

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

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



DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS  
PARA EL MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN  
PUENTES UTILIZANDO OBSERVACIONES GNSS DE  
RECEPTORES DE BAJO COSTO Y TELÉFONOS  
INTELIGENTES

**TESIS**

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

**PRESENTA:**

**M.C. JESÚS RENÉ VÁZQUEZ ONTIVEROS**

**DIRECTORES**

**DR. GUADALUPE ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA**

**DR. JOSÉ RAMÓN GAXIOLA CAMACHO**

**CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO, MARZO 2024**



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## UAS-Dirección General de Bibliotecas

### Repositorio Institucional Buelna

#### Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional

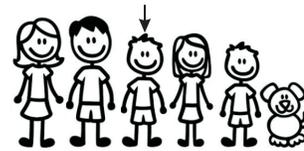


# Dedicatorias

Para mi pequeña familia: Laura, Nash y Lizzie



Para mi primera familia:  
Mamá, Papá, Martha, Carlos y el Broly



*“Never, never be afraid to do what’s right, especially if the well-being of a person or animal is at stake. Society’s punishments are small compared to the wounds we inflict on our soul when we look the other way”*

Martin Luther King Jr  
(1929-1968)



---

# Agradecimiento

Esta investigación se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio en conjunto con la Facultad de Informática Culiacán, ambas facultades de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. La investigación fue financiada por una beca de investigación de 4 años otorgada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), con el número de registro de becario: 859589. Sin embargo, cabe destacar que los resultados, observaciones y conclusiones presentados en este documento de tesis doctoral son únicamente responsabilidad del autor y no reflejan necesariamente las opiniones de las organizaciones patrocinadoras.

En primer lugar, extiendo mis agradecimientos al esfuerzo que hicieron/hacen/harán todas las personas alrededor del mundo para aportar conocimiento original y de calidad a la ciencia, ya que sin este esfuerzo no habría culminado este documento de tesis doctoral. En segundo lugar, agradezco a mis asesores de tesis, el Dr. G. Esteban Vázquez-Becerra y al Dr. J. Ramón Gaxiola-Camacho por aportarme un poco de sus conocimientos y el proceso de guiarme-enseñarme en el ámbito académico/científico, principalmente en lo ético y profesional generando investigación original y de alta calidad internacional, en estos últimos 7 años. En tercer lugar, extiendo mis agradecimientos y respeto a la Dra. M. Clara de Lacy y al Dr. Antonio Miguel Ruíz-Armenteros por enseñarme que ser científico no es tener un título de Dr/PhD, sino, sentarse a trabajar y generar conocimiento. En cuarto lugar, agradezco al Dr. Quintana por asesorarme en el área del Monitoreo Estructural en puentes, conocimiento necesario para la culminación de este trabajo. También, agradezco al MC. Miguel, MC. Alvaro, Lic. Hector por brindarme la oportunidad y confianza de llevar a cabo mediciones sobre el puente El Carrizo. En quinto lugar, hago un agradecimiento especial a mis amigos Michel Guzmán y Jesús Monjardín por arriesgar la vida por la ciencia. Además, agradezco a mi amigo Juan Luis Cabanillas-Zavala por enseñarme a valorar el tiempo. Gracias también a mis colegas y amigos del posgrado en ciencias de la información: Charbeth, Ana, Grisel, Karan. A Jorge Padilla, por su ayuda en el procesamiento de datos GPS en GAMIT y un sinfín de software.

A mis amigos geodestas Leire, Alejandro y Gustavo, y mi amigo astrónomo Benjamín Camacho, de quienes aprendí que el mayor error que alguien puede cometer es pensar que ser investigador es un trabajo: es una pasión y amor por el conocimiento. Por último, y más importante, me gustaría expresar mi mayor agradecimiento y respeto a mis padres, hermanos y mi hermosa novia Laura. Siempre me apoyaron y se mantuvieron en contacto conmigo cuando estuve trabajando. Su cuidado y amor son esenciales para continuar con

---

mi investigación.

Agradezco a la Dra. Xóchitl Guadalupe Torres Carrillo y al Dr. Jesús Roberto Millán Almaraz por haber revisado este documento de tesis, sin duda sus comentarios y sugerencias fueron muy valiosas.

# Resumen

Los procesos de Monitoreo de la Salud Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) de puentes en donde se utiliza la tecnología satelital GNSS, actualmente dependen de receptores y antenas de grado geodésico. Sin embargo, el elevado costo de estos equipos limita su aplicación y hace que su adquisición sea difícil por parte de universidades e institutos de investigación. En los últimos años, debido al rápido desarrollo de los módulos y chips GNSS, nace una nueva generación de receptores GNSS de bajo costo y teléfonos inteligentes capaces de registrar observaciones multi-GNSS y multi-frecuencia de código y fase portadora. No obstante, las mediciones de los receptores GNSS de bajo costo son de menor calidad que los de grado geodésico, con un mayor ruido en las observables y una baja supresión del efecto *multipath* en las antenas de parche. Por lo cual, el objetivo principal de esta tesis de investigación fue evaluar el desempeño/comportamiento de las observaciones GNSS de receptores de bajo costo y teléfonos inteligentes para monitorear desplazamientos y frecuencias modales de puentes bajo condiciones normales de uso. En este sentido, para probar la precisión de estos equipos de bajo costo se estableció un conjunto de experimentos. Dichas experimentaciones consistieron desde mediciones estáticas de periodo largo para realizar un análisis de calidad sobre la señal, pruebas estáticas sobre monumentos con coordenadas de referencia para evaluar el posicionamiento multi-GNSS a través de diferentes técnicas de procesamiento (PPP-AR, RTK, Diferencias Dobles), pruebas para analizar el efecto de los parámetros de calibración de la antena de parche en el posicionamiento preciso, simulación de desplazamientos para probar el desempeño de los equipos de bajo costo en la detección de desplazamientos en tiempo real, evaluación de un conjunto de software de código abierto y servicios en línea para el procesamiento de datos PPP-GNSS, y finalmente, los receptores GNSS de bajo costo y el teléfono inteligente se prueban sobre un puente atirantado para evaluar las metodologías propuestas y la precisión. Con base en los resultados alcanzados se concluye que los receptores GNSS de bajo costo son capaces de detectar las frecuencias de hasta 4 modos de vibrar en un puente flexible, y desplazamientos semi-estáticos similares a los alcanzados por un receptor de grado geodésico. Además, estos equipos fueron capaces de detectar desplazamientos mínimos horizontales y verticales en tiempo real de 4 y 5 mm, respectivamente. Por otro lado, por primera vez en un trabajo formal de investigación, se demuestra que las observaciones GNSS desde un teléfono inteligente pueden medir propiedades dinámicas sobre puentes al lograr registrar la frecuencia fundamental con un error del 0.22 %, y obtener desplazamientos semi-estáticos con una diferencia menor a los 5 mm con respecto a los de referencia. En general, los resultados alcanzados en esta tesis doctoral demuestran que los receptores GNSS de bajo costo pueden ser implementados en sistemas SHM en tiempo

---

real y en aplicaciones de monitoreo de deformaciones. También, un teléfono inteligente GNSS puede ser utilizado en mediciones de deformación de alta precisión. Por último, con el desarrollo e implementación de las metodologías documentadas en esta tesis doctoral, se contribuye bastante en el entendimiento del funcionamiento de sensores GNSS de bajo costo y teléfonos inteligentes a ser implementados en la filosofía SHM de puentes. Lo anterior, sin duda beneficia a los organismos encargados de la seguridad de la infraestructura utilizada día con día por población de una nación.

# Abstract

The Structural Health Monitoring (SHM) philosophy of bridges where GNSS technology is used, currently depends on geodetic grade receivers and antennas. However, the high cost of these devices limits their application making the data acquisition process a real challenge. This is something really faced by universities and research institutes trying to buy expensive receivers and antennas. In recent years, due to the rapid development of GNSS modules and chips, a new generation of low-cost GNSS receivers and smartphones are now available in the market. Such devices can record multi-GNSS and -frequency code as well as carrier phase observations. However, measurements obtained via low-cost GNSS receivers are of lower quality than geodetic-grade ones, presenting higher noise in observables and low multipath suppression in patch antennas. Based on the above problematic, the main objective of this doctoral thesis is to evaluate the performance of GNSS observations coming from low-cost receivers and smartphones to monitor displacements and modal frequencies of bridges subjected to normal/service loadings. Then, to test the precision of these low-cost devices, a set of experiments was established and explored. Such experiments and tests consisted on long-period static measurements to perform a quality analysis on the signal, static tests on monuments with reference coordinates to evaluate multi-GNSS positioning through different processing techniques (PPP-AR, RTK, Double Differences), tests to analyze the effect of patch antenna calibration parameters on precise positioning, displacement simulation to test the performance of low-cost equipment in real-time displacement detection, evaluation of a set of open source software and online services for data processing PPP-GNSS, and finally, the low-cost GNSS receivers and smartphone are tested on a cable-stayed bridge to evaluate the proposed methodologies and their accuracy. Based on the results, it is concluded that low-cost GNSS receivers can detect the frequencies of up to 4 modes of vibration in a flexible bridge, and semi-static displacements like those extracted by a geodetic grade receiver. In addition, these devices could detect minimum horizontal and vertical displacements in real time of 4 and 5 mm, respectively. On the other hand, for the first time in a formal investigation, it is demonstrated that GNSS observations from a smartphone can measure dynamic properties on bridges by extracting the fundamental frequency with an error of 0.22 % and obtaining semi-static displacements with a difference of less than 5 mm with respect to the reference. Overall, the results achieved in this doctoral thesis demonstrate that low-cost GNSS receivers can be implemented in real-time SHM systems and deformation monitoring applications. Also, a GNSS smartphone can be used when high-precision deformation measurements are required to be extracted. Finally, with the development and implementation of the methodologies presented in this doctoral thesis, an outstanding contribution is documented

---

about the understanding of the performance of low-cost GNSS devices and smartphones to be used in the SHM philosophy of bridges. Hence, without a doubt, this will benefit the public/private organisms in charge of the safety of critical infrastructure as bridges.

# Contenido

<b>Lista de figuras</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XIX</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XXI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	5
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. General	7
1.4.2. Específicos	7
1.5. Hipótesis	8
1.6. Antecedentes	8
1.7. Esquema de la tesis	11
<b>2. Monitoreo de la Salud Estructural (SHM)</b>	<b>19</b>
2.1. Introducción	19
2.2. Estrategia y técnica SHM	22
2.3. Sensores utilizados en el SHM	23
2.3.1. Sensores cinemáticos	24
2.3.2. Sensores mecánicos	26
2.3.3. Sensores ambientales	26
<b>3. Evaluación de la calidad de observaciones y rendimiento del posicionamiento 3D de receptores GNSS de bajo costo de doble frecuencia</b>	<b>33</b>
3.1. Introducción	33
3.2. Receptores GNSS de bajo costo	35
3.2.1. Módulo ZED-F9P	35
3.2.2. Módulo Mosaic-X5	37
3.3. Configuración experimental y adquisición de datos	38
3.3.1. Pruebas estáticas de largo periodo de medición	38
3.3.2. Posicionamiento 3D	41
3.4. Análisis de calidad de las señales GNSS	45

3.4.1. Propuesta de análisis SNR . . . . .	45
3.4.2. Intensidad de la señal GNSS . . . . .	47
3.4.3. Análisis del <i>multipath</i> . . . . .	53
3.4.4. Análisis de la integridad y saltos de ciclo . . . . .	58
3.5. Resultados y análisis . . . . .	60
3.5.1. Evaluación del posicionamiento 3D . . . . .	60
3.5.1.1. Posicionamiento relativo . . . . .	60
3.5.1.2. Posicionamiento Puntual Preciso . . . . .	62
3.6. Discusiones . . . . .	64
3.7. Conclusiones . . . . .	65
<b>4. Monitoreo de desplazamientos dinámicos en tiempo real mediante receptores GNSS de bajo costo de alta frecuencia: Una posibilidad al monitoreo de puentes de gran envergadura</b>	<b>73</b>
4.1. Introducción . . . . .	73
4.2. Protocolo NTRIP . . . . .	76
4.3. Posicionamiento Cinemático en Tiempo Real (RTK) . . . . .	77
4.4. Configuración experimental . . . . .	78
4.4.1. Posicionamiento 3D . . . . .	79
4.4.2. Simulación de desplazamientos horizontales y verticales . . . . .	80
4.4.3. Prueba estacionaria . . . . .	82
4.5. Resultados y análisis . . . . .	83
4.5.1. Análisis del posicionamiento 3D . . . . .	83
4.5.2. Análisis de desplazamientos simulados . . . . .	85
4.5.3. Prueba estacionaria . . . . .	94
4.6. Discusión . . . . .	97
4.7. Conclusiones y recomendaciones . . . . .	98
<b>5. Evaluación de la calidad de observaciones GNSS y análisis del rendimiento en posicionamiento de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 para el Monitoreo de Salud Estructural</b>	<b>107</b>
5.1. Introducción . . . . .	107
5.2. Chip GNSS Broadcom BCM47755 . . . . .	111
5.3. Apps para la recopilación de mediciones GNSS . . . . .	112
5.3.1. Geo++ Rinex Logger . . . . .	112
5.3.2. GNSS Logger . . . . .	113
5.3.3. RINEX ON . . . . .	114
5.4. Configuración experimental y adquisición de datos . . . . .	114
5.4.1. Análisis de calidad de los datos GNSS . . . . .	118
5.4.1.1. Análisis de la visibilidad y geometría de los satélites . . . . .	118
5.4.1.2. Análisis de los valores $C/N_0$ para las señales GNSS recibidas	126
5.4.1.3. Integridad de las observaciones GNSS . . . . .	129
5.4.1.4. Análisis del <i>multipath</i> de doble frecuencia . . . . .	130
5.5. Rendimiento de posicionamiento GNSS del teléfono inteligente . . . . .	133
5.5.1. Estrategias de procesamiento . . . . .	135

---

5.5.2. Resultados del posicionamiento estático . . . . .	135
5.6. Discusiones . . . . .	136
5.7. Conclusiones . . . . .	139
<b>6. Evaluación y análisis de PPP con resolución de ambigüedad entera utilizando diferentes software de código abierto y servicios en línea</b>	<b>145</b>
6.1. Introducción . . . . .	145
6.2. Resumen de los software PPP de código abierto y servicios PPP en línea . . .	147
6.2.1. Software PPP de código abierto . . . . .	147
6.2.1.1. PPPH . . . . .	147
6.2.1.2. gLAB . . . . .	147
6.2.1.3. Net_Diff . . . . .	147
6.2.1.4. RTKLib . . . . .	148
6.2.1.5. PRIDE-PPPAR . . . . .	148
6.2.1.6. MG-APP . . . . .	148
6.2.1.7. goGPS . . . . .	149
6.2.1.8. GAMP . . . . .	149
6.2.1.9. PPPLib . . . . .	149
6.2.1.10. GipsyX . . . . .	149
6.2.2. Servicios PPP en línea . . . . .	150
6.2.2.1. CSRS-PPP . . . . .	150
6.2.2.2. APPS . . . . .	150
6.2.2.3. GAPS . . . . .	151
6.2.2.4. Trimble Center Point RTX . . . . .	151
6.2.2.5. MagicGNSS . . . . .	151
6.3. Adquisición de datos y Metodología . . . . .	151
6.3.1. Descripción de los datos . . . . .	152
6.3.2. Estrategias de procesamiento . . . . .	152
6.4. Resultados y análisis . . . . .	158
6.4.1. Experimento estático . . . . .	158
6.4.2. Experimento cinemático . . . . .	163
6.5. Discusión . . . . .	166
6.6. Conclusiones . . . . .	169
<b>7. Caso de estudio: Puente Atirantado El Carrizo</b>	<b>175</b>
7.1. Puente El Carrizo . . . . .	175
7.2. Sistema SHM con receptores GNSS de orden geodésico . . . . .	176
7.2.1. Configuración experimental . . . . .	176
7.2.2. Adquisición de datos GNSS . . . . .	178
7.2.3. Estrategias de procesamiento GNSS . . . . .	179
7.2.4. Respuesta del puente El Carrizo- análisis espectral . . . . .	181
7.2.5. Resultados . . . . .	181
7.2.5.1. Calidad de las observaciones GNSS . . . . .	182
7.2.5.2. Desplazamientos semi-estáticos del puente El Carrizo . . . .	184

7.2.5.3. Desplazamientos dinámicos y análisis espectral del puente El Carrizo . . . . .	187
7.2.6. Discusión . . . . .	192
7.2.7. Conclusiones . . . . .	194
7.3. Sistema SHM de bajo costo . . . . .	195
7.3.1. Descripción del experimento y adquisición de datos . . . . .	195
7.3.2. Procesamiento de datos GNSS . . . . .	197
7.3.3. Resultados . . . . .	198
7.3.3.1. Calidad de las observaciones GNSS . . . . .	198
7.3.3.2. Desplazamientos semi-estáticos . . . . .	200
7.3.3.3. Análisis de frecuencias naturales . . . . .	203
7.3.4. Discusiones y conclusiones . . . . .	205
7.4. Sistema SHM desde mediciones GNSS de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8	208
7.4.1. Recopilación de datos y diseño del experimento . . . . .	208
7.4.2. Características de las observaciones GNSS del Xiaomi Mi 8 . . . . .	212
7.4.2.1. Relación portadora/densidad de ruido (C/N0) . . . . .	212
7.4.2.2. Observaciones de pseudodistancia . . . . .	213
7.4.2.3. Análisis de deslizamiento de ciclo . . . . .	214
7.4.3. Posicionamiento relativo cinemático con un teléfono inteligente Xiao- mi Mi 8 . . . . .	215
7.4.4. Desplazamientos estáticos del puente El Carrizo desde el Xiaomi Mi 8	216
7.4.5. Análisis espectral del puente El Carrizo desde un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 . . . . .	218
7.4.6. Discusión . . . . .	220
7.4.7. Conclusiones . . . . .	221
<b>8. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>227</b>
8.1. Resumen . . . . .	227
8.2. Receptores GNSS de bajo costo . . . . .	228
8.3. RTK con receptores GNSS de bajo costo . . . . .	229
8.4. Teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 . . . . .	229
8.5. Software de código abierto y servicios en línea para PPP-AR . . . . .	230
8.6. Caso de estudio: puente atirantado El Carrizo . . . . .	230
8.7. Principales contribuciones al conocimiento . . . . .	231
8.8. Trabajos futuros . . . . .	232
<b>A. Publicaciones durante este estudio de doctorado</b>	<b>235</b>
<b>B. Premios y experiencia profesional durante este estudio de doctorado</b>	<b>237</b>

# Índice de figuras

1.1. (a) red de estaciones de referencia, (b) red de puntos de deformación. Fuente: Yavaşoğlu et al. (2018). . . . .	9
1.2. (a) mesa vibratoria, y (b) modelo a pequeña escala en mesa vibratoria. Fuente: Yigit et al. (2021). . . . .	10
1.3. (a) Panel superior: puente peatonal Wilford sobre el río Trent y la ubicación de la estación GNSS de referencia, así como también la estación total robotica; (b) antena de grado geodésico Leica AS10 ubicada en el tramo medio (ubicación c) instrumentada con prismas reflectantes para las mediciones con el RTS; (c) las dos antenas de bajo costo sobre un plano de tierra; (d) dos receptores GNSS de bajo costo, cada uno de ellos conectado a una antena de bajo costo. Fuente: Xue y Psimoulis (2023). . . . .	11
2.1. Estrategias de monitoreo de salud estructural para estructuras de ingeniería civil. Fuente: traducido de Frangopol y Messervey (2009). . . . .	22
3.1. Receptor y antena GNSS de bajo costo utilizados: a) placa C099-F9P, y b) antena GNSS ANN-MB-00. . . . .	36
3.2. Receptor y antena GNSS utilizados: a) Mosaic-X5, y b) antena GNSS. . . . .	37
3.3. Monumento de concreto. . . . .	39
3.4. Trayectoria de los satélites en el cielo durante la medición de 24 horas con los receptores GNSS de bajo costo: a) ZED-F9P y b) Mosaic-X5. . . . .	40
3.5. Bandas disponibles para cada satélite GNSS observado: (a) receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P y, (b) receptor GNSS de bajo costo Mosaic-X5. GLO:GLONASS, GAL:Galileo, BDS:BeiDou. . . . .	40
3.6. Características geométricas de la antena GNSS ANN-MB-00: (a) Dimensiones de la geometría, y (b) desplazamientos del centro de fase. Editado de: U-blox (2023a). . . . .	42
3.7. Diseño experimental para evaluar el posicionamiento 3D con equipo de bajo costo: (a) Pilar rover B, y (b) Pilar de referencia E. . . . .	43
3.8. Efecto de la relación señal-ruido (SNR) sobre las señales GNSS: a)S1C-GPS, b)S2X-GPS, c)S1C-GLONASS, d)S2C-GLONASS, e)S1X-GAL, f)S7X-GAL, g)S2I-BDS y h)S7I-BDS. . . . .	48
3.9. Porcentaje de puntuación SNR para cada satélite GNSS observado desde el receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P. . . . .	49

3.10. Efecto de la relación señal ruido las mediciones del receptor MOSAIC-X5 para las señales: a)S1C-GPS, b)S2X-GPS, c)S1C-GLONASS, d)S2C-GLONASS, e)S1X-GAL, f)S7X-GAL, g)S2I-BDS y h)S7I-BDS. . . . .	51
3.11. Porcentaje de puntuación SNR para cada satélite GNSS observado desde el receptor GNSS de bajo costo Mosaic-X5. . . . .	52
3.12. Efecto del <i>multipath</i> sobre las señales GNSS: a)L1C-GPS, b)L2X-GPS, c)L1C-GLONASS, d)L2C-GLONASS, e)L1X-GAL, f)L7X-GAL, g)C2I-BDS y h)C7I-BDS. . . . .	55
3.13. <i>Multipath</i> para los satélites GNSS observados desde el receptor GNSS ZED-F9P. . . . .	56
3.14. Efecto del <i>multipath</i> en las mediciones del receptor MOSAIC-X5 para las señales: a)S1C-GPS, b)S2X-GPS, c)S1C-GLONASS, d)S2C-GLONASS, e)S1X-GAL, f)S7X-GAL, g)S2I-BDS y h)S7I-BDS. . . . .	57
3.15. <i>Multipath</i> para los satélites GNSS observados desde el receptor GNSS Mosaic-X5. . . . .	58
3.16. Comportamiento tridimensional para cada uno de los criterios: (a)BCK-RSC, (b)BCK-RCCK, (c)BCA-RSC, (d)BCA-RCCA y (e) BSC-RSC. El círculo rojo representa el punto de referencia. . . . .	61
3.17. Diferencias entre las coordenadas obtenidas por PPP y las de referencia. . . . .	63
4.1. Sistema NTRIP. . . . .	76
4.2. Configuración experimental para el posicionamiento 3D con el receptor GNSS de bajo costo en modo RTK: (a) antena ANN-MB-00 sobre el pilar B (ROVER), y (b) antena ANN-MB-00 sobre el pilar E (Punto de Referencia). . . . .	80
4.3. Configuración experimental en la detección de desplazamientos horizontales: (a) Antena ANN-MB-00 sobre el servomotor rotativo, y (b) estación de referencia. . . . .	81
4.4. Configuración experimental en la detección de desplazamientos verticales: (a) dispositivo simulador de desplazamientos verticales y, (b) esquema del orden de los desplazamientos verticales simulados manualmente. . . . .	82
4.5. Configuración experimental para estudiar el nivel de ruido en las series temporales de desplazamientos obtenidas por la técnica RTK. . . . .	83
4.6. Residuos de referencia del punto B pertenecientes a la combinación G+R+E+C: (arriba) residuos de referencia de las componentes horizontales, y (abajo) los residuos de referencia de la componente vertical. El punto y línea color naranja es la posición de referencia para la componente horizontal y vertical, respectivamente. . . . .	84
4.7. Residuos de referencia del punto B pertenecientes a la combinación G+R+E: (arriba) residuos de referencia de las componentes horizontales, y (abajo) los residuos de referencia de la componente vertical. El punto y línea color naranja es la posición de referencia para la componente horizontal y vertical, respectivamente. . . . .	84
4.8. Seguimiento de la trayectoria circular con una frecuencia de muestreo de: (a) 1Hz, (b) 5 Hz, (c) 10 Hz y (d) 20 Hz. . . . .	88
4.9. Error cuadrático medio en cm de las trayectorias circulares registradas a partir de diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo. . . . .	89

4.10. Tiempo en fijar la primera solución durante la medición de las trayectorias circulares medidas a partir de diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo. . . . .	89
4.11. Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical. . .	90
4.12. Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 5 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical. . .	91
4.13. Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 10 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical. . .	92
4.14. Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 20 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical. . .	92
4.15. Porcentaje de error en la detección de desplazamientos verticales para diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo. . . . .	93
4.16. Ruido en las series temporales multi-GNSS muestreadas a: (a) 1Hz, (b) 5 Hz, (c) 10 Hz y (d) 20 Hz. . . . .	95
4.17. Histogramas de errores de las series temporales ajustadas a una distribución normal para las combinaciones GNSS E, G+E y G. . . . .	96
5.1. Chip Broadcom BCM47755. Fuente: Broadcom (2021). . . . .	111
5.2. Interfaz y logo de la aplicación <i>Geo++ Rinex Logger</i> . Fuente: Logger (2021). . . . .	112
5.3. Interfaz y logo de la aplicación <i>GNSS Logger</i> . Fuente: GnsLogger (2021). . . . .	113
5.4. Interfaz y logo de la aplicación <i>RINEX ON</i> . Fuente: rinexON (2021). . . . .	114
5.5. Teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Fuente: Xiaomishop (2021). . . . .	115
5.6. Centro de fase del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Fuente: Zeng et al. (2022). . . . .	116
5.7. Teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 sobre el disco metálico (plano de tierra) en el experimento 1: (a) sin protección térmica y, (b) con protección térmica. . . . .	117
5.8. Orientación de la antena del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical. . . . .	118
5.9. Mapa del cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 1: (a) MLCT y, (b) MCCT. . . . .	119
5.10. Bandas disponibles de los satélites GNSS visibles durante el experimento 1: (a) prueba MLCT y, (b) prueba MCCT. . . . .	120
5.11. Mapa del cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical. . . . .	122
5.12. Bandas disponibles de los satélites GNSS visibles durante el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical. . . . .	123
5.13. Mapa del cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 3: (a) satélites GPS, (b) satélites GLONASS, (c) satélites Galileo, y (d) satélites BeiDou. . . . .	125
5.14. Bandas disponibles de los satélites GNSS visibles durante el experimento 3. . . . .	126

5.15. Porcentajes de puntuación medios de $C/N_0$ para diferentes observaciones GNSS del experimento 1: (a) MLCT y, (b) MCCT. . . . .	127
5.16. Porcentajes de puntuación medios de $C/N_0$ para diferentes observaciones GNSS del experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical. . . . .	128
5.17. Porcentajes de puntuación medios de $C/N_0$ para diferentes observaciones GNSS del experimento 3. . . . .	128
5.18. Porcentajes de puntuación de $C/N_0$ para cada satélite GNSS observado en el experimento 3. . . . .	129
5.19. Integridad de las observaciones GNSS correspondientes al experimento 3. . . . .	130
5.20. Valores medios del <i>multipath</i> para las mediciones de GPS y Galileo en el experimento 1: (a) MLCT y, (b) MCCT. . . . .	131
5.21. Valores medios del <i>multipath</i> para las mediciones de GPS y Galileo en el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical. . . . .	132
5.22. Valores medios del <i>multipath</i> para las mediciones de GPS y Galileo en el experimento 3. . . . .	132
5.23. Valores del <i>multipath</i> para cada satélite GPS y Galileo observado en el experimento 3. . . . .	133
5.24. Xiaomