticales de la tierra (Bingley *et al.*, 2001; Teferle *et al.*, 2002), deslizamientos de tierra (Brunner *et al.*, 2000), estructuras de tierra (Forward *et al.*, 2001), presas (Hudnut y Behr, 1998), edificios (Lovse *et al.*, 1995) y puentes (Ashkenazi y Roberts, 1997).

Los GNSS ofrecen varias ventajas sobre los métodos terrestres convencionales (Duff *et al.*, 1997). La intervisibilidad entre estaciones es innecesaria, lo que permite una mayor flexibilidad en la selección de ubicaciones de estaciones que en las prospecciones geodésicas terrestres. Las mediciones se pueden tomar durante la noche o el día, en diferentes condiciones climáticas, lo que hace que las mediciones GNSS sean económicas. Con las técnicas de posicionamiento estático rápido desarrolladas recientemente, el tiempo para las mediciones en cada estación se reduce a unos pocos minutos.

La tarea principal de la topografía con GNSS es medir las distancias a diferentes satélites de varias constelaciones. Una vez que se han medido las distancias, las coordenadas de las posiciones en la tierra se calculan por triangulación (El-Rabbany, 2002). Las distancias se miden en función de la cantidad de tiempo requerido para que una señal electromagnética emitida por los diferentes satélites viaje desde los satélites a las antenas y receptores terrestres. Las antenas recogen la señal del satélite y convierten las ondas electromagnéticas en corrientes eléctricas que pueden ser registradas por el receptor (Magalhães *et al.*, 2008). Hay dos métodos principales de topografía por GNSS, cinemática y topografía estática. En aplicaciones de cinemática, los receptores están en movimiento durante el período de medición y las soluciones de posicionamiento en tiempo real están disponibles basadas en la pseudodistancia observable. En aplicaciones estáticas, los receptores son estacionarios durante largos periodos de medición (generalmente > 30 minutos) y tanto los datos de pseudorange como de fase portadora se postprocesan para soluciones de posicionamiento precisas (Beshr, 2004). Las aplicaciones estáticas rápidas son lo mismo que las técnicas estáticas, excepto que los tiempos de ocupación son cortos, generalmente entre 5 y 20 minutos, y el procesamiento posterior se basa en las observaciones del código y de la fase portadora.

Capítulo 3

Fuentes de Error y Estrategias de Mitigación del PPP

3.1. Introducción

El fundamento clave en el posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS) para lograr resultados de posición de alta precisión, es cómo mitigar todos los errores potenciales involucrados en el segmento espacial, la propagación de la señal, el entorno terrestre y el segmento usuario. En el posicionamiento diferencial o DD-GNSS, el motivo por el cual se puede lograr una precisión del orden milimétrico es porque algunos errores se pueden eliminar total o parcialmente mediante la diferenciación de las observaciones entre dos estaciones. Sin embargo, esta técnica no se puede utilizar en PPP-GNSS debido al hecho de que solo están disponibles las observaciones de un solo receptor. Por lo tanto, todos los errores deben manejarse en PPP-GNSS para lograr una precisión de centímetro o milímetros. Cai (2009) clasifica las posibles fuentes de error en dos grupos, donde un grupo equivale a las fuentes de error convencionales que normalmente deben manejarse en el posicionamiento GNSS, como la órbita del satélite y los errores de reloj, el error de retardo ionosférico, error de retardo troposférico, desplazamiento del reloj del receptor, *multipath* y ruido de medición. El otro grupo incluye las fuentes de error especiales que deben ser mitigadas específicamente en el PPP-GNSS, como las compensaciones de centro de fase de la antena del satélite y del receptor, la fase de finalización, el efecto relativista, la marea terrestre, la carga de mareas oceánicas, la carga atmosférica y el efecto Sagnac. Donde la mayoría de estos errores se pueden mitigar en cierta medida a través del modelado.

En este capítulo se abordarán las fuentes de error que afectan a la señal durante la propagación del satélite al receptor GNSS y como se pueden mitigar.

3.2. Fuentes de error convencionales

3.2.1. Órbitas satelitales y errores de reloj

Un error de órbita del satélite se puede definir como una discrepancia entre la posición real del satélite y su valor de cálculo. Esta discrepancia generalmente se expresa en tres

componentes de órbita: (1) longitudinal, (2) transversal, y (3) radial. El error de la órbita del satélite tiene un efecto directo en el posicionamiento de un solo punto. En primer lugar, la precisión de posicionamiento en la componente vertical (altura) es relativamente baja, principalmente debido a que no se observan satélites debajo del horizonte. Además, la precisión de posicionamiento en el componente Este (longitud) es ligeramente más débil que en la componente Norte (latitud) debido al diseño de las órbitas de los satélites y al movimiento de los satélites (Rizos, 1997).

La órbita del satélite y la información de desplazamiento del reloj están contenidas en las efemérides del satélite, que pueden clasificarse en efemérides emitidas y efemérides precisas. Estas efemérides transmitidas por GPS (también llamadas efemérides pronosticadas) que consisten en un conjunto de elementos keplerianos que están disponibles para los usuarios de GPS en el momento de la observación con una precisión de aproximadamente 1.6 m para las posiciones de los satélites y 7 ns para el reloj (IGS, 2008). Las efemérides de emisión de GLONASS que se proporcionan en forma de coordenadas, velocidades y aceleración también están disponibles de inmediato durante la recolección de datos. La precisión de las efemérides de emisión de GLONASS se proporcionan en la Tabla 3.1. Las efemérides precisas también se denominan efemérides postprocesadas, que no están disponibles en tiempo real debido a un retraso causado por el proceso de recopilación de datos, transmisión, cálculo y distribución a los usuarios. Las efemérides precisas de GPS se estiman utilizando los datos recopilados en estaciones de referencia distribuidas globalmente, cuyas coordenadas están predeterminadas de manera precisa. Estas estaciones de referencia equipadas con receptores GPS de doble frecuencia de alto rendimiento recopilan observaciones sin interrupciones. Estas observaciones luego se transmiten a un centro de procesamiento de datos donde se utilizan algoritmos sofisticados para realizar el cálculo para generar la órbita satelital precisa y los productos de reloj. Finalmente, estos productos de datos precisos se distribuyen a los usuarios a través de Internet o satélites de comunicación geoestacionarios.

Tabla 3.1: Exactitud de coordenadas y velocidad de los satélites GLONASS (GLONASS, 2002).

	Coordenadas (m)		Velocidad (cm/s)	
	GLONASS	GLONASS-M	GLONASS	GLONASS-M
Along track	20	7	0.05	0.03
Cross track	10	7	0.1	0.03
Radial	5	1.5	0.3	0.2

3.2.1.1. Organización IGS

El Servicio Internacional GNSS (IGS, por sus siglas en inglés) es una fuente principal de productos de órbita y reloj satelitales precisos. Es una organización civil internacional de GNSS que proporciona datos de observación de GPS y GLONASS y productos de órbita y reloj GPS y GLONASS de alta precisión para respaldar la investigación en ciencias de la tierra y aplicaciones multidisciplinarias. IGS consta de cuatro centros de datos globales, seis centros de datos regionales, diecisiete centros de datos operativos, diez centros de

análisis y varios centros de análisis asociados regionales. La Figura 3.1 ilustra la estructura de la organización de IGS. El IGS ha construido una red global de rastreo de GPS con más de 300 estaciones de GPS en funcionamiento continuo y cerca de 100 estaciones de GPS/GLONASS, que se pueden ver en la Figura 3.2. A través de la red de rastreo, el IGS recopila, archiva y distribuye datos de observación GPS o GLONASS a todo tipo de usuarios para aplicaciones y estudios científicos y de ingeniería.



Figura 3.1: Organización del IGS. Fuente: Traducido al Español de IGS (2008).

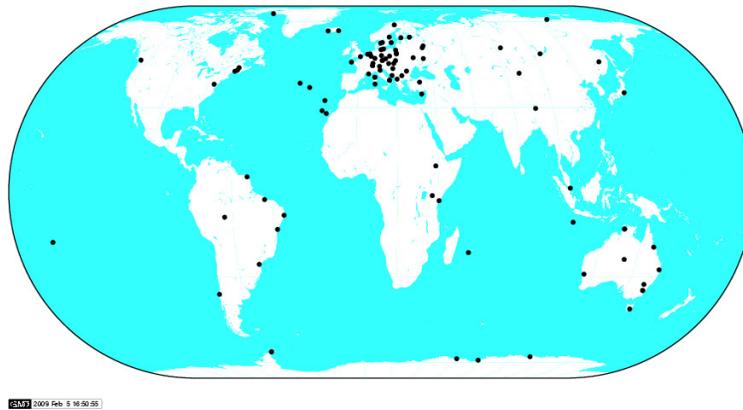


Figura 3.2: Red mundial de estaciones continuas del IGS. Fuente: IGS (2008).

3.2.1.2. Productos GPS precisos

Los productos que proporciona IGS incluyen información precisa sobre satélites, información de satélites y relojes de estaciones, y coordenadas geocéntricas de las estaciones de seguimiento de IGS, parámetros de rotación de la Tierra y parámetros atmosféricos. Desde 1994, el IGS ha estado proporcionando a la comunidad científica, con precisión y puntualidad, la precisión de la órbita del satélite GPS y los productos de corrección de reloj (Héroux y Kouba, 2001). Hoy en día, una serie de productos IGS con diferentes precisiones y latencias están disponibles para los usuarios de GNSS, incluidos productos ultra-precisos, rápidos y precisos. Existe una compensación entre la precisión y la puntualidad de estos

productos. Desde el ultra-rápido de IGS hasta los productos finales de IGS, la precisión aumenta, pero la latencia se hace más larga. En la Tabla 3.2 se muestran las precisiones de los productos emitidos por el IGS.

Tabla 3.2: Órbitas satelitales GPS precisas y productos de reloj (IGS, 2008).

Órbita/Reloj		Exactitud	Estado	Actualización	Intervalo de muestra
Broadcast	Órbita	~ 160 cm	tiempo real	-	diario
	reloj	~ 70 ns			
Ultra-rápida (predicted half)	Órbita	~ 10 cm	tiempo real	cuatro veces al día	15 min
	reloj	~ 5 ns			
Ultra-rápido (observed half)	Órbita	< 5cm	3 horas	cuatro veces al día	15 min
	reloj	~ 0.2 ns			
IGS rápidas	Órbita	<5 cm	17 horas	diarias	15 min
	reloj	0.1 ns			5min
IGS final	órbita	< 5 cm	~ 13 días	semanalmente	15 min
	reloj	< 0.1 ns			5 min
JPL Near Real-time	órbita	~ 22 cm	2~3 min	15 min	5 min
	reloj	~0.7 ns			
JPL Real-time	órbita	~ 18 cm	~ 4 seg	1 seg	~ 28 seg
	reloj	~ 1 ns			1 seg
NRCAN real-time	órbita	~ 10 cm	~ 5 seg	2 seg	~ 20 seg
	reloj	~ 1 ns			2 seg

Además del IGS, otras organizaciones como *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* y *Natural Resources Canada (NRCAN)* también proporcionan productos GPS precisos a los usuarios.

3.2.1.3. Productos GLONASS precisos

El experimento internacional GLONASS es una campaña global de observación y análisis de GLONASS para aplicaciones geodésicas y geodinámicas, que se llevó a cabo entre el 19 de octubre de 1998 y el 19 de abril de 1999. Sus principales objetivos son recopilar conjuntos de datos de GLONASS con doble distribución global de receptores GPS/GLONASS y determinar las órbitas satelitales GLONASS precisas. El IGEX-98 tiene una red de observación global que consta de 52 estaciones equipadas con 19 receptores de doble frecuencia y 13 receptores de una sola frecuencia. Después de la campaña IGEX-98, se estableció una infraestructura comparable a la del IGS. El IGEX-98 generó las órbitas precisas de todos los satélites GLONASS operativos.

El proyecto Piloto de Servicio Internacional GLONASS (IGLOS) es un proyecto de seguimiento del IGEX-98 con el propósito principal de integrar el sistema satelital GLONASS en la operación del IGS. El proyecto piloto IGLOS tiene una red global que consta de aproximadamente 50 estaciones de rastreo con receptores GPS/GLONASS de doble frecuencia. Los datos de GLONASS se recopilan continuamente y se archivan en el formato RINEX en los Centros de Datos Globales de IGS (Weber *et al.*, 2005). Las observaciones de GPS y GLONASS se procesan simultáneamente y, por lo tanto, los productos orbitales precisos generados para ambos sistemas están en el mismo marco de referencia (Weber y Fragner,

2002). Actualmente, cuatro centros de análisis del IGS pueden proporcionar productos de órbita precisa GLONASS, incluidos CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*), IAC (*Information Analytical Center*), ESA/ESOC (*European Space Operations Center*) y BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*, Alemania).

CODE proporciona productos de órbitas GLONASS rápidas y predichos (Weber *et al.*, 2005). Las órbitas de CÓDIGO se expresan en el marco de referencia IGB00, que es una realización del ITRF200 (Bruyninx, 2007). IAC es un departamento de MCC (*Russian Mission Control Center*) que monitorea rutinariamente el rendimiento de GLONASS. IAC inició una determinación de órbita y reloj de rutina utilizando datos de la red de seguimiento de IGS en 2004. Como uno de los 4 centros de análisis del IGS, ha proporcionado productos de órbita y reloj posteriores a la misión de GLONASS desde 2005. Estos productos incluyen la órbita final y los datos del reloj con un retraso de 5 días y los datos rápidos de órbita y reloj con un retraso de 1 día (Oleynik *et al.*, 2001). Un resumen de los productos de órbita y reloj precisos de GLONASS se encuentra en la Tabla 3.3.

ESOC comenzó a procesar y analizar los datos GNSS para una determinación de órbita precisa en 1991. ESA/ESOC primero utiliza su software GPSOBS/BAHN para calcular los parámetros precisos de órbita y reloj GPS y luego alinea su solución GLONASS con el marco de referencia ITRF2000 utilizando el GPS preciso datos de órbita y restricciones estrictas en las coordenadas de siete estaciones de observación (Romero *et al.*, 2004). BKG ha comenzado a procesar y analizar las observaciones combinadas de GPS /GLONASS de las estaciones de rastreo global desde que comenzó el IGEX-98. De manera similar a ESA/ESOC, BKG primero calcula las órbitas de GPS, la estimación de reloj y los parámetros de orientación de la Tierra y luego utiliza el software Bernese para producir coordenadas de estación y órbitas GLONASS precisas diariamente utilizando observaciones de fase de doble diferencia (Habrich *et al.*, 2004). Proporciona datos de órbita precisas de GLONASS, estimaciones específicas del receptor de una diferencia de tiempo del sistema entre GPS y GLONASS, y las coordenadas de la estación.

De manera similar a las órbitas GPS finales del IGS, las órbitas GLONASS independientes de las cuatro organizaciones se han combinado para generar las órbitas GLONASS finales del IGS con una precisión de 10-15 cm (Weber *et al.*, 2005).

Tabla 3.3: Órbitas satelitales GLONASS precisas y productos de reloj (IGS, 2008; Oleynik *et al.*, 2001).

Órbita/Reloj		Exactitud	Estado	Actualización	Intervalo de muestra
IGS Final	órbita	15 cm	dos semanas	semanalmente	15 min
IAC rápida	órbita	--	1 día	--	15 min
	reloj	--			5 min
IAC final	órbita	~ 15 cm	5 días	--	15 min
	reloj	~ 1.5 ns			5 min
ESOC final	órbita	--	--	--	15 min
	reloj	--			5 min

Actualmente, solo dos centros de análisis de datos, IAC y ESA/ESOC, proporcionan da-

tos de reloj GLONASS posteriores a la misión. Pero su comparación directa difícilmente se puede hacer debido a las diferentes escalas de tiempo de referencia utilizadas y los diferentes sesgos interfrecuencia aplicados a las mediciones del código GLONASS. El acuerdo entre el IAC y los valores de reloj GLONASS posteriores a la misión de ESOC se encuentra en el nivel de 1.5 ns (Oleynik *et al.*, 2001). Con solo dos centros contribuyentes, IGS no proporciona correcciones de reloj satelital GLONASS precisas.

3.2.2. Retraso Ionosférico

La *ionosfera* es una capa de la atmósfera que se encuentra a una altura de aproximadamente 50 a 1000 km sobre la superficie de la Tierra. En esta capa, la luz ultravioleta del Sol ioniza los átomos y las moléculas. Como resultado, los electrones y los iones se producen a partir de partículas atmosféricas neutras durante el proceso de fotoionización (Liao, 2000). Los electrones libres en la capa de la ionosfera ejercen una gran influencia en la propagación de las señales del GPS o GLONASS que viajan a través de la ionosfera (en la Figura 3.3 se ilustra el efecto que sufre la señal cuando pasa por la ionosfera), la velocidad de transmisión de las señales cambia y, por lo tanto, el rango medido entre un usuario y un satélite se ve corrompido por el retraso ionosférico. El error de retardo de la ionosfera que puede alcanzar decenas de metros en el cenit se ha convertido en la fuente de error dominante desde la eliminación de la disponibilidad selectiva de GPS (SA). Para lograr una mayor precisión en el posicionamiento por satélite y la navegación, se debe tener en cuenta el efecto ionosférico. El índice de refracción es uno de los parámetros más importantes para caracterizar la ionosfera. La ionosfera es un medio dispersivo, y su índice de refracción es, por lo tanto, una función de la frecuencia. Como resultado, la capa de la ionosfera causará diferentes retrasos para las frecuencias GPS o GLONASS L_1 y L_2 .

La aproximación de primer orden del índice de refracción de fase se puede escribir como (Seeber, 1993):

$$n_p = 1 - \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2} \quad (3.1)$$

donde N_e es la densidad electrónica total (el/m³); f es la frecuencia de onda de radio (Hz). De la misma manera, el índice de refracción grupal de primer orden se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$n_g = 1 + \frac{4,03 \cdot N_e}{f^2} \quad (3.2)$$

La velocidad de propagación se puede expresar en función del índice de refracción en lo siguiente:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.3)$$

donde c es la velocidad de la luz.

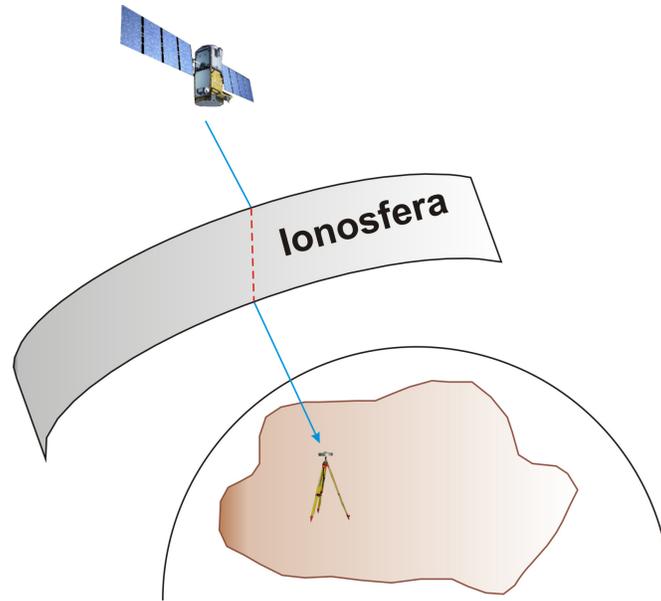


Figura 3.3: Retraso ionosférico en la señal GNSS.

El retraso de grupo de la ionosfera se puede expresar en la unidad de longitud de la siguiente manera (Liao, 2000):

$$\Delta_g = \int (n_g - 1) dt \quad (3.4)$$

De la ecuación 3.2, la ecuación 3.4 se puede reescribir como:

$$\Delta_g = \frac{40,3}{f^2} \int N_e dl = \frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad (3.5)$$

donde TEC (Contenido Total de Electrones) es el número total de electrones a lo largo del camino entre una estación y un satélite. Del mismo modo, el avance de la fase de la portadora se puede escribir como:

$$\Delta\Phi = \int (n_p - 1) dl = -\frac{40,3}{f^2} \int N_e dl = -\frac{40,3}{f^2} \cdot TEC \quad (3.6)$$

Como se puede ver en el signo de retardo de grupo y avance de fase, los pseudorangos de fase se miden más cortos que el rango geométrico real entre el satélite y el receptor, mientras que los pseudofases de código se miden más tiempo que el rango geométrico verdadero. Por lo tanto, las pseudodistancias de la fase portadora se consideran *avanzadas*, mientras que las pseudodistancias del código se consideran *retrasadas*.

Para usuarios de GPS de una sola frecuencia, un modelo de ionosfera Klobuchar, que utiliza una curva senoidal para ajustarse a la variación diurna promedio de la ionosfera, se usa comúnmente para corregir el error ionosférico. Los parámetros del modelo de Klobuchar se transmiten a través del mensaje de navegación. Un inconveniente del modelo de Klobuchar es que solo puede compensar el 50-60% del efecto de la ionosfera total (Klobuchar, 1996). Chen y Gao (2005) compararon el modelo de Klobuchar con el modelo ionosférico global (GIM) proporcionado por el IGS y el modelo de estimación del retardo

ionosférico en el que el retardo ionosférico zenit se estima utilizando observaciones de código y fase (Beran *et al.*, 2003; IONEX, 1998). Los resultados indican que el modelo de estimación ionosférica y GIM ofrecen un mejor rendimiento que el modelo de Klobuchar.

Para usuarios de GPS de doble frecuencia, el efecto de la ionosfera se puede mitigar a través de una combinación lineal de mediciones en L_1 y L_2 de acuerdo con la propiedad dispersiva de la ionosfera. En el posicionamiento preciso del punto, las combinaciones de observación sin ionosfera se aplican generalmente para mitigar la influencia del error ionosférico. Las siguientes dos ecuaciones representan las combinaciones tradicionales de observaciones sin ionosfera (Héroux y Kouba, 2001).

$$P_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} P_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} P_{L2} \quad (3.7)$$

$$\Phi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \Phi_{L2} \quad (3.8)$$

donde P y Φ son el código libre de ionosfera y las observaciones de fase, respectivamente; Φ_{L1} y Φ_{L2} son las observaciones de la fase portadora en L_1 y L_2 en la longitud de onda, respectivamente; P_{L1} y P_{L2} son las observaciones de código en L_1 y L_2 , respectivamente; f_1 y f_2 son las frecuencias portadoras en L_1 y L_2 , respectivamente.

3.2.3. Retraso Troposférico

La *troposfera* es la capa de la atmósfera desde la superficie de la Tierra hasta unos 40 km (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2007). A diferencia de la ionosfera, es un medio no dispersivo y, por lo tanto, su efecto no puede eliminarse mediante la combinación de observaciones de los datos L_1 y L_2 . La magnitud del retraso troposférico depende de muchos factores, como el ángulo de elevación del satélite, la altitud de la estación, la presión atmosférica, la temperatura y presión de vapor de agua. Normalmente se divide en dos componentes: seco y húmedo. El primero es causado por la porción más alta de la troposfera y representa aproximadamente el 90% del retraso troposférico total, mientras que el último es causado por la porción más baja de la troposfera y representa alrededor del 10% del retraso troposférico total. Además, el retraso de la troposfera seca se puede modelar fácilmente, pero el retraso de la troposfera húmeda es difícil de modelar debido a la variación irregular del agua líquida y el vapor de agua en el espacio y el tiempo en la troposfera (Misra y Enge, 2006). Si bien la componente troposférica húmeda representa aproximadamente el 10% del efecto troposférico total, causa la principal dificultad para eliminar el efecto troposférico mediante el modelado.

El promedio del retraso troposférico total en el cenit es de aproximadamente 2.5 m (Abdel-Salam, 2005). Los retrasos de la troposfera seca y húmeda generalmente se modelan en el cenit y luego se escalan mediante una función de mapeo a la elevación del satélite, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta d_{trop} = \Delta d_{dry} \cdot M_{dry} + \Delta d_{wet} \cdot M_{wet} \quad (3.9)$$

donde Δd_{dry} es el componente seco del cenit; Δd_{wet} es el componente húmedo del cenit; M_{dry} es el mapeo seco; M_{wet} es la función de mapeo en húmedo.

Existen muchos modelos troposféricos. Entre ellos, los modelos Saastamoinen y Hopfield son los más utilizados (Mekik, 1997). El modelo de Hopfield está construido por un gran número de perfiles de globos de radio-sondas meteorológicas y se realiza en diferentes lugares durante varios años. En el modelo de Hopfield, el retraso de la troposfera se modela con una tasa de lapso constante de temperatura y una integral de altura que es una función lineal de la presión medida en la superficie de la Tierra. El retraso troposférico seco y húmedo en el cenit se puede dar como (Mekik, 1997):

Retraso del cenit seco:

$$\Delta d_{dry} = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{P_s}{T_s} \cdot \int_{h_s}^{h_d} \left[\frac{h_d - h}{h_d - h_s} \right]^4 \cdot dh = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{P_s}{T_s} \cdot \frac{h_d - h_s}{5} \quad (3.10)$$

$$h_d - h_s = 148,98 \cdot (T_s - 4,12) \quad (3.11)$$

Retraso cenital húmedo:

$$\Delta d_{wet} = 10^{-6} (k_3 + 273(k_2 - k_1)) \cdot \frac{e_s}{T_s} \cdot \int_{h_s}^{h_w} \left[\frac{h_w - h}{h_w - h_s} \right]^4 \cdot dh \quad (3.12)$$

$$= 10^{-6} \cdot (k_3 + 273(k_2 - k_1)) \cdot \frac{e_s}{T_s} \cdot \frac{h_w - h_s}{5}$$

$$h_w - h_s = 11km \quad (3.13)$$

donde h_d y h_w son las alturas de la troposfera seca y húmeda sobre el geoide, respectivamente; e_s es la presión de vapor de agua parcial superficial (mbar); T_s es la temperatura de la superficie (K); P_s es la presión superficial (mbar); h_s es la altura de la superficie sobre el geoide (m); k_{k1}, k_2, k_3 son constantes.

Hay muchas funciones de mapeo en uso. La función de mapeo de Niell es una de ellas y se usa comúnmente para calcular el retraso troposférico desde el cenit hasta un ángulo de elevación arbitrario. Es una función empírica que depende de la latitud de la estación y el tiempo con diferentes formas de demoras troposféricas húmedas y secas. La función de mapeo de Niell se puede escribir como (Shrestha, 2003):

$$m_{dry}(\varepsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{dry}}{1 + \frac{b_{dr}}{1 + c_{dry}}}}}{1} + \left[\frac{1}{\sin \varepsilon} - \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}}{1}}{\sin \varepsilon + \frac{a_{ht}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{ht}}{\sin \varepsilon + c_{ht}}}} \right] x \frac{H}{1000} \quad (3.14)$$

$$m_{wet}(\varepsilon) = \frac{\frac{1}{1 + \frac{a_{wet}}{1 + \frac{b_{wet}}{1 + c_{wet}}}}}{\frac{\sin\varepsilon + \frac{a_{wet}}{\sin\varepsilon + \frac{b_{wet}}{\sin\varepsilon + c_{wet}}}}}} \quad (3.15)$$

3.2.4. Desplazamiento del reloj del receptor

El reloj del receptor generalmente está equipado con osciladores de cristal de cuarzo debido a las ventajas del tamaño pequeño, el bajo consumo de energía y el bajo precio. Debido a la estabilidad relativamente pobre del reloj de cuarzo, el reloj del receptor se desplaza en un corto período de tiempo, lo que provocará un cambio rápido del desplazamiento del reloj del receptor con el tiempo. Por lo tanto, el desplazamiento del reloj del receptor generalmente se estima como un parámetro desconocido junto con tres componentes de coordenadas en el posicionamiento preciso del punto. Alternativamente, el desfase del reloj del receptor puede eliminarse si las observaciones entre satélites están diferenciadas.

3.2.5. Salto de ciclo (*Cycle slip*)

Un problema común que se encuentra al usar observables en la fase de la portadora es la ocurrencia de saltos de ciclo. Esto es cuando el receptor pierde el bloqueo en la señal del satélite. Cuando se vuelve a adquirir la señal, se perderá el recuento entero del número de ciclos. La magnitud del deslizamiento puede variar entre un ciclo y varios miles de ciclos. La parte fraccionaria de la fase todavía se mide correctamente, por lo tanto, es importante que los saltos del ciclo se corrijan por valores enteros.

La pérdida de bloqueo puede deberse a fallas en el hardware del receptor, por la obstrucción de la antena o por una falla de alineamiento temporal. Para aplicaciones dinámicas de GNSS, las aceleraciones repentinas de la antena pueden causar un pérdida de bloqueo. Al considerar un método de reparación de deslizamiento de ciclo, los datos pueden repararse desde una sola estación o desde varias estaciones, utilizando los residuos de una solución para verificar los saltos de ciclo.

Se han sugerido muchos métodos de reparación de saltos de ciclo de una sola estación. Los datos de frecuencia dual se pueden usar para corregir pequeños saltos de ciclos en una sola estación (Whalley, 1990). En cada época, la diferencia en los observables de la fase portadora se puede escribir como,

$$\delta_t = \Phi_A^i(t)L_1 - \frac{f_{L_1}}{f_{L_2}}\Phi_A^i(t)L_2 \quad (3.16)$$

Donde

$\Phi_A^i(t)L_1$ = Frecuencia portadora L_1 observada en la época t ;

$\Phi_A^i(t)L_2$ = Frecuencia portadora L_2 observada en la época t ;
 f_{L_1} = Frecuencia L_1 ;
 f_{L_2} = Frecuencia L_2 .

Los cambios en la diferencia en el tiempo serán causados por la ionosfera. Los coeficientes en la ecuación 3.16 son 1.0 y -1.28 para las frecuencias L_1 y L_2 para la señal GPS, respectivamente. Por lo tanto, un salto de ciclo en L_1 y un salto de ciclo en L_2 causarían un cambio de 1.0, y un cambio de 1.28.

Otro método de reparación de salto de ciclo de una sola estación es ajustar un expresión polinomial a los datos de fase de la portadora sin procesar utilizando un método de mínimos cuadrados. Se puede hacer una predicción de la siguiente fase observable extrapolando el polinomio a la siguiente época. Luego se puede realizar una verificación entre la fase pronosticada y la observada, para verificar la ocurrencia y el tamaño de los saltos de ciclo.

3.2.6. Multipath y ruido de la medición

Un error *multipath* es causado por las señal reflejada emitida por los satélites, en los objetos que se encuentran en las cercanías de la antena de la estación GNSS (ver Figura 3.4). Corrompe las señales de línea de visión directa de los satélites GPS o GLONASS y, por lo tanto, degrada la precisión de las mediciones de fase de código y portadora. A pesar del rápido desarrollo de la tecnología del receptor, el *multipath* sigue siendo una fuente de error principal en el posicionamiento y la navegación. En teoría, el error máximo de *multipath* es aproximadamente la mitad de la longitud del chip de código: 150 m para el código C/A y 15 m para el código P(Y). El efecto de *multipath* en la observación de fase no excede un cuarto de su longitud de onda, aproximadamente 5-6 m para L_1 y L_2 (Shen, 2002).

En los últimos años se han desarrollado varios métodos de mitigación del *multipath* basados en receptores. Los enfoques existentes se pueden clasificar en tres categorías (Yang *et al.*, 2004). La primera categoría se basa en las señales de radiofrecuencia, que incluyen el uso de una antena de chock-ring y el uso de múltiples antenas de GPS. La segunda categoría se basa en las señales de banda base disponible, que incluyen la tecnología de correlador estrecho, el correlador delta doble, la técnica de pendiente temprana/tardía (ELS) y el seguimiento de temprana 1/temprana 2 (E_1/E_2). La tercera categoría se basa en el código final y las mediciones de la fase de la portadora después del procesamiento de banda base del receptor, que incluye el procesamiento de las mediciones del día anterior como correcciones para las mediciones del día siguiente, el análisis de la relación señal/ruido (SNR) de las mediciones y la estimación del error de *multipath*.

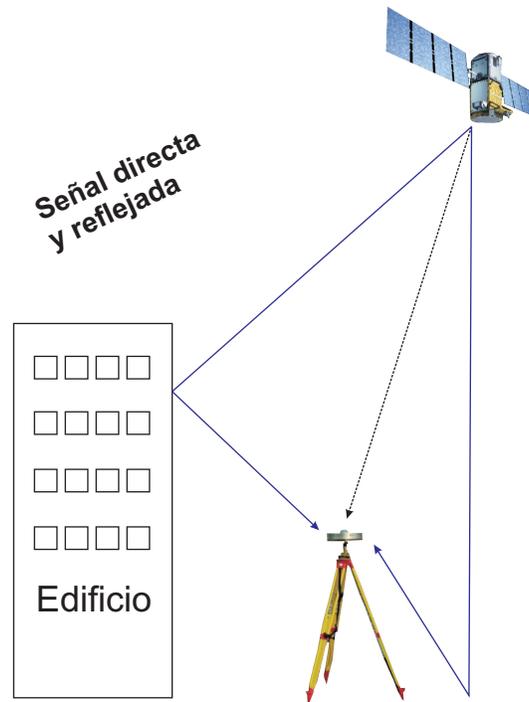


Figura 3.4: Efecto *multipath* en la señal GNSS.

Se pueden tomar varias medidas para mitigar el efecto *multipath*. En primer lugar, una medida efectiva es simplemente instalar antenas en un área libre de reflectores cercanos. Cuando el receptor debe colocarse en un entorno reflectivo, se puede usar una antena de buena calidad que sea resistente a múltiples vías. En segundo lugar, se puede tomar una antena con un plano de tierra o un conjunto chock-ring y un receptor que pueda filtrar la perturbación de la señal de *multipath* para reducir el efecto del error de *multipath*. En tercer lugar, se puede establecer un ángulo de elevación de la máscara para evitar la observación de satélites de baja elevación cuyas señales son susceptibles de ser multitrayecto (*multipath*). El ruido de medición causado por la antena, el oscilador del receptor y otros componentes es generalmente de pequeña magnitud. Tiene algunas características tales como baja correlación entre observaciones y distribución gaussiana. El ruido de medición generalmente está en un nivel decimétrico para las observaciones del código y unos pocos milímetros para las observaciones de la fase portadora. Su efecto se puede mitigar utilizando equipos de hardware de alta calidad.

3.3. Fuentes de error especiales

3.3.1. Desplazamiento del Centro de Fase de la antena del Receptor y del Satélite

El desfase del centro de fase de la antena del satélite causado por la separación entre el centro de masa del satélite y el centro de fase de la antena del satélite debe tenerse en cuenta en la técnica PPP. La razón es que la órbita del satélite y los productos de reloj se

refiere al centro de masas del satélite debido al hecho de que los modelos de fuerza de la órbita del satélite modelados se realiza en el centro de masas, mientras que las observaciones de código y fase portadora utilizadas en PPP se refieren al centro de fase de la antena. Las compensaciones del centro de fase para la mayoría de los satélites están en la dirección de la coordenada del cuerpo Z hacia la Tierra y en la dirección de la coordenada X del cuerpo que está en el plano que contiene el Sol (Héroux y Kouba, 2001). La Figura 3.5 siguiente muestra el centro de fase de la antena del satélite a compensar.



Figura 3.5: Antena del Satélite. Fuente: Traducido al Español de Héroux y Kouba (2001).

No todos los tipos de satélites deben considerar la compensación del centro de fase de la antena del satélite. Los satélites GPS del bloque IIR y los satélites diseñados más tarde no necesitan aplicar la corrección de desplazamiento de centro de fase debido a la consistencia de dos centros. Este desplazamiento para los satélites del Bloque II/IIA es un valor constante que se proporciona en la Tabla 3.4 La corrección se puede hacer a través de la siguiente ecuación (Leick *et al.*, 2015):

$$X_{fase} = X_{masa} + [e_x \ e_y \ e_z]^{-1} [x_{offset} \ y_{offset} \ z_{offset}]^T \quad (3.17)$$

donde e_x es el vector unidad satélite-Sol en Tierra centrada en la (ECEF); e_z es el vector de la unidad satelital hacia la tierra en ECEF; e_y es el tercer vector para completar el sistema de la mano derecha; x_{offset} , y_{offset} , z_{offset} son las compensaciones en el sistema de coordenadas fijas del satélite; X_{fase} X_{masa} son las coordenadas del satélite que se refieren al centro de fase de la antena y al centro de masa del satélite, respectivamente.

Tabla 3.4: Desplazamiento del centro de fase de la antena de Satélite GPS en el marco de referencia fijo del satélite (m) (Héroux y Kouba, 2001).

	X_{offset}	Y_{offset}	Z_{offset}
Bloque II/IIA	0.279	0	1.023
Bloque IIR	0	0	0

De manera similar al GPS, el desplazamiento del centro de fase de la antena del satélite GLONASS también debe considerarse en PPP debido a la separación entre el centro de

masa del satélite y el centro de fase de la antena. Dado que el centro de fase eléctrico de una antena receptora a la que se refieren las mediciones es diferente del centro de la marca física, el desfase del centro de fase de la antena receptora debe tenerse en cuenta en el PPP. Para cualquier antena receptora GNSS dada, su centro de fase varía con la dirección cambiante de la señal del satélite recibida. La magnitud de la variación generalmente depende del ángulo de elevación del satélite. El acimut inherente tiene un efecto muy pequeño en la variación del centro de fase, que generalmente es causada por el entorno local alrededor del sitio de la antena. Las calibraciones de las antenas se pueden dividir en dos partes (Mader y Czopek, 2002). Una de ellas es la calibración de un desfase de centro de fase promedio con respecto a una característica física de la antena. El otro es la calibración para la variación del centro de fase (PCV) con el ángulo de elevación o posiblemente azimut. Ambas partes deben realizarse en las calibraciones de la antena.

3.3.2. Fase wind up

Como las señales de navegación transmitidas en L_1 y L_2 por cada GPS o satélite GLO-NASS están polarizadas circularmente a la derecha, las observaciones de la fase portadora de un receptor dependen de la orientación mutua de las antenas del satélite y del receptor.

Una rotación relativa de las antenas del satélite y del receptor puede cambiar la fase de la portadora observada hasta un ciclo. Este efecto se denomina *finalización de fase* (Wu *et al.*, 1992). Una antena receptora generalmente está orientada hacia una dirección fija en un modo estático, mientras que la antena de satélite generalmente gira lentamente debido a la continua reorientación de sus paneles solares hacia el Sol. La antena del satélite puede girar hasta una revolución en menos de media hora durante el período de eclipsamiento debido a que la antena de satélite está experimentando una rotación rápida para reorientar sus paneles solares hacia el Sol (Héroux y Kouba, 2001).

El efecto de la fase de finalización (phase wind up) es insignificante para el posicionamiento diferencial que se extiende hasta varios cientos de kilómetros, mientras que es bastante significativo para el posicionamiento puntual preciso (PPP), ya que este efecto puede alcanzar hasta la mitad de la longitud de onda (Héroux y Kouba, 2001). La corrección de la fase (phase wind up) se puede realizar a través de las siguientes ecuaciones (Wu *et al.*, 1992):

$$D = x - k(k \cdot x) + kXy \quad (3.18)$$

$$D' = \bar{x} - k(k \cdot \bar{x}) \quad (3.19)$$

$$\Delta\phi = \text{sign}(k \cdot (D' \times D)) \cos^{-1}(D' \cdot D / |D'| |D|) \quad (3.20)$$

donde

k = es el satélite al receptor unidad vectorial;

x, y, z = son los vectores de la unidad receptora local;

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ = son los vectores de la unidad de coordenadas del cuerpo del satélite;

$\Delta\phi$ = es la corrección de fase wind up;

D, D' = Son los vectores dipolos efectivos del satélite y receptor;

3.3.3. Efecto relativista

El principio del posicionamiento del satélite se establece sobre la base de medir el tiempo de viaje de la señal desde un satélite a un receptor. La relatividad es causada por el potencial gravitatorio y la diferencia de velocidad en movimiento de un reloj en un satélite y uno en un receptor. Afecta el tiempo medido y, por tanto, la corrección de la relatividad debe aplicarse en PPP. Los relojes satelitales están sujetos a dos efectos relativistas: relatividad especial y relatividad general. Según la teoría de la relatividad especial, el reloj del satélite que viaja a una velocidad constante parece ir más lento que el reloj en tierra debido al efecto de dilatación del tiempo de su movimiento relativo (Tao, 2008). Esta corrección del efecto relativista se puede aplicar de la siguiente manera (GPS, 2000):

$$\Delta t_r = -\frac{2\vec{R} \bullet \vec{V}}{c^2} \quad (3.21)$$

donde Δt_r es la corrección de la relatividad; \vec{R} es el vector de posición instantáneo del satélite; \vec{V} es el vector de velocidad instantáneo del satélite; c es la velocidad de la luz.

De acuerdo con la relatividad general, un reloj satelital parece funcionar más rápido que el de tierra debido a su diferencia en el potencial gravitatorio. Esta corrección para este efecto viene dada por la siguiente ecuación (Rothacher y Beutler, 2002):

$$\Delta t_p = \frac{2GM}{c^2} \ln \left(\frac{r^s + r_r + r_r^s}{r^s + r_r - r_r^s} \right) \quad (3.22)$$

donde,

Δt_p = es el error de retraso de la gravedad;

G = es una constante gravitacional;

M = es la masa de la Tierra ;

r^s = es la distancia entre el satélite y el centro de la Tierra;

r_r = es la distancia entre el receptor y el centro de la Tierra;

r_r^s = es la distancia del receptor al satélite.

3.3.4. Mareas terrestres

Como la Tierra no es un cuerpo rígido, responde como un cuerpo elástico a las fuerzas externas ejercidas por los cuerpos celestes. Las mareas de la Tierra son causadas por la fuerza gravitacional impuesta por el Sol y la Luna. Causará deformaciones periódicas en la Tierra y conducirá a un desplazamiento vertical y horizontal del sitio, que puede representarse por armónicos esféricos de grado y orden caracterizados por el número de Love y el número de Shida. El efecto de las mareas de la Tierra que depende de la latitud de la estación, la frecuencia de las mareas y el tiempo sideral puede alcanzar unos 30 cm en la componente de altura y 5 cm en el plano horizontal (Héroux y Kouba, 2001). El desplazamiento causado por la marea sólida de la Tierra se puede dividir en una parte permanente y una parte periódica. La parte periódica se puede promediar en gran medida en la posición estática de un día entero, mientras que la parte permanente que puede alcanzar los

12 cm en la región de latitud media permanece (Héroux y Kouba, 2001). Incluso con un tiempo de observación prolongado, si se descuida la corrección de la marea de la Tierra, se producirá un error de posicionamiento de hasta 12.5 cm en el componente de altura y 5 cm en el plano horizontal en la posición del punto. La ecuación que incluye las correcciones de desplazamiento tanto permanentes como periódicas se da continuación (McCarthy, 1992):

$$\Delta r = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \left\{ \left[3l_2(\widehat{R}_j \cdot \widehat{r}) \right] \widehat{R}_j + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\widehat{R}_j \cdot \widehat{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \widehat{r} \right\} + \quad (3.23)$$

$$[-0,025 \text{ m} \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \sin(\phi_g + \lambda)] \cdot \widehat{r}$$

donde,

$\Delta \vec{r}$ = es un vector de desplazamiento del sitio en el sistema de coordenadas cartesiano;

GM = son los parámetros gravitacionales de la Tierra ;

GM_j = los parámetros gravitacionales de la luna (j=2) y el Sol (j=3);

r = vectores de estado geocéntrico de la estación;

R_j = vectores de estado geocéntrico de la Luna (j=2) y el Sol (j=3) ;

\widehat{r} = Son los vectores de estado de la unidad geocéntrica de la estación; ;

\widehat{R}_j = son los vectores de estado de la unidad geocéntrica de la Luna (j=2) y el Sol (j=3) ;

l_2 = es el número nominal de Love de segundo grado (0.609);

h_2 = es el número dimensional sin dimensiones de Shida (0.085);

ϕ = es la latitud del sitio ;

λ = es la longitud del sitio ;

ϕ_g = es el tiempo sideral de Greenwich .

3.3.5. Carga de mareas oceánicas

De manera similar a las mareas sólidas de la Tierra, la redistribución del agua del mar bajo la fuerza gravitacional impone una carga en el fondo marino y el terreno adyacente, lo que causa la deformación del fondo marino y un desplazamiento de la superficie de un terreno adyacente. La marea oceánica pura puede medirse utilizando mareógrafos y altímetros y observaciones en la playa por su subida y bajada con respecto a un punto de referencia.

La carga oceánica consiste en los componentes del período diurno y semi-diurno con un orden de magnitud más pequeño que las mareas sólidas de la Tierra. Su efecto debe tenerse en cuenta en el posicionamiento del punto cinemático preciso en el nivel del centímetro o en el posicionamiento estático del punto cerca del mar en un intervalo de tiempo inferior a 24 h, mientras que su efecto es insignificante cuando la estación está lejos de las líneas costeras del océano (Héroux y Kouba, 2001):

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(w_j t + X_j + u_j - \phi_{cj}) \quad (3.24)$$

donde,

Δ_c = es un desplazamiento causado por la carga del océano;

j = representa 11 olas de marea;

f_j = depende de la longitud del nodo lunar (1-3 mm de precisión $f_j = 1$);
 u_j = depende de la longitud del nodo lunar (1-3 mm de precisión $u_j = 0$);
 ω_j = es la velocidad angular en el tiempo $t = 0h$;
 X_j = es una amplitud específica de la estación;
 A_{cj} = es una fase específica de la estación;

3.3.6. Carga atmosférica

La carga atmosférica es causada por las variaciones espaciales y temporales de la masa atmosférica. Tiene un impacto indirecto en las mareas del océano y de la Tierra, lo que causa la deformación de la superficie de la Tierra. Como resultado, el desplazamiento causado por la carga atmosférica puede alcanzar hasta 20 mm en el componente vertical y 3 mm en el componente horizontal (Petrov y Boy, 2003). Este desplazamiento es una función de la ubicación geográfica con un valor mayor en las regiones de latitud media en comparación con las regiones de latitud alta (McCarthy, 1996). Hay disponibles una serie de modelos de desplazamiento de carga en la atmósfera que varía de simples a complejos. Entre ellos, un modelo simple es el siguiente (Rabbel y Schuh, 1986):

$$\Delta r = -0,35p - 0,55p' \quad (3.25)$$

donde Δr es el desplazamiento de carga de la atmósfera en la unidad del milímetro; p es la diferencia de presión del sitio del valor estándar (101.3 KPA); p' es la anomalía de presión dentro de los 2000 km desde la estación.

3.3.7. Efecto Sagnac

Un efecto Sagnac es causado por la rotación de la Tierra durante el tránsito de la señal del satélite desde un receptor. Debido a la rotación de la Tierra, el receptor en la superficie de la Tierra se mueve con una velocidad de hasta 500 m/s (en el Ecuador), lo que resulta en el efecto Sagnac. Este efecto es muy complicado de calcular. Según Parkinson (1996), el efecto Sagnac es proporcional al área barrida por el vector radio desde el centro de la Tierra al rayo de la luz durante la propagación de la señal de un satélite a un receptor, y se puede describir como:

$$\Delta t_s = + \frac{2\Omega_e \cdot A_e}{c^2} \quad (3.26)$$

donde Ω_e es la velocidad de rotación angular de la Tierra (WGS84); A_e es el área total barrida por el vector radio desde el centro de la Tierra hasta el rayo de luz mientras la señal viaja desde un satélite a un receptor.

Capítulo 4

Filtros Digitales y Teoría de Probabilidad

4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es dar a conocer cuales son las características básicas de los filtros digitales y cuales son las propiedades importantes al momento de diseñar un filtro para extraer alguna señal de interés. Por otro lado, se describe de manera resumida la teoría de probabilidad y las distribuciones que se utilizaron en esta investigación. Se describe para cada distribución de probabilidad la función de densidad de probabilidad al igual que la función de probabilidad acumulativa, esto debido a que la probabilidad de falla (p_f) se calculó a partir de la función matemática que describe a cada distribución y para el caso del índice de confiabilidad (β) que se determinó considerando la función de probabilidad acumulativa.

4.2. Filtros digitales

El término **filtro** se puede definir como cualquier sistema que discrimina o modifica lo que pasa a través de él de acuerdo con alguno de los atributos de entrada (Moya, 2011). Un filtro digital emplea un procesador digital que efectúa operaciones matemáticas en valores muestreados de la señal. El procesador puede ser de propósito general, como es el caso de una computadora personal o de escritorio. En general, el filtrado consiste en el procesamiento sobre una señal en el dominio del tiempo que ocasiona algún cambio en el contenido espectral de la señal original (Lyons, 2004). Los filtros se pueden clasificar en varios grupos diferentes, dependiendo de los criterios que se utilizan para la clasificación. Los dos tipos principales de filtros digitales son los filtros digitales de Respuesta Finita al Impulso (FIR, por sus siglas en inglés) y los filtros digitales de Respuesta Infinita al Impulso (IIR, por sus siglas en inglés). Ambos tipos tienen algunas ventajas y desventajas que deben considerarse cuidadosamente al diseñar un filtro. Además, es necesario tener en cuenta todas las características fundamentales de una señal a filtrar, ya que son muy importantes a la hora de decidir qué filtro usar. En la mayoría de los casos, es solo una característica lo que realmente importa y es si es necesario que el filtro tenga o no una característica de fase lineal. También, existen señales para las que la característica de la fase es esencial, por lo tanto, es necesario que un filtro tenga una característica de fase

lineal para evitar perder información importante (Meyer-Baese, 2007). Cuando una señal a filtrar se analiza de esta manera, es fácil decidir qué tipo de filtro digital es mejor usar. Por consiguiente, si la característica de la fase es esencial, los filtros FIR deben usarse ya que tienen una característica de la fase lineal. Tales filtros son de orden superior y más complejos, por lo tanto, de lo contrario, cuando solo importa la respuesta de frecuencia, es preferible utilizar filtros digitales IIR que tengan un orden mucho más bajo, es decir, sean menos complejos y, por lo tanto, mucho más fáciles de realizar.

Las características básicas de los filtros de Respuesta de Impulsos Finitos(FIR) son:

- Característica de la fase lineal;
- Orden de filtro alto; y
- Estabilidad.

Las características básicas de los filtros de Respuesta de Impulsos Infinitos (IIF) son:

- Característica de fase no lineal;
- Orden de filtro bajo; y
- El filtro digital resultante tiene el potencial de volverse inestable.

Diferentes filtros digitales fueron utilizados en esta investigación para extraer frecuencias de interés que representan los desplazamientos semi-estáticos y dinámicos, al igual que la aplicación de filtros para eliminar ruido causado por los diferentes errores de la medición en la señal original.

4.2.1. Tipos de filtros digitales

Existen 4 tipos de filtros, los cuales son (Alexander y Sadiku, 2002):

- **Pasa-bajas:** Atenúa todas las señales cuya frecuencia sea mayor a la frecuencia de corte (ω_c) y mantiene las que están bajo esta.
- **Pasa-altas:** Atenúa todas las señales cuya frecuencia sea menor a la frecuencia de corte (ω_c) y mantiene las que están sobre esta.
- **Pasa-bandas:** Permite el paso de las señales cuya frecuencia se encuentre dentro del intervalo creado entre dos frecuencias (ω_1, ω_2), atenuando el resto.
- **Rechaza-bandas:** Permite el paso de las señales cuya frecuencia este fuera del rango del intervalo creado entre dos frecuencias (ω_1, ω_2), atenuando las que están dentro de esta.

4.2.1.1. Filtro pasa baja

Estos filtros dejan pasar todas las frecuencias desde 0 a la frecuencia de corte (ω_c) y bloquean las frecuencias que están sobre esta. Las frecuencias que se ubican entre 0 hasta la frecuencia de corte se les denomina banda pasante mientras las frecuencias que están encima de la frecuencia de corte se les denomina banda eliminada. Las zonas entre la banda pasante y la banda eliminada se les llama banda de transición (Alexander y Sadiku, 2002). En la Figura 4.1 siguiente, se puede apreciar el comportamiento del filtro pasa baja ideal.

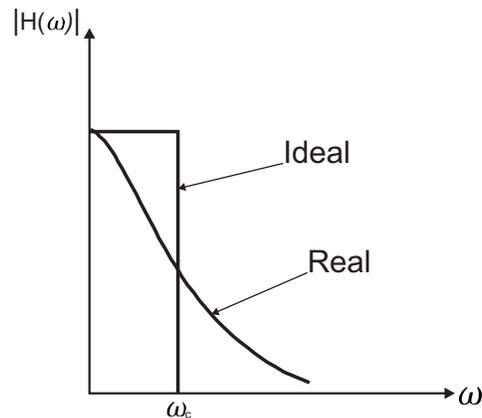


Figura 4.1: Filtro pasa-bajas.

4.2.1.2. Filtros pasa alta

Estos filtros tienen una banda pasante ubicada entre la frecuencia de corte (ω_c) y el infinito. Su banda de rechazo se ubica por debajo de la frecuencia de corte, hasta el 0 (Alexander y Sadiku, 2002). La Figura 4.2 muestra el comportamiento de un filtro pasa alta ideal.

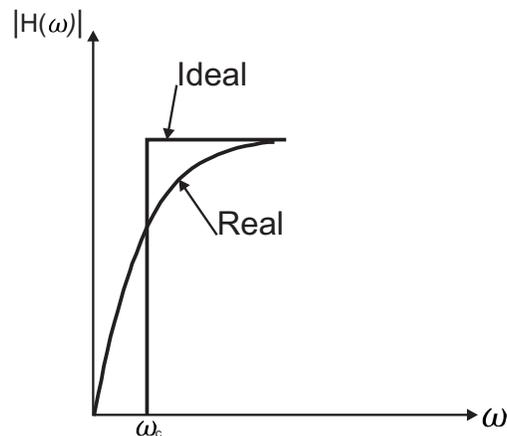


Figura 4.2: Filtro pasa-altas.

4.2.1.3. Filtro pasa banda

Estos filtros, a diferencia de los anteriores, poseen dos frecuencias de corte, una inferior (ω_1) y otra superior (ω_2). La banda pasante se encuentra entre las frecuencias de corte superior e inferior, mientras que las bandas de rechazo se ubican desde 0 a la frecuencia de corte inferior y desde la frecuencia de corte superior hasta el infinito (Alexander y Sadiku, 2002). La Figura 4.3 muestra el comportamiento de un filtro pasa banda ideal.

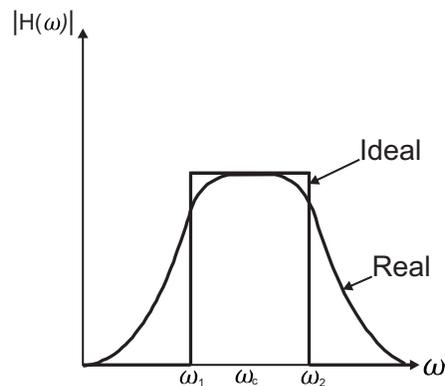


Figura 4.3: Filtro pasa-bandas.

4.2.1.4. Filtro rechaza banda

Este filtro posee dos frecuencias de corte, una inferior (ω_1) y otra superior (ω_2). Para este tipo de filtro, hay dos bandas pasantes, estas se encuentran desde 0 a la frecuencia de corte inferior y la otra desde la frecuencia de corte superior hasta el infinito (Alexander y Sadiku, 2002). En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de un filtro rechaza banda ideal.

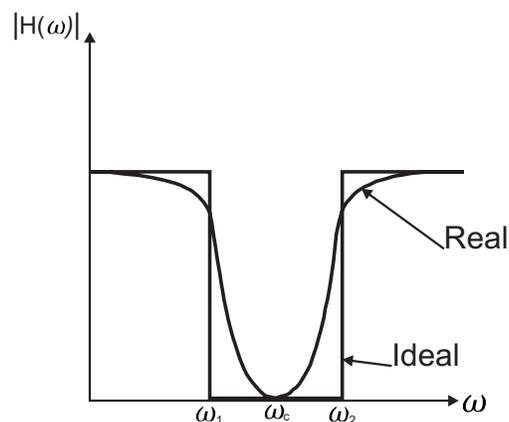


Figura 4.4: Filtro pasa-rechazo.

4.3. Teoría de Probabilidad

En la vida cotidiana se pueden encontrar dos clases de fenómenos o experimentos: *determinísticos* y *aleatorios*. El primero se realiza bajo las mismas condiciones generales, y por lo tanto, presentan siempre el mismo resultado. El segundo es aún cuando se observa bajo las mismas condiciones y se conozcan los posibles resultados ninguno se puede anticipar con certeza.

La Teoría de Probabilidad nace del estudio de los juegos de azar, los cuales impulsaron los primeros estudios sobre cálculo de probabilidades en el siglo XVI, aunque fue hasta el siglo XVIII cuando se aborda la probabilidad desde una perspectiva matemática. Uno de los conceptos básicos y de más importancia en la teoría de probabilidades es el de variable aleatoria, que puede definirse como cualquier característica medible que toma un conjunto de valores diferentes con probabilidades determinadas. Toda variable aleatoria posee una distribución de probabilidad que describe su comportamiento. Una forma usual de describir la distribución de probabilidad de una variable aleatoria es mediante la denominada función de densidad para el caso de variables continuas y función de masa de probabilidad para el caso de variables discretas (Canavos, 1988; Kissell y Poserina, 2017; Pliego y Ruiz-Maya, 2004). El objetivo de la teoría de probabilidades es proporcionar un modelo matemático adecuado, aplicable a la descripción e interpretación de los fenómenos aleatorios.

4.3.1. Funciones de Densidad de Probabilidad

4.3.1.1. Introducción

En la teoría de la probabilidad, la función de densidad de probabilidad describe la probabilidad relativa según la cual dicha variable aleatoria tomará determinado valor. La probabilidad de que la variable aleatoria caiga en una región específica del espacio de posibilidades estará dada por la integral de la densidad de esta variable entre uno y otro límite de dicha región. La función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) es positiva a lo largo de todo su dominio y su integral sobre todo el espacio es de valor unitario (Kissell y Poserina, 2017).

Una *función de densidad de probabilidad* caracteriza el comportamiento probable de una población en tanto especifica la posibilidad relativa de que una variable aleatoria continua X tome un valor cercano a x . Una variable aleatoria X tiene densidad f , siendo f una función no negativa integrable de Lebesgue, si:

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x) dx. \quad (4.1)$$

Por lo tanto, si F es la función de distribución acumulativa de X , entonces:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du. \quad (4.2)$$

La mayoría de las funciones de densidad de probabilidad requieren uno o más parámetros para especificarlas totalmente, como ejemplo se puede mencionar la distribución normal que se define a partir de dos parámetros como la media (μ) y la desviación estándar (σ). En las siguientes secciones se describirán de manera particular cada distribución utilizada en esta investigación.

4.3.1.2. Distribución normal

La distribución normal es, sin duda, la distribución de probabilidad de variable continua más importante del cálculo de probabilidades y de la Estadística. Fue descubierta por Abraham De Moivre (1667-1754) y publicada en 1733. La importancia de la distribución normal queda totalmente consolidada por ser la distribución límite de numerosas variables aleatorias, discretas y continuas (Canavos, 1988; Kissell y Poserina, 2017). La gráfica de su función de densidad tiene forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico. Esta distribución queda definida mediante dos parámetros: la media (μ) y la desviación estándar o desviación típica ($\sigma > 0$).

La función de distribución de la distribución normal está definida como:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \text{Dominio: } -\infty < x < +\infty \quad (4.3)$$

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (4.4)$$

donde Φ es la integral de Laplace.

4.3.1.3. Distribución LogNormal

La distribución normal logarítmica es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo está normalmente distribuido. Es decir, si x es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces e^x tiene una distribución log-normal. La base de una función logarítmica no es importante, ya que $\log_a x$ está distribuida normalmente si y solo si $\log_b x$ está distribuida normalmente, solo se diferencia en un factor constante (Kissell y Poserina, 2017; Pliego y Ruiz-Maya, 2004). La distribución lognormal es útil para modelar datos de numerosos estudios médicos tales como el período de incubación de una enfermedad, los títulos de anticuerpo a un virus, el tiempo de supervivencia en pacientes

con cancer o SIDA.

La función de densidad de probabilidad de la distribución log-normal considerando 3 parámetros está definida como:

$$f(x) = \frac{1}{(x - \gamma)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x - \gamma) - \mu}{\sigma}\right)^2\right), \quad \text{Dominio: } \gamma < x < +\infty \quad (4.5)$$

donde σ es la desviación estándar ($\sigma > 0$), μ es la media y γ es el parámetro de localización.

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x - \gamma) - \mu}{\sigma}\right) \quad (4.6)$$

donde Φ es la integral de Laplace.

La función de densidad de probabilidad de la distribución log-normal considerando 2 parámetros está definida como:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.7)$$

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right) \quad (4.8)$$

donde Φ es la integral de Laplace.

4.3.1.4. Distribución Logística

La curva logística fue descrita por primera vez por Pierre Francois Verhulst (1804-1849) en un trabajo publicado en 1845. La distribución logística se utiliza en el estudio del crecimiento temporal de variables, en particular, demográficos. En biología se ha aplicado para modelar el crecimiento de células de levadura, y para representar curvas de dosis-respuesta en bioensayos. Se parece a la distribución normal en su forma, pero tiene colas más pesadas (y, por lo tanto menor curtosis) (Kissell y Poserina, 2017).

La función de densidad de probabilidad de la distribución logística está definida como:

$$f(x) = \frac{1}{s\left(1 + \exp\left(\frac{-(x-\mu)}{s}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{-(x-\mu)}{s}\right), \quad \text{Dominio: } -\infty < x < +\infty \quad (4.9)$$

donde μ es el parámetro de localización y s es el parámetro de escala ($s > 0$).

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-(x-\mu)}{s}\right)} \quad (4.10)$$

4.3.1.5. Distribución Log-Logística

La distribución loglogística es una distribución de probabilidad continua para una variable aleatoria no negativa. Se utiliza en hidrología para modelar el flujo y la precipitación.

La función de densidad de probabilidad de la distribución log-logística está definida como (Al-Shomrani *et al.*, 2016):

$$f(x) = \frac{\left(\frac{\gamma}{\alpha}\right) \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\gamma-1}}{\left(1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^2\right)^2}, \quad \text{Dominio: } 0 < x < +\infty \quad (4.11)$$

donde α es el parámetro de escala y γ es el parámetro de forma.

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{-\gamma}} \quad (4.12)$$

4.3.1.6. Distribución Gamma

Es una distribución adecuada para modelizar el comportamiento de variables aleatorias continuas con asimetría positiva. Es decir, variables que presentan una mayor densidad de sucesos a la izquierda de la media que a la derecha. En su expresión se encuentran dos parámetros, siempre positivos, α y ε de los que depende su forma y alcance por la derecha, y también la función Gamma $\tau(\alpha)$, responsable de la convergencia de la distribución (Plego y Ruiz-Maya, 2004). La función de densidad de probabilidad de la distribución gamma para tres parámetros está definida como:

$$f(x) = \frac{(x - \gamma)^{\alpha-1}}{\varepsilon^\alpha \tau(\alpha)} \exp\left(\frac{-(x - \gamma)}{\varepsilon}\right), \quad \text{Dominio: } \gamma \leq x < +\infty \quad (4.13)$$

donde α es el parámetro de forma ($\alpha > 0$), ε es el parámetro de escala ($\varepsilon > 0$) y γ es el parámetro de localización. La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \frac{\tau\left(\frac{x-\gamma}{\varepsilon}\right)(\alpha)}{\tau(\alpha)} \quad (4.14)$$

La función de densidad de probabilidad de la distribución gamma para dos parámetros está definida como:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\varepsilon^\alpha \tau(\alpha)} \exp\left(\frac{-x}{\varepsilon}\right) \quad (4.15)$$

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \frac{\tau\left(\frac{x}{\varepsilon}\right)}{\tau(\alpha)} \quad (4.16)$$

donde τ es la función Gamma.

4.3.1.7. Distribución de Weibull

Es una distribución de probabilidad continua. Recibe su nombre de Waloddi Weibull, que la describió detalladamente en 1951, aunque fue descubierta inicialmente por Fréchet (1927) y aplicada por primera vez por Rosin y Rammler (1933) para describir la distribución de los tamaños de determinadas partículas. La función de densidad de probabilidad de la distribución Weibull está definida como (Pliego y Ruiz-Maya, 2004):

$$f(x) = \frac{a}{\varepsilon} \left(\frac{x - \gamma}{\varepsilon} \right)^{a-1} \exp \left(- \left(\frac{x - \gamma}{\varepsilon} \right)^a \right), \quad \text{Dominio: } \gamma \leq x < +\infty \quad (4.17)$$

donde α es el parámetro de forma ($\alpha > 0$), ε es el parámetro de escala ($\varepsilon > 0$) y γ es el parámetro de localización.

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = 1 - \exp \left(- \left(\frac{x - \gamma}{\varepsilon} \right)^a \right) \quad (4.18)$$

4.3.1.8. Distribución Gaussiana Inversa

La distribución gaussiana inversa es una familia de dos parámetros de distribución de probabilidad continuas con soporte $(0, \infty)$. Su función de densidad de probabilidad está dada por (Tweedie *et al.*, 1957):

$$f(x) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp \left(- \frac{\lambda(x - \mu)^2}{2\mu^2 x} \right), \quad \text{Dominio: } \mu < x < +\infty \quad (4.19)$$

donde μ es la media ($\mu > 0$) y λ es el parámetro de forma ($\lambda > 0$). La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \Phi \left(\sqrt{\frac{\lambda}{x}} \left(\frac{x}{\mu} - 1 \right) \right) + \Phi \left(-\sqrt{\frac{\lambda}{x}} \left(\frac{x}{\mu} + 1 \right) \right) \exp \left(\frac{2\lambda}{\mu} \right) \quad (4.20)$$

donde Φ es la integral de Laplace.

4.3.1.9. Distribución Burr

La distribución de Burr es una distribución de probabilidad continua para una variable aleatoria no negativa. Su función de densidad de probabilidad se define como (Burr, 1942):

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x}{\varepsilon} \right)^{\alpha-1}}{\varepsilon \left(1 + \left(\frac{x}{\varepsilon} \right)^\alpha \right)^{-k}}, \quad \text{Dominio: } 0 < x < +\infty \quad (4.21)$$

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = 1 - \left(1 + \left(\frac{x}{\varepsilon} \right)^\alpha \right)^{-k} \quad (4.22)$$

donde k es el parámetro de forma ($k > 0$), α es el parámetro de forma ($\alpha > 0$) y ε es el parámetro de escala ($\varepsilon > 0$).

4.3.1.10. Distribución Kernel

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria continua x se describe mediante una función denominada función de densidad $f(x)$ con la cual se pueden determinar valores de probabilidad. Si $f(x)$ no es un modelo conocido, es de interés para la investigación poder estimar $f(x)$ a partir de una muestra de observaciones x_1, x_2, \dots, x_n que suponemos son resultados independientes y tienen la misma distribución de probabilidad. El método kernel utiliza un conjunto de datos que provienen de una distribución continua, univariada y desconocida para aproximar esta función (Hwang *et al.*, 1994). Los fundamentos matemáticos para la selección de los parámetros de ajuste adecuados ya son conocidos. Los kernels son funciones que se asocian a cada uno de los datos. Entonces, la suma ponderada de estas funciones es un estimador para aproximar la función de densidad desconocida. Donde este estimador fue propuesto por primera vez por Rosenblatt en el año 1956.

Sea la muestra de n observaciones reales x_1, \dots, x_n . Definimos la estimación tipo Núcleo como:

$$f(x) = \frac{1}{n \cdot h_n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (4.23)$$

donde $K(x)$ es la función núcleo y h_n es el ancho de banda.

El *ancho de banda* h_n , también llamado parámetro de suavización es una secuencia de constantes positivas que determina la cantidad de suavización de la estimación. Si h es muy grande, la estimación resulta muy suave; si es muy pequeña, prácticamente se interpolan los datos. La *función núcleo* ($K(x)$), también conocida como función peso, es la que define la forma y la importancia de los pesos que se asocian a cada observación para el cálculo de la estimación.

4.3.1.11. Distribución Estable

Una distribución se denomina estable si es una combinación lineal de dos o más copias independientes de una muestra aleatoria que tiene la misma distribución de probabilidad, salvo por quizá algún parámetro de localización o factor de escala. La familia de distribuciones estables a veces se denomina también distribución α -estable de Lévy, en honor a Paul Lévy, el primero en estudiar este tipo de distribuciones.

De los cuatro parámetros que definen una distribución estable, el más significativo es el parámetro de estabilidad, α . Las distribuciones estables satisfacen que $0 < \alpha \leq 2$, correspondiendo el valor máximo con una distribución normal. El valor $\alpha = 1$ corresponde a la distribución de Cauchy. Las distribuciones estables no tienen una varianza finita si $\alpha < 2$, más aún si $\alpha \leq 1$ ninguna tienen media finita. Mandelbrot llamó a las distribuciones estables con $\alpha < 2$ como *distribuciones estables paretianas* (Mandelbrot, 1961; Voit, 2013).

Una distribución no degenerada ¹ es estable si satisface las siguientes notaciones:

- Sean X_1 y X_2 dos copias de una variable aleatoria X (estas dos variables aleatorias independientes tienen la misma distribución de X). Por lo tanto, X se denomina estable si existen dos constantes $a > y > 0$ tales que la nueva variable aleatoria $aX_1 + bX_2$ tenga la misma distribución que $cX + d$ para otras dos constantes $c > 0$ y d .

La distribución normal, la distribución de Cauchy y la distribución de Lévy satisfacen esta propiedad, siendo casos particulares de distribuciones estables. La densidad de probabilidad de estas distribuciones estables no admite una fórmula matemática cerrada, sin embargo, su función característica se admite una fórmula matemática cerrada. Por otro lado, cualquier distribución de probabilidad dada por la transformada de Fourier de una función característica $\varphi(t)$ del tipo:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) e^{-ixt} dt \quad (4.24)$$

Una variable aleatoria X es estable si su función característica puede escribirse como (Mandelbrot, 1961):

$$\varphi(t; \alpha, \varepsilon, c, \mu) = \exp [it\mu - |ct|^\alpha (1 - i\varepsilon \operatorname{sgn}(t)\Phi)] \quad (4.25)$$

donde $\operatorname{sgn}(t)$ es la función signo de t y Φ esta dada por:

$$\Phi = \tan \frac{\pi\alpha}{2} \quad (4.26)$$

para todo α , excepto $\alpha = 1$.

Los parámetros de la distribución Estable son:

$\alpha \in (0, 2] \rightarrow$ parámetro de estabilidad.

$\varepsilon \in [-1, 1] \rightarrow$ parámetro de asimetría.

$c \in (0, \infty) \rightarrow$ parámetro de escala.

$\mu \in (-\infty, \infty) \rightarrow$ parámetro de localización.

4.3.1.12. Distribución Birnbaum-Saunders

La distribución Birnbaum-Saunders fue desarrollada originalmente para modelar tiempos de vida de materiales expuestos a pruebas de fatiga. En 1969, siendo una motivación los problemas de vibración que se encontraron en los nuevos aviones comerciales y por los problemas de fatigas de materiales, Birnbaum y Saunders presentaron un modelo probabilístico para tiempos de vida de estructuras bajo carga dinámica. Esta distribución fue derivada a partir de un modelo que muestra que las fallas se deben al desarrollo y crecimiento de una fractura dominante. De esta manera, la distribución Birnbaum-Saunders

¹Una **distribución no degenerada** es una distribución de probabilidad en un espacio (discreto o continuo) con apoyo solamente en un espacio de menor dimensión.

describe el tiempo de falla que ha transcurrido cuando cierta clase de daño acumulado excede un umbral. La función de densidad de probabilidad es de la forma (Birnbaum y Saunders, 1969):

$$f(x) = \frac{\sqrt{\frac{x-\mu}{\varepsilon}} + \sqrt{\frac{\varepsilon}{x-\mu}}}{2\gamma(x-\mu)} \phi\left(\frac{\sqrt{\frac{x-\mu}{\varepsilon}} - \sqrt{\frac{\varepsilon}{x-\mu}}}{\gamma}\right) \quad x > \mu; \gamma, \varepsilon > 0 \quad (4.27)$$

donde γ es el parámetro de forma, μ es el parámetro de ubicación, ε es el parámetro de escala y ϕ es la función de densidad de probabilidad de la distribución normal estándar.

La fórmula para la función de distribución acumulativa esta definida como:

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\sqrt{x} - \sqrt{\frac{1}{x}}}{\gamma}\right) \quad x > 0; \gamma > 0 \quad (4.28)$$

donde Φ es la función de distribución acumulativa de la distribución normal estándar (Birnbaum y Saunders, 1969).

4.3.1.13. Distribución Rice

La distribución Rice es la distribución de probabilidad que se utiliza para modelar los caminos que llevan las señales dispersas a un receptor. Particularmente, esta distribución modela la dispersión de la línea de visión: transmisiones entre dos estaciones una en la otra, que tienen una ruta sin obstrucciones entre ellas. La dispersión de la línea de visión incluye ondas de radio FM, microondas, imágenes de IRM en presencia de ruido y transmisiones por satélite (Gudbjartsson y Patz, 1995).

La distribución Rice se define por dos parámetros de forma: ν ($\nu \geq 0$) y σ ($\sigma > 0$). La fórmula de la función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x^2 + \nu^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma^2}\right) \quad \text{Dominio: } a \leq x < +\infty \quad (4.29)$$

siendo a cualquier número positivo real y donde I_0 es una función de Bessel modificada del primer tipo con orden cero.

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = 1 - Q_1\left(\frac{\nu}{\sigma}, \frac{x}{\sigma}\right) \quad (4.30)$$

donde Q_1 es la función de Q-Marcum.

4.3.1.14. Distribución Nakagami

La distribución Nakagami es una distribución de probabilidad bastante nueva, que apareció por primera vez en 1960. Es una forma generalizada de modelar el desvanecimiento a pequeña escala para dispersiones de señales densas y es una de las distribuciones más comunes para modelar conjuntos de datos positivos y sesgados a la derecha. Las aplicaciones del mundo real incluyen el modelado de señales inalámbricas y la propagación de ondas de radio, la caracterización de los tumores de mama mediante ecografía y la meteorología (Nakagami, 1960).

La fórmula de la función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega}x^2\right) \quad \text{Dominio: } 0 \leq x < +\infty \quad (4.31)$$

donde m es el parámetro de forma ($m \geq 0.5$) y Ω es el parámetro de escala ($\Omega > 0$) y Γ^2 es la función Gamma.

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = \frac{\Gamma_{mx^2/\Omega}(m)}{\Gamma(m)} \quad (4.32)$$

4.3.1.15. Valor Extremo

Las distribuciones de valor extremo son las distribuciones limitantes para el mínimo o el máximo de una colección muy grande de observaciones aleatorias de la misma distribución arbitraria (Gumbel, 2012). Gumbel (1958) demostró que para cualquier distribución inicial con buen comportamiento, solo se necesitan unos pocos modelos, dependiendo de si está interesado en el máximo o el mínimo, y también si las observaciones están limitadas arriba o abajo. La teoría del valor extremo dice que, independientemente de la elección del modelo de componente, el modelo del sistema se acercará a un Weibull a medida que n se hace grande.

La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{x - \mu}{\varepsilon}\right) \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{x - \mu}{\varepsilon}\right)\right] \quad \text{Dominio: } -\infty < x < +\infty \quad (4.33)$$

²La función Gamma esta definida como (Noga y Studański, 2016): $\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} dt$

donde ε es el parámetro de escala ($\varepsilon > 0$) y μ es el parámetro de localización ($\mu > 0$).

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{x - \mu}{\varepsilon} \right) \right] \quad (4.34)$$

4.3.1.16. Valor Extremo Generalizado

La distribución de valor extremo generalizada (VEG) es un modelo flexible de tres parámetros que combina las distribuciones de valor extremo máximo de Gumbel, Fréchet y Weibull. Según el teorema del valor extremo, la distribución VEG es la distribución límite de máximos correctamente normalizados de una secuencia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. Por lo tanto, la distribución VEG se usa como una aproximación para modelar los máximos de secuencias largas de variables aleatorias (Coles *et al.*, 2001). La función de densidad de probabilidad está definida como (Kotz y Nadarajah, 2000):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp \left(-(1 + kz)^{-1/k} \right) (1 + kz)^{-1-1/k}, & k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} (-z - \exp(-z)), & k = 0 \end{cases} \quad (4.35)$$

donde $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$, y k, σ, μ son los parámetros de forma, escala y ubicación, respectivamente. La escala debe ser positiva ($\sigma > 0$), la forma y la ubicación pueden tomar cualquier valor real. El rango de definición de la distribución valor extremo generalizado depende de k . Varios valores del parámetro k producen las distribuciones de valor extremo tipo I, II y III (Kotz y Nadarajah, 2000).

La función de distribución acumulativa está definida como:

$$f(x) = \begin{cases} \exp \left[-(1 + kz)^{-1/k} \right], & k \neq 0 \\ \exp \left[-\exp(-z) \right], & k = 0 \end{cases} \quad (4.36)$$

donde $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$.

4.3.2. Prueba de bondad de ajuste χ^2

La prueba de bondad de ajuste χ^2 es el test de bondad de ajuste más utilizado, por lo cual, fue requerido aplicarlo en este trabajo de investigación para conocer cual es la distribución que se ajusta al comportamiento de los desplazamientos dinámicos. El test de bondad de ajuste se utiliza para discriminar si un conjunto de datos o muestra se ajusta a una distribución teórica de una determinada población. Es decir, la prueba de bondad χ^2

nos dice si la muestra disponible representa (ajusta) razonablemente los datos que uno esperaría encontrar en la población (Snedecor y Cochran, 1989). Una característica atractiva de la prueba de bondad de ajuste de χ^2 es que se puede aplicar a cualquier distribución univariada para la que pueda calcular la función de distribución acumulativa. La prueba de bondad de ajuste χ^2 se aplica a los datos agrupados (es decir, los datos puestos en clases). En realidad, esto no es una restricción, ya que para los datos no agrupados simplemente se puede calcular un histograma o una tabla de frecuencias antes de generar la prueba de χ^2 . Sin embargo, el valor de la estadística de prueba de χ^2 depende de cómo se agrupan los datos. Una desventaja de la prueba de χ^2 es que requieren un tamaño de muestras suficiente para que la aproximación de χ^2 sea válida (Snedecor y Cochran, 1989).

La prueba de χ^2 se define para la hipótesis:

H_0 : Los datos siguen una distribución especificada.

H_1 : Los datos no siguen la distribución especificada.

Para el cálculo de bondad de ajuste de χ^2 , los datos se dividen en k contenedores y el estadístico de prueba se define como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (O_i - E_i)^2 / E_i \quad (4.37)$$

donde O_i es la frecuencia observada para i y E_i es la frecuencia esperada para i . La frecuencia esperada se calcula mediante:

$$E_i = N(F(Y_u)) - F(Y_l) \quad (4.38)$$

donde F es la función de distribución acumulativa para la distribución que se está probando, Y_u es el límite superior para la clase i , Y_l es el límite inferior para la clase i y N es el tamaño de la muestra.

Para este trabajo de investigación, la prueba de bondad de ajuste χ^2 se programó utilizando la herramienta de computo MATLAB[®].

Capítulo 5

Materiales y Métodos

5.1. Introducción

La metodología utilizada en este trabajo de investigación se describirá de manera detallada en la presente sección. En primer lugar, se describe a los sensores utilizados en el registro de información sobre el puente *El Carrizo*, siendo la información geo-espacial registrada con el receptor-geodésico GNSS la de interés para esta investigación. La coordenada geodésica h (altura elipsoidal) precisa obtenida a partir de un post-proceso a través del servicio online CSRS-PPP (Sistema de Referencia Espacial Canadiense-Posicionamiento Puntual Preciso) a los archivos de observación de las mediciones GNSS, es la componente que mejor refleja los desplazamientos ocurridos por el peso de los camiones sobre el puente, por lo cual, se generaron series de tiempo que representan al movimiento de la estructura del doble voladizo durante cada prueba de carga. Por otro lado, a las series de tiempo fue necesario realizarle un tratamiento para llevar los valores de h a desplazamientos aparentes. Posteriormente, a los desplazamientos aparentes se les aplicó un filtro adaptativo LMS (*Least Mean Squares*) para mitigar fuentes de error como el *multipath*, y finalmente a partir de filtros digitales se extrajeron los desplazamientos semi-estáticos (los cuales representan de manera precisa los desplazamientos sobre el puente) y dinámicos de los desplazamientos aparentes del puente *El Carrizo*. Los desplazamientos resultantes para cada prueba de carga sobre el doble voladizo obtenidos con el postprocesamiento PPP-GNSS, fueron comparados con los desplazamientos obtenidos con el sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Esto debido a que los sensores registraron los desplazamientos de manera directa sobre el puente.

Como segunda parte de la metodología, se analizó el comportamiento de los desplazamientos dinámicos del puente, generando así histogramas y posteriormente funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se seleccionó la función de distribución que presentó el mejor ajuste a los datos a partir de una prueba de bondad chi-cuadrada. Por otro lado, la probabilidad de falla fue calculada a partir de los PDFs con diferentes límites, después se determinó el índice de confiabilidad correspondiente a cada probabilidad de falla.

5.2. Receptor geodésicos GNSS

Los receptores geodésicos GNSS pertenecen al segmento del usuario, es decir, es el segmento que recibe la señal proveniente de los diferentes satélites pertenecientes a las constelaciones GNSS. Con esta señal es posible determinar la distancia existente entre cada satélite observado y el receptor GNSS, y posteriormente la posición. La trayectoria cuando la señal se propaga del satélite al receptor, está compuesta por diferentes partículas que interactúan con la señal, haciendo que esta se altere y cambie de dirección, generando que el posicionamiento sea de baja calidad. Para mejorar la precisión del posicionamiento, fue necesario utilizar dos señales L_1 y L_2 , donde a partir de diferentes combinaciones lineales de las señales se resuelven los errores causados por diferentes fuentes (Ver capítulo 3).

Con base en lo descrito en el párrafo anterior, cuando se requieren de mediciones de alta precisión, es indispensable utilizar receptores de doble frecuencia y con seguimiento a diferentes constelaciones para mejorar el tiempo de resolución de ambigüedades (Xia *et al.*, 2019) cuando se procesa con la técnica PPP-GNSS. Para el caso de este trabajo de investigación, se utilizó un receptor geodésico GNSS Hi-Target V60 de doble frecuencia y con seguimiento de 220 canales; este receptor permite dar seguimiento a las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo, BDS/Compas y QZSS, y es compatible con los parámetros de la antena GNSS del NGS (*National Geodetic Survey*). El receptor Hi-Target V60 tiene un rango máximo de medición de 10 Hz, los resultados de las mediciones tienen una precisión en estático en la componente horizontal de 2.5 mm + 0.5 ppm y en la vertical de 5 mm + 0.5 ppm. En la Figura 5.1 se presenta el receptor GNSS Hi-Target V60.

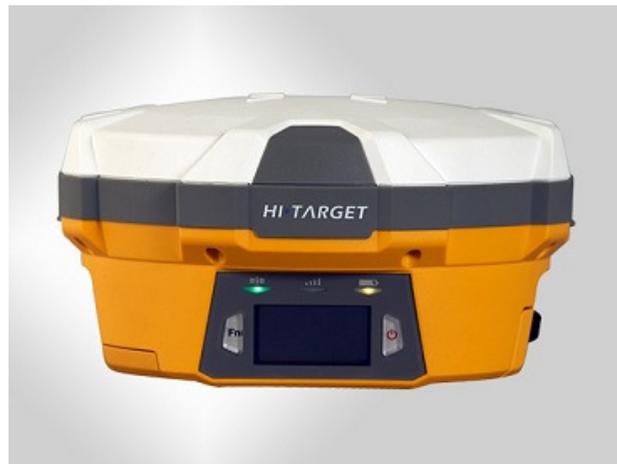


Figura 5.1: Receptor geodésico GNSS Hi-Target V60. Fuente: *es. hi-target.com.cn*

Por otro lado, en la Tabla 5.1 se observan las especificaciones técnicas del receptor Hi-Target V60.

Tabla 5.1: Especificaciones técnicas del receptor GNSS Hi-Target V60. Fuente: <http://www.intopcol.com>.

Especificaciones del receptor	
Canales	220, doble frecuencia
GPS	L1C/A, L2C, L2E, L5
GLONASS	L1C/A, L1P, L2C/A (GLONASS M), L2P
Galileo	L1 BOC, E5A, E5B, E5AltBOC
BDS/Compass (opcional)	B1, B2
QZSS	L1 C/A, L1 SAIF, L2C, L5
Intervalo de adquisición de datos	10 Hz
Precisión del receptor	
Estático horizontal	2.5 mm \pm 0.5 ppm(rms)
Estático vertical	5 mm \pm 0.5 ppm(rms)
Cinemático horizontal	10 mm \pm 1 ppm(rms)
Cinemático vertical	20 mm \pm 1 ppm(rms)

5.3. Transformador diferencial de variación lineal (LVDT)

Los sensores de desplazamiento inducido LVDT, también conocidos como sensores de desplazamiento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), basan su funcionamiento en el movimiento de un núcleo dentro del cuerpo del sensor que tiene enrollados los bobinados, de ahí que en esencia sea un transformador con su núcleo móvil. Se trata de un sensor sin rozamiento, ya que, al ser inductivo, la variación es por campo magnético.

Este desplazamiento debidamente calculado y calibrado, proporciona una relación entre la inducción de los bobinados y la distancia recorrida. En los sensores de desplazamiento inductivo LVDT, son habituales los rangos bajos y medios, desde pocos milímetros hasta los cientos de milímetros, y cuentan con múltiples opciones de montaje, libre, guiado, guiado con doble rótula, palpador como muelle de retorno, etc. En la figura 5.2 se observa un sensor LVDT en operación sobre el puente *El Carrizo*.



Figura 5.2: Sensor LVDT instalado sobre el puente *El Carrizo*.

5.4. Extensómetro

Los transductores de tensión ST350 han sido diseñados para medir de manera rápida y precisa la tensión, provocada por eventos en todos los tipos de estructura en condiciones difíciles de campo y también son adecuados para aplicaciones de laboratorio y fabricación. Estos robustos transductores de tensión de puente de Wheatstone completos están diseñados con galgas giratorias de 3500 completamente activas, en un típico gancho de cuatro cables. La longitud nominal del medidor es de 3 pulgadas (76.2 mm) y cada transductor de tensión se calibra individualmente con un sistema de calibración trazable. El ST350 es compatible con cualquier sistema de adquisición de datos capaz de medir una salida diferencial resistiva.



Figura 5.3: Extensómetro utilizado sobre el puente *El Carrizo*. Fuente: <https://bditest.com>.

5.5. Inclinómetro

El medidor de inclinación es un sensor de inclinación electrónico y se puede utilizar para aplicaciones de prueba a corto y largo plazo. Estas unidades se conectan directamente a los sistemas de monitoreo y pruebas STS y también son compatibles con la mayoría de los sistemas de adquisición de datos. Las carcasas de aluminio resistentes proporcionan un fácil montaje y capacidades de ajuste a cero.

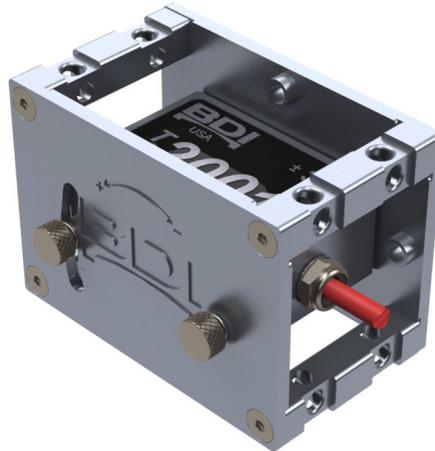


Figura 5.4: Inclinómetro utilizado sobre el puente *El Carrizo*. Fuente: <https://bditest.com>.

5.6. Servicio Online CSRS-PPP

En este estudio, el procesamiento de PPP-GNSS se realizó utilizando el software CSRS-PPP desarrollado por la División de Estudios Geodésicos de los Recursos Naturales de Canadá (NRCan-GSD, por sus siglas en inglés) (CSRS, 2004). CSRS-PPP es una aplicación que provee soluciones de posición en post-proceso vía internet¹ con el envío de ficheros de observación GNSS. Aunque CSRS-PPP se basó completamente en productos IGS cuando se lanzó por primera vez en 2003, ahora utiliza una mezcla de productos IGS y NRCan. Los parámetros estimados en PPP son las posiciones de la estación, los estados del reloj de la estación, los retrasos cenitales de la troposfera local y las ambigüedades de la fase portadora. Las mejores precisiones de solución de posición se obtienen mediante el procesamiento de observaciones de fase portadora y pseudorange de doble frecuencia GNSS con productos de reloj y órbita satelital del IGS (Servicio Internacional GNSS). NRCan PPP puede lograr esto utilizando modelos precisos para todos los fenómenos físicos involucrados (Yigit *et al.*, 2016).

Las soluciones están referidas al datum estándar de América del Norte de 1983 (NAD83) así como al ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional), esto debido a que el datum NAD83 es el sistema de coordenadas de referencia para Canadá y Estados Unidos, para el caso del ITRF, existe una relación de transformación, donde son necesarios 6 parámetros, 3 de rotación y 3 de traslación. El servicio CSRS-PPP utiliza las últimas efemérides disponibles en el momento del procesado y no requiere de una longitud mínima del archivo de observación. Este servicio permite procesar hasta 6 días de datos de manera simultánea y archivos de hasta 100 Mb de tamaño. El CSRS-PPP utiliza los valores de calibración de los centros de fase de la antena que son publicados por el IGS y NGS (*National Geodetic Survey*). Respecto al efecto ionosférico, el servicio resuelve empleando la combinación libre de ionosfera en código y fase, como se describe en la Sección 3.2.2. Por otro lado,

¹Se puede visitar este servicio a través del sitio web del NRCAN <http://www.nrcan.gc.ca/>

para la troposfera, el ZPD (*Zenith Path Delay*) se obtiene a partir del GMF (*Global Mapping Function*) que es derivado del modelo meteorológico numérico del centro Europeo para la predicción meteorológica de medio alcance (ECMWF, por sus siglas en inglés) (Mireault *et al.*, 2008).

Para el procesamiento en el servicio CSRS-PPP vía internet solo se requiere el archivo RINEX de observación y seleccionar el modo de procesado (estático o cinemático) y el marco de referencia NAD83 o ITRF, finalmente se agrega un correo para recibir los resultados. Estos resultados son un conjunto de archivos que incluyen las coordenadas cartesianas geocéntricas y geodésicas, el estado de reloj, el ZPD calculado y los errores asociados a estos parámetros.

El servicio online CSRS-PPP ha sido evaluado en diversas investigaciones (Abdelazeem *et al.*, 2011; Bolbol *et al.*, 2017; Dawod *et al.*, 2007; Ebner y Featherstone, 2008; Farah, 2015; Huber *et al.*, 2010), donde se comparan las soluciones obtenidas con diferentes servicios online y software de procesamiento de datos GNSS para el método PPP-GNSS, resultando ser un servicio de post-procesamiento preciso en el modo cinemático. Siendo la base las investigaciones citadas anteriormente para seleccionar el servicio online CSRS-PPP para realizar el procesamiento de las mediciones GNSS de este estudio. Dos archivos de observación GNSS (uno por cada prueba de carga) a una frecuencia de muestreo de 10 Hz con un receptor GNSS de grado geodésico Hi-Target V60 fueron procesados con la técnica PPP-GNSS a través del servicio online CSRS-PPP. Para que el proceso de solución fija de ambigüedad entera fuera rápido, el receptor GNSS inició la medición 1 hora antes de cada prueba de carga sobre el puente. Las características del procesamiento de datos en este estudio se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Características del procesado usando CSRS-PPP.

Modo	Cinemático
Tipo GNSS	GPS + GLONASS
Procesado de información	Código y fase
Frecuencias observadas	L_1, L_2
Órbitas satelitales	Precisas(Final, Rápidas o Ultra-Rápidas)
Productos de entrada del satélite	CLK-RINEX
Modelo ionosférico	$L_1 \& L_2$
Modelo troposférico	Davis (GPT) para el retraso hidrostático
Modelo troposférico	Hopf (GPT) para el retraso húmedo
Modelo troposférico	GMF para la función de mapeo
Retraso cenital troposférico (TZD)	Estimado
Interpolación del reloj	Si
Suavizado de parámetros	Si
Marco de referencia	NAD83

La configuración de la máscara de elevación fue de 10° . Se observaron 7 satélites GPS y 6 GLONASS² durante el experimento, y se tuvieron valores del DOP³ (dilución de pre-

²En la Figura 5.5 se observa la configuración de los satélites observados sobre el cielo.

³En la Figura 5.6 se observa el DOP para el intervalo de medición donde se llevaron a cabo las pruebas

cisión) reportados de ≤ 3 . Los datos de salidad del servicio CSRS-PPP son coordenadas geodésicas en el sistema de coordenadas del Sistema Mundial Geodésico 84 (WGS84, por sus siglas en inglés).

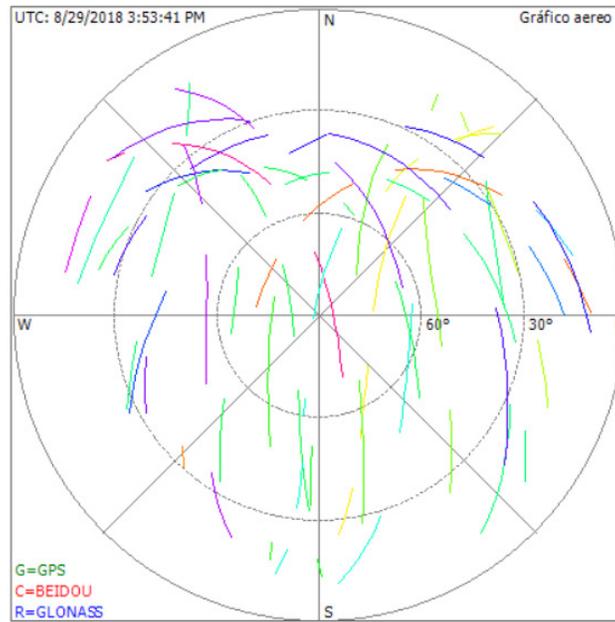


Figura 5.5: Mapa del cielo de los satélites GPS, GLONASS y BEIDOU disponibles en las mediciones GNSS que se llevaron a cabo en las pruebas de carga del día 29 de agosto de 2018.

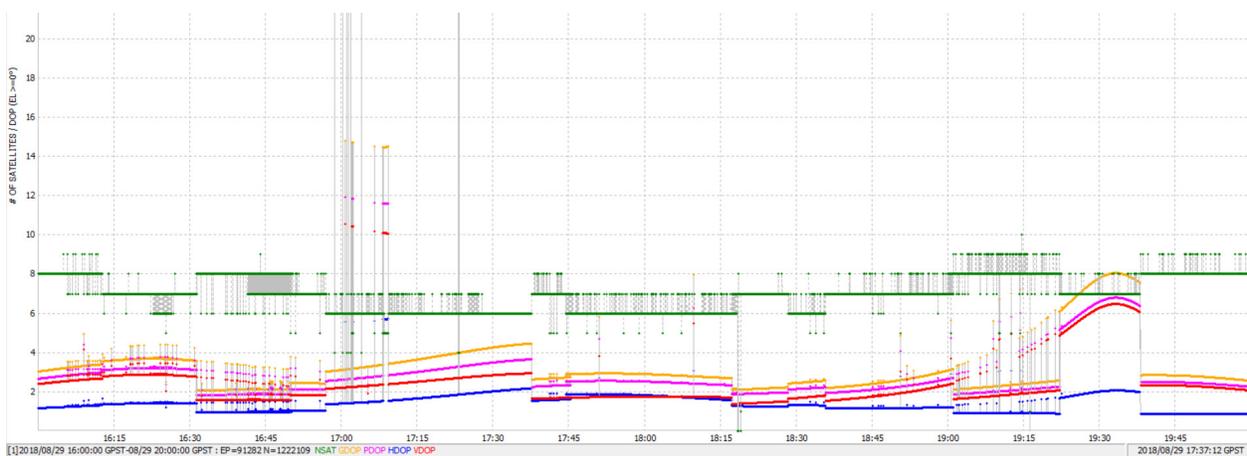


Figura 5.6: DOPs de los satélites GPS y GLONASS.

de carga.

5.7. Matlab

MATLAB[®] es un entorno de computación técnica que posibilita la ejecución del cálculo numérico y simbólico de forma rápida y precisa, acompañado de características gráficas y de visualización avanzadas aptas para el trabajo científico y la ingeniería. MATLAB es un entorno interactivo para el análisis y el modelado que implementa más de 500 funciones para el trabajo en distintos campos de la ciencia. Por otra parte, MATLAB presenta un lenguaje de programación de muy alto nivel basado en vectores, arreglos y matrices.

Además, el entorno básico de MATLAB se complementa con una amplia colección de toolboxes que contienen funciones específicas para determinadas aplicaciones en diferentes ramas de las ciencias y la ingeniería. La arquitectura de MATLAB es abierta y ampliamente extensible, permitiendo la relación con Excel, C, Fortran y otras aplicaciones externas muy utilizadas e importantes. Entre otras cosas, el código escrito en lenguaje de MATLAB puede ser traducido a C de forma inmediata (Thompson y Shure, 1995).

MATLAB también permite la operatividad entre plataformas posibilitando trabajar con distintos sistemas operativos y relacionar el trabajo realizado en las distintas plataformas. MATLAB es un software en continuo crecimiento y muy adaptable a los avances científicos y al trabajo en laboratorio, que resuelve los problemas que presenta la ingeniería en el desarrollo de productos innovadores.

5.8. Pruebas de carga sobre el puente *El Carrizo*

5.8.1. Introducción

El puente *El Carrizo* es uno de los 10 puentes atirantados de la Red Federal de Carreteras, siendo una obra de ingeniería de gran importancia para el país, esto debido a la conexión geográfica que logra. Dicha estructura permite la circulación de diferentes usuarios y ayuda a los sectores turísticos, comerciales y económicos de la región a crecer. Sin embargo, el uso diario de los diferentes usuarios hace que sean susceptibles a accidentes de tránsito, como el ocurrido el día viernes 12 de enero de 2018, donde se registró un accidente sobre el tramo que corresponde al doble voladizo del puente *El Carrizo*, el cual fue ocasionado por la volcadura de un vehículo doblemente articulado que transportaba Diésel, provocando que uno de los remolques se incendiara por más de 8 horas causando grandes daños sobre la superestructura. En la Figura 5.7 se observa la zona del daño ocasionado por el accidente sobre el puente. Después del accidente se cerró la circulación de todos los vehículos hasta no realizarse un dictamen técnico de los daños sobre la estructura del puente y la reparación del puente *El Carrizo*.

En México, la dependencia Federal responsable de la evaluación y monitoreo de puentes, es el *Instituto Mexicano del Transporte*, que en colaboración con diferentes instituciones y empresas realizan los trabajos de rehabilitación y monitoreo. Por lo cual, posterior al accidente, se llevaron a cabo una serie de reuniones por parte del personal del Instituto

Mexicano del Transporte ^{4 5}, CAPUFE (Caminos y Puentes Federales) y la DGST (Dirección General de Servicios Técnicos), donde tuvieron como fin realizar pruebas de carga y evaluar la integridad estructural del tramo del doble voladizo del puente *El Carrizo*. También como producto de estas reuniones, concluyeron que era necesario en primer lugar abrir la circulación lo más rápido posible, por lo cual, desarrollaron un plan de acción donde se derivan dos etapas. La primera etapa consistió en rehabilitar el doble voladizo de manera temporal, de tal manera que se pudiera dar circulación a un carril para cada uno de los dos cuerpos. Considerando la rehabilitación de los cajones del puente mediante la remoción del concreto dañado por el incendio, la recuperación del acero de refuerzo y el concreto dañado en los cajones, la reparación de los diafragmas y el reforzamiento de los mismos, el post tensado de 4 cables adicionales y reservados en el diseño original para incrementar la rigidez en el futuro por cambios en la demanda de cargas vivas en el puente o mantenimiento de los cables, esta acción se realizó con el objetivo de recuperar una posible pérdida de rigidez de los cables post-tensados en los cajones causados por el incendio y finalmente la fabricación temporal de una superficie de rodamiento sobre la parte superior del cajón para abrir el paso temporal de un carril por cada cuerpo. La segunda etapa consistió en la rehabilitación del doble voladizo para la operación normal como antes de ocurrido el accidente.

En conjunto, las diferentes dependencias participaron en las etapas de apertura parcial y rehabilitación del puente *El Carrizo*, con el monitoreo de los trabajos de rehabilitación de los cajones para dar paso provisional, el diseño y la ejecución de las pruebas de carga antes de abrir el paso provisional y una vez terminada la rehabilitación del doble voladizo, el seguimiento del comportamiento estructural del doble voladizo durante el tiempo de la etapa 1. Una vez culminado ambas etapas, se diseñaron pruebas de carga estáticas y dinámicas para evaluar la integridad estructural del puente *El Carrizo* después de la rehabilitación. Esta investigación nace a partir de la invitación por parte del personal del Instituto Mexicano del Transporte, para colaborar en la determinación de los desplazamientos ocurridos sobre el doble voladizo durante las pruebas de carga y desarrollar una metodología para la cuantificación precisa de desplazamientos sobre puentes para trabajos futuros a partir de la tecnología GNSS a través de la técnica de post-procesamiento PPP-GNSS. Las pruebas de carga se realizaron el día 29 de agosto de 2018, donde las mediciones reportadas en este documento con los diferentes sensores representan a estas pruebas. En la Sección 5.8.2 se describe como fue la instrumentación del tramo del doble voladizo del puente *El Carrizo* y en las Secciones 5.8.3 y 5.8.4 se describe la configuración de las pruebas de carga.

⁴El *Instituto Mexicano del Transporte* es un órgano desconcentrado de la Secretaría de Comunicación y Transporte SCT, creado por acuerdo presidencial el 15 de abril de 1987.

⁵Esta investigación fue llevada a cabo en colaboración con el *Instituto Mexicano del Transporte*.

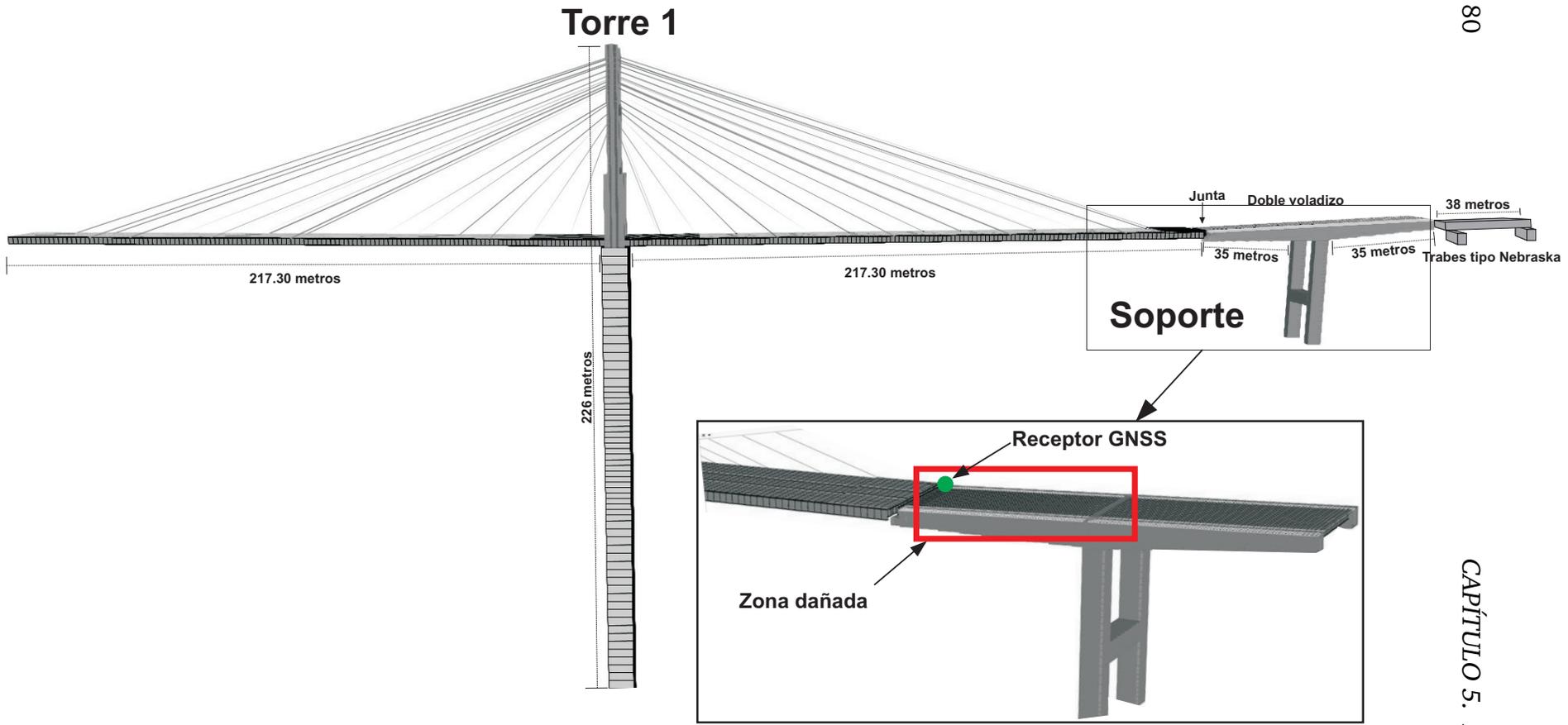


Figura 5.7: Zona dañada del Puente *El Carrizo*.

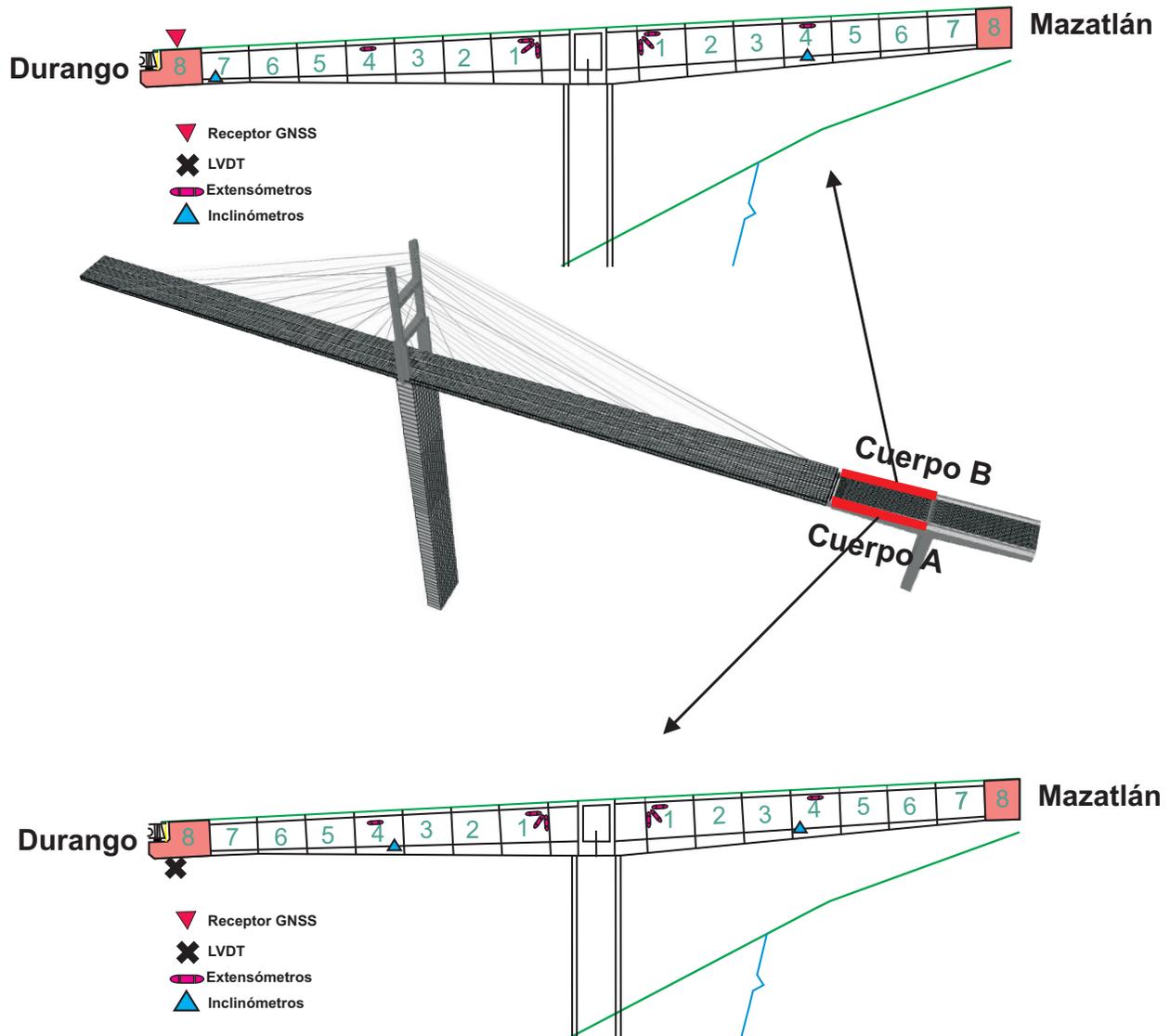


Figura 5.8: Diagrama de instrumentación del puente *El Carrizo*.

5.8.2. Instrumentación del puente *El Carrizo*

Para la implementación estratégica del monitoreo y llevar a cabo las pruebas de carga, se instaló un conjunto de sensores basados en dos arreglos de instrumentación. El primero para la prueba de carga, el cual incluyó la instrumentación con 24 sensores de fibra óptica y 26 sensores eléctricos con equipos BDI (Bridge Diagnostics, Inc) y para el segundo arreglo, el cual consistió en monitoreo permanente, se incluyeron únicamente sensores de fibra óptica.

Para el caso de los sensores eléctricos, se instrumentaron con extensómetros en configuración simétrica para ambas vigas del doble voladizo. En la dovela 1 con un arreglo en roseta en ambas caras laterales por la parte interna de las dovelas para medir esfuerzos máximos y en la dovela 4 en la dirección axial (ver Figura 5.8). De igual forma, en la parte

inferior de la dovela 8 del cuerpo A del voladizo en el que se apoya el puente atirantado, se colocó un medidor de desplazamiento LVDT, y para el cuerpo B no fue posible colocar un sensor LVDT, esto debido a que en la dovela 8 del cuerpo B se estaban llevando a cabo trabajos que impedían la colocación del sensor.

En la relación a la configuración del segundo arreglo con sensores de fibra óptica, tanto para la prueba de carga como para el monitoreo, se instrumentaron igualmente las dovelas 1 y 4 y, en este caso, los sensores se ubicaron en la parte superior e inferior interna de cada dovela (ver Figura 5.8). Para el voladizo del lado Durango, se colocó en la dovela 7 del cuerpo A un inclinómetro y otro en la dovela 4 del cuerpo B; esta diferencia se debió a que no fue posible colocar este último en la dovela 7 por los trabajos que se estaban realizando en esos momentos. Los otros dos inclinómetros se colocaron en las dovelas 4 del lado Mazatlán de ambos cuerpos (ver Figura 5.8).

Estos sensores fueron instalados sobre el puente para la primera etapa, la cual consistió en la rehabilitación y la evaluación del doble voladizo cuando se agregaron los carriles temporales en cada cuerpo. Como se menciona, este puente fue instrumentado con dos objetivos: para el monitoreo permante y para realizar pruebas de carga.

Los sensores que se utilizaron para esta investigación fueron; el extensómetro colocado en la parte inferior de la dovela 1, debido a que en esa zona se presenta la mayor tensión/compresión cuando se colocaban los vehículos sobre el doble voladizo, ya que se encuentra más cerca del soporte, el inclinómetro de la dovela 7, porque en esa dovela se presentan mayores cambios en la inclinación del doble voladizo, ambos sensores del cuerpo B en dirección hacia Durango. Por otro lado, se utilizó el sensor LVDT colocado sobre la dovela 8 del cuerpo A en la dirección hacia Durango. En la dovela 8 es donde se presenta el mayor desplazamiento por la mayor distancia que se encuentra del soporte que sostiene al doble voladizo.

El receptor GNSS fue colocado sobre la dovela 8 del cuerpo B en la dirección hacia Durango (En las Figuras 5.7 y 5.8.2 se observa la localización del receptor GNSS), ya que, la zona más dañada del doble voladizo fue en la dirección hacia Durango (ver Figura 5.7) y también debido a que el mayor desplazamiento ocurrido en el puente sería sobre las dovelas 8 de ambos cuerpos en la dirección hacia Durango. El receptor fue fijado sobre una base nivelante, donde esta estaba enroscada en una baliza. La baliza fue soportada con un bipode para controlar la estabilidad en la componente horizontal y para la vertical, el bipode se sujetó sobre la barrera de metal del puente, dejando así, al receptor GNSS fijo sobre la estructura. Esto es importante, debido a que no debe existir un desplazamiento externo al causado por los vehículos durante las pruebas de carga o los mismos desplazamientos ocurridos por el viento sobre el puente. La altura del receptor fue de 2 metros, esto con el objetivo de minimizar la fuente de error *multipath* causada por la superestructura y la barrera de metal.

EL objetivo de realizar pruebas de carga sobre la estructura rehabilitada del puente *El Carrizo* es para evaluar la integridad estructural y conocer el comportamiento dinámico a través de la identificación de las propiedades modales como frecuencias naturales de vibración y formas modales. Las mediciones de las respuestas estáticas y dinámicas durante las pruebas de carga son requeridas para la calibración de un modelo analítico. El modelo matemático calibrado es utilizado para simular condiciones normales de operación y escenarios de carga críticos a los cuales se podría someter el puente (AASTHO, 1994).

La prueba de carga tipo estática, consiste en colocar la carga en diferentes puntos de interés sobre la estructura, de esta manera se comparan efectos como deflexiones, deformaciones y factores de distribución con su contraparte del modelo analítico. Para esta investigación, se analizaron dos pruebas de carga estáticas realizadas sobre el doble voladizo del puente *El Carrizo*, donde se involucraron vehículos tipo C3 y T3-S3, con peso conocido. Con un total de 6 vehículos de prueba, 4 del tipo C3 y 2 del tipo T3-S3. Estas dos pruebas son descritas en las siguientes secciones.

5.8.3. Prueba estática de carga 1

Esta prueba consistió en posicionar 2 vehículos T3-S3 sobre la junta del lado Durango (ver Figura 5.10), la secuencia en la cual se posicionaron los vehículos es la que se muestra en la Figura 5.9. Los vehículos utilizados para esta prueba tuvieron un peso aproximadamente de 54 toneladas cada uno. En la Figura 5.13 se observan las configuraciones reales sobre el doble voladizo del puente *El Carrizo* ⁶.

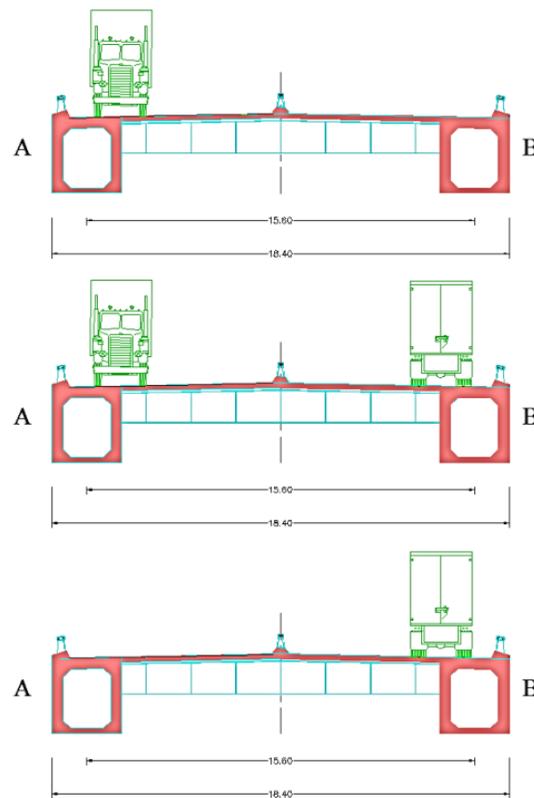


Figura 5.9: Orden de posicionamiento de los vehículos para la prueba de carga 1.

⁶Para la Figura 5.13a se colocó la imagen de otra prueba de carga que no se consideró para esta investigación, debido que para la prueba de carga 1 no se cuenta con una fotografía de campo y por otro lado, la configuración del posicionamiento de los vehículos fue la misma, pero en diferente parte del doble voladizo. En la Figura 5.13a los vehículos están colocados sobre la dovela 4 en la dirección hacia Mazatlán.

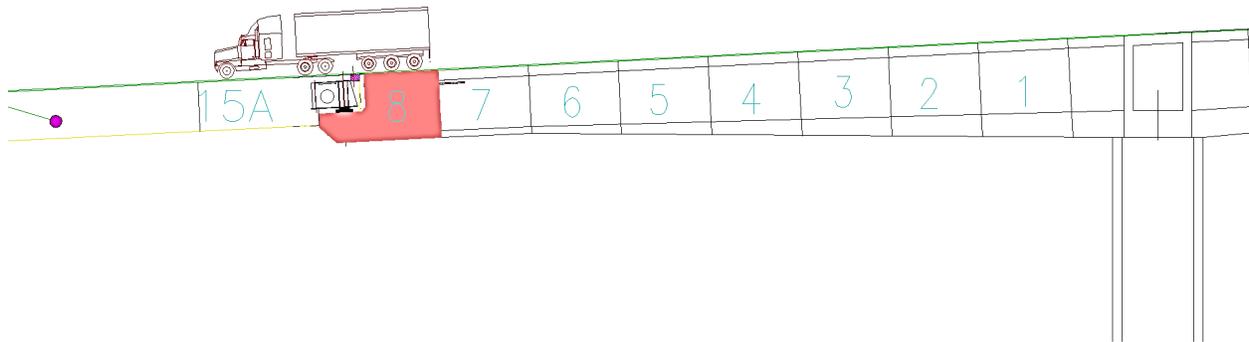


Figura 5.10: Configuración de la prueba de carga 1.

5.8.4. Prueba estática de carga 2

Esta prueba consistió en posicionar 4 vehículos C3 lo más cercano a la junta del lado hacia Durango en diferentes posiciones como se muestra en la Figura 5.12, donde estos vehículos se posicionan en diferentes tiempos. La secuencia de posición de los vehículos se ilustra en la Figura 5.11. Los vehículos de prueba se colocaron a 50 cm del eje trasero respecto al voladizo para el cuerpo A (dirección Mazatlán) y a 50 cm del eje delantero respecto al voladizo para el cuerpo B (dirección Durango). El peso promedio de cada vehículo tipo C3 fue de aproximadamente 27.5 toneladas.

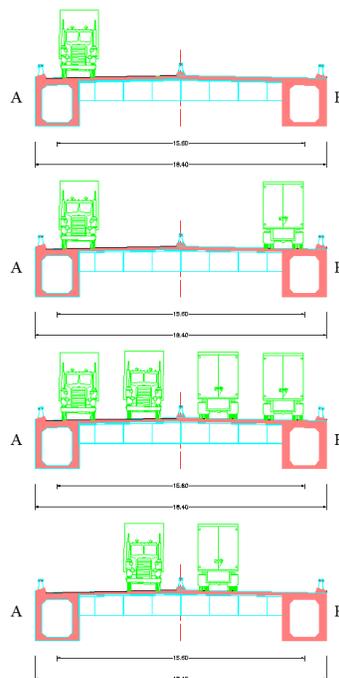


Figura 5.11: Orden de posicionamiento de los vehículos para la prueba de carga 2.

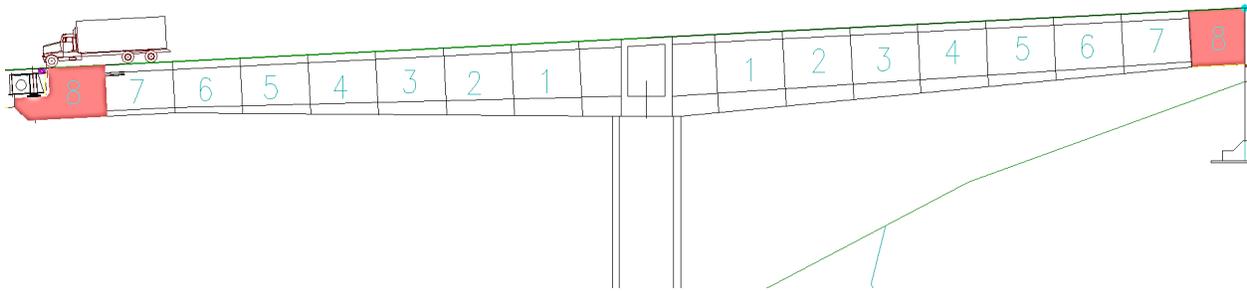


Figura 5.12: Configuración de la prueba de carga 2.



(a) Posicionamiento de los vehículos T3-S3 sobre el doble voladizo para la prueba de carga 1.

(b) Posicionamiento de los vehículos C3 sobre el doble voladizo para la prueba de carga 2.

Figura 5.13: Posición de los vehículos sobre el doble voladizo del puente *El Carrizo* para ambas pruebas de carga.

5.9. Metodología para el análisis de las mediciones PPP-GNSS

El producto final de los datos GNSS después de haber sido procesados, son las coordenadas geodésicas o cartesianas (entre otras), donde estas coordenadas representan el comportamiento en el tiempo del fenómeno estudiado (series temporales). Para el caso de esta investigación, la coordenada h representa el desplazamiento vertical ocurrido sobre el puente *El Carrizo*. Sin embargo, las coordenadas obtenidas a través del servicio CSRS-PPP no se consideran como el producto final para este estudio, esto debido a fuentes de error que no se pueden eliminar en el procesado como el *multipath*. Por lo tanto, es importante que la señal reciba un tratamiento para que represente de mejor manera los desplazamientos reales sobre el puente mediante la aplicación de filtros digitales. Otro factor importante que se debe considerar en las series de tiempo, es cambiar la escala a

la cual están referidas las coordenadas, a una escala regional representativa de los desplazamientos. Las coordenadas resultantes del servicio CSRS-PPP pertenecen al elipsoide WGS84, por lo cual, estas coordenadas deben transformarse a desplazamientos aparentes para una mejor representación de las series de tiempo.

5.9.1. Transformación de los datos crudos de las series temporales a desplazamientos aparentes

Los datos de salida del CSRS-PPP son las series temporales de coordenadas en el Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS84). Las coordenadas verticales h_i obtenidas con el receptor GNSS, que examinamos en el presente documento, se transformaron en series temporales de desplazamientos verticales aparentes U_i alrededor de un cero relativo que representa el nivel de referencia del punto de monitoreo. Esta transformación se basó en la siguiente Ecuación (Moschas y Stiros, 2011):

$$U_i = h_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (5.1)$$

Con $i = 1, 2, 3 \dots n$, siendo n el número total de puntos muestreados, h_i representa la altura elipsoidal obtenida con el receptor GNSS sobre el puente *El Carrizo*.

En la Figura 5.14 se observa la serie de tiempo de los desplazamientos crudos de la prueba de carga 2 y para la Figura 5.15 la serie de tiempo de los desplazamientos aparentes para la misma prueba una vez aplicada la ecuación 5.1 a los datos de la Figura 5.14.

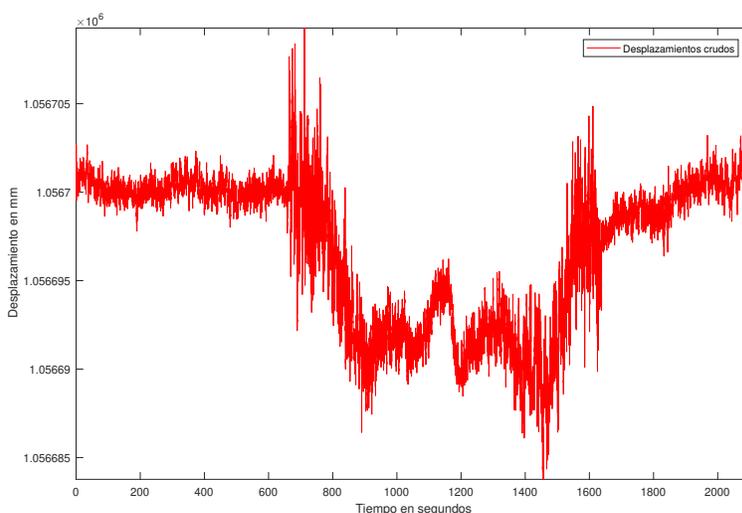


Figura 5.14: Desplazamientos crudos de la prueba de carga E2.

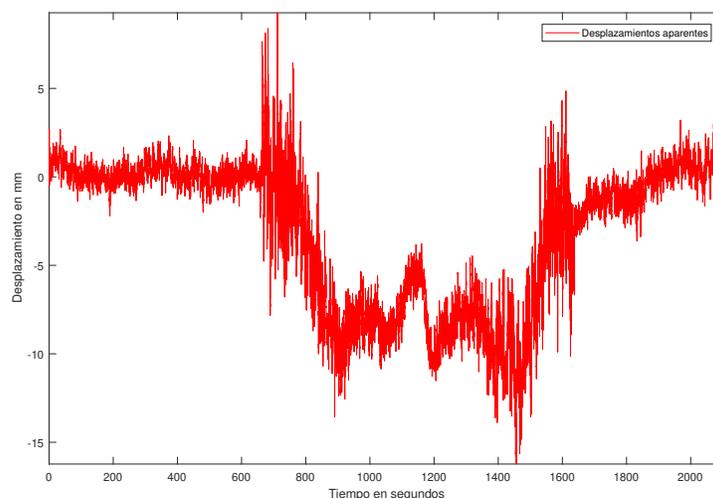


Figura 5.15: Desplazamientos aparentes de la prueba de carga E2.

La gráfica de los desplazamientos aparentes U_i se muestra en la Figura 5.15, y a primera vista, no proporciona evidencia de ningún desplazamiento preciso sobre la estructura, debido al ruido ambiental dominante. Por lo tanto, nuestro objetivo fue eliminar el ruido de la serie de tiempo de la Figura 5.15, para extraer la señal útil que describe los desplazamientos semi-estáticos y dinámicos del puente para ambas pruebas de carga.

Por este motivo, adoptamos un procedimiento de filtrado de varios pasos para las series de tiempo de los desplazamientos aparentes U_i . Como primer paso, se le aplicó un filtro adaptativo LMS a los desplazamientos aparentes, y al resultado se le aplicó el filtro de la media móvil para obtener los desplazamientos semi-estáticos, para un paso segundo, a los desplazamientos aparentes se les aplicaron tres filtros pasa alta para extraer los desplazamientos dinámicos, donde estos filtros fueron: Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II.

5.9.2. Filtro adaptativo LMS

El entorno que rodea a la antena de un receptor GNSS afecta significativamente la propagación de la señal y como resultado se introduce ruido en la medición. El *multipath* es una de las principales fuentes de error inducida por el entorno de la medición, esto debido a que el *multipath* cambia su fase y amplitud todo el tiempo con el cambio de constelación de satélites GNSS y depende totalmente del medio ambiente del sitio, y es muy difícil utilizar medios matemáticos para caracterizarlo y reducir su influencia.

En el monitoreo de desplazamientos estructurales, la complejidad del medio ambiente topográfico y el entorno de la infraestructura, así como la limitación en el sitio de topografía seleccionado, hacen del *multipath* una fuente de error inevitable e incluso un componente dominante en la señal final de las series de tiempo.

Basado en el algoritmo de mínimos cuadrados (LMS, por sus siglas en inglés), un sistema de filtrado adaptativo puede proporcionar una manera sencilla de estimar y reducir los

errores en la serie de tiempo de las soluciones PPP-GNSS. Actuando como un cancelador de interferencias, un sistema adaptativo puede aislar la parte correlacionada de dos series de tiempo. Es posible utilizar este método para analizar las magnitudes de los movimientos estructurales reales, el *multipath*, el ruido aleatorio del receptor, el retardo troposférico y otras fuentes de error, utilizando sus características de correlación. Mediante estos procesos se pueden obtener conjuntos de datos de desplazamientos del puente relativamente limpios (Dodson *et al.*, 2001).

El procesamiento de señales digitales comienza con una señal que aparece en la computadora como una secuencia de valores digitales. Desde el punto de vista del sistema, hay tres componentes básicos en un simple procesamiento digital de señales; secuencia de entrada $x(n)$, operador $D \{ \}$ y secuencias de salida $y(n)$. Su relación general se puede expresar de la siguiente manera,

$$y(n) = D \{x(n)\} \quad (5.2)$$

donde, la expresión equivalente de la Ecuación 5.2 es:

$$y(n) = \sum_{q=0}^{Q-1} b_q x(n-q) + \sum_{p=1}^{P-1} a_p y(n-p) \quad (5.3)$$

donde los coeficientes b_q y a_p son usados para determinar operadores lineales $D \{ \}$ y $D \{ \}$ se puede considerar como filtro digital.

Existen dos clases generales de filtros digitales que se pueden usar para procesar series de tiempo de desviación del puente en función de los valores de los coeficientes q y p . El primero es el filtro de Respuesta de Impulso Finito (FIR, por sus siglas en inglés) que tiene un a_p ($p = 1, 2, \dots, P - 1$) igual a 0. Así, la ecuación 5.3 se convierte en:

$$y(n) = \sum_{q=0}^{Q-1} b_q x(n-q) \quad (5.4)$$

Dado que la salida es simplemente un promedio ponderado de los valores de entrada, estos filtros también se denominan filtros de media móvil (MA, por sus siglas en inglés). Debido a su simplicidad y estabilidad, este tipo de filtros se utilizan ampliamente en la compresión de ruido de la señal y la identificación del modelo del sistema. La segunda clase de filtros digitales son los filtros de Respuesta de Impulso Infinito (IIR, por sus siglas en inglés) en forma de la Ecuación 5.5 cuando todas las b_q de $q = 1$ a $Q - 1$ se establece en 0, en la forma general de la Ecuación 5.3,

$$y(n) = x(n) - \sum_{p=1}^{P-1} a_p y(n-p) \quad (5.5)$$

En comparación con un filtro FIR, la estabilidad, el ruido de redondeo, y en ocasiones, la no linealidad de la fase podrían ser problemáticos al usar el filtro IIR. Por lo tanto, se requiere mucho más esfuerzo con el diseño e implementación de un filtro IIR. Los filtros FIR adaptativos se adoptarán para mitigar el ruido aleatorio de los receptores GNSS y el

multipath, tanto en estaciones de referencia como en sitios de puentes para obtener el movimiento real del puente a partir de series de tiempo de coordenadas medidas.

La determinación de los filtros lineales óptimos es el núcleo de un sistema de procesamiento digital de señales. Los filtros adaptativos y los sistemas adaptativos intentan encontrar el conjunto óptimo de parámetros de filtro en funciones de las señales de entrada y salida que varían con el tiempo usando el algoritmo LMS.

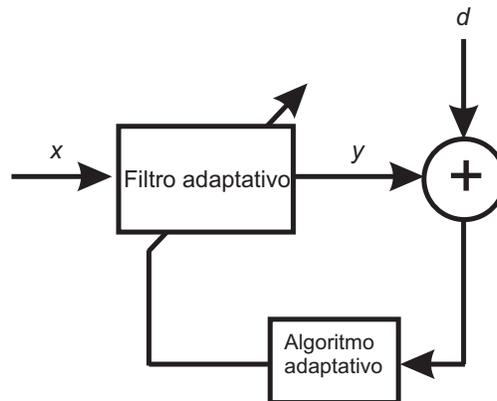


Figura 5.16: Esquema de un filtro adaptativo LMS.

En la Figura 5.16 se observa un esquema simple de un sistema adaptativo. En el cálculo real, es posible comenzar con valores iniciales arbitrarios $\{b_q\}$. Después de que cada nueva muestra de entrada $x(n)$ ingresa al filtro adaptativo, la salida correspondiente a la predicción del filtro $y(n)$ se compara con $d(n)$. La señal de error $e(n) = d(n) - y(n)$ se forma y se usa para actualizar los coeficientes del filtro según el método de descenso más pronunciado (Haykin, 2005).

$$\vec{B}_{n+1} = \vec{B}_n + 2\mu e_n \vec{X}_n \quad (5.6)$$

donde \vec{B}_n es el vector de la columna de coeficiente, μ es un parámetro que controla la tasa de convergencia, \vec{X}_n es el vector de la columna de señal de entrada.

Este es el algoritmo recursivo para ajustar los coeficientes del filtro de manera adaptativa para minimizar la suma del error cuadrado $e(n)$.

5.9.3. Desplazamientos semi-estáticos

Los desplazamientos semi-estáticos son movimientos lentos en períodos de tiempo largo (Psimoulis *et al.*, 2016), pueden ser producidos por el asentamiento de la cimentación, deformación de la estructura, etc. Los desplazamientos semi-estáticos son usados para analizar el movimiento de puentes (Kaloop, 2012).

Para extraer los desplazamientos semi-estáticos de las series de tiempo para ambas pruebas de carga, se utilizó el filtro de la media móvil con una ventana de 400. Este filtro se aplicó a las series de tiempo resultantes del filtro LMS. En la literatura científica se han reportado trabajos que aplican el filtro de la media móvil (MA, por sus siglas en inglés)

para extraer los desplazamientos semi-estáticos (Guzman-Acevedo *et al.*, 2019; Kaloop *et al.*, 2013; Moschas y Stiros, 2011; Roberts *et al.*, 2014; Vazquez B. *et al.*, 2017).

5.9.3.1. Media Móvil

El filtro de la media móvil es el más común en el procesamiento digital de señales, principalmente porque es el filtro digital más fácil de entender y usar. A pesar de su simplicidad, el filtro de la media móvil es óptimo para una tarea común: reducir el ruido aleatorio y al mismo tiempo mantener una respuesta escalonada. Esto lo convierte en el filtro principal para las señales codificadas en el dominio del tiempo. Sin embargo, la media móvil es el peor filtro para señales codificadas en el dominio de la frecuencia, con poca capacidad para separar una banda de frecuencias de otra.

Como su nombre lo indica, el filtro de la media móvil opera determinando el promedio (media) de un número de puntos de la señal de entrada para reducir cada punto en la señal de salida. El filtro de la media móvil se define por la siguiente expresión (Guzman-Acevedo *et al.*, 2019; Vazquez B. *et al.*, 2017):

$$y(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x(i+j) \quad (5.7)$$

donde $x()$ es la señal de entrada, $y()$ es la señal de salida, y M es el número total de muestras de la señal.

5.9.4. Desplazamientos dinámicos

Los desplazamientos dinámicos son movimientos rápidos en período de tiempo corto, estos desplazamientos son muy complejos de registrar sobre la estructura de puentes, ya que son afectados por el mismo ruido de los sensores que los registran. Cuando se registran mediciones de vibración dinámica con receptores GNSS, estos son más factibles a las fuentes de error, como es el caso de los efectos del *multipath* que contribuye principalmente a los componentes de baja frecuencia del comportamiento dinámico del puente y son difíciles de separar. Por lo tanto, para poder determinar los desplazamientos dinámicos en el monitoreo de puentes con la tecnología GNSS, se debe considerar la siguiente expresión, que define a la señal de vibraciones dinámicas sobre el puente:

$$y(n) = M(n) + D(n) + N(n) \quad (5.8)$$

donde $M(n)$ representa las interferencias de baja frecuencia, como el error de *multipath*, el error atmosférico o el error de reloj en la n época de observación, entre las cuales el error de *multipath* es la parte principal, $D(n)$ son las vibraciones dinámicas reales de la estructura del puente y $N(n)$ es el ruido (Wang *et al.*, 2016).

Considerando lo descrito anteriormente, para obtener las frecuencias de vibración del puente, se pueden aislar los desplazamientos de baja frecuencia utilizando un filtro digital de pasa alta que puede diseñarse de acuerdo con las características de la señal de vibración específica, y el filtro digital de paso alto está diseñado para la extracción de frecuencias

de vibración del puente. Para eso, se seleccionaron 3 filtros digitales para extraer los desplazamientos dinámicos de las series de tiempo de los desplazamientos aparentes. Estos filtros son: *chebyshev tipo I*, *chebyshev tipo II* y *butterworth*. El filtro chebyshev tipo I es el más utilizado para extraer los desplazamientos dinámicos en diversas investigaciones (Guzman-Acevedo *et al.*, 2019; Moschas y Stiros, 2011; Psimoulis *et al.*, 2016; Vazquez B. *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2014). Por otro lado, el filtro chebyshev tipo II es más recomendado en la mayoría de casos de procesamiento digital de señales, esto debido a que se debe evitar oscilaciones en la banda de interés.

Los desplazamientos dinámicos en esta investigación son utilizados para calcular la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad de la estructura del doble voladizo, por lo cual, la selección de un filtro digital que extraiga los desplazamientos dinámicos es una prioridad. Con la utilización de los tres filtros, se extrajeron desplazamientos dinámicos, donde estos desplazamientos fueron muy similares. Se hizo un análisis estadístico con las diferencias de los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro.

5.9.4.1. Filtros chebyshev tipo I y II

Existen dos tipos de filtros Chebyshev; *Chebyshev tipo I* y *Chebyshev tipo II*. Los tipo I son filtros de sólo polos que presentan un rizado constante en la banda de paso y una característica monótona en la banda eliminada. Para el caso del tipo II, tienen polos y ceros, y representan un comportamiento monótono en la banda de paso y un rizado constante en la banda eliminada. Los ceros de este tipo de filtros se encuentran en el eje imaginario del plano S.

El módulo al cuadrado de la respuesta en frecuencia de un filtro de Chebyshev de tipo I está dado por

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 T_N^2\left(\frac{\Omega}{\Omega_p}\right)} \quad \text{para } 0 \leq \epsilon \leq \quad (5.9)$$

donde ϵ es un parámetro del filtro relacionado con el rizado en la banda de paso y $T_N(x)$ es un polinomio de Chebyshev de orden N que se define como

$$T_N = \begin{cases} \cos(N \cos^{-1} x), & |x| \leq 1 \\ \cosh(N \cosh^{-1} x), & |x| > 1 \end{cases} \quad (5.10)$$

Los polinomios de Chebyshev pueden generarse mediante la ecuación recursiva

$$T_{N+1}(x) = 2xT_N(x) - T_{N-1}(x), \quad N = 1, 2, \dots \quad (5.11)$$

Para el caso del filtro Chebyshev tipo II, su respuesta en frecuencia esta dada por:

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \cdot \frac{T_N^2(\Omega_s/\Omega_c)}{T_N^2(\Omega_s/\Omega)}} \quad \text{para } 0 \leq \epsilon \leq \quad (5.12)$$

Las características del diseño para ambos filtros fue la siguiente: orden ($n = 8$), frecuencia de corte ($f_c = 0,6$ Hz), atenuación ($S = 100$) para para el Chebyshev tipo II y para el tipo I una atenuación de 1, frecuencia de muestreo ($f_s = 10$ Hz), ancho de banda ($B_w = 5$ Hz) y tipo 'high'. Los filtros fueron diseñados y aplicados utilizando la herramienta de cómputo MATLAB.

5.9.4.2. Filtro Butterworth

El filtro Butterworth, tiene una respuesta plana en la banda de paso y una suave caída en la región de transición, la rapidez de la caída en la región de transición aumenta con el orden del filtro. El filtro Butterworth tiene como respuesta frecuencia:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2N}} \quad (5.13)$$

donde ω_p es la frecuencia de corte y N el orden del filtro.

Las características del diseño del filtro Butterworth fueron las siguientes: orden ($n = 8$), frecuencia de corte ($f_c = 0,6$ Hz), frecuencia de muestreo ($f_s = 10$ Hz), ancho de banda ($B_w = 5$ Hz) y tipo 'high'.

La frecuencia de corte de 0.6 Hz fue seleccionada porque cubre el rango de 0.4-6 Hz, esto debido a la amplia variedad de movimientos dinámicos, incluidas las oscilaciones de la mayoría de las estructuras de ingeniería en eventos sísmicos (Moschas y Stiros, 2013).

5.10. Generación de PDF a partir de los desplazamientos dinámicos

La *Función de Densidad de Probabilidad* (PDF, por sus siglas en inglés) es una expresión estadística que define una distribución de probabilidad para una variable aleatoria continua en lugar de una variable aleatoria discreta. Cuando el PDF se representa gráficamente, el área debajo de la curva indicará el intervalo en el que caerá la variable. El área total en este intervalo del gráfico es igual a la probabilidad de que ocurra una variable aleatoria continua.

A partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con los filtros Chebyshev I, Chebyshev II y Butterworth de las series temporales de los desplazamientos aparentes (para ambas pruebas), se determinó el comportamiento aleatorio de estos desplazamientos sobre el puente, por lo cual, se generaron para cada prueba de carga su respectivo histograma, siendo un total de 6 histogramas (tres para cada prueba) para esta investigación. De los tres histogramas por prueba, representando un histograma por cada filtro, se ajustaron 15 distribuciones y posteriormente se realizó una prueba de bondad chi-cuadrada para determinar cual función de densidad de probabilidad se ajusta mejor al comportamiento de los datos y considerar esta distribución como la más precisa al momento de calcular la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad. Después se comparan las probabilidades de falla y los índices de confiabilidad obtenidos a partir de las 14 distribuciones que no se ajustaron a los datos. Las distribuciones usadas son: *BirnbaumSaunders*, *Burr*, *Extreme Value*, *gamma*, *Generalized Extreme Value*, *InverseGaussian*, *LogLogistic*, *Lognormal*, *Nakagami*, *Normal*, *Rician*, *Stable*, *Weibull*, *logistic*, *kernel*

Como complemento a esta investigación, con las diferencias obtenidas de las diferentes probabilidades de falla e índices de confiabilidad y considerando la distribución que mejor se ajustó a los desplazamientos dinámicos como la de referencia para el cálculo de probabilidad de falla y el índice de confiabilidad, se realizó un análisis estadístico para

determinar cuales son las distribuciones que más se asemejan al comportamiento de los datos, siendo estos los desplazamientos dinámicos del puente *El Carrizo*.

5.11. Probabilidades de falla (p_f) a partir de desplazamientos dinámicos

La probabilidad de falla p_f se refiere a la seguridad de la estructura. Por lo tanto, durante el diseño de las estructuras, la probabilidad de falla debe ser considerablemente baja. Para dos límites particulares a y b , la p_f se puede calcular como (Nowak y Collins, 2012):

$$p_f = 1 - P(a < X \leq b) \quad (5.14)$$

donde X , para el caso de este trabajo de investigación, es el desplazamiento dinámico; a y b son límites que definen cierto nivel de seguridad en el puente. La Figura 5.17 ilustra cómo se calculará la p_f utilizando los límites a y b en términos de milímetros (mm).

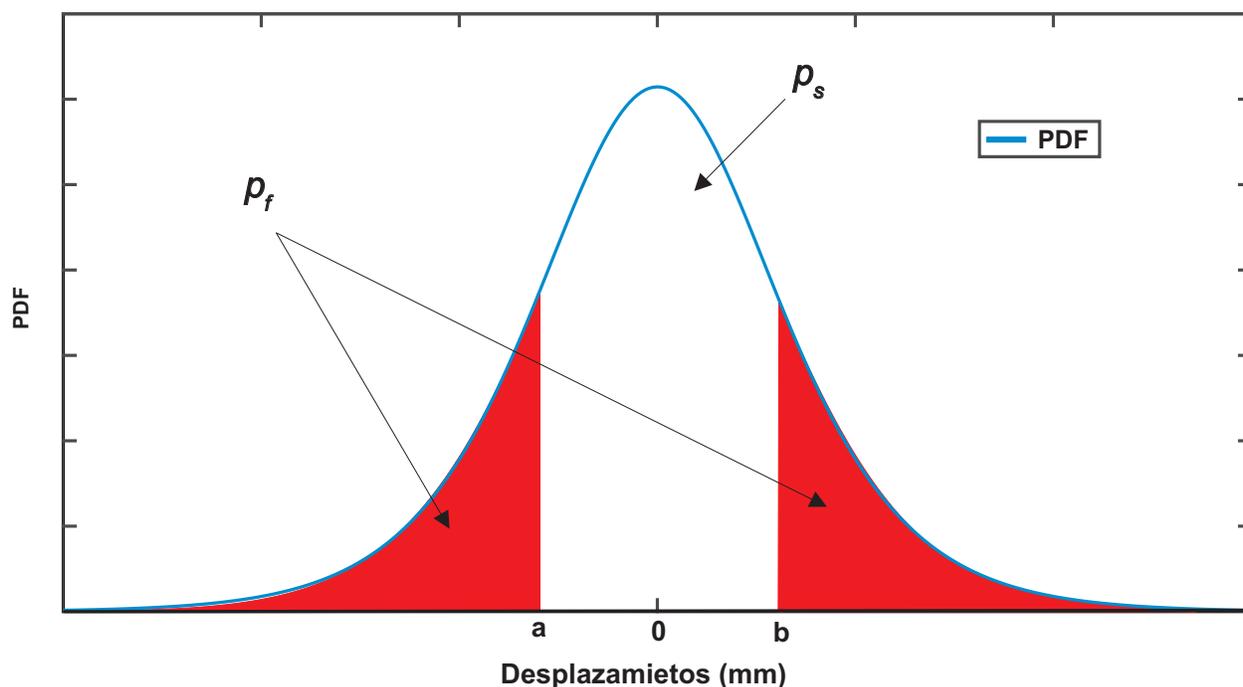


Figura 5.17: PDF con los límites correspondientes de los desplazamientos dinámicos.

Trabajando en el lado derecho de la Ecuación 5.14, la probabilidad se puede calcular como (Nowak y Collins, 2012):

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f_x(x) dx \quad (5.15)$$

donde $f_x(x)$ es el PDF de los desplazamientos dinámicos obtenidos a través de PPP-GNSS.

Para este trabajo de investigación, $f_x(x)$ se refiere a la función de probabilidad de las 15 distribuciones utilizadas, y para a, b , los límites van de 1 a 8 mm, ya que son los desplazamientos dinámicos máximos que se toman para que los cálculos sean considerables al momento de determinar p_f y el β .

5.12. Índice de confiabilidad (β) a partir de la probabilidad de falla

Los puentes están en interacción constante con diferentes factores, como el tráfico, las cargas de viento y terremotos, etc. Estas y otras cargas causan ciertos deterioros estructurales. Por lo tanto, es muy importante expresar la confiabilidad de los puentes en términos de un factor específico. Dicho factor o índice se conoce comúnmente en la literatura como índice de confiabilidad (Nowak y Collins, 2012); en lo sucesivo denotado simplemente como β . En términos generales, β es la confiabilidad asociada a un sistema para lograr la función requerida en condiciones de rendimiento específicas durante un período de tiempo determinado (Lemaire, 2013). Además, β está estrechamente relacionado con p_f , y puede expresarse de la siguiente manera:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (5.16)$$

donde Φ^{-1} es la función de distribución acumulativa inversa (CDF, por sus siglas en inglés) de interés, obviamente relacionada con el *PDF* de los datos en consideración.

Para el cálculo de la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad, se utilizó la herramienta de cálculo MATLAB, donde se utilizaron los comandos de probabilidad.

5.13. Procesamiento de las mediciones del extensómetro, inclinómetro y el LVDT

Los sensores utilizados en esta investigación, como bien se describen en las Secciones 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, la información recabada por cada uno, fue procesada de diferente manera, esto debido a la naturaleza en la que cada sensor registra su medición. Para el caso del sensor GNSS, su procesamiento se describe en la Sección 5.6. Por otro lado, los sensores como el extensómetro, inclinómetro y el LVDT fueron procesados utilizando otra alternativa. Como primero paso, estos sensores fueron instalados como una red de sensores inalámbricos, siendo un sistema de adquisición de datos de sensores de alta velocidad y escalable. Cada sistema consta de nodos de interfaz de sensor inalámbricos, un Gateway o interfaz de enlace de recopilación de datos y plataformas de software de usuario. En la Figura 5.18 se visualiza el sistema utilizado para la adquisición de datos. La comunicación inalámbrica bidireccional entre el nodo y la puerta de enlace permite la recopilación y configuración de datos del sensor desde grandes distancias. Esto permite que en la práctica sea de mucha utilidad, porque durante la rehabilitación del puente existen muchos camiones y personal que se desplaza por la zona afectada y si por esa zona se colocará cableado, la

5.13. PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES DEL EXTENSÓMETRO, INCLINÓMETRO Y EL LVDT95

adquisición de datos sería alterada por algún posible daño en los cables. El dispositivo de enlace se conecta a una computadora a través de vía USB.

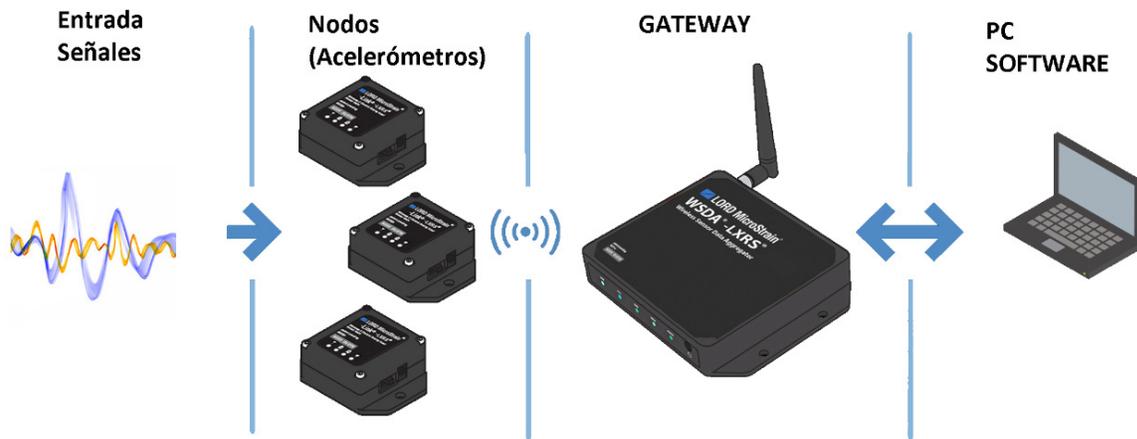


Figura 5.18: Sistema de adquisición de datos para los sensores extensómetros, inclinómetros y LVDT.

Capítulo 6

Análisis y Resultados

6.1. Introducción

En este capítulo, se abordarán los resultados derivados de la metodología descrita en el capítulo 5 y se realizará un análisis profundo de cada uno de ellos. Por otro lado, el presente capítulo se divide en dos secciones, siendo estas: resultados de los desplazamientos obtenidos para la prueba de carga 1 y 2, y un análisis estadístico del comportamiento de los desplazamientos dinámicos; así como el cálculo de la probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos y el índice de confiabilidad (β) a partir de la probabilidad de falla.

Para el caso de los desplazamientos dinámicos extraídos con diferentes filtros, los cuales se mencionan en las Secciones 5.9.4.1 y 5.9.4.2, para cada prueba de carga se generaron 3 conjuntos de datos de los desplazamientos dinámicos correspondientes a cada filtro. Siendo un total de 6 conjuntos de desplazamientos dinámicos, y a cada conjunto se le realizó una prueba de bondad χ^2 para determinar la función de probabilidad que más se ajusta y así determinar la probabilidad de falla a partir de la función de densidad de probabilidad considerando diferentes límites. A partir de cada probabilidad de falla calculada de los diferentes conjuntos de desplazamientos dinámicos, se determinaron los índices de confiabilidad. Todos los procesos de cálculo se realizaron con la herramienta de cómputo MATLAB[®].

6.2. Resultados para la prueba de carga 1

6.2.1. Desplazamientos crudos del post-procesado

La primera prueba de carga tuvo una duración aproximada de 28 minutos, donde se colocaron 2 vehículos tipo T3-S3 en diferentes tiempos tal como se explica en la Figura 5.9, registrando el comportamiento del puente por el peso de los camiones con el receptor GNSS y posteriormente enviando los archivos de observación generados en la medición al servicio online CSRS-PPP para un post-procesamiento y así, recibir un archivo con coord-

nadas geodésicas ϕ , λ y h , tomando la componente vertical h^1 para generar la gráfica de la Figura 6.1 que representa el comportamiento del doble voladizo durante el paso de los camiones.

En la Figura 6.1 se representan los desplazamientos crudos, donde se identifican aquellos que no han sido modificados después del post-procesamiento. El eje 'y' corresponde a la altura elipsoidal, es decir, la altura del centro del elipsoide al punto donde se colocó el receptor GNSS. Sin embargo, los valores de h no se representan como referencia a la estructura, sino, al elipsoide. Por lo cual, es necesario aplicar la Ecuación 5.1 a la serie de tiempo de la Figura 6.1 para obtener desplazamientos aparentes, dichos desplazamientos se pueden ver en la Figura 6.2, estos son referidos alrededor de un cero relativo que representa el nivel de referencia del punto de monitoreo sobre la estructura.

Las Figuras 6.1 y 6.2 representan la misma serie de tiempo pero en diferente escala en la componente del eje y , por lo cual, se describirá la Figura 6.1 considerando los mismos efectos en la Figura 6.2. Se observa en la Figura 6.1 que la serie de tiempo está muy contaminada con ruido, este ruido se relaciona al efecto del *multipath* y a los saltos de ciclo producidos principalmente por la superestructura. En la parte inferior de la Figura 6.1 se observan 3 ilustraciones que representan a la colocación de los vehículos tipo T3-S3 y la línea punteada vertical de color negro representa al tiempo donde se colocó cada camión.

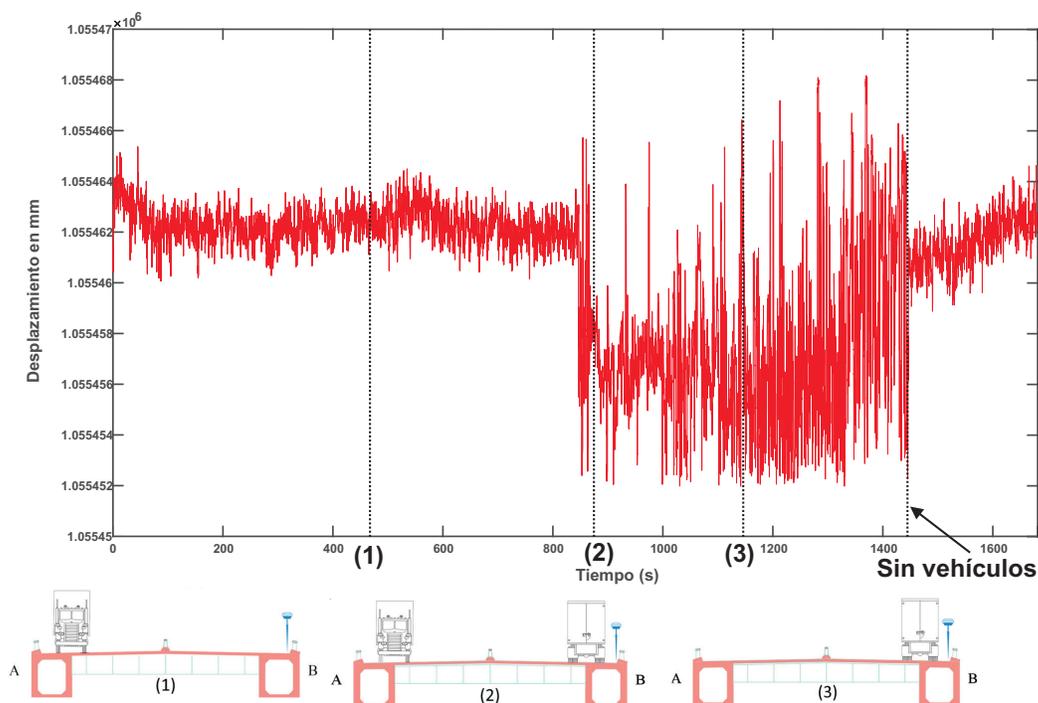


Figura 6.1: Desplazamientos crudos de la primera prueba de carga.

¹ h es la altura elipsoidal.

También, se observa que el paso de los vehículos es una fuente de *multipath* y saltos de ciclo al obstruir la señal y ser una superficie reflejante, esto se visualiza en los primeros minutos de medición en la serie de tiempo, que permanece constante hasta la llegada de los camiones.

6.2.2. Desplazamientos aparentes

La Figura 6.2 ilustra a los desplazamientos aparentes los cuales contienen ruido, para esto es necesario aplicar un tipo de filtrado adaptativo para mitigar esta fuente de error. Por lo cual, a la serie de tiempo de la Figura 6.2 se le aplicó un filtro adaptativo LMS y el resultado se puede observar en la Figura 6.3.

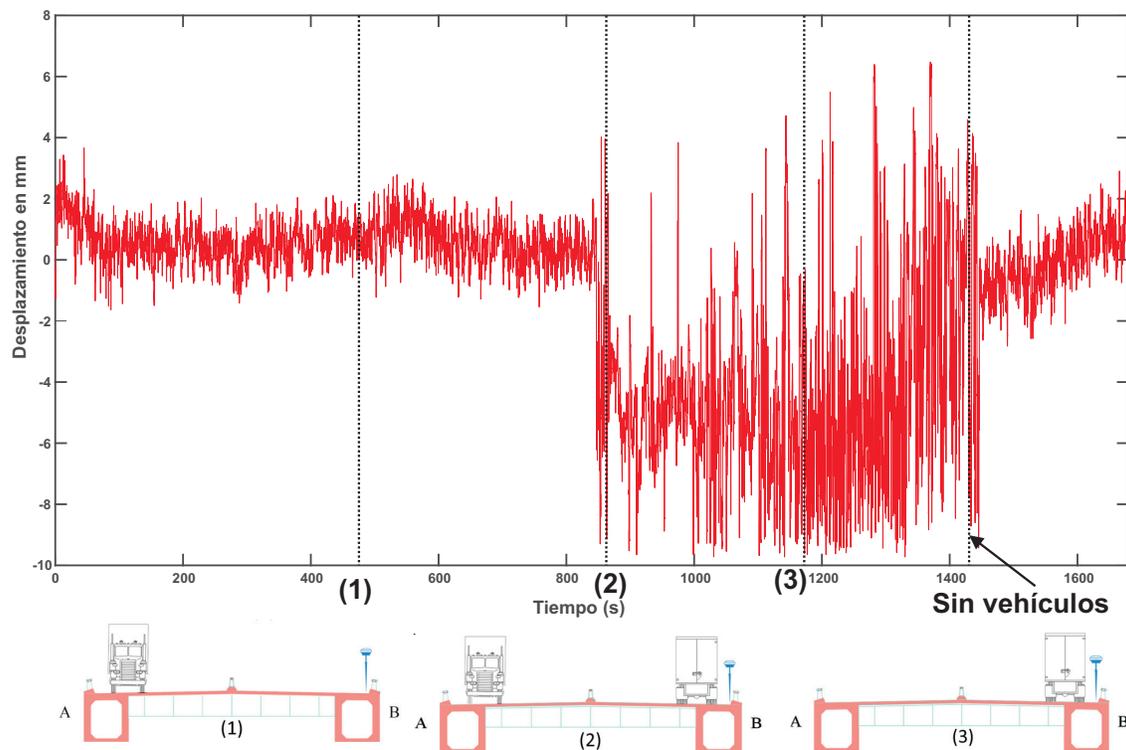


Figura 6.2: Desplazamientos aparentes de la primera prueba de carga.

6.2.3. Aplicación del filtro adaptativo-LMS

Los filtros adaptativos se usan donde las señales están cambiando con el tiempo, ya que en este tipo de señales, los filtros con coeficientes fijos no funcionan. Para el caso de la señal (serie de tiempo) obtenida con el receptor GNSS, esta tiene un comportamiento dinámico con respecto al tiempo, por esta razón el filtro adaptativo es una atractiva forma de mitigar el ruido en la señal. Considerando la configuración planteada en la sección

5.9.2, se sustituyó la señal del receptor GNSS de los desplazamientos aparentes y se obtuvo una señal con un grado de mitigación de ruido considerablemente bueno para poder obtener el desplazamiento de interés para esta investigación. Se escogió el algoritmo LMS (*Least Mean Square*) como herramienta matemática para conseguir una solución al problema de cancelación de ruido. En la Figura 6.3 se observa el resultado del filtro adaptativo LMS.

Se observa que el filtrado ayuda a minimizar los errores correspondientes al error del *multipath*, principalmente en el tiempo que corresponde a la llegada del vehículo al lado del receptor GNSS, donde se relaciona directamente el ruido al vehículo.

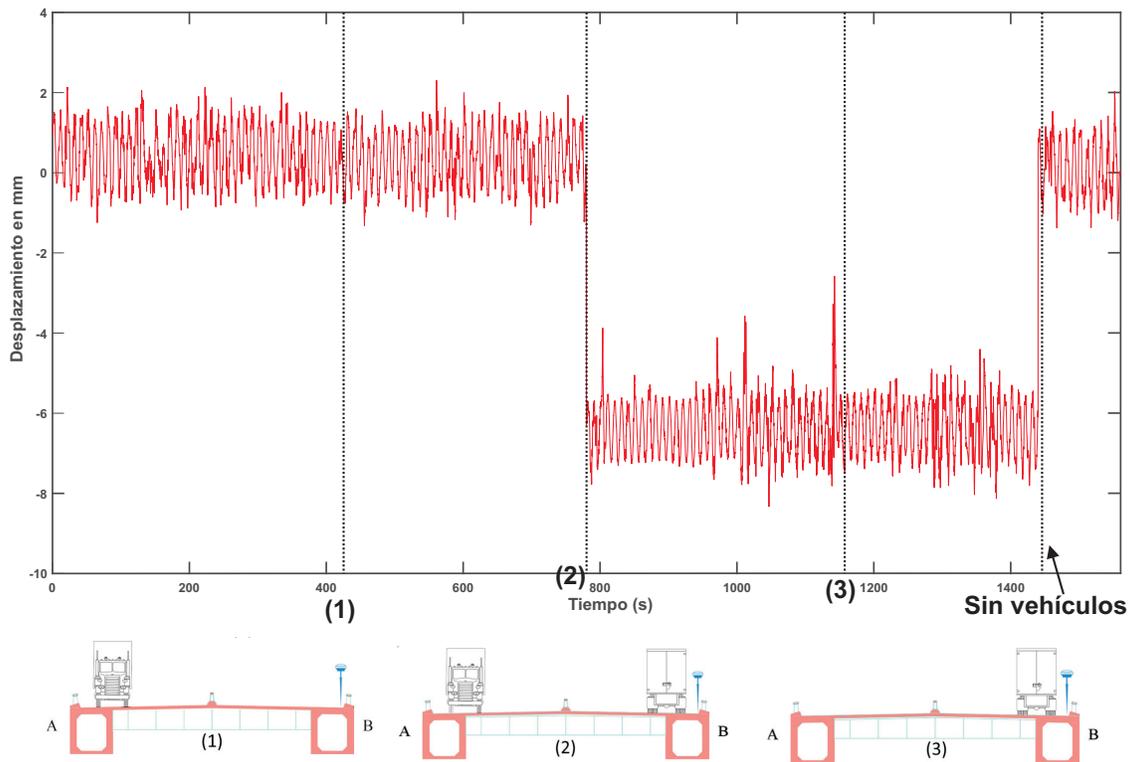


Figura 6.3: Mitigación del *multipath* en la serie de tiempo de los desplazamientos aparentes de la primera prueba de carga.

6.2.4. Desplazamientos semi-estáticos

A partir de la Ecuación 5.7 que corresponde al filtro de la media móvil (ver sección 5.9.3.1) se logró llevar a un nivel de suavizado la serie de tiempo correspondiente al resultado del filtro LMS. Este suavizado se puede ver en la Figura 6.4, a este desplazamiento se le suele llamar desplazamiento semi-estático y representa de mejor manera el comportamiento real del puente. Los desplazamientos máximos de la estructura para la prueba de carga 1 se pueden visualizar en la Figura 6.4, de esta manera se logra determinar los des-

plazamientos causados por el peso de los vehículos sobre la estructura del doble voladizo con una precisión en el orden los milímetros (\simeq mm).

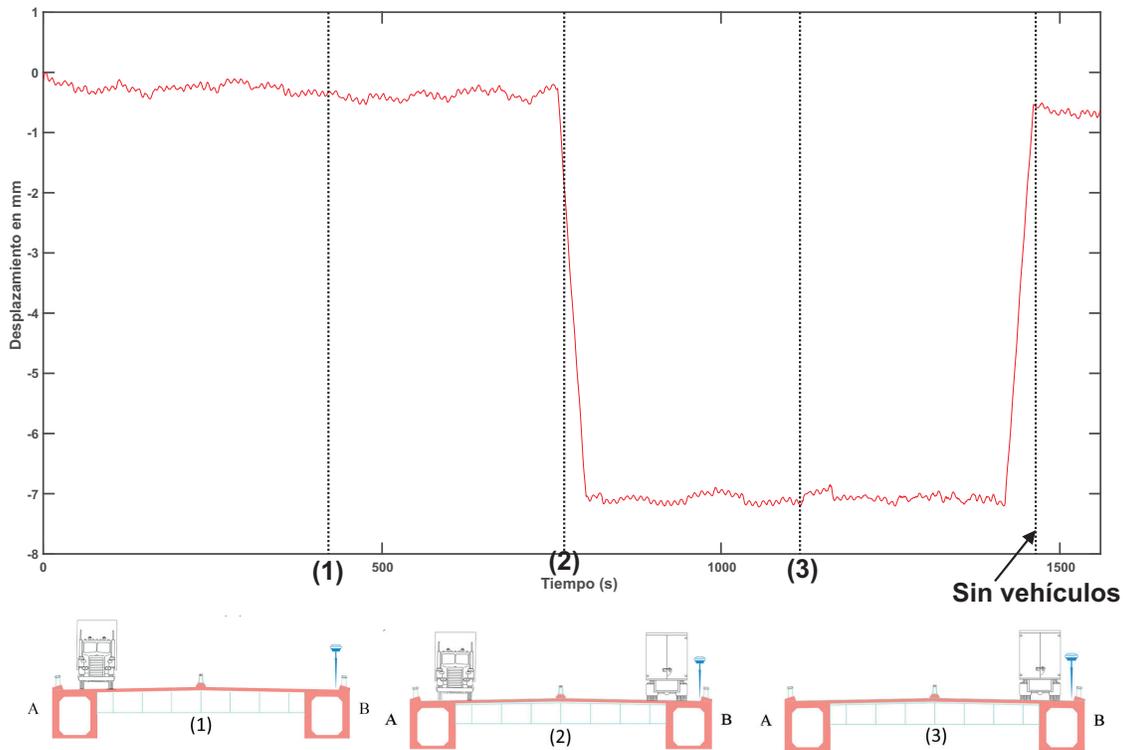


Figura 6.4: Desplazamientos semi-estáticos de la primera prueba de carga.

6.2.5. Comparación entre las mediciones de los diferentes sensores

Cuando la estructura del doble voladizo es sometida a cargas vivas sufre diferentes alteraciones, donde se pueden mencionar: deformaciones de tensión y compresión, deflexiones (desplazamientos), cambios en la inclinación y aceleración. Considerando que esta investigación tiene como objetivo implementar la técnica de posicionamiento puntual preciso como una alternativa para medir los desplazamientos en puentes. Se normalizaron los datos obtenidos con el extensómetro, LVDT, inclinómetro y GNSS para graficar los en conjunto y poder visualizar el comportamiento del puente en diferentes magnitudes. Esto se representa en la Figura 6.5, donde el desplazamiento registrado con el receptor GNSS no sigue el mismo comportamiento que los otros sensores, principalmente a que la tecnología PPP-GNSS no puede registrar desplazamientos menores a 6-8 milímetros para esta investigación, y el desplazamiento ocurrido en el punto 1 fue de aproximadamente 6 mm, lo cual no es posible registrarlo por el receptor GNSS. Solamente se registra el desplazamiento ocasionado por el peso del vehículo en el cuerpo B, que fue donde se colocó el

sensor GNSS. Por otro lado, se puede observar en la Figura 6.5 que los escalones registrados con el sensor GNSS coinciden con los escalones de las otras magnitudes, demostrando así la confiabilidad de registro de desplazamientos con la tecnología GNSS cuando los desplazamientos son mayores a 6 milímetros o más.

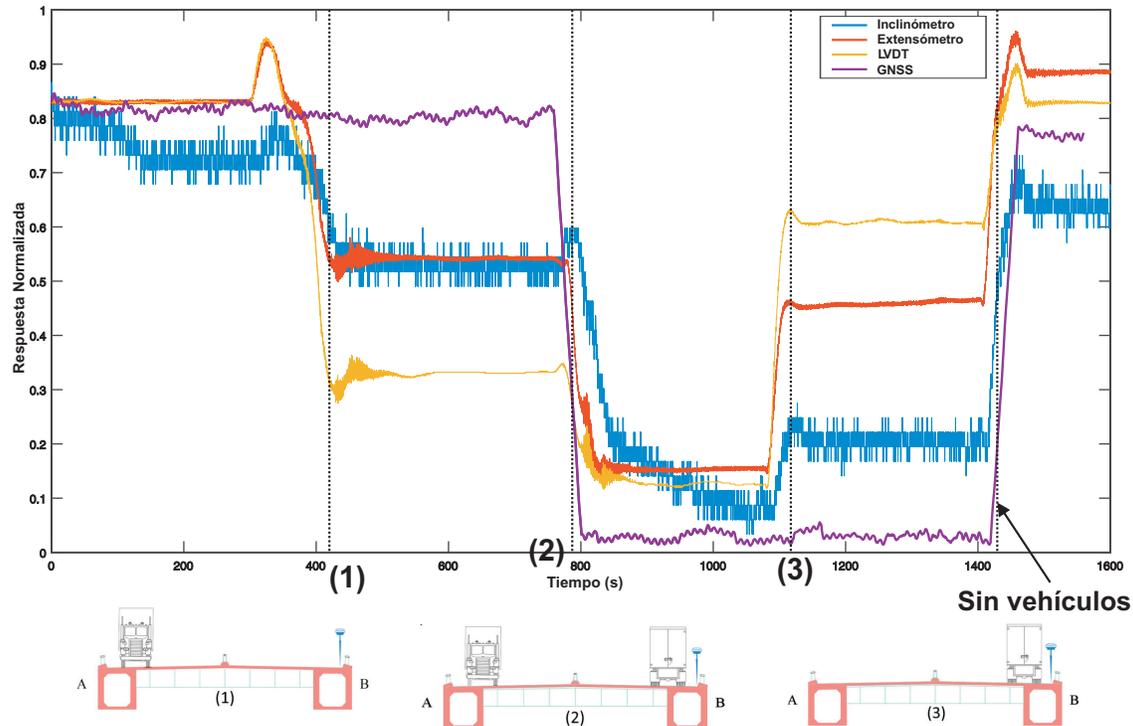


Figura 6.5: Comportamiento del puente *El Carrizo* registrado con diferentes sensores, de la primera prueba de carga.

6.2.6. Comparación entre los desplazamientos obtenidos con la tecnología GNSS y el sensor LVDT para la prueba de carga 1

Los desplazamientos obtenidos con el sensor LVDT fueron utilizados de referencia para poder determinar el grado de precisión del sensor GNSS para el registro de desplazamientos. Para el caso de los sensores que miden directamente el desplazamiento: sensor LVDT y GNSS, se creó una gráfica para observar las comparaciones entre estos sensores. En la Figura 6.6 se observan las diferencias de los desplazamientos obtenidos con estos sensores. Se tienen desplazamientos diferentes debido a que los sensores estaban colocados en diferentes cuerpos tal como se observa en la Figura 5.8, por lo cual, cada sensor registró el desplazamiento ocurrido sobre el puente por el peso de los vehículos T3-S3 con diferente magnitud. Entre mayor sea la cercanía del sensor a la colocación del vehículo, mayor será la sensibilidad de registrar el desplazamiento ocasionado.

Cuando se colocó el primer vehículo T3-S3 sobre la dovela 8 del cuerpo A en dirección

hacia Durango, el puente sufrió una deformación por el peso del vehículo, esta deformación la registró el sensor LVDT como un desplazamiento de aproximadamente 6 mm. Sin embargo, para el caso del sensor GNSS no fue posible registrar ese desplazamiento ya que el cuerpo A fue el que sufrió más desplazamiento que el cuerpo B, y para el cuerpo B el desplazamiento ocasionado por el vehículo colocado en el cuerpo A fue de aproximadamente 3 mm, un desplazamiento invisible para el sensor GNSS por eso no se aprecia el escalón definido por el peso del primer vehículo colocado sobre la estructura.

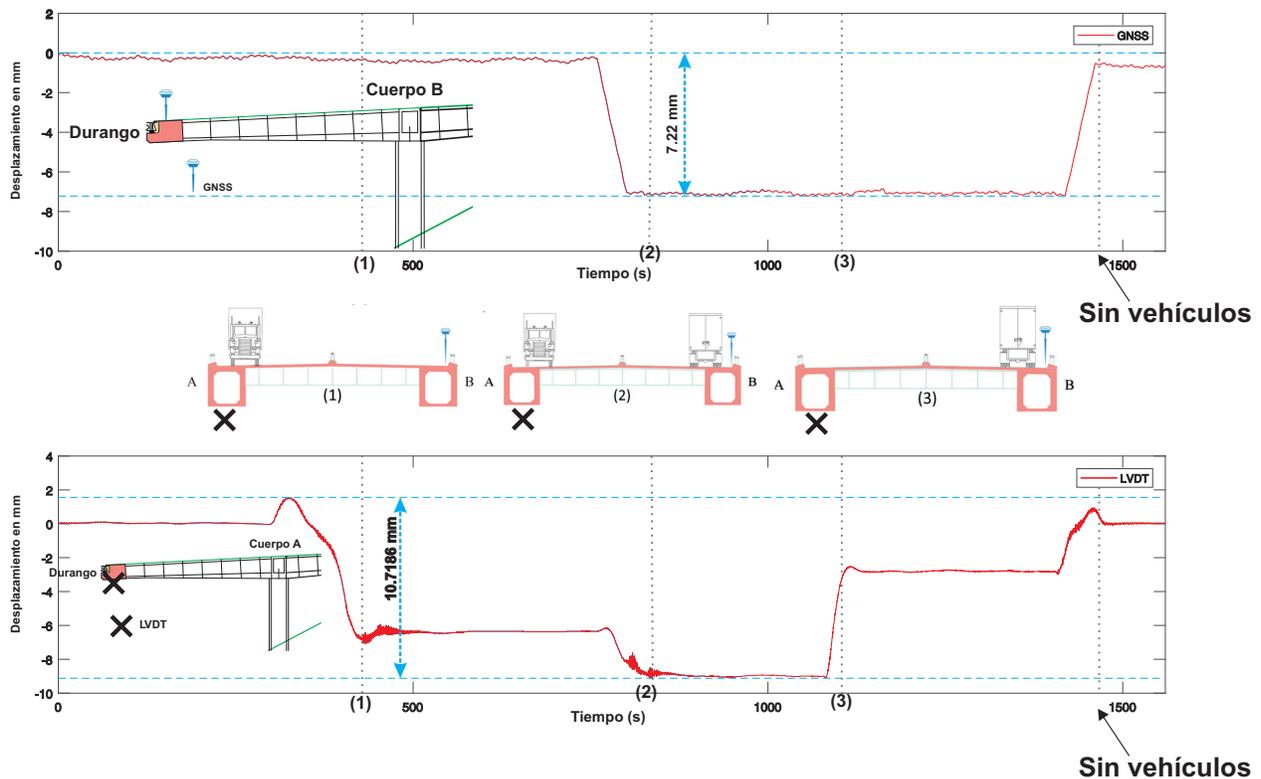


Figura 6.6: Desplazamientos obtenidos de la primera prueba de carga con el sensor *LVDT* y el receptor *GNSS*.

Para el caso del segundo vehículo, el cual se colocó en la dovela 8 del cuerpo B en dirección hacia Durango, el cuerpo B sufrió deformación considerable para el registro del desplazamiento con el sensor *GNSS*. El desplazamiento ocasionado por el peso de este vehículo y registrado por el sensor *GNSS* fue de aproximadamente 7.22 mm para el cuerpo B y para el sensor *LVDT* (colocado en el cuerpo A) fue de aproximadamente 3 mm. Es decir, el desplazamiento total de la estructura con el peso de los vehículos fue de 7.22 mm y 10.718 mm para el sensor *GNSS* y el sensor *LVDT*, respectivamente. Cuando el vehículo colocado en la dovela 8 sobre el cuerpo A sale de la estructura, esta se recupera a su estado normal sin cargas vivas en un porcentaje del 66%. Es decir, el cuerpo A recupera los 6 mm ocasionado por el peso del primer vehículo, pero debido al peso del vehículo que aún se encuentra en

el cuerpo B, la estructura del cuerpo A no se encuentra en su posición original y conserva aproximadamente 2 mm por encima (registrado por el sensor LVDT). El desplazamiento ocurrido por la salida del vehículo colocado en el cuerpo A no fue registrado por el sensor GNSS. Cuando sale de la estructura el vehículo colocado sobre el cuerpo B, la estructura vuelve a su estado original, registrando un desplazamiento aproximado de 2 mm y 7 mm con el LVDT y el sensor GNSS, respectivamente. En la Figura 6.6 se observa que durante la salida de los vehículos del puente las series de tiempo correspondientes a los desplazamientos vuelven al origen completamente estático (desplazamiento 0) para el caso del sensor LVDT, pero para el sensor GNSS no, esto debido a la precisión alcanzada por el sensor GNSS.

En la llegada de los vehículos al punto correspondiente a la dovela 8 de los cuerpos A y B de la dirección hacia Durango, se observa que estos vehículos excitan a la estructura reflejándose estas vibraciones en las mediciones del sensor LVDT así como se observa en la Figura 6.6. Estas vibraciones son registradas solamente a la entrada de los vehículos y no a la salida, esto es porque cuando los vehículos se van a posicionar sobre cada cuerpo llegan con una cierta velocidad que hace vibrar a la estructura hasta que terminan en reposo, y para el caso de la salida es inverso, los vehículos salen del reposo a una velocidad relativamente baja que no ocasiona vibración sobre la estructura. En la Tabla 6.2 se observan los desplazamientos medidos para la prueba de carga 1 con la tecnología GNSS y el sensor LVDT.

6.2.7. Desplazamientos dinámicos

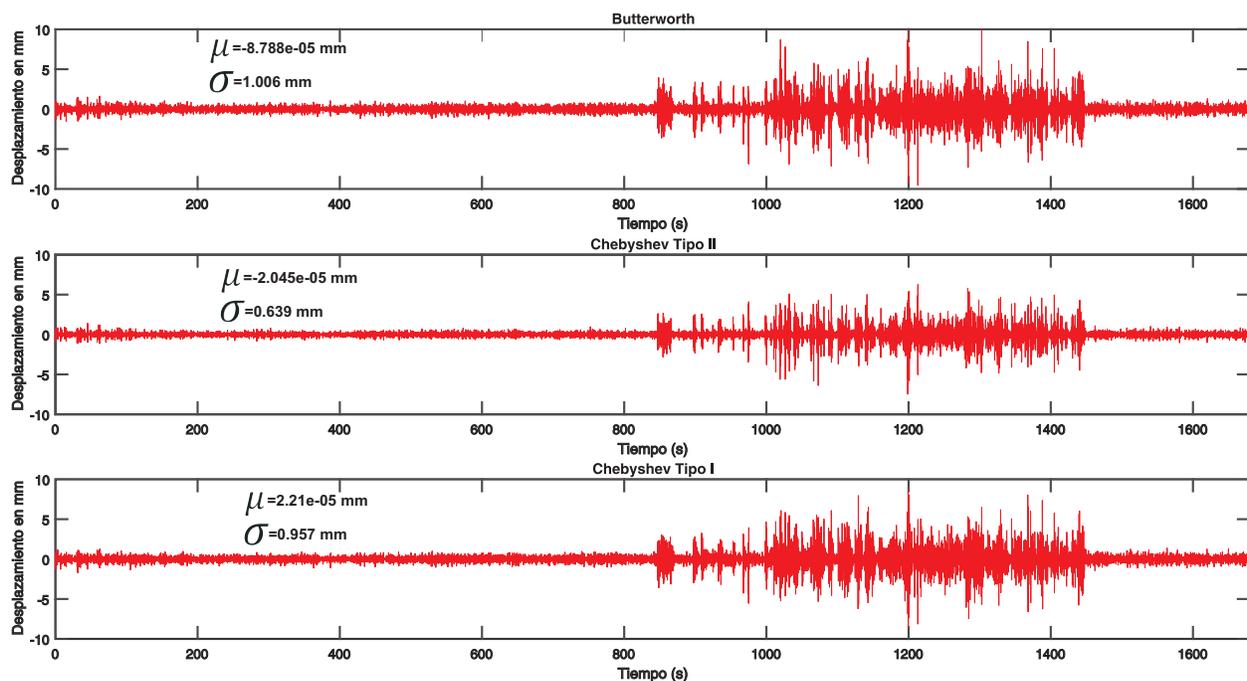


Figura 6.7: Desplazamientos dinámicos extraídos con diferentes filtros de la primera prueba de carga.

Los desplazamientos dinámicos en la mayoría de los trabajos reportados en el área del monitoreo estructural con la tecnología GNSS son extraídos utilizando el filtro Chebyshev tipo I con un orden de 8. Para este trabajo de investigación, el autor propone dos filtros más para extraer desplazamientos dinámicos. Donde estos filtros son el Butterworth y el Chebyshev tipo II que son explicados en las Secciones 5.9.4.2 y 5.9.4.1. En la Figura 6.7 se observan los desplazamientos dinámicos extraídos con los diferentes filtros, donde a estos desplazamientos se les determinó la media (μ) y la desviación estándar (σ). También se realizó la correlación entre los desplazamientos que se pueden ver en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Correlación entre los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro para la primera prueba de carga.

Filtros	Correlación
Chebyshev Tipo I-Chebyshev Tipo II	0.1753
Chebyshev Tipo I-Butterworth	0.3250
Chebyshev Tipo II-Butterworth	0.0610

Los valores estadísticos nos dicen que el filtro Chebyshev Tipo II es el que tiene menor desviación estándar (σ), donde esto significa que la dispersión de los datos es menor y esto se puede observar en la Figura 6.7 donde los desplazamientos dinámicos extraídos con los filtros Chebyshev tipo I y Butterworth tienen valores de desplazamientos mayores cercanos a 10 mm. Las características del diseño de los filtros fueron igual para los tres casos, por lo cual, los resultados estadísticos están directamente relacionados a las propiedades de cada filtro y no a sus características de diseño. Para el caso de la media (μ), esta es siempre muy cercana a 0, debido a que a los datos de entrada para los filtros se le aplicó la Ecuación 5.1 dejándolos con una media igual a cero (a los datos de entrada se les restó la media). Considerando los valores que se muestran en la Tabla 6.1, los filtros que tienen mayor similitud para extraer desplazamientos dinámicos son el Butterworth y Chebyshev tipo I.

6.2.8. Comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos

A partir del conjunto de datos que representan a los desplazamientos dinámicos extraídos con diferentes filtros se generaron sus respectivos histogramas, como se observa en la Figura 6.8. El comportamiento probabilístico de los desplazamientos dinámicos es indispensable conocerlo para el cálculo de la probabilidad de falla (p_f) y el índice de confiabilidad (β), ya que los resultados se deben apegar lo más posible a lo real. En la Figura 6.8 se visualiza el comportamiento de los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro, teniendo un comportamiento muy similar entre ellos.

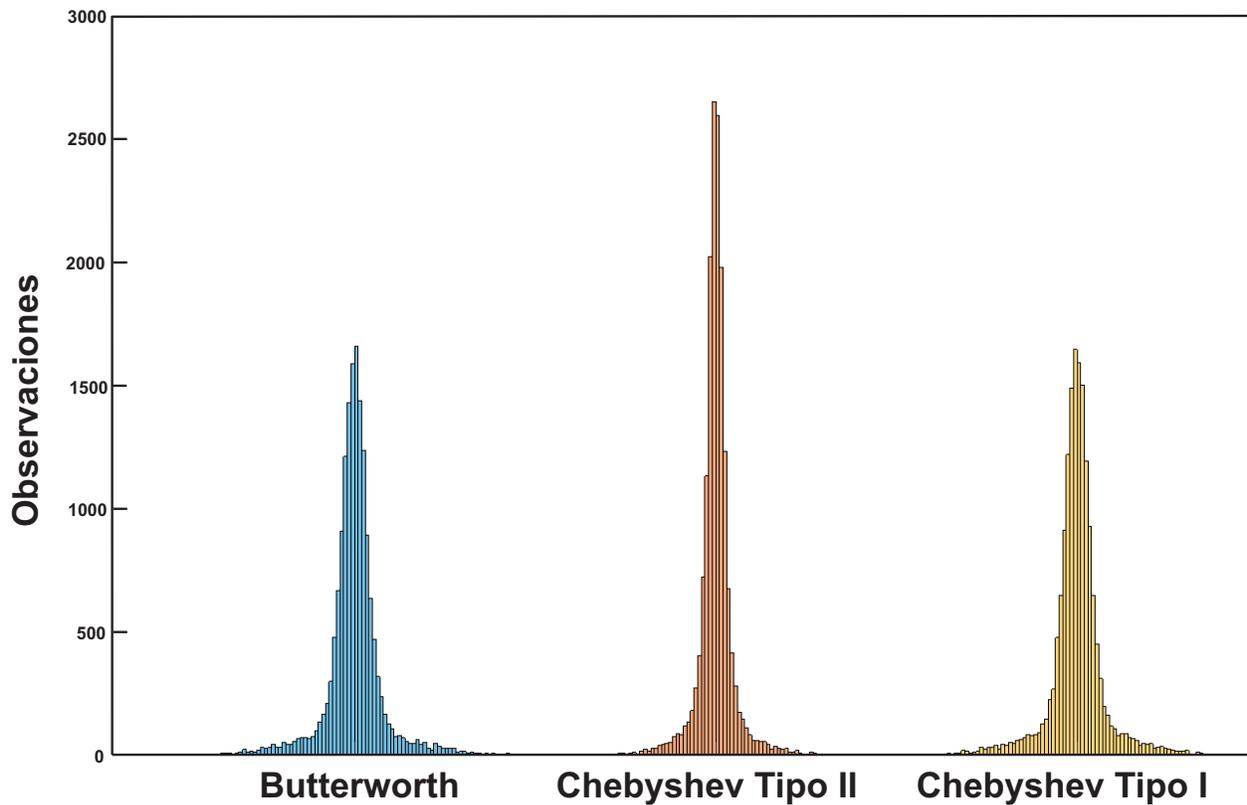


Figura 6.8: Histogramas de los desplazamientos dinámicos obtenidos con los filtros: Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II.

6.2.9. Ajuste de distribuciones

Para determinar cuál es la función de densidad de probabilidad (*PDF*, por sus siglas en inglés) que mejor se ajusta a los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro, se realizó una prueba de bondad de χ^2 , dando como resultado un *PDF* que se utilizará para el cálculo de la p_f . En las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11 se observa el ajuste de 15 distribuciones a los desplazamientos dinámicos de cada filtro, donde la mayoría de las funciones no cubre la superficie total del histograma y por lo tanto no representan el comportamiento probabilístico más real de los desplazamientos. Las 15 funciones de probabilidad utilizadas en este trabajo fueron seleccionadas considerando el software MATLAB, donde estas distribuciones están integradas en su módulo de probabilidad. La Figura 6.9 representa los desplazamientos dinámicos extraídos por el filtro Butterworth, donde la distribución que mejor se ajustó fue la kernel, esto debido a que la distribución kernel define una función que se ajuste a los datos ² y de esta manera el ajuste es el más confiable al momento del cálculo de la probabilidad de falla (p_f) y el índice de confiabilidad (β).

²Para un mejor entendimiento de la distribución kernel ir a la sección 4.3.1.10.

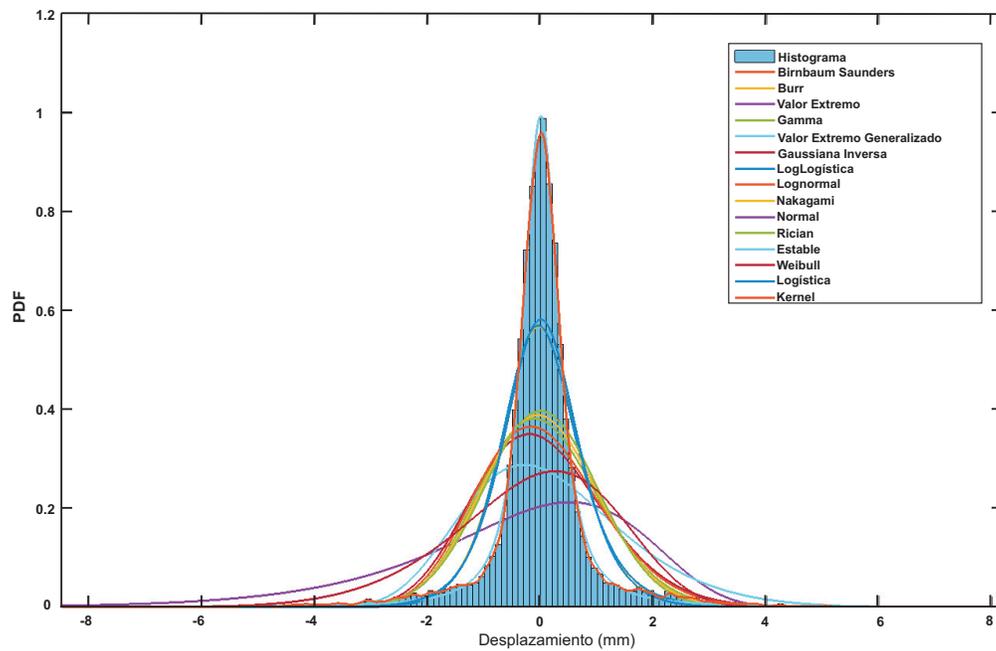


Figura 6.9: Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Butterworth.

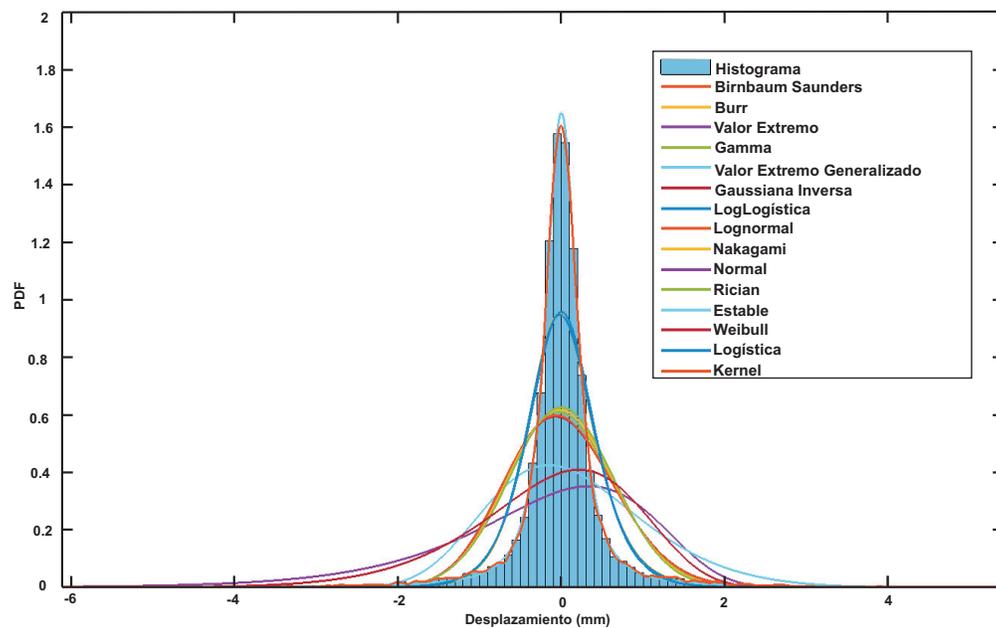


Figura 6.10: Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo II.

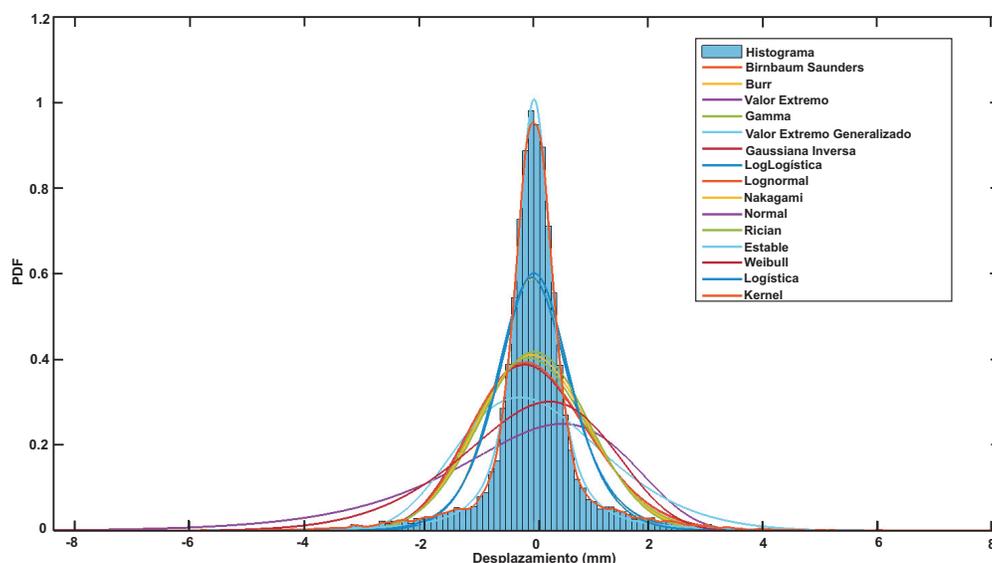


Figura 6.11: Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo I.

Para el caso de la Figura 6.10 que representa a los desplazamientos dinámicos extraídos del filtro Chebyshev tipo II, la distribución que mejor ajuste tuvo a partir de la prueba de bondad χ^2 fue la kernel y estable. Estas dos distribuciones tienen características parecidas al momento de definir una función que describa el comportamiento aleatorio de los datos a analizar. Para el caso de la Figura 6.11 que representa los desplazamientos dinámicos extraídos por el filtro Chebyshev tipo I, la distribución kernel fue la que mejor ajuste tuvo a partir del resultado de la prueba de bondad χ^2 .

Tabla 6.2: Resumen de los desplazamientos máximos registrados con la tecnología GNSS y el sensor LVDT para ambas pruebas de carga sobre el puente *El Carrizo*.

	PPP-GNSS	LVDT	Δ desplazamiento
Prueba 1	7.22 ± 5 mm	10.71 ± 0.1 mm	3.49 mm
Prueba 2	11.25 ± 5 mm	11.61 ± 0.1 mm	0.36 mm

6.3. Resultados para la prueba de carga 2

6.3.1. Desplazamientos crudos del post-procesado

La segunda prueba de carga tuvo una duración aproximada de 35 minutos, donde se colocaron 4 vehículos tipo C3 en diferentes tiempos tal como se explica en la Figura 5.11, donde se registró el comportamiento del puente por el peso de los vehículos con la tecnología GNSS. Una vez realizado el registro de la medición sobre el puente, los archivos de observación fueron enviados al servicio online CSRS-PPP para un post-procesamiento de los mismos y calcular las coordenadas de interés. Siendo estas coordenadas geodésicas ϕ , λ y h , tomando la componente vertical h para el análisis del comportamiento de la superestructura del puente.

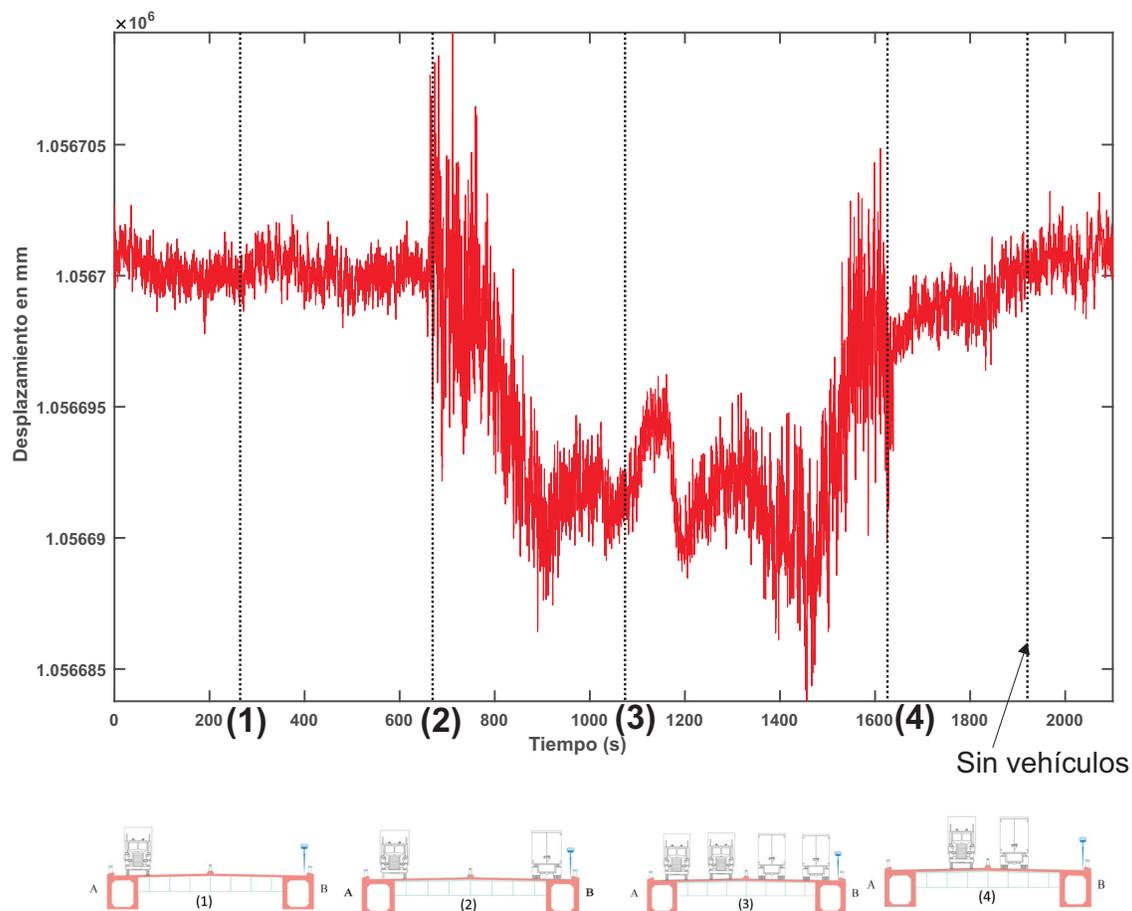


Figura 6.12: Desplazamientos crudos de la segunda prueba de carga.

La Figura 6.12 representa los desplazamientos ocurridos sobre la estructura del doble voladizo durante la posición de los vehículos C3 en diferentes tiempos. La componente y de la Figura 6.12 representa la altura elipsoidal, es decir, una de las tres componentes que registra el receptor GNSS y que define el comportamiento vertical de la estructura, sin

embargo, esta altura esta referida a un elipsoide y es necesario tomar el valor cero como referencia para una mejor interpretación de los desplazamientos ocurridos sobre el doble voladizo. Por lo cual, a los desplazamientos de la Figura 6.12 se le aplicó la Ecuación 5.1 para dejar los desplazamientos referidos alrededor de un cero relativo que representa el nivel de referencia del punto de monitoreo sobre la estructura. El comportamiento en las series de tiempo de las Figuras 6.12 y 6.13 es el mismo, pero la diferencia de estas figuras es que una esta referida a la altura elipsoidal y la otra a un 0 relativo. A la primera se le llaman desplazamientos crudos y a la segunda desplazamientos aparentes. A los desplazamientos aparentes se les dio un tratamiento para extraer los desplazamientos de interés de esta investigación.

6.3.2. Desplazamientos aparentes

El efecto del *multipath* producido por los cables y los vehículos se puede observar claramente en la Figura 6.13, donde este error es necesario mitigarlo a partir de filtros digitales para tener una serie de tiempo más limpia y así poder cuantificar los desplazamientos.

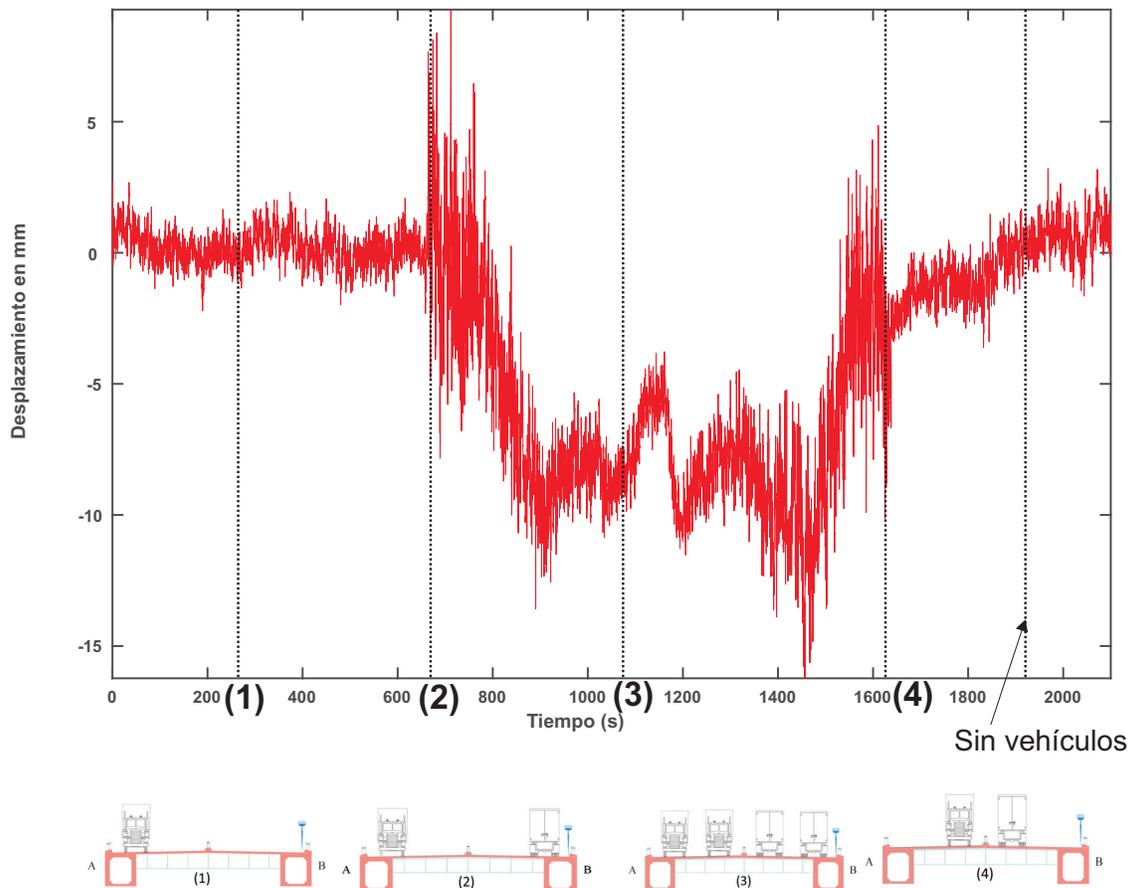


Figura 6.13: Desplazamientos aparentes de la segunda prueba de carga.

Aplicando el filtro LMS (ver Sección 5.9.2) a la serie de tiempo de los desplazamientos aparentes se logró mitigar en un porcentaje considerable el efecto del *multipath*. Se observa en la Figura 6.14 que las amplitudes altas en las series de tiempo fueron suavizadas por el filtro LMS y la serie de tiempo tiene un comportamiento más real al del doble voladizo cuando se colocaban los vehículos.

6.3.3. Aplicación del filtro adaptativo-LMS

A los desplazamientos obtenidos por el filtro adaptativo-LMS se le aplicó el filtro de la media móvil para extraer los desplazamientos semi-estáticos, siendo estos, desplazamientos lentos en períodos de tiempo largo. Las características del filtro de la media móvil se describen en la sección 5.9.3.1, y el resultado de aplicar este filtro sobre la serie de tiempo resultante del filtro LMS se visualiza en la Figura 6.15.

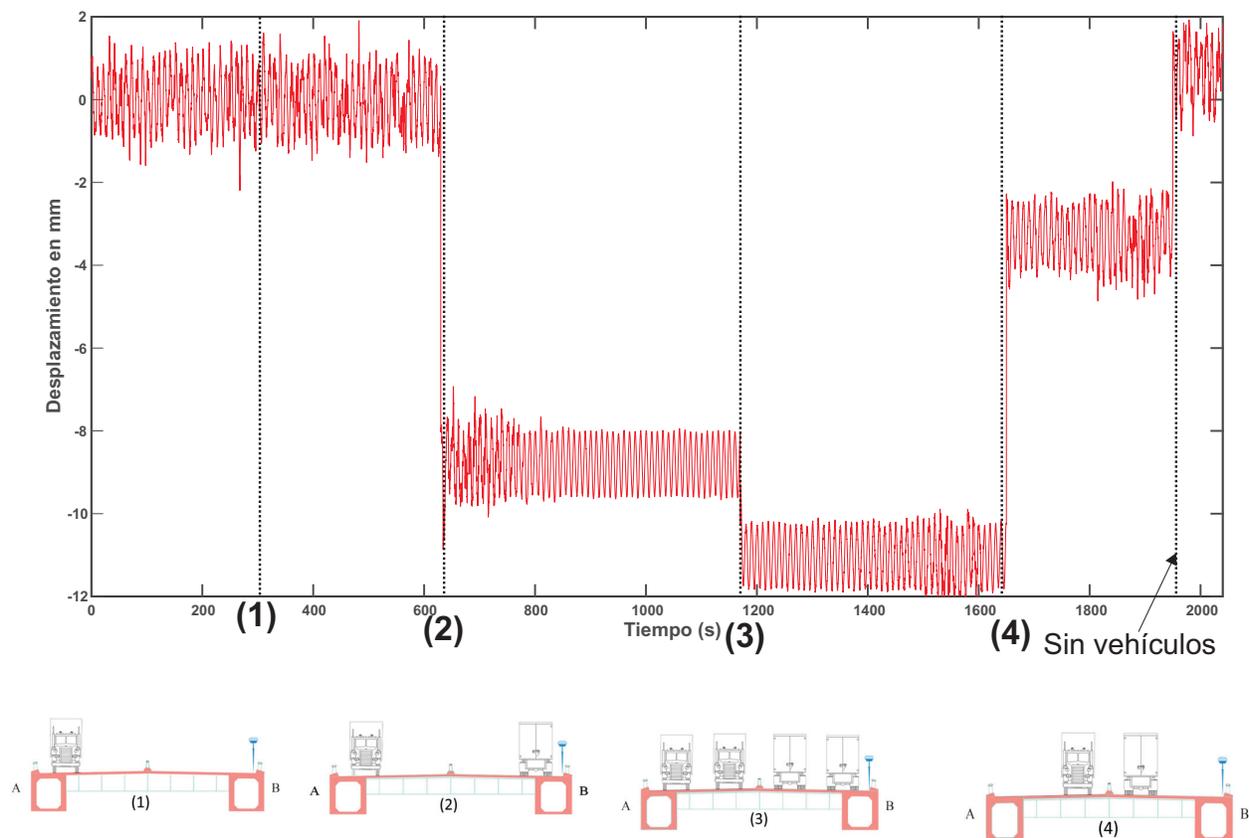


Figura 6.14: Mitigación del *multipath* en la serie de tiempo de los desplazamientos aparentes de la segunda prueba de carga.

6.3.4. Desplazamientos semi-estáticos

Los desplazamientos semi-estáticos representan de mejor manera el comportamiento del puente, esto debido a que el ruido fue minimizado logrando así determinar los despla-

zamientos ocurridos sobre el doble voladizo a efecto del peso de los vehículos. En la Figura 6.15 se observan 4 escalones que representan el desplazamiento que se tuvo al momento de colocar en diferentes tiempos los vehículos tipo C3 sobre el doble voladizo.

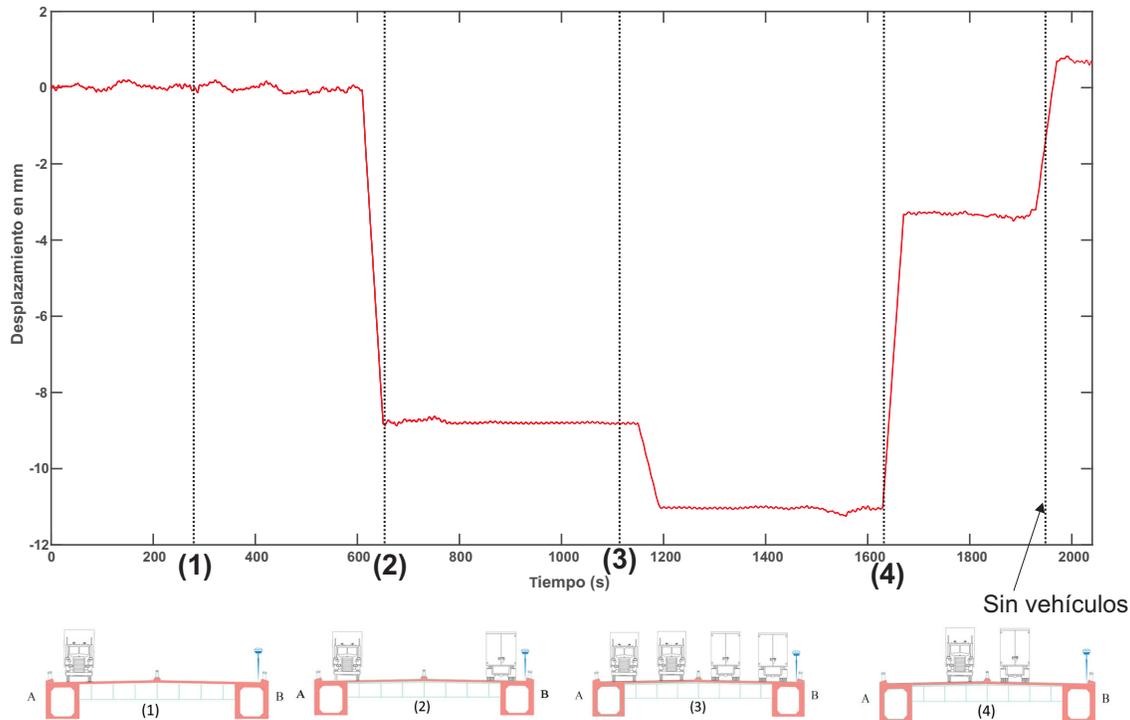


Figura 6.15: Desplazamientos semi-estáticos de la segunda prueba de carga.

6.3.5. Comparación entre las mediciones de los diferentes sensores

Los sensores instalados sobre el doble voladizo registraron los efectos producidos por el peso de los vehículos tipo C3. Los efectos que se registraron fueron las micro-deformaciones, el desplazamiento y la inclinación de la estructura del doble voladizo. Estos sensores estuvieron permanentes durante la segunda prueba de carga, por lo cual, todos los sensores midieron los efectos del peso sobre la estructura pero en diferentes magnitudes. Realizando una normalización de 0 a 1 para todas las magnitudes y graficándolas da como resultado la Figura 6.16. Se observa que los desplazamientos registrados con el receptor GNSS no tienen un comportamiento similar a las demás magnitudes, y al igual que la prueba de carga 1, esto es debido a la precisión alcanzable con el receptor GNSS. Los desplazamientos mayores representan a los escalones que se pueden observar en la Figura 6.16, donde estos desplazamientos son mayores a 3-4 mm. Por lo tanto, los desplazamientos inferiores a esa magnitud no son registrados por el receptor GNSS y entran en el rango del ruido de la misma técnica.

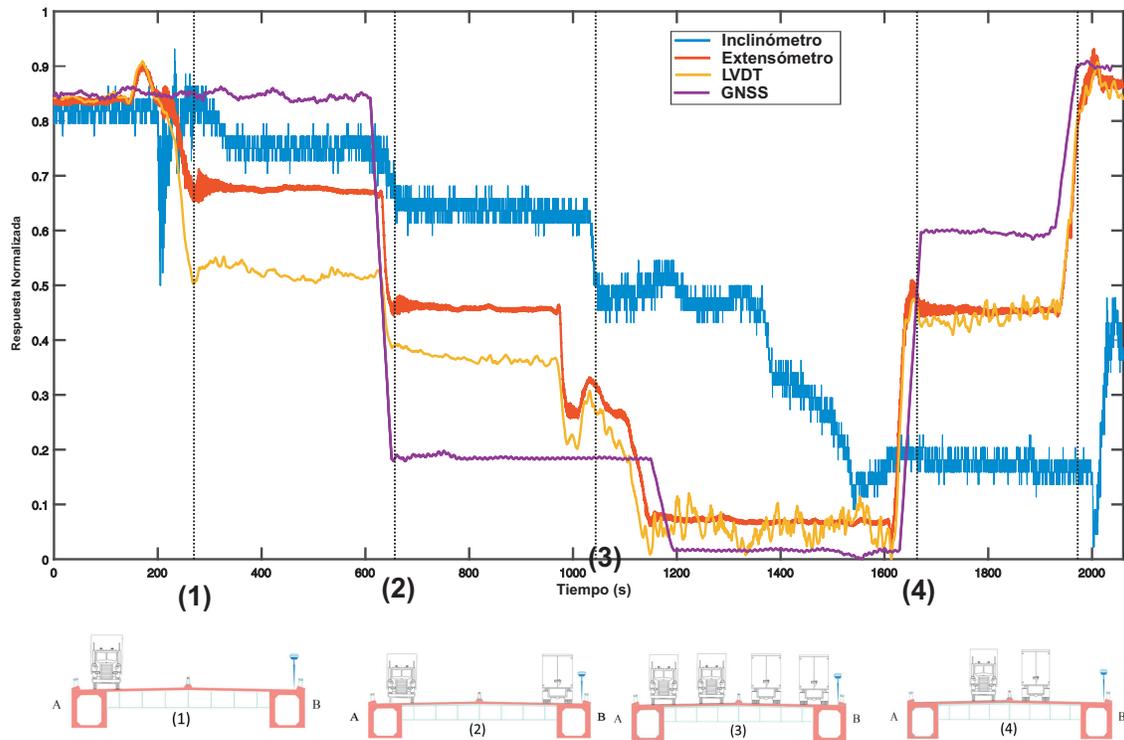


Figura 6.16: Comportamiento del puente *El Carrizo* registrado con diferentes sensores de la segunda prueba de carga.

6.3.6. Comparación entre los desplazamientos obtenidos con la tecnología GNSS y el sensor LVDT para la prueba de carga 2

Al igual que en la prueba de carga 1, se utilizaron los desplazamientos registrados por el sensor LVDT para compararlos con los obtenidos con la tecnología GNSS, ya que los desplazamientos obtenidos con el sensor LVDT fueron recolectados con una precisión menor a 1 mm. Se tomaron como referencia los desplazamientos del sensor LVDT para validar la precisión con la cual se obtuvieron los desplazamientos con la tecnología GNSS. En la Figura 6.17 se muestran los esquemas representativos de las series de tiempo del comportamiento vertical del puente doble voladizo registrado con el sensor LVDT y el receptor GNSS. En la Figura 6.17 se observa que las series de tiempo no coinciden en el registro de los desplazamientos, esto debido a que los sensores LVDT y GNSS estaban colocados en diferentes cuerpos del doble voladizo (ver Figura 5.8). Por lo tanto, cada sensor registró los desplazamientos ocurridos en el puente por el peso de los vehículos C3 con diferente magnitud. Reescribiendo lo mencionado en la sección prueba de carga 1, entre mayor sea la cercanía del sensor a la colocación del vehículo C3, mayor será la sensibilidad de registrar el desplazamiento ocasionado por el peso de los camiones.

La configuración de la prueba de carga se muestra en la Figura 5.11. Recordando que, el sensor LVDT se colocó en la dovela 8 del cuerpo A en dirección hacia Durango y el sensor

GNSS sobre la dovela 8 en el cuerpo B en dirección hacia Durango para un mejor entendimiento de la Figura 6.17. Se coloca un vehículo tipo C3 sobre la dovela 8 en el cuerpo A en la dirección hacia Durango sobre el carril lento, este desplazamiento es registrado por el sensor LVDT, caso contrario para el receptor GNSS que no fue posible registrarlo, esto se ve en el paso (1). Después dejando estático el primer vehículo C3 sobre el cuerpo A en el carril lento, se posiciona un segundo vehículo C3 en la dovela 8 del cuerpo B sobre el carril lento en dirección hacia Durango. El desplazamiento ocurrido es registrado con el receptor GNSS de manera precisa, como se observa en el paso (2).

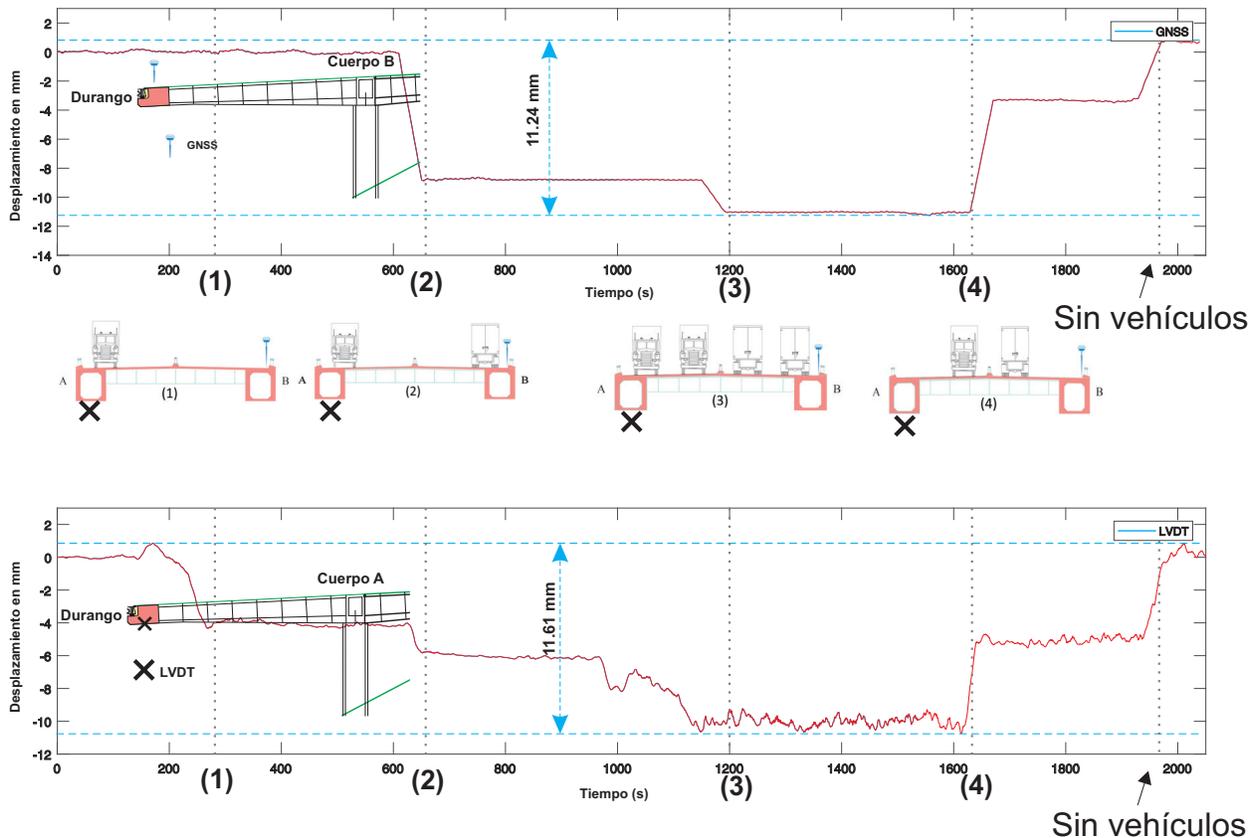


Figura 6.17: Desplazamientos obtenidos de la segunda prueba de carga con el sensor LVDT y el receptor GNSS.

Para el paso (3), se colocan dos vehículos, uno en cada cuerpo (A y B) pero en los carriles rápidos sin mover los vehículos de los carriles lentos. Para este paso (3) el receptor GNSS registra más de 3 mm y el sensor LVDT 5 mm. La diferencia en los desplazamientos para este paso (3) es debido a la precisión con la cual se determina el desplazamiento con el método PPP-GNSS.

Para el paso (4), los dos vehículos colocados en los carriles lentos de ambos cuerpos (A y B) salen y se mantienen en su lugar los vehículos colocados en los carriles rápidos. El desplazamiento ocasionado por los vehículos al salir hace que la estructura se acerque a

su estado original, es decir, a la posición de origen (cero) de la serie de tiempo. Para este paso (4) el receptor GNSS registró más de 7 mm y el sensor LVDT 6 mm. En el paso (4) los desplazamientos fueron muy similares debido a que los mismos de magnitud mayor cercanos a 1 cm, el receptor GNSS los registra de manera precisa. Para el paso final, los vehículos salen y dejan a la estructura sin carga viva, por lo tanto, la estructura regresa a su posición original. Como ya se ha venido mencionando, la precisión de la técnica PPP esta en el rango cerca a 1 cm, por lo tanto, la serie de tiempo registrada por el receptor GNSS no regresa a su estado original en 0, y para el caso del sensor LVDT si. Esto se puede observar en la Figura 6.17. En la Tabla 6.2 se observan los desplazamientos medidos para la prueba de carga 2 con la tecnología GNSS y el sensor LVDT.

6.3.7. Desplazamientos dinámicos

Para extraer los desplazamientos dinámicos de la prueba de carga 2, al igual que para la prueba de carga 1, se utilizaron 3 filtros pasa-alta:Buterworth, Chebyshev Tipo I y II. El resultado de cada filtro se observa en la Figura 6.18, donde el comportamiento de los tres filtros fue muy similar, esto debido a los resultados estadísticos de cada filtro .

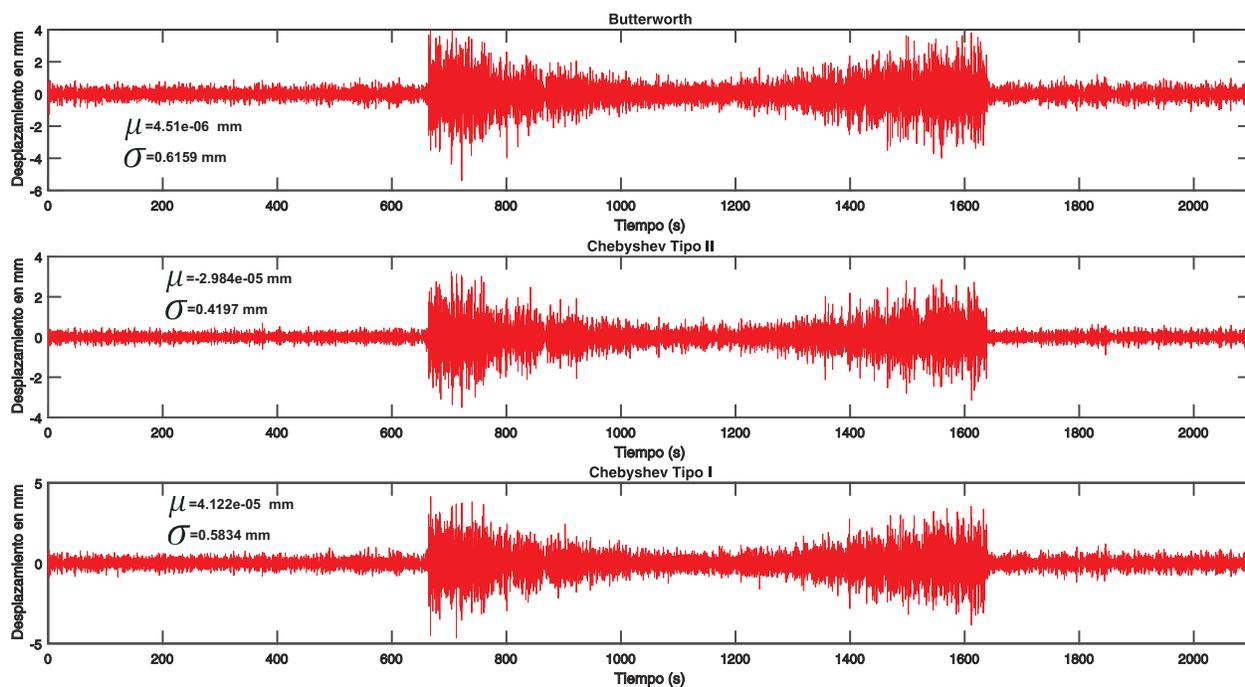


Figura 6.18: Desplazamientos dinámicos extraídos con diferentes filtros de la segunda prueba de carga.

El filtro que presentó menor desviación estándar (σ) fue el Chebyshev tipo II, y el de mayor el Butterworth. Aunque las diferencias entre desviaciones estándares son muy pequeñas, cada filtro presenta sus características diferentes y esto ocasiona que al momento de aplicar el filtrado, un filtro deje pasar frecuencias diferentes en comparación con los

demás filtros. El comportamiento estadístico de los desplazamientos dinámicos para la prueba de carga 2 fue muy similar al de la prueba de carga 1, ya que el orden de las desviaciones estándares son iguales.

Tabla 6.3: Correlación entre los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro para la segunda prueba de carga.

Filtros	Correlación
Chebyshev Tipo I-Chebyshev Tipo II	0.163
Chebyshev Tipo I-Butterworth	0.409
Chebyshev Tipo II-Butterworth	0.002

Se realizó un análisis de correlación entre los desplazamientos extraídos por los tres filtros, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 6.3, donde los desplazamientos resultantes del filtro Butterworth y Chebyshev Tipo I fueron los de mayor correlación y para el caso opuesto, los filtros Chebyshev Tipo II y Butterworth fueron los que tuvieron la correlación más pequeña.

6.3.8. Comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos

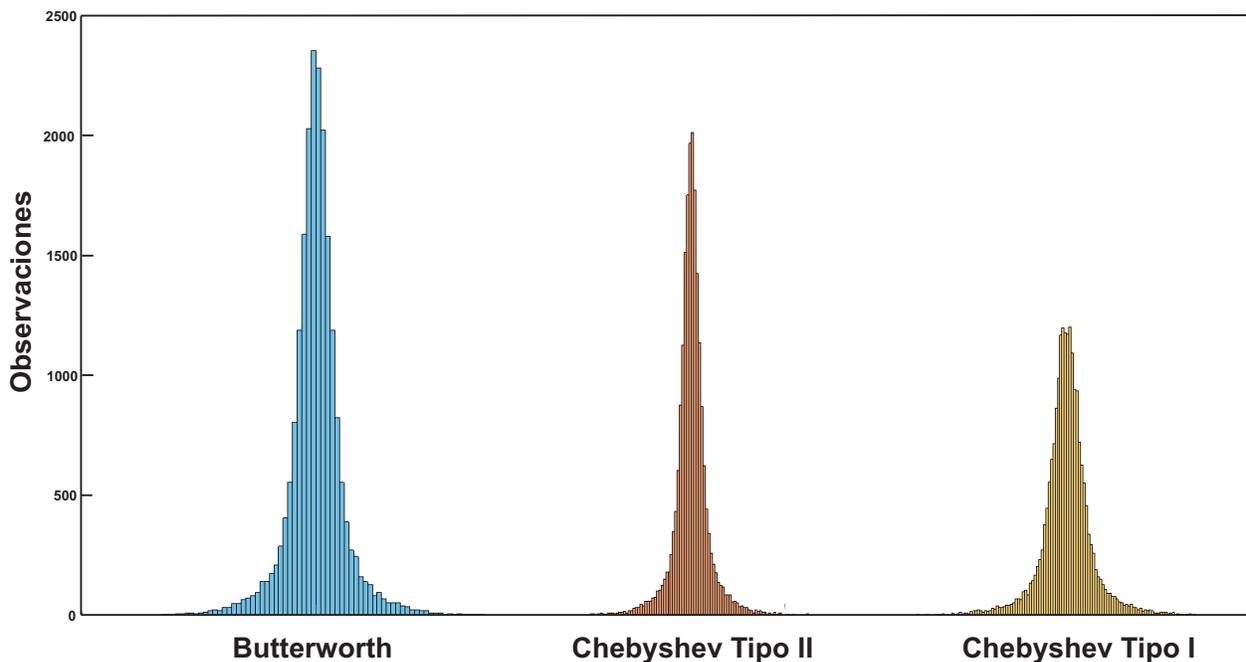


Figura 6.19: Histogramas de los desplazamientos dinámicos obtenidos con los filtros: Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II.

Cuando se tienen los 3 conjuntos de datos que representan a los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro, se generaron histogramas para cada conjunto. En la

Figura 6.19 se observa el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos, en un primer instante se observa que los desplazamientos extraídos por el filtro Butterworth y Chebyshev tipo I son muy similares en comparación con el filtro Chebyshev tipo II. Conocer el comportamiento probabilístico de los desplazamientos dinámicos en esta investigación es de suma relevancia, ya que a partir de este comportamiento se van a determinar probabilidades de falla (p_{fs}) e índices de confiabilidad (β_s).

6.3.9. Ajuste de distribuciones

Para el cálculo de la probabilidad de falla (p_f) es necesario conocer cual es la función matemática que define el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos, por lo cual, al igual que en la prueba de carga 1, se realizó una prueba de bondad χ^2 para saber cual función de densidad de probabilidad (PDF) se ajusta a los datos. En la Figuras 6.20, 6.21 y 6.22 se visualiza el ajuste de las 15 distribuciones que se están trabajando para esta investigación. De las 15 distribuciones, la mayoría no se ajusta a la curva de los datos, la prueba χ^2 da como resultado que las distribuciones kernel y estable son las que se ajustan para todos los datos, sin embargo, estas distribuciones no tienen una función matemática definida, si no que, son estimadores y generan una función a partir de los datos. Para esta investigación se consideró la distribución kernel como referencia, es decir, la probabilidad de falla (p_f) e índice de confiabilidad (β) obtenidos a partir de esta distribución serán los más precisos y se utilizaran para comparar los resultados obtenidos con el resto de las distribuciones.

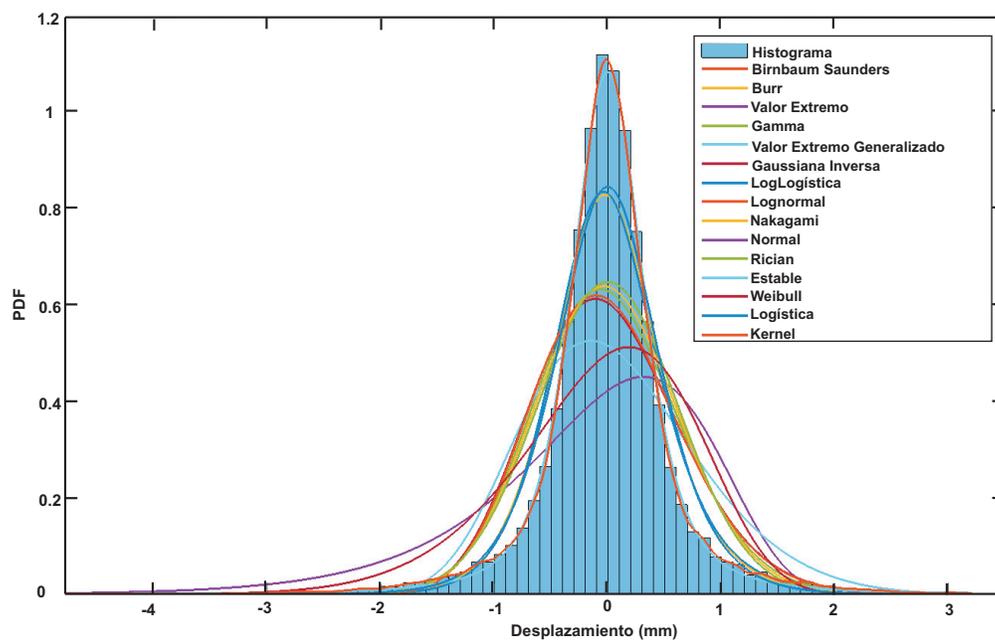


Figura 6.20: Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Butterworth.

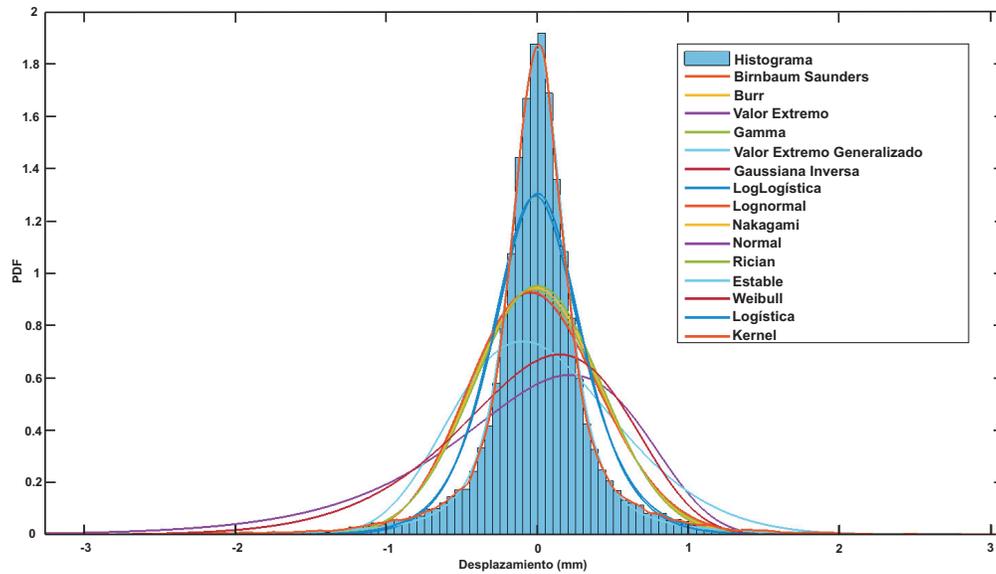


Figura 6.21: Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo II.

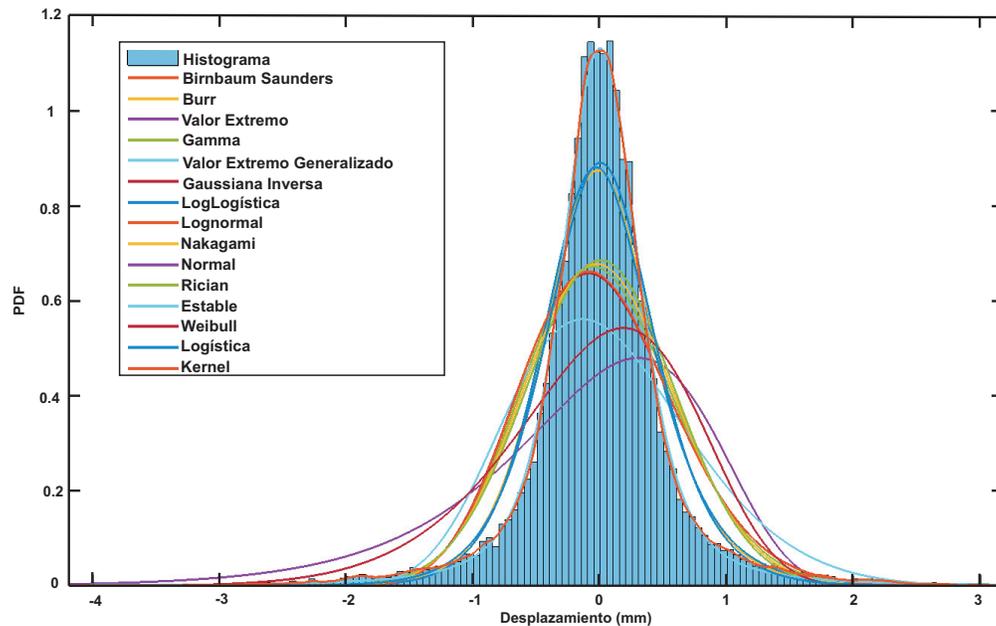


Figura 6.22: Ajuste de diferentes funciones de densidad de probabilidad a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro pasa-alta Chebyshev Tipo I.

La Figura 6.20 representa el ajuste de las 15 distribuciones a los desplazamientos dinámicos extraídos a partir del filtro Butterworth. La Figura 6.21 representa el ajuste de

las 15 distribuciones a los desplazamientos dinámicos extraídos a partir del filtro Chebyshev tipo II y para la Figura 6.22 representa el ajuste de los desplazamientos dinámicos extraídos a partir del filtro Chebyshev tipo I.

6.4. Probabilidad de falla (p_f) e índice de confiabilidad (β)

6.4.1. Introducción

En esta sección se describen los resultados del cálculo de la probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos y el índice de confiabilidad (β) para cada una de las 15 distribuciones. Considerando la p_f y el β que fueron calculados con la distribución kernel como referencia (es decir, los parámetros que presentan mayor ajuste a los desplazamientos). Estos parámetros de referencia se utilizaron para determinar, cuales distribuciones se apegan más al comportamiento aleatorio de los desplazamientos estudiados y al mismo tiempo, demostrar la importancia que tiene la selección de la distribución de probabilidad que se ajusta a los datos, para conocer cual es el comportamiento aleatorio de la muestra, y la función matemática que la describa.

Para el caso de la prueba de carga 1, donde los desplazamientos medidos sobre el puente fueron menores, la probabilidad de falla fue mayor que la de la prueba de carga 2, donde los desplazamientos fueron mayores. Esto debido a la forma de los histogramas. Los histogramas de los desplazamientos dinámicos para cada filtro en la prueba de carga 1 tienen una curtosis³ mayor, por lo cual, el área correspondiente entre los límites a y b es menor, y sabiendo que la $p_f = 1 - p_s$, entonces entre menor sea p_s ⁴, mayor será la probabilidad de falla.

6.4.2. Prueba de carga 1

La Figura 6.23 representa las probabilidades de falla (p_{fs}) en términos de desplazamientos, calculadas con las diferentes distribuciones para el caso de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Butterworth. Recordando que la p_f determinada a partir de la distribución Kernel, es la que representa mayor precisión al comportamiento de los datos. En la Figura 6.23 se puede ver que las probabilidades de falla para diferentes límites (estos límites están en mm) son considerablemente diferentes, esto debido a que la función que describe a cada distribución tiene diferente área bajo la curva, como es el caso de la distribución normal, que para los límites [-1,1] es mayor a 0.3, cuando en la distribución kernel es de un poco más de 0.1, una diferencia de mas del doble de la probabilidad de falla. Existen distribuciones que tienen una curtosis tipo leptocúrtica⁵ y sus colas son muy

³La **curtosis** es una medida estadística, que determina el grado de concentración que presentan los valores de una variable alrededor de la zona central de la distribución de frecuencias.

⁴Probabilidad segura-zona segura.

⁵Es cuando existe una gran concentración de los valores entorno a su media.

cortas, por lo tanto, los límites que están mas allá de esas colas no son considerados y se toma como $p_f = 0$. Para el caso de las distribuciones con curtosis tipo platicúrtica⁶ que tienen colas más largas, los límites grandes tendran valores de p_f . En la Figuras de esta sección, se graficaron solamente los primeros 4 límites para ambas direcciones, ya que los valores de los límites mayores a 4 son muy cercanos a 0 y en la gráfica de barras no se representan estos valores.

La distribución que tiene más similitud a la distribución kernel, es la estable. Estas dos distribuciones tienen el mejor ajuste a los datos, debido a que ambas son funciones estimadoras de los datos, es decir, que utilizan una metodología matemática para encontrar la función que describa de manera precisa los datos de una muestra. Como se puede ver, las barras de color morado, azul, verde y amarillo, que representan los primeros 4 límites en mm de los desplazamientos dinámicos, son muy similares para la distribución Kernel y estable. Conforme los límites van aumentando, la probabilidad de falla va descendiendo hasta llegar a 0. Las distribuciones que mayor similitud presentan en la p_f , considerando las barras de la distribución kernel y comparandolas con el resto de las distribuciones son: la distribución estable, valores extremos, valores extremos generalizados y la weibull.

La Figura 6.24 representa el índice de confiabilidad (β) calculado a partir de la probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos. Se observa que las barra de color azul son las de menor β que representan a una p_f alta, es decir, entre mas grande sea la probabilidad de falla ,menor será el índice de confiabilidad o caso inverso, entre menor p_f mayor será el β . Por lo tanto, el β crecerá con base en el aumento de los límites y esto se puede observar claramente en la Figura 6.24, donde las barras de color amarillo representan los límites con magnitud mayor que se consideraron para este documento, que fueron [-4,4] mm. Las distribuciones que tuvieron mayor parecido en el β a la distribución kernel fueron: la estable, valores extremos, logística y weibull. Estas distribuciones fueron las que tuvieron menor β para los límites [-4,4], esto debido a que el resto de las distribuciones tuvieron valores de p_f cercanos a 0 (cuando $p_f = 0$, entonces, $\beta = \infty$) y por lo tanto, tuvieron valores de β altos. Sin embargo, esto no significa que las distribuciones que no se ajustaron de manera precisa a los datos, hayan tenido mejor índice de confiabilidad⁷, ya que el índice de confiabilidad de las distribuciones que no se ajustaron no corresponden al comportamiento real del puente doble voladizo y el grado de confiabilidad es menor o nulo. Por esta razón, la importancia de conocer cual es la función de densidad de probabilidad que mejor se ajuste a los desplazamientos dinámicos del puente *El Carrizo*.

Las Figuras 6.25 y 6.26 representan a las probabilidades de falla (p_{fs}) e índices de confiabilidad (β), de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo I. El comportamiento aleatorio de estos desplazamientos son muy parecidos a los desplazamientos dinámicos obtenidos con el filtro Butterworth y esto se puede observar en la Figura 6.8 a través del histograma. El histograma representativo al filtro Chebyshev tipo

⁶Es cuando existe una baja concentración de los valores en torno a su media.

⁷Esto debido a que el índice de confiabilidad es la confiabilidad asociada a un sistema para lograr la función requerida en condiciones de rendimiento específicas durante un período de tiempo determinado.

I tiene una similitud al histograma del filtro Butterworth, por lo cual, las probabilidades de falla (p_{fs}) e índices de confiabilidad (β_s) serán muy similares. Esto se puede ver en las Figuras 6.23, 6.25 y 6.24,6.26. Al igual que, para el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro butterworth, la función matemática que se ajustó a los desplazamientos extraídos con el filtro Chebyshev tipo I fue la distribución kernel. La distribución que presentó resultados parecidos a la distribución kernel para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo I, fue la estable. Para el caso de la Figura 6.26 que representa el índice de confiabilidad (β), la distribución que tuvo un ajuste parecido a la kernel, fue la logística, al tener la magnitud de las barras prácticamente igual.

Tomando como base el histograma de los desplazamientos dinámicos, extraídos con el filtro Chebyshev tipo II de la Figura 6.8, el histograma presenta una curtosis leptocúrtica donde los valores están concentrados en la media, generando una campana muy angosta, donde al momento de calcular la p_f y el β , estos parámetros tendrán valores de p_f mayores a 0 en los primeros límites. Esto se puede observar en la Figura 6.27, donde la mayoría de distribuciones solo se muestra la barra morada, que representa los límites en milímetros (-1,1). Para estos desplazamientos dinámicos, tomando como referencia las barras de colores de la distribución kernel, la distribución que tuvo un ajuste preciso o parecido a la distribución kernel fue la estable. Para el caso de la Figura 6.28, que representa los índices de confiabilidad, la distribución que tuvo un ajuste parecido a la kernel fue la logística. Retomando la probabilidad de falla calculada para los desplazamientos extraídos con el filtro Chebyshev tipo II, donde estos fueron muy cercanos a 0 en los límites mayores a (-1,1), en la mayoría de las distribuciones. Por lo tanto, en la Figura 6.28 un número mayor de distribuciones presentan índices de confiabilidad altos (recordando que, $p_f = 0$, entonces, $\beta = \infty$).

El comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos extraídos por los filtros Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II, no siguen un patrón de similitud, esto principalmente a la forma del histograma generado por cada filtro. Y por lo tanto, los resultados de p_f y β serán diferentes.

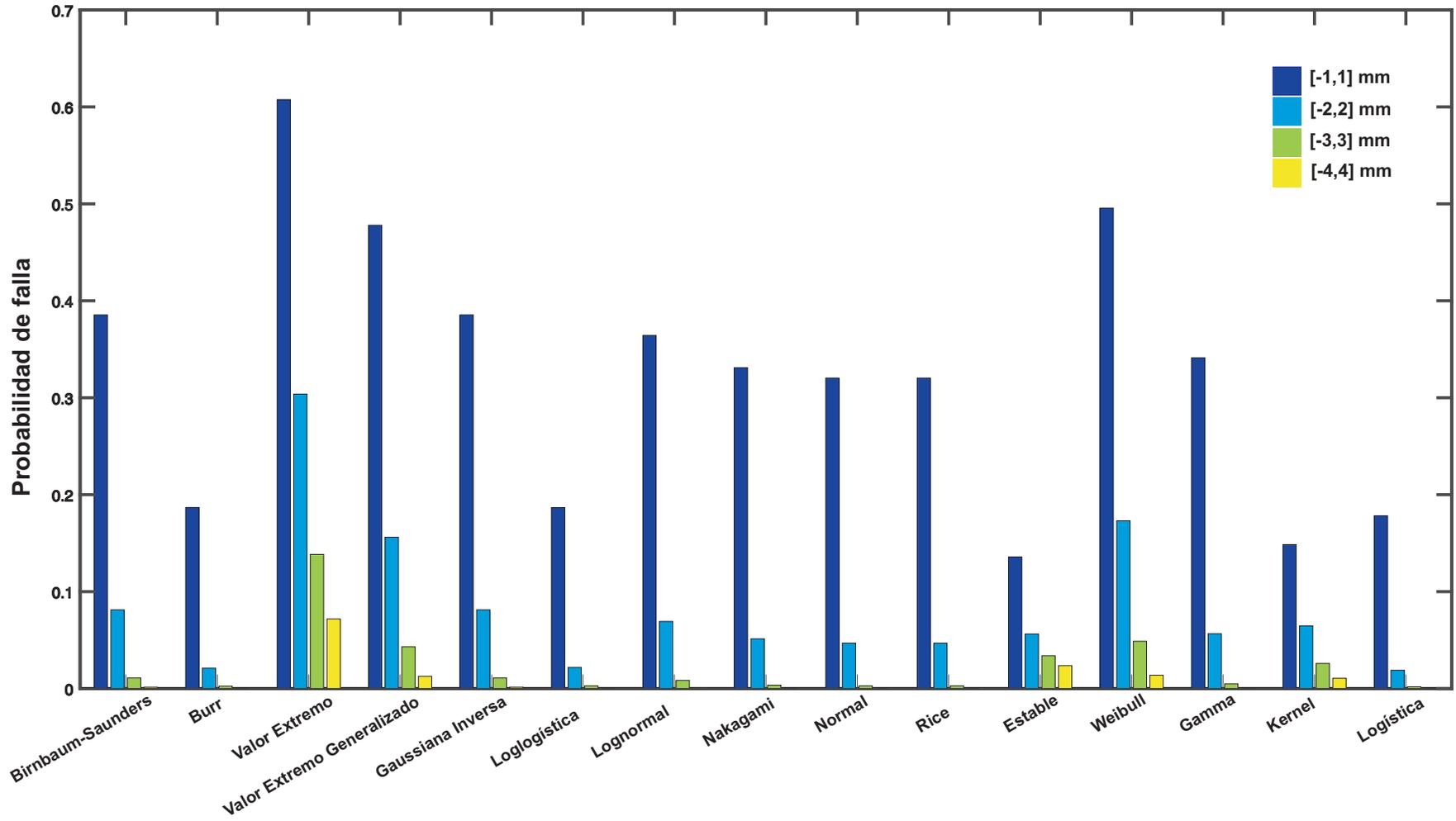


Figura 6.23: Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones, para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Butterworth* en la prueba de carga 1.

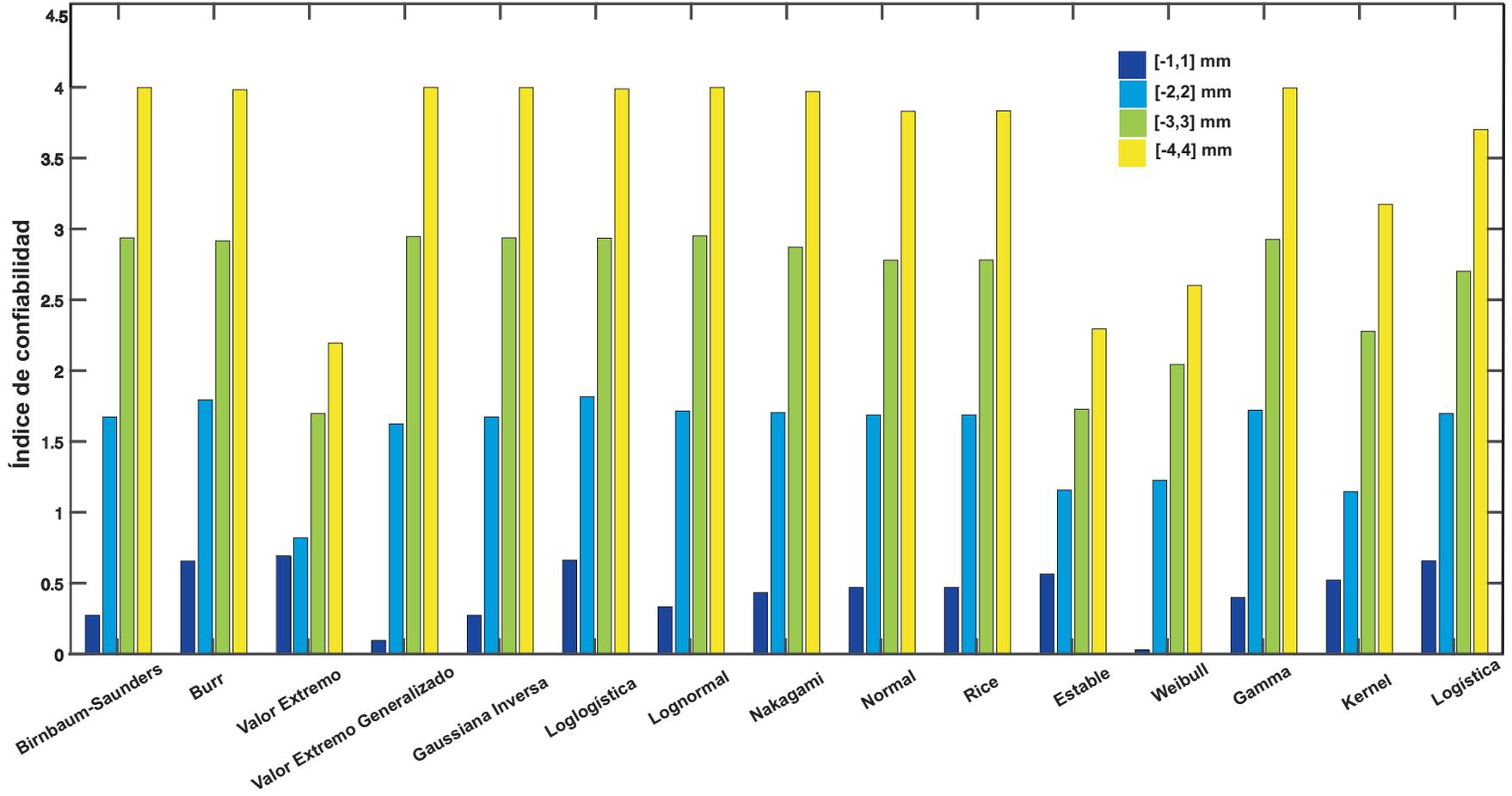


Figura 6.24: Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}), para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Butterworth* en la prueba de carga 1.

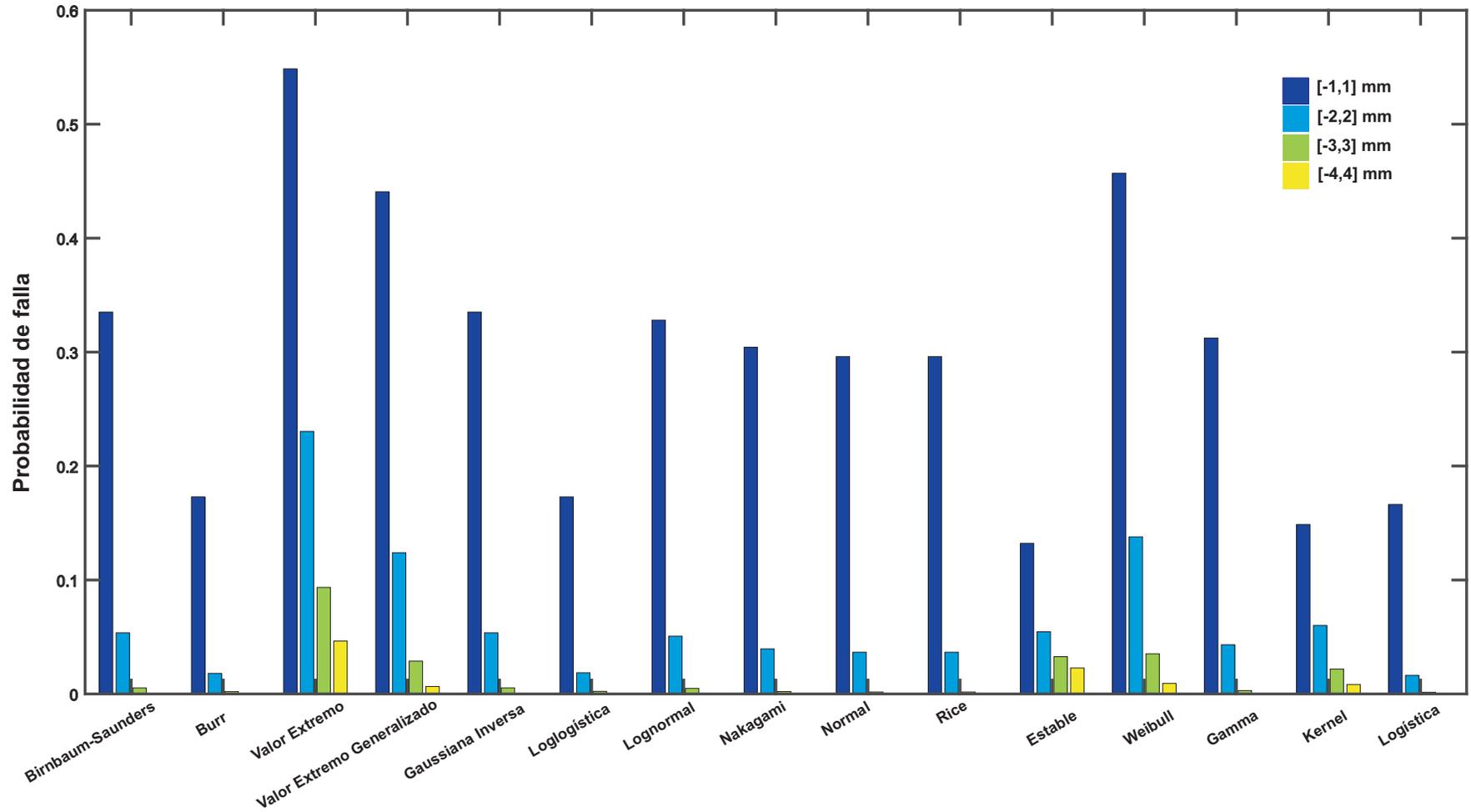


Figura 6.25: Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones, para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Chebyshev tipo I* en la prueba de carga 1.

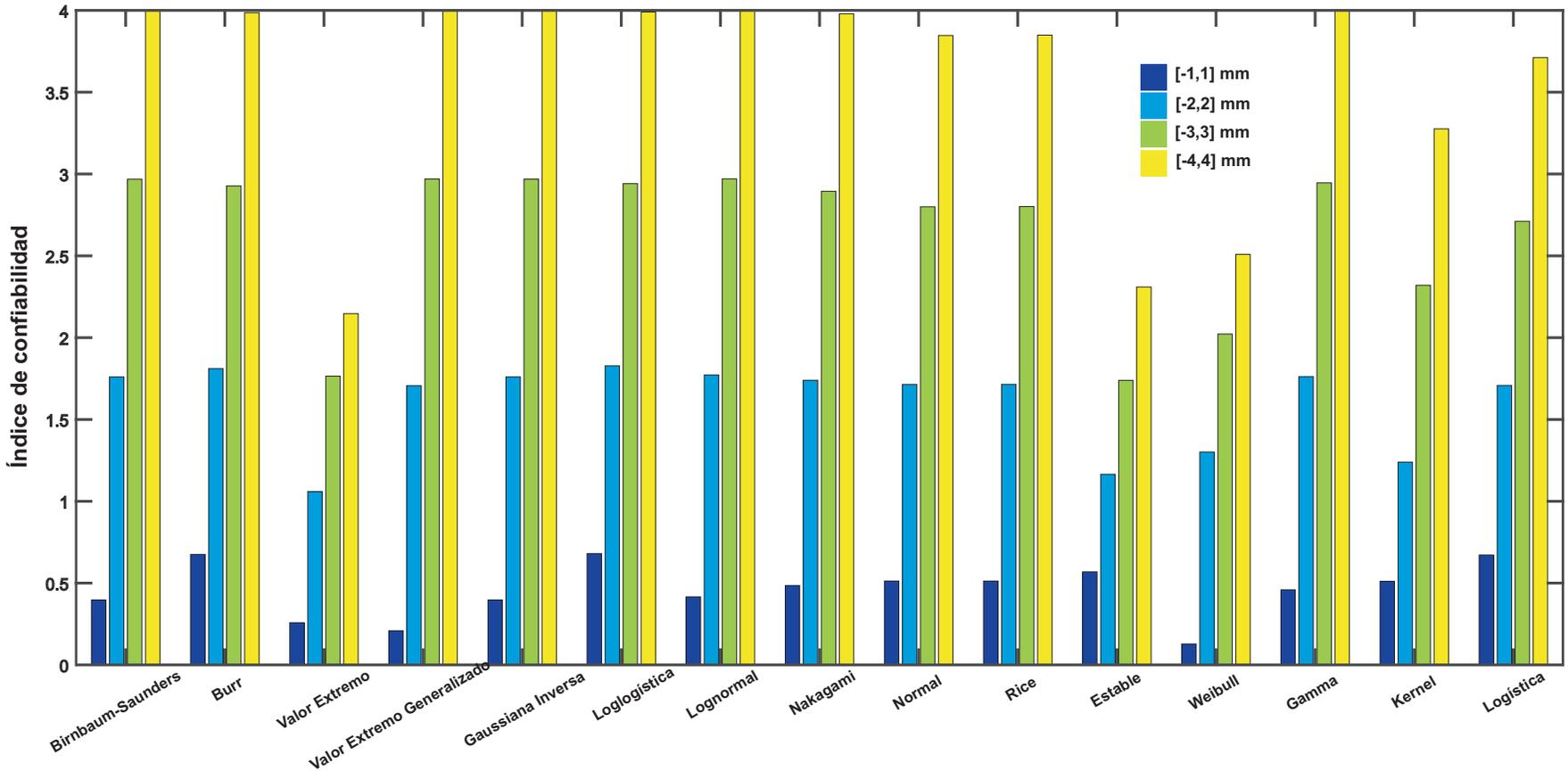


Figura 6.26: Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}), para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Chebyshev tipo I* en la prueba de carga 1.

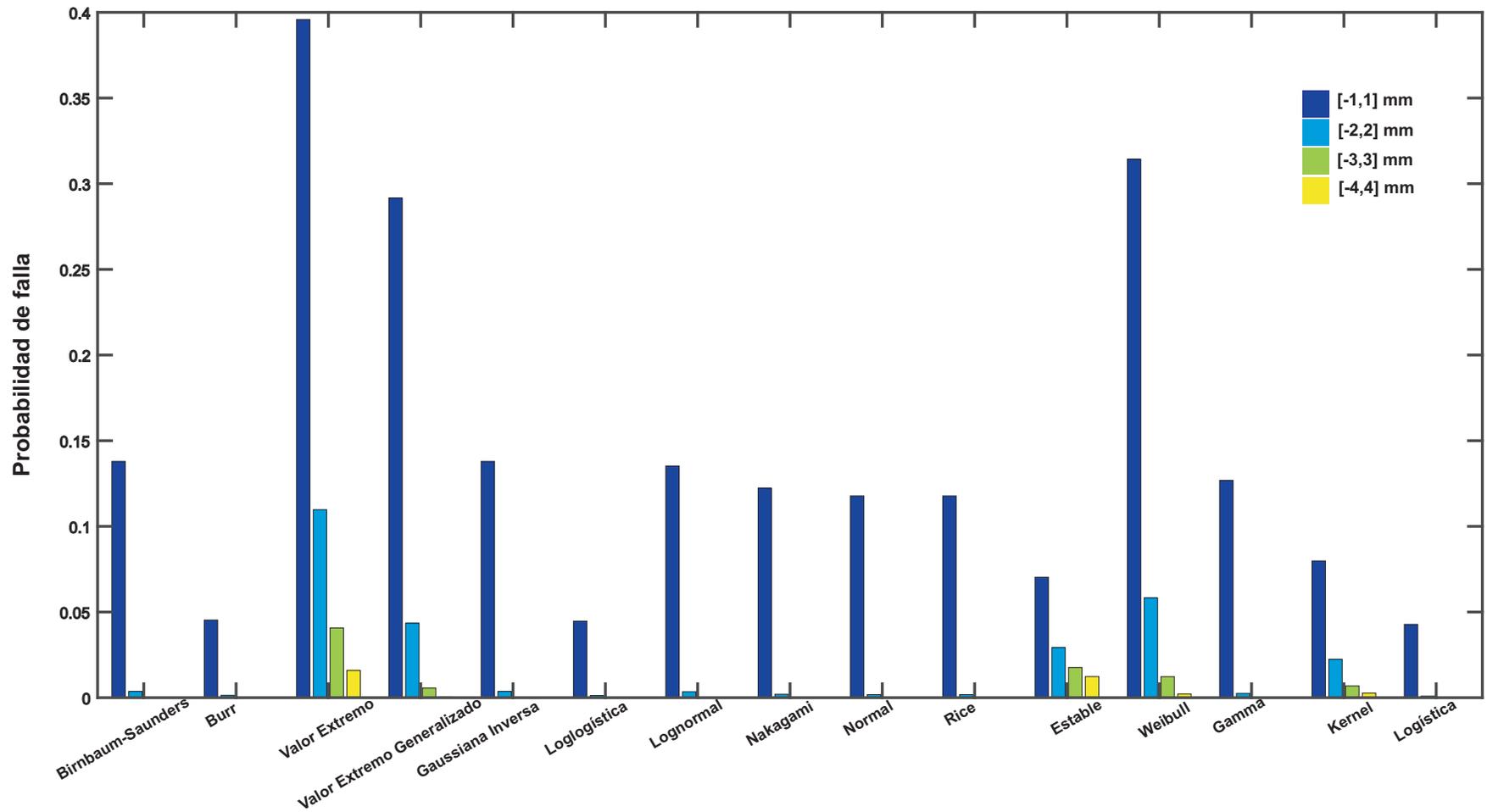


Figura 6.27: Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones, para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Chebyshev tipo II* en la prueba de carga 1.

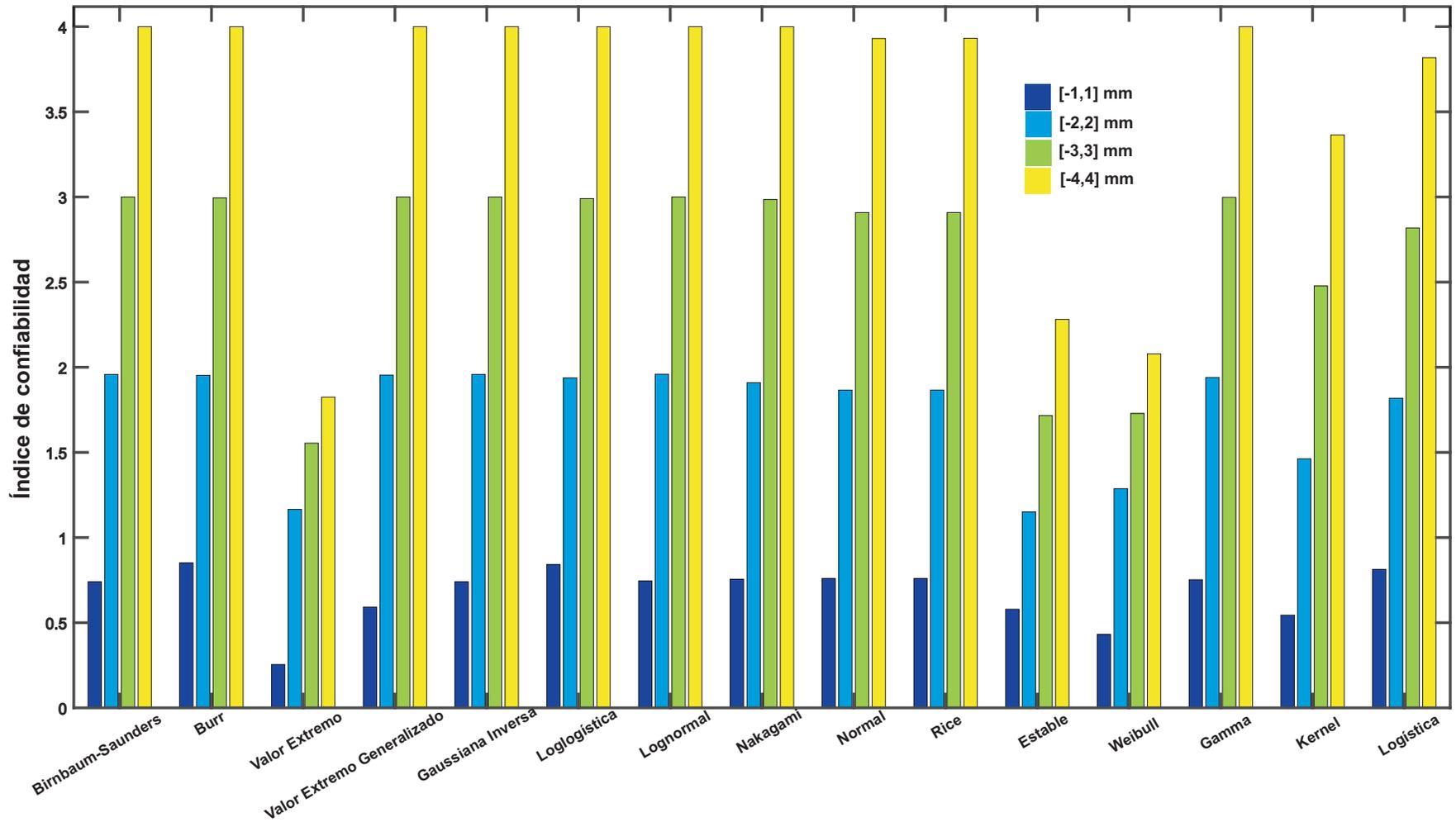


Figura 6.28: Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}), para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Chebyshev tipo II* en la prueba de carga 1.

6.4.3. Prueba de carga 2

En la Figura 6.29 se presentan las probabilidades de falla (p_{fs}), calculadas a partir de las 15 distribuciones estudiadas en este documento. Se eligió representar la p_f solamente para los primeros 4 límites en mm ($[-1,1],[2,2],[3,3],[4,4]$), ya que después de los límites $[-4,4]$ los valores de probabilidad de falla (p_f) son muy cercanos a 0, y no se genera una barra que represente ese valor. Para el cálculo de la probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos para la prueba de carga 2, fueron utilizados los desplazamientos dinámicos extraídos con los filtros Butterworth, Chebyshev tipo I y Chebyshev tipo II, al igual que para la prueba de carga 1.

Retomando que la p_f y el β para cada límite [1 mm - 4 mm], calculados a partir de la distribución kernel, se tomaron como referencia, es decir, la p_f y el β que se ajusta al comportamiento aleatorio de los datos representativos a los desplazamientos dinámicos, extraídos con los tres filtros mencionados anteriormente. Se puede observar en la Figura 6.29, las probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos por el filtro Butterworth, que las barras de color morado para cada distribución tienen diferente magnitud, esto debido a que cada función define una diferente curva en los datos de interés y por lo tanto, el área debajo de la curva sea diferente con respecto a cada límite. Algunas distribuciones tienen una curtosis leptocúrtica o platicúrtica y al mismo tiempo una asimetría ⁸ tipo negativa⁹, positiva ¹⁰ o simétrica ¹¹, que hacen, que la curva definida sea diferente para cada función y por lo tanto, la p_f diferente. Las distribuciones que tienen las barras de color morado con mayor magnitud significa que la curva que define la función tienen colas o sesgos mayores a las que tienen menor magnitud. Ubicandonos en las barras que corresponden a la distribución kernel y comparandolas con las barras de las distribuciones restantes, la distribución estable y la de valores extremos, son las que más similitud tienen con la distribución kernel.

Por otro lado, la Figura 6.30 representa el índice de confiabilidad (β), calculado a partir de la probabilidad de falla en términos de desplazamientos extraídos con el filtro Butterworth. En la Figura 6.30 se observan 4 barras de diferente color para cada distribución utilizada, la primera barra de color morado representa el β para los límites $[-1,1]$, para el caso de la barra de color amarillo, que representa el β de los límites $[-4,4]$. Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, y recordando la definición de p_f y β , cuando se tiene una probabilidad de falla cercana a 0, significa que la estructura es muy segura y que el índice de confiabilidad es grande, donde esto se representa de manera clara en las Figuras

⁸La **asimetría** es una medida de forma de una distribución que permite identificar y describir la manera como los datos tienden a reunirse de acuerdo con la frecuencia con que se hallen dentro de la distribución.

⁹Es cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte izquierda de la media. Tiene un alargamiento o sesgo hacia la izquierda. Es decir, la distribución de los datos a la izquierda tiene una cola más larga que a la derecha.

¹⁰Es cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte derecha de la media. Tiene un alargamiento o sesgo hacia la derecha. Es decir, la distribución de los datos a la derecha tiene una cola más larga que a la izquierda.

¹¹Es cuando en una distribución se distribuyen aproximadamente la misma cantidad de los datos a ambos lados de la media.

de esta sección 6.4, cuando la probabilidad de falla es alta en una estructura, significa que la confiabilidad es baja. Considerando las barras del índice de confiabilidad de la distribución kernel, como la referencia para el resto de las distribuciones, la distribución que tuvo mayor similitud a la kernel fue la logística. Caso contrario a la prueba de carga 1, donde más distribuciones tuvieron mayor similitud con la distribución kernel. El que pocas distribuciones hayan tenido menos similitud, se relaciona al tipo de curva que definió cada función sobre los datos, es decir, que los desplazamientos dinámicos extraídos por el filtro Butterworth para la prueba de carga 2 tuvo un comportamiento probabilístico diferente a los de la prueba de carga 1.

Para el caso de la Figura 6.31 que representa la p_f calculada a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo I, tienen un comportamiento diferente a los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Butterworth. Estas diferencias se pueden ver en la Figura 6.19, que representa los histogramas de los desplazamientos extraídos por los tres filtros utilizados. Tomando como referencia las barras representativas a los límites [-3,3], [-2,2], [-1,1] de la distribución kernel en la Figura 6.31 y comparándolos con las barras de las otras distribuciones, se encontró que ninguna distribución tiene similitud, es decir, que 14 de las 15 distribuciones no se ajustan de manera precisa a los datos. La Figura 6.32, ilustra los índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}) obtenidas, por el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos extraídos por el filtro Chebyshev tipo I. Se observa que la mayoría de distribuciones contienen las mismas magnitudes, es decir, que contienen el mismo número de barras para cada límite. Esto es debido a que la probabilidad de falla (p_f) para los límites mayores a (-1,1) era muy cercana a 0, entonces cuando se calculó el β en el proceso matemático, solo se consideró el valor del límite, por esta razón, los valores de las barras tienen una magnitud de β equivalente a su límite. Sin embargo, caso contrario a la probabilidad de falla (p_f), donde ninguna distribución tuvo similitud con la kernel, en el índice de confiabilidad (β), la distribución logística fue la que presentó mayor similitud a la kernel.

En la Figura 6.19 se aprecia el histograma de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo II, este histograma tiene una curtosis leptocúrtica y sus colas son muy pequeñas en el orden de ± 1 mm (ver Figura 6.21). Por lo tanto, cuando se calcula la probabilidad de falla (p_f) se espera que sea 0 después de los límites (-1,1). Sin embargo, no todas las distribuciones siguen el comportamiento de los datos, por esa razón solo 3 distribuciones tuvieron valor en p_f , una de ellas la distribución kernel. La prueba de bondad de ajuste chi-cuadra (χ^2), da como resultado de su hipótesis a la distribución kernel. Por esta razón, también se considerará como la distribución de referencia para el cálculo de p_f y β . Y como es de esperar, ninguna distribución tuvo similitud con los valores de p_f calculadas con la distribución kernel. Esto se puede ver en la Figura 6.33.

Retomando los valores de la probabilidad de falla (p_f) mostrados en la Figura 6.33, donde estos fueron muy cercanos a 0 para la mayoría de distribuciones, y en algunos casos de 0 en los límites (-4,4). Los índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de estas probabilidades de falla (p_{fs}), se muestran en la Figura 6.34, donde en algunas distribuciones

no se ubica la barra amarilla que representa los límites (-4,4), debido a que la p_f para esos límites es 0, y cuando $p_f = 0$, el $\beta = \infty$. Para los índices de confiabilidad (β_s) de la Figura 6.34, ninguna distribución presentó similitud a la distribución kernel.

Los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro chebyshev tipo II para la prueba de carga 2, resultó muy inestable, esto debido a que los valores de los desplazamientos dinámicos fueron muy parecidos y cuando se genera el histograma, se observa que el comportamiento aleatorio de los desplazamientos están muy acumulados hacia la media, reduciendo el cálculo de la p_f para la mayoría de los límites establecidos en esta investigación. Un factor importante en las diferencias de los desplazamientos dinámicos para ambas pruebas de carga, es el ruido que presentan los datos de los desplazamientos aparentes cuando se aplica un determinado filtro. Para eso la importancia de tener señales libres de fuentes de error.

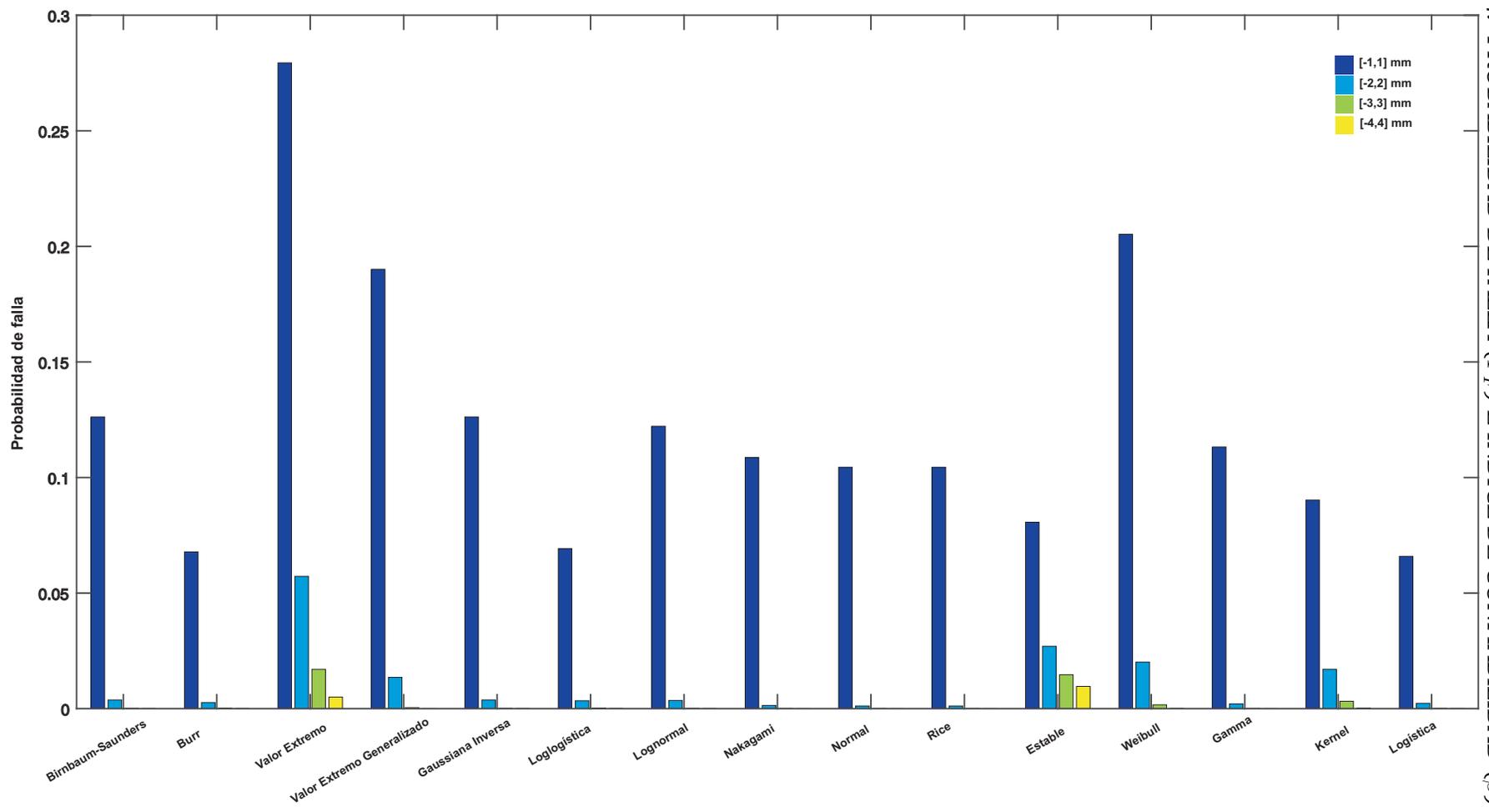


Figura 6.29: Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de diferentes distribuciones de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Butterworth* para la prueba de carga 2.

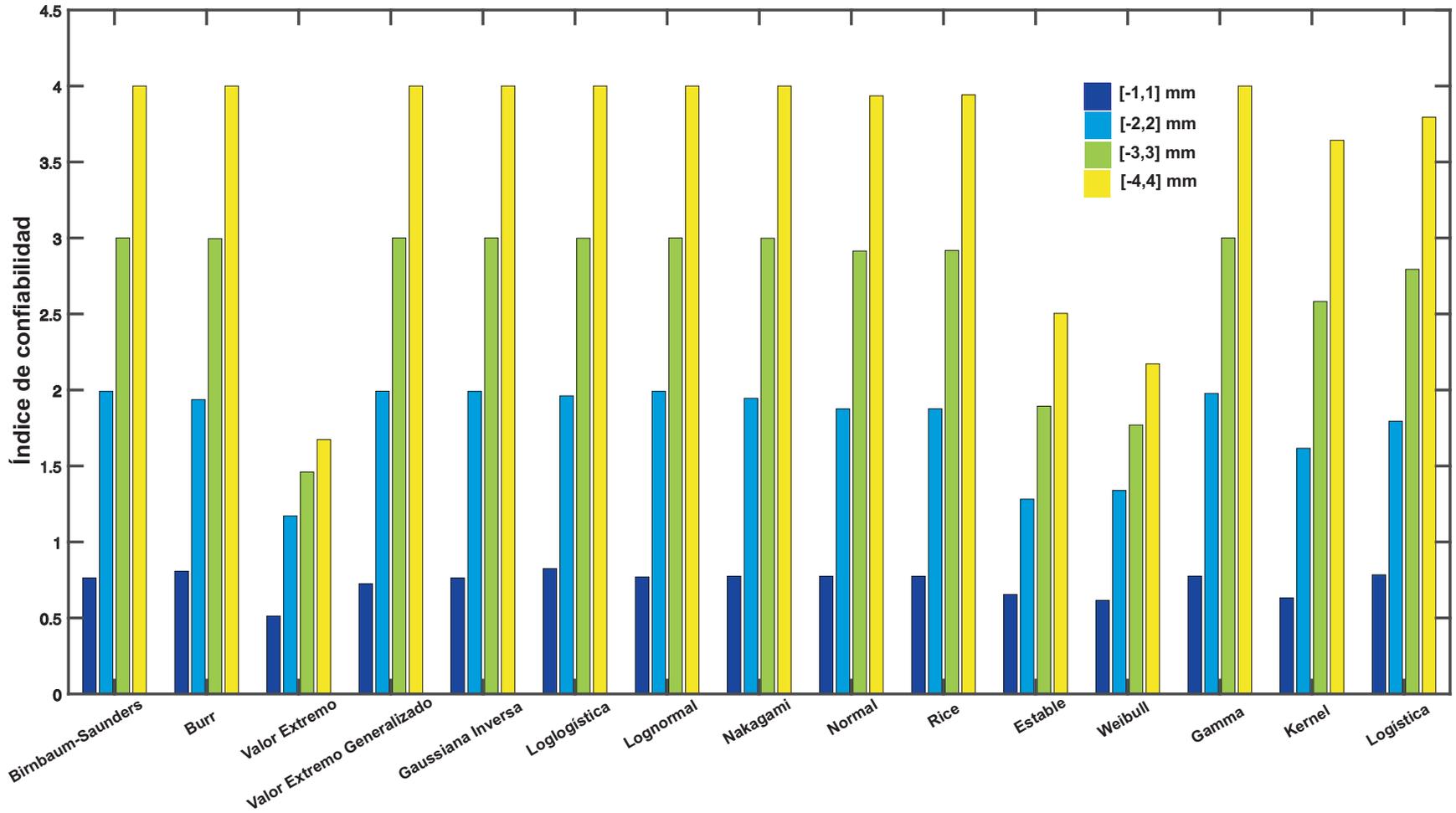


Figura 6.30: Índices de confiabilidad (β_s) calculados a partir de las probabilidades de falla (p_{fs}) para los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro *Butterworth* para la prueba de carga 2.

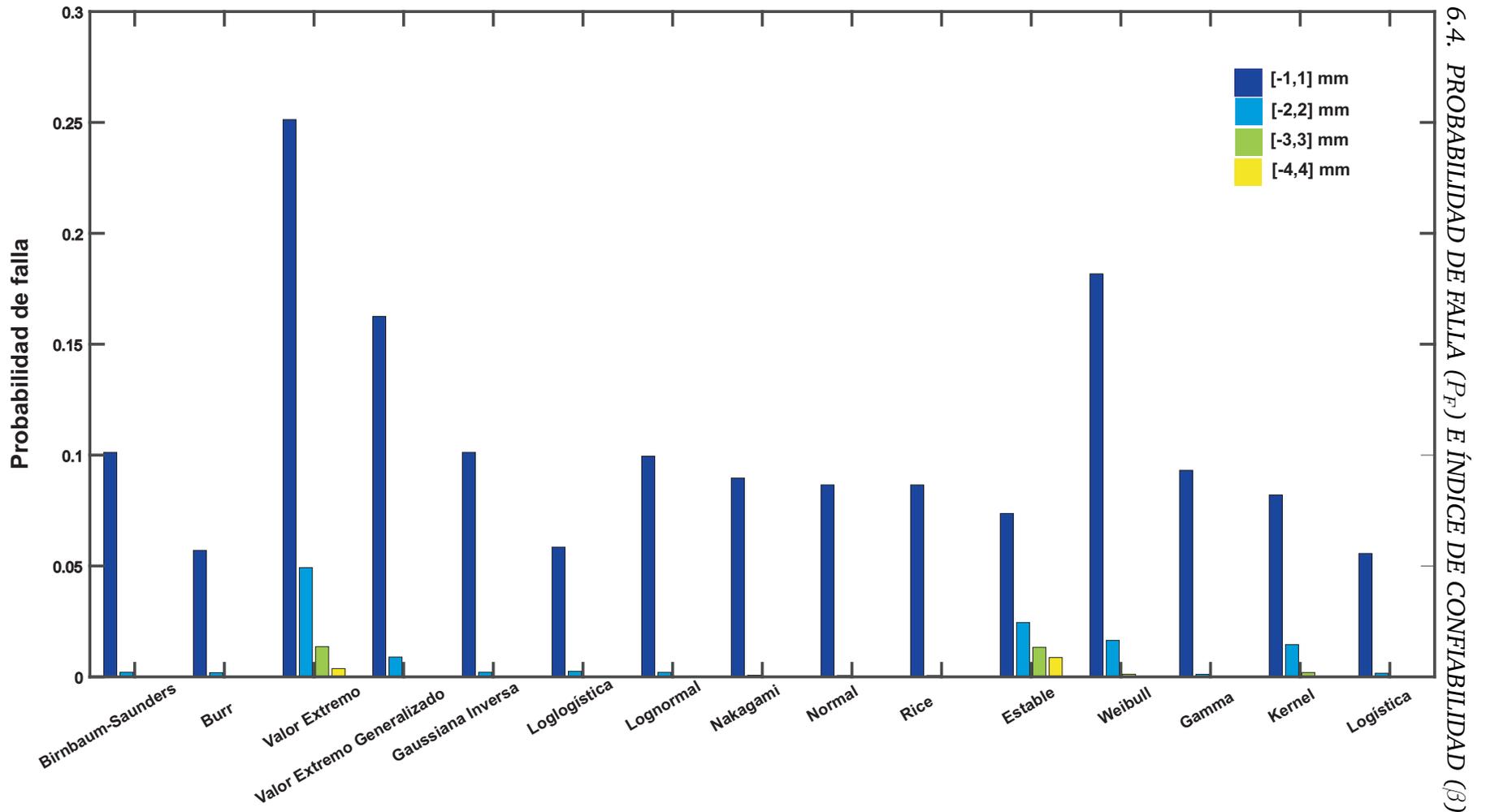


Figura 6.31: Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo I para la prueba de carga 2.

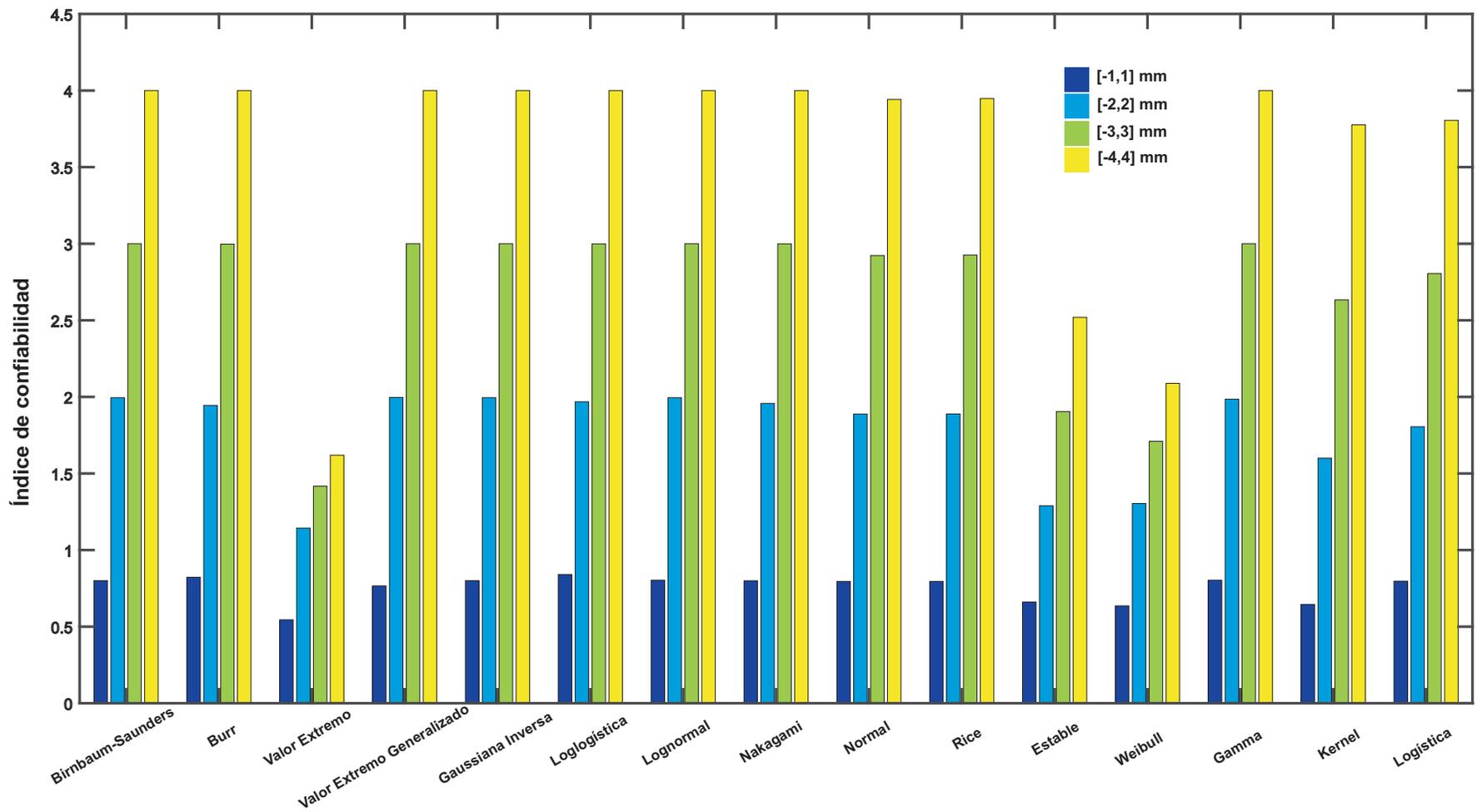


Figura 6.32: Índices de confiabilidad calculados a partir de la probabilidad de falla para la prueba de carga 2. Filtro Chebyshev tipo I.

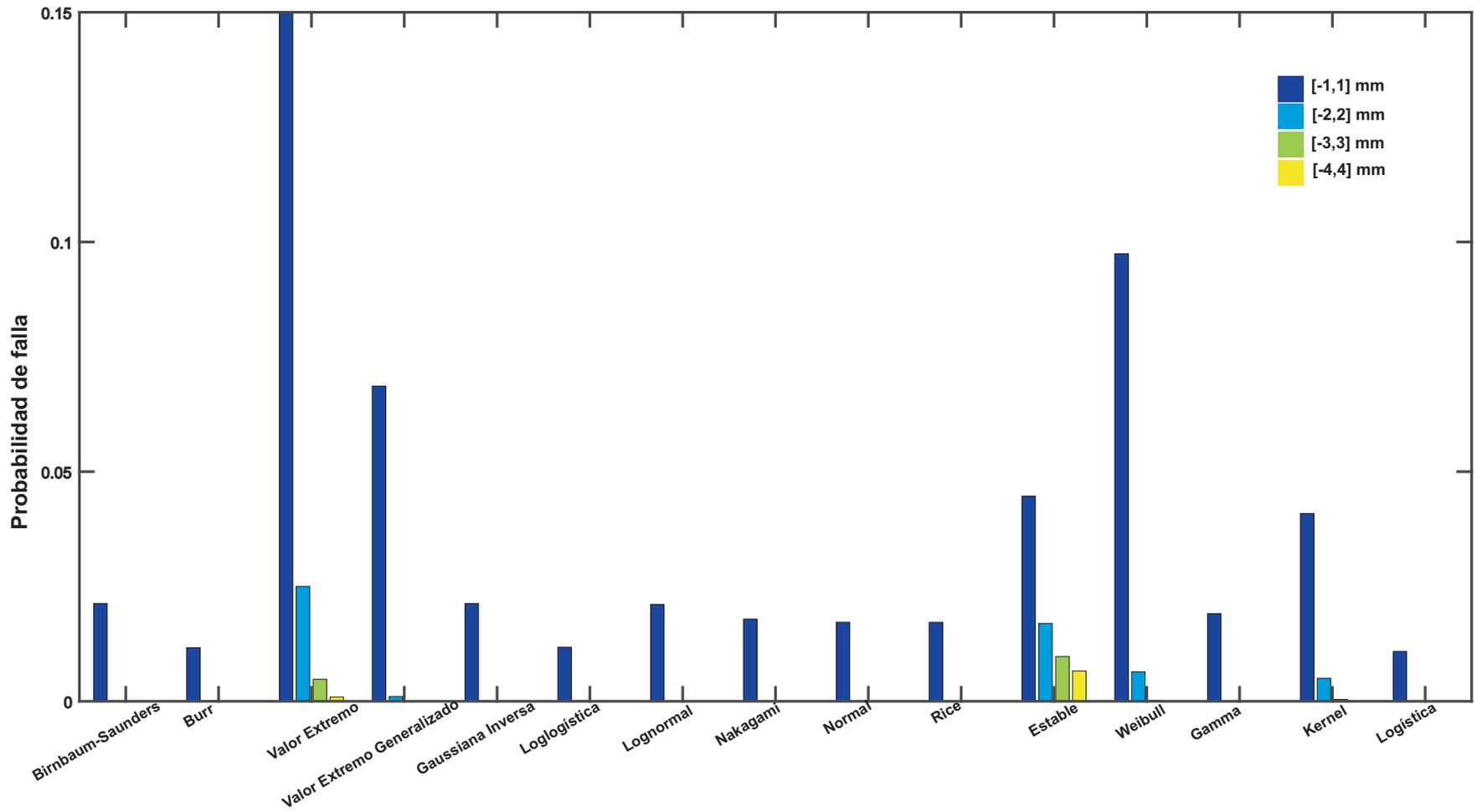


Figura 6.33: Probabilidades de falla (p_{fs}) calculadas a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con el filtro Chebyshev tipo II para la prueba de carga 2.

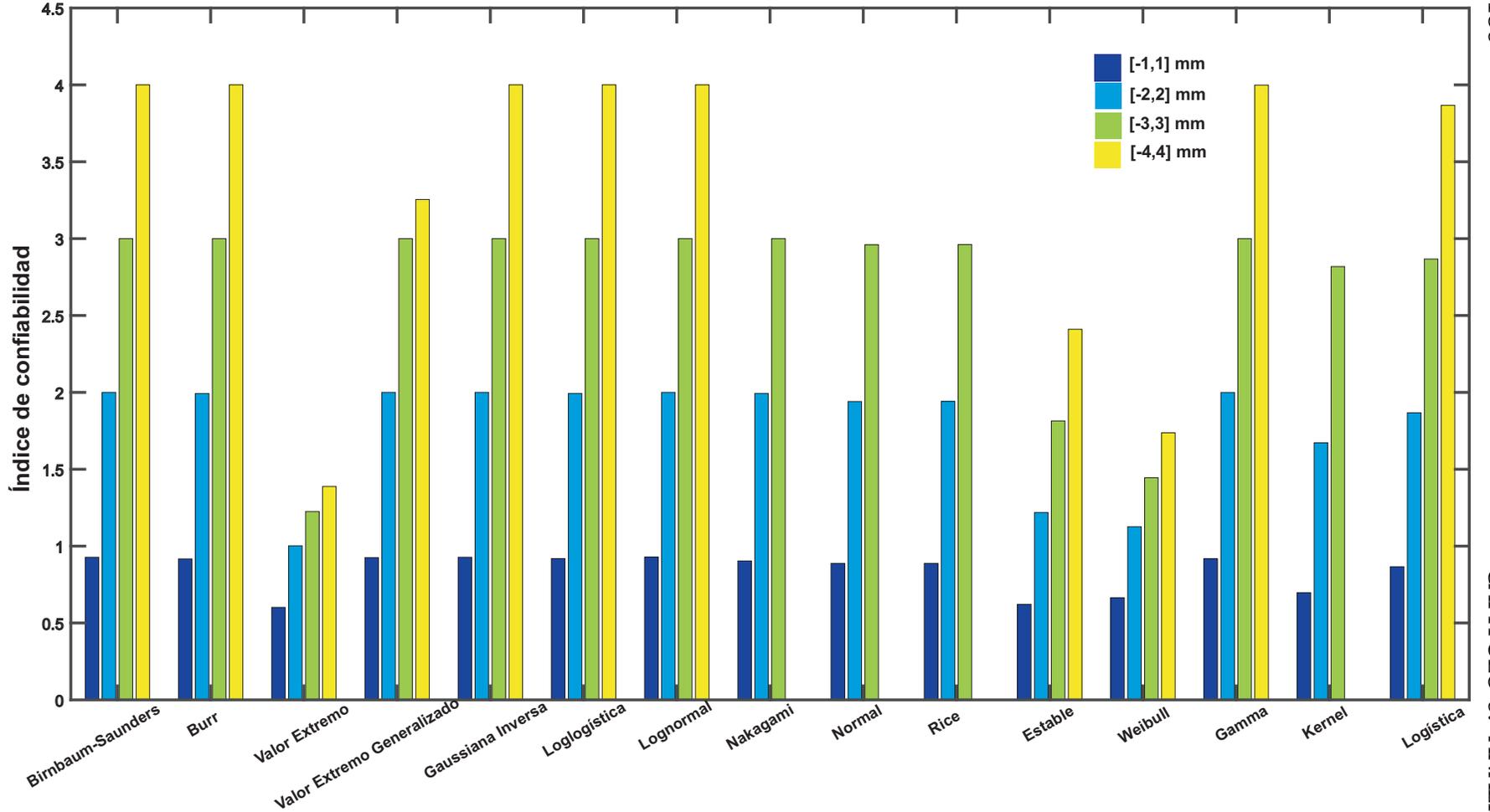


Figura 6.34: Índices de confiabilidad calculados a partir de la probabilidad de falla para la prueba de carga 2. Filtro Chebyshev tipo II.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

El método de *Pocisionamiento Puntual Preciso (PPP-GNSS)* demostró ser una alternativa potencial para el monitoreo de la salud estructural y una tecnología que se puede aplicar a los procesos de rehabilitación de puentes. La precisión lograda con el método PPP-GNSS es lo suficientemente confiable para medir desplazamientos mayores a los 5 mm, bajo condiciones especiales de medición. Por otro lado, la aplicación de un filtro adaptativo LMS para mitigar el error de *multipath*, fue de bastante importancia para poder encontrar los desplazamientos precisos ocurridos en cada prueba de carga por el peso de los vehículos. También, es necesario aplicar el filtro de la media móvil para extraer los desplazamientos semi-estáticos, donde estos representan los desplazamientos lentos del puente. El servicio de post-procesamiento CSRS-PPP, representa una atractiva opción para el procesamiento de mediciones GNSS por el método PPP-GNSS. Principalmente, a las soluciones de posición precisas que alcanza con los diferentes productos como: las efemérides precisas, correcciones de reloj para el satélite y receptor, combinaciones lineales para la solución de la ionosfera libre, entre otros productos necesarios para el método PPP-GNSS. Para encontrar desplazamientos que representen el comportamiento real del puente *El Carrizo*, por el peso de los vehículos, a través del método PPP-GNSS, debe de procesarse en modo PPP-cinemático (dinámico). Esto debido, a que las soluciones por época son independientes a las épocas anteriores. Por lo cual, cuando la estructura sufre un cambio en desplazamientos de una época de medición a otra, es registrada de manera precisa con el método PPP-cinemático. Sin embargo, una deficiencia de esta técnica es la precisión alcanzada. Para llevar a cabo el método PPP-GNSS en modo cinemático (dinámico), es necesario tener en consideración el tiempo de medición, el cual debe ser de por lo menos 60 minutos para la resolución de la ambigüedad entera.

Los desplazamientos obtenidos sobre el puente *El Carrizo*, durante las pruebas de carga con la tecnología GNSS a través de la técnica PPP-GNSS y el sensor LVDT, fueron muy similares. Donde las diferencias están en el rango de los 3 mm para ambas pruebas de carga, estas diferencias se pueden derivar de que los sensores estaban en diferentes cuerpos. Considerando los desplazamientos obtenidos con el sensor LVDT, como referencia para de-

terminar el grado de precisión con el cual se registraron los desplazamientos para cada prueba de carga, con la tecnología PPP-GNSS. Para la primera prueba de carga se registraron desplazamientos máximos de 7.22 mm con la tecnología PPP-GNSS, representando el 67 % de precisión con respecto a los 10.718 mm registrados con el sensor LVDT. Para el caso de la segunda prueba de carga, se registraron desplazamientos máximos de 11.24 mm con la tecnología PPP-GNSS, representando el 96 % de precisión con respecto a los 11.61 mm registrados con el sensor LVDT. Concluyendo así, que la tecnología PPP-GNSS tiene un mayor grado de precisión cuando se registran desplazamientos mayores a 1 cm, algo bastante común en puentes flexibles.

Otro de los objetivos de esta investigación, es la extracción de los desplazamientos dinámicos de las series de tiempo que representan a los desplazamientos aparentes. De los 3 filtros digitales pasa-altas utilizados para extraer los desplazamientos dinámicos en esta investigación, dos de ellos son propuestos por el autor como una alternativa al filtro Chebyshev tipo I, siendo este, el más utilizado en la literatura científica de monitoreo estructural con la tecnología GNSS, para extraer desplazamientos dinámicos. Estos filtros pasa-altas alternativos son: Butterworth y Chebyshev tipo II. Demostrando que el filtro Butterworth es el filtro digital pasa-altas que más similitud tiene con el filtro Chebyshev tipo I. Sin embargo, los desplazamientos dinámicos extraídos con los 3 filtros son estadísticamente muy parecidos, y concluyendo así, que los filtros Butterworth y Chebyshev tipo II son confiables y precisos para extraer desplazamientos dinámicos. Por otro lado, el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos extraídos por cada filtro fue diferente, esto debido a las características y propiedades de cada filtro. A partir de la prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrada (χ^2), se determinó que la distribución Kernel, es la que mejor representa el comportamiento aleatorio de los desplazamientos dinámicos para las dos pruebas de carga. La probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos, se cálculo a partir de la distribución de probabilidad Kernel. Se demostró, que para el cálculo de la probabilidad de falla en términos de desplazamiento, el parámetro más importante a considerar, es la función de densidad de probabilidad que se ajuste a los datos. Si se calcula la p_f con una función de densidad de probabilidad que no se ajusta a los datos a estudiar, la probabilidad de falla será imprecisa y no representará una magnitud a considerar al momento de tomar una decisión sobre la condición estructural del puente. El índice de confiabilidad (β), esta relacionado de manera directa sobre la probabilidad de falla (p_f), por lo cual, la importancia del cálculo de la p_f de manera precisa.

La probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos, calculada a partir de los desplazamientos dinámicos extraídos con los tres filtros, presentó diferencias considerables, esto debido a que la curva que define a los histogramas era diferente para cada caso, y por lo tanto, al momento de determinar el área bajo la curva en los límites a y b , será diferente. Se concluye que para el cálculo de la probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos y el índice de confiabilidad (β), es importante definir el filtro digital pasa-altas que extraiga los desplazamientos dinámicos, ya que para cada filtro, el comportamiento aleatorio es diferente, y por lo tanto, la p_f y el β serán diferentes. Y por último, se demostró que la tecnología GNSS a través de la técnica de posicionamiento PPP-GNSS, es una metodología eficiente y precisa para el estudio de desplazamientos en puentes, donde

la geometría del mismo sea compleja y no permita la instalación de otros sensores para registrar desplazamientos. Con base en la probabilidad de falla (p_f) y el índice de confiabilidad (β), se concluye que las condiciones del Puente *El Carrizo* en la subestructura del doble voladizo, son seguras después de la rehabilitación y no representan algún problema para el tránsito vehicular.

7.2. Recomendaciones y trabajos futuros

Para llevar a cabo una medición precisa y confiable de desplazamientos sobre la estructura de un Puente, con la tecnología GNSS a través de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP-GNSS), es necesario que el receptor a utilizar sea de orden geodésico y tenga seguimiento a diferentes constelaciones GNSS (para una rápida resolución de ambigüedades enteras), al igual que una tasa de muestreo alta (≥ 10 Hz). Es necesario tener por lo menos 60 minutos de medición antes de provocar un cambio en la estructura (rápida resolución de ambigüedad), ya sea por el peso conocido de los vehículos o el mismo tráfico. Una de las condiciones que tiene mayor importancia en las mediciones GNSS en general es: determinar donde colocar el receptor geodésico GNSS para que el error de *multipath* lo afecte lo menos posible, conociendo esto, se debe colocar el receptor geodésico GNSS en una zona de la estructura del puente, donde no haya obstrucciones y reflejo de la señal. Para el procesamiento de los archivos de observación generados en la medición, es necesario contar con un software de procesamiento de datos GNSS por el método PPP-GNSS cinemático, que considere la mitigación o eliminación de todas las fuentes de errores que afectan al método PPP. El autor propone el servicio online CSRS-PPP para el proceso de datos GNSS por el método PPP-GNSS, ya que es gratuito y cuenta con diferentes productos para la mitigación de las fuentes de error. Después del procesamiento de los datos GNSS es necesario aplicar un filtro adaptativo LMS para mitigar el error de *multipath*, causado principalmente por los cables del puente (si es un puente atirantado) o el mismo tráfico. El filtro de la media móvil es una opción para suavizar las series de tiempo generadas en las mediciones y así eliminar mediciones erróneas (offset). Para la extracción de los desplazamientos dinámicos, el autor propone utilizar los filtros Butterworth, Chebyshev tipo II y el ya utilizado en diversos trabajos científicos; Chebyshev tipo I.

Para garantizar que, el cálculo de la probabilidad de falla (p_f) en términos de desplazamientos sea confiable, es necesario realizar una prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrada (χ^2).

Considerando como base el estudio redactado en este documento para trabajos futuros y retomando las ineficiencias del método PPP y los errores generales de las mediciones GNSS. Se recomienda seguir trabajando en la mejora del método PPP para el monitoreo de la salud estructural en Puentes y el tratamiento de la señal. En la actualidad, se sigue estudiando la mitigación del *multipath* en las mediciones GNSS sobre estructuras, por lo cual, el autor propone desarrollar un *Sistema integrado*, a base de dos sensores para la mitigación del *multipath*, el cual consiste:

- Desarrollar un sistema que este compuesto por un receptor de orden geodésico GNSS

y un acelerómetro, que ambos sensores registren el comportamiento de la estructura en dos magnitudes, es decir, la posición y la aceleración. Considerando que la medición de la aceleración no es afectada por el error de *multipath*, y llevando la posición obtenida con el receptor GNSS a aceleración por un proceso matemático, se pretende tener dos señales muy similares, pero estas señales tendrán diferencias por el error del *multipath* en la aceleración derivada del posicionamiento. Tomando como referencia la señal de aceleración del acelerómetro, y a través de un proceso matemático estadístico y de correlación, se eliminan los offset causados por el *multipath*. Después se aplica un proceso inverso matemático de doble integración, y considerando la aceleración como una magnitud no constante, se lleva la aceleración a posicionamiento con un grado de confiabilidad preciso para los desplazamientos alcanzables con la tecnología GNSS, por el método PPP-GNSS.

- Desarrollar e implementar un software, que permita la transmisión inalámbrica en tiempo real de los datos registrados por el receptor GNSS y el acelerómetro, para visualizar el comportamiento a través de desplazamientos de la estructura libre del efecto *multipath*.
- Aplicar el sistema desarrollado a diferentes Puentes de la Ciudad de Culiacán y extenderlo a otras obras de ingeniería como: los edificios, puentes peatonales y presas, para determinar su salud estructural.

Referencias

- AASTHO (1994). *LRFD Bridge Design Specification, 1ra ed.*, American Association of State Highway And Transportation Officials. Washington, DC.
- Abdel-Salam, M. A.-t. (2005). *Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations*, volumen 69.
- Abdelazeem, M., Farah, A., y Farrag, F. (2011). Assessment study of using online (csrs) gps-ppp service for mapping applications in egypt. *Journal of Geodetic Science*, 1:233–239.
- Al-Shomrani, A. A., Shawky, A. I., Arif, O. H., y Aslam, M. (2016). Log-logistic distribution for survival data analysis using mcmc. *SpringerPlus*, 5(1):1774.
- Alexander, C. y Sadiku, M. (2002). *Fundamentos de circuitos eléctricos mcgraw-hill*.
- Anderle, R. J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. En *Satellite Doppler Positioning*, páginas 47–75.
- Ashkenazi, V. y Roberts, G. (1997). Experimental monitoring of the humber bridge using gps. En *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, volumen 120, páginas 177–182. Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- Bahadur, B. y Nohutcu, M. (2018). Ppph: a matlab-based software for multi-gnss precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4):113.
- Behr, J., Hudnut, K., y King, N. (1998). Monitoring structural deformation at pacoima dam, california using continuous gps. En *PROCEEDINGS OF ION GPS*, volumen 11, páginas 59–68. INSTITUTE OF NAVIGATION.
- Beran, T., Kim, D., y Langley, R. B. (2003). High-precision single-frequency gps point positioning. En *Proceedings of the 16th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation, Portland, OR, USA*, volumen 912, página 912. Citeseer.
- Beshr, A. (2004). *Accurate Surveying Measurements for Smart Structural Members*. Tesis Doctoral, MSc. Thesis, Mansoura University, Public Works Department, faculty of
- Bingley, R., Dodson, A., Penna, N., Teferle, N., y Baker, T. (2001). Monitoring the vertical land movement component of changes in mean sea level using gps: results from tide gauges in the uk. *Journal of Geospatial Engineering*, 3(1):9–20.

- Birnbaum, Z. W. y Saunders, S. C. (1969). A new family of life distributions. *Journal of applied probability*, 6(2):319–327.
- Blewitt, G. (1989). Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B8):10187–10203.
- Blewitt, G. (1990). An automatic editing algorithm for gps data. *Geophysical research letters*, 17(3):199–202.
- Bolbol, S., Ali, A., S El-Sayed, M., y Nasr, M. (2017). Performance evaluation of precise point positioning (ppp) using csrs-ppp online service. *American Journal of Geographic Information System*, 2017:156–167.
- Brunner, F., Hartinger, H., y Richter, B. (2000). Continuous monitoring of landslides using gps: A progress report. *Geophysical Aspects of Mass Movements*, edited by: Bauer, SJ and Weber, F., Austrian Academy of Sciences, Vienna, páginas 51–60.
- Bruyninx, C. (2007). Comparing gps-only with gps+ glonass positioning in a regional permanent gnss network. *GPS Solutions*, 11(2):97–106.
- Burr, I. W. (1942). Cumulative frequency functions. *The Annals of mathematical statistics*, 13(2):215–232.
- Cai, C. (2009). Precise point positioning using dual-frequency gps and glonass measurements. En *Masters Abstracts International*, volumen 48, página 172.
- Canavos, G. (1988). Probabilidad y estadística. aplicaciones y métodos. editorial mcgraw-hill.
- Chan, W., Xu, Y., Ding, X., y Dai, W. (2006). An integrated gps–accelerometer data processing technique for structural deformation monitoring. *Journal of Geodesy*, 80(12).
- Chen, K. y Gao, Y. (2005). Real-time precise point positioning using single frequency data. En *ION GNSS*. Citeseer.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., y Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*, volumen 208. Springer.
- CSRS (2004). Online precise point positioning 'how to use' document. *NRC. Natural Resources Canada*, 144.
- Dai, L., Wang, J., Rizos, C., y Han, S. (2003). Predicting atmospheric biases for real-time ambiguity resolution in gps/glonass reference station networks. *Journal of Geodesy*, 76(11-12):617–628.
- Dawod, G., Ismail, S., y Mohamed, H. (2007). Assessment of a cost-effective gps data processing alternative in egypt utilizing international online processing services. *Civ. Eng. Res. Mag. (CREM), Al-Azhar College of Engineering*, 29(2):1–12.

- Dodson, A., Meng, X., y Roberts, G. (2001). Adaptive method for multipath mitigation and its applications for structural deflection monitoring. En *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001)*, páginas 5–8.
- Duff, K., Hyzak, M., McDonald, H., Mc Gown, A., y Innes, J. (1997). Deformation monitoring with gps, part 1: System design and performance. En *Symposium on Surveying of Large Bridge and Tunnel Projects (FIG)*.
- Ebner, R. y Featherstone, W. (2008). How well can online gps ppp post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? *Journal of Applied Geodesy*, 2.
- El-Rabbany, A. (2002). *Introduction to GPS: the global positioning system*. Artech house.
- Euler, H.-J. y Schaffrin, B. (1991). On a measure for the discernibility between different ambiguity solutions in the static-kinematic gps-mode. En *Kinematic systems in geodesy, surveying, and remote sensing*, páginas 285–295. Springer.
- Farah, A. (2015). Accuracy assessment study for kinematic gps–ppp using single- and dual-frequency observations with various software packages. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(7):2013–2019.
- Forward, T., Stewart, M., Penna, N., y Tsakiri, M. (2001). Steep wall monitoring using switched antenna arrays and permanent gps networks. En *Proc. 10th FIG Int. Symp. On Deformation Measurements*, páginas 19–22. Citeseer.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M. a., Shi, C., y Liu, J. (2008). Resolution of gps carrier-phase ambiguities in precise point positioning (ppp) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7):389–399.
- Gelb, A. (1979). *Applied optimal estimation*. MIT press.
- GLONASS, I. (1998). Technical report. v.4.0.
- GLONASS, I. (2002). Global navigation satellite system glonass interface control document.
- GPS, I. (2000). Space segment/navigation user interfaces, interface control document gps (200), no. *ICD GPS*, 200.
- Gudbjartsson, H. y Patz, S. (1995). The rician distribution of noisy mri data. *Magnetic resonance in medicine*, 34(6):910–914.
- Gumbel, E. J. (1958). Statistical theory of floods and droughts. *Journal of the Institution of Water Enigneers and Scientists*, (12):157–184.
- Gumbel, E. J. (2012). *Statistics of extremes*. Courier Corporation.
- Guzman-Acevedo, G. M., Vazquez-Becerra, G. E., Millan-Almaraz, J. R., Rodriguez-Lozoya, H. E., Reyes-Salazar, A., Gaxiola-Camacho, J. R., y Martinez-Felix, C. A. (2019). Gps, accelerometer, and smartphone fused smart sensor for shm on real-scale bridges. *Advances in Civil Engineering*, 2019.

- Habrigh, H., Neumaier, P., y Fischer, K. (2004). Glonass data analysis for igs. En *Proceedings of the IGS Workshop*, páginas 1–5.
- Haykin, S. S. (2005). *Adaptive filter theory*. Pearson Education India.
- Héroux, P. y Kouba, J. (2001). Gps precise point positioning using igs orbit products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8):573–578.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Hong, Y. H., Park, H. W., y Lee, H. S. (2008). A regularization scheme for displacement reconstruction using acceleration data measured from structures. En *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, volumen 6932, página 693228. International Society for Optics and Photonics.
- Huber, K., Heuberger, F., Abart, C., Karabatic, A., y Weber, R. (2010). Ppp: Precise point positioning—constraints and opportunities.
- Hudnut, K. W. y Behr, J. A. (1998). Continuous gps monitoring of structural deformation at pacoima dam, california. *Seismological Research Letters*, 69(4):299–308.
- Hudnut, K. W., Bock, Y., Galetzka, J. E., Webb, F. H., y Young, W. H. (2001). The southern california integrated gps network (scign). En *The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements*, páginas 19–22. Orange California, USA.
- Hugentobler, U., Dach, R., Fridez, P., y Meindl, M. (2006). Bernese gps software, version 5.0 draft. *Astronomical Institute, University of Berne*.
- Hwang, J., Yun, H., Park, S.-K., Lee, D., y Hong, S. (2012). Optimal methods of rtk-gps/accelerometer integration to monitor the displacement of structures. *Sensors*, 12(1):1014–1034.
- Hwang, J.-N., Lay, S.-R., y Lippman, A. (1994). Nonparametric multivariate density estimation: a comparative study. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(10):2795–2810.
- IGS (2008). Igs products. available at <http://www.igs.org/components/prods.html>.
- IONEX, G. S. (1998). The ionosphere map exchange format version 1. *Astronomical institute, university of Berne*.
- Jin, S., Luo, O., y Ren, C. (2010). Effects of physical correlations on long-distance gps positioning and zenith tropospheric delay estimates. *Advances in Space Research*, 46(2):190–195.
- Kalooop, M. R. (2012). Bridge safety monitoring based-gps technique: case study zhujiang huangpu bridge. *Smart Structures and Systems*, 9(6):473–487.
- Kalooop, M. R., Sayed, M. A., y Kim, D. (2013). Damage detection of cable-stayed bridge using combined gps and accelerometer observations.

- Kashima, S., Yanaka, Y., Suzuki, S., y Mori, K. (2001). Monitoring the akashi kaikyo bridge: first experiences. *Structural engineering international*, 11(2):120–123.
- Kissell, R. y Poserina, J. (2017). Chapter 4 - advanced math and statistics. En Kissell, R. y Poserina, J., editores, *Optimal Sports Math, Statistics, and Fantasy*, páginas 103 – 135. Academic Press.
- Klobuchar, J. A. (1996). Ionospheric effects on gps. *Global positioning system: theory and application*.
- Kotz, S. y Nadarajah, S. (2000). *Extreme value distributions: theory and applications*. World Scientific.
- Larson, K. M., Webb, F. H., y Agnew, D. C. (1991). Application of the global positioning system to crustal deformation measurement. ii-the influence of errors in orbit determination networks. *Journal of Geophysical Research*, 96:16.
- Leick, A., Rapoport, L., y Tatarnikov, D. (2015). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.
- Lemaire, M. (2013). *Structural reliability*. John Wiley & Sons.
- Li, H., Bao, Y., y Ou, J. (2008). Structural damage identification based on integration of information fusion and shannon entropy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(6):1427–1440.
- Li, X., Rizos, C., Ge, L., Tamura, Y., y Yoshida, A. (2005). The complementary characteristics of gps and accelerometer in monitoring structural deformation. En *Ion 2005 Meeting*. Citeseer.
- Li, X., Zhang, X., y Guo, F. (2014). Predicting atmospheric delays for rapid ambiguity resolution in precise point positioning. *Advances in Space Research*, 54(5):840–850.
- Liao, X. (2000). *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*. Calgary.
- Lovse, J., Teskey, W., Lachapelle, G., y Cannon, M. (1995). Dynamic deformation monitoring of tall structure using gps technology. *Journal of surveying engineering*, 121(1):35–40.
- Lyons, R. G. (2004). *Understanding digital signal processing, 3/E*. Pearson Education India.
- Mader, G. y Czopek, F. (2002). Calibrating antenna phase centers. the block iia satellite. *GPS World*, 13:40–46.
- Magalhães, F., Caetano, E., y Cunha, Á. (2008). Operational modal analysis and finite element model correlation of the braga stadium suspended roof. *Engineering Structures*, 30(6):1688–1698.
- Mandelbrot, B. (1961). Stable paretian random functions and the multiplicative variation of income. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, páginas 517–543.

- Marquez-Azua, B. y DeMets, C. (2009). Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2).
- McCarthy, D. (1996). IERS conventions, IERS tech. note 21. Paris: *Observatoire de Paris*.
- McCarthy, D. D. (1992). IERS technical note 13. *Observatoire de Paris. Central Bureau of IERS. Paris*.
- Mekik, C. (1997). Tropospheric delay models in GPS. En *International Symp. On GIS/GPS, Istanbul, Turkey*.
- Melbourne, W. (1985). The case for ranging in GPS-based geodetic systems. En *Proc. 1st int. symp. on precise positioning with GPS*, páginas 373–386.
- Meng, X. (2002). *Real-time deformation monitoring of bridges using GPS/accelerometers*. Tesis Doctoral, University of Nottingham.
- Meo, M., Luliano, E., y Morris, A. (2002). Health monitoring of large scale civil structures. *Cranfield University, Cranfield, UK*.
- Meo, M., Zumpano, G., Meng, X., Cosser, E., Roberts, G., y Dodson, A. (2006). Measurements of dynamic properties of a medium span suspension bridge by using the wavelet transforms. *Mechanical systems and signal processing*, 20(5):1112–1133.
- Meyer-Baese, U. (2007). *Digital signal processing with field programmable gate arrays*, volumen 65. Springer.
- Mireault, Y., Tétreault, P., Lahaye, F., Héroux, P., y Kouba, J. (2008). Online precise point positioning: A new, timely service from natural resources Canada. *GPS World*, 19:59–64.
- Misra, P. y Enge, P. (2006). Global positioning system: signals, measurements and performance second edition. *Massachusetts: Ganga-Jamuna Press*.
- Moschas, F. y Stiros, S. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Engineering Structures*, 33(1):10–17.
- Moschas, F. y Stiros, S. (2013). Noise characteristics of high-frequency, short-duration GPS records from analysis of identical, collocated instruments. *Measurement*, 46(4):1488 – 1506.
- Moya, J. P. A. (2011). Procesamiento digital de señales. *Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniera Electrónica*.
- Nakagami, M. (1960). The m-distribution—a general formula of intensity distribution of rapid fading. En *Statistical methods in radio wave propagation*, páginas 3–36. Elsevier.
- Noga, K. M. y Studański, R. (2016). Estimation of Nakagami distribution parameters in describing a fading radio-communication channel. *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, 204(1):69–81.

- Nowak, A. S. y Collins, K. R. (2012). *Reliability of structures*. CRC Press.
- Oleynik, E., Mitrikas, V., Revniviykh, S., Serdukov, A., Dutov, E., y Shiriaev, V. (2001). High-accurate glonass orbit and clock determination for the assessment of system performance. En *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*, páginas 2065–2079.
- Parkinson, B. W. (1996). Global positioning system: Theory and applications i. *Progress in Astronautics and aeronautics*, 163:3–55.
- Petrov, L. y Boy, J. (2003). Study of the atmospheric pressure loading signal in vlbi observations, submitted to j. *Geophys. Res.*
- Pliego, F. J. M. y Ruiz-Maya, L. (2004). *Estadística: Probabilidad*. Thomson.
- Psimoulis, P., Peppas, I., Bonenberg, L., Ince, S., y Meng, X. (2016). Combination of gps and rts measurements for the monitoring of semi-static and dynamic motion of pedestrian bridge.
- Rabbel, W. y Schuh, H. (1986). The influence of atmospheric loading on vlbi-experiments. *Journal of Geophysics-Zeitschrift fuer Geophysik*, 59:164–170.
- Rizos, C. (1997). *Principles and practice of GPS surveying*. University of New South Wales.
- Rizos, C., Han, S., Ge, L., Chen, H.-Y., Hatanaka, Y., y Abe, K. (2000). Low-cost densification of permanent gps networks for natural hazard mitigation: First tests on gsi's geonet network. *Earth, planets and space*, 52(10):867–871.
- Roberts, G., Brown, C., Tang, X., Meng, X., y Ogundipe, O. (2014). A tale of five bridges; the use of gnss for monitoring the deflections of bridges. *Journal of Applied Geodesy*, 8:241–264.
- Roberts, G., Meng, X., Brown, C., et al. (2004). From st pauls to the tate modern; overcoming problems in monitoring bridge deflections using gps. En *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, United Kingdom, June*.
- Romero, I., Dow J, Z. R., Feltens J, G. C., Glotov, B. H., y J, P. (2004). The esa/esoc igs analysis center report 2002, igs 2001-2002 technical report, 53-58, igs central bureau.
- Rothacher, M. y Beutler, G. (2002). Advanced aspects of satellite positioning, lecture notes for engo 609.90. *University of Calgary: Master Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary*.
- Sánchez-Alzola, A. (2016). Monitorización geodésica de deformaciones en el archipiélago balear y en el sector oriental de la cordillera bética a partir de series temporales gnss de estaciones permanentes con procesamiento ppp.

- Sanz Subirana, J., Zornoza, J. J., y Hernández-Pajares, M. (2013). Gns data processing. vol. i: Fundamentals and algorithms. Noordwijk: European Space Agency Communications.
- Seeber, G. (1993). Satellite and geodesy: foundations, methods, and applications. Walter de Gruyter. Berlin-New York.
- Shen, X. (2002). *Improving ambiguity convergence in carrier phase-based precise point positioning*. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering.
- Shrestha, S. M. (2003). *Investigations Into the Estimation of Tropospheric Delay and Wet Refractivity Using GPS Measurements H*. Citeseer.
- Snedecor, G. W. y Cochran, W. G. (1989). Statistical methods, eight edition. Iowa state University press, Ames, Iowa.
- Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L.-C., Ishibashi, R., y Yoshida, A. (2002). Measurement of wind-induced response of buildings using rtk-gps. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12-15):1783–1793.
- Tang, X., Roberts, G. W., Li, X., y Hancock, C. M. (2017). Real-time kinematic ppp gps for structure monitoring applied on the severn suspension bridge, uk. *Advances in Space Research*, 60(5):925 – 937.
- Tao, W. (2008). Near real-time gps ppp-inferred water vapor system development and evaluation. *University of Calgary: Master Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary*.
- Teferle, F., Bingley, R., Dodson, A., Penna, N., y Baker, T. (2002). Using gps to separate crustal movements and sea level changes at tide gauges in the uk. En *Vertical reference systems*, páginas 264–269. Springer.
- Thompson, C. y Shure, L. (1995). *Image Processing Toolbox: For Use with MATLAB; [user's Guide]*. MathWorks.
- Trotin, N., Ladret, P., y del Olmo, S. (2015). «el carrizo»: construcción con lanzadoras de un tablero atirantado por avance en voladizo. *Hormigón y Acero*, 66(275):69–83.
- Tweedie, M. C. *et al.* (1957). Statistical properties of inverse gaussian distributions. i. *The Annals of Mathematical Statistics*, 28(2):362–377.
- Vazquez B., G., Gaxiola-Camacho, J., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G., y Gaxiola-Camacho, I. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the juarez bridge using gps technology. *Measurement*, 110:146–153.
- Verhagen, S. y Teunissen, P. J. (2006). New global navigation satellite system ambiguity resolution method compared to existing approaches. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 29(4):981–991.

- Voit, J. (2013). *The statistical mechanics of financial markets*. Springer Science & Business Media.
- Wang, J., Meng, X., Qin, C., y Yi, J. (2016). Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling gps data. *Shock and Vibration*, 2016.
- Wang, J., Stewart, M., y Tsakiri, M. (1998). A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly. *Journal of Geodesy*, 72(11):644–653.
- Weber, R. y Fagnier, E. (2002). The quality of precise glonass ephemerides. *Advances in Space Research*, 30(2):271–279.
- Weber, R., Slater, J. A., Fagnier, E., Glotov, V., Habrich, H., Romero, I., y Schaer, S. (2005). Precise glonass orbit determination within the igs/iglos–pilot project. *Advances in Space Research*, 36(3):369–375.
- Whalley, S. (1990). *Precise orbit determination for GPS satellites*. Tesis Doctoral, University of Nottingham.
- Wu, J.-T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I., y Lichten, S. M. (1992). Effects of antenna orientation on gps carrier phase. En *Astrodynamicity 1991*, páginas 1647–1660.
- Wubben, G. (1985). Software developments for geodetic positioning with gps using ti 4100 code and carrier measurements. En *Proceedings 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system*, páginas 403–412. US Department of Commerce.
- Xia, F., Ye, S., Xia, P., Zhao, L., Jiang, N., Chen, D., y Hu, G. (2019). Assessing the latest performance of galileo-only ppp and the contribution of galileo to multi-gnss ppp. *Advances in Space Research*, 63(9):2784 – 2795. Multi-GNSS: Methods, Benefits, Challenges, and Geosciences Applications.
- Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q., y Yanagidani, T. (2013). High-rate precise point positioning (ppp) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of gps ppp with inertial measurement units. *Journal of Geodesy*, 87(4):361–372.
- Yang, Y., Hatch, R. R., y Sharpe, R. T. (2004). Gps multipath mitigation in measurement domain and its applications for high accuracy navigation. En *Proceedings of the ION GNSS*.
- Yigit, C. O., Coskun, M. Z., Yavasoglu, H., Arslan, A., y Kalkan, Y. (2016). The potential of gps precise point positioning method for point displacement monitoring: A case study. *Measurement*, 91:398 – 404.
- Yigit, C. O. y Gurlek, E. (2017). Experimental testing of high-rate gnss precise point positioning (ppp) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2):893–904.

- Yu, J., Meng, X., Shao, X., Yan, B., y Yang, L. (2014). Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode gnss processing. *Engineering Structures*, 81:432 – 443.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., y Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B3):5005–5017.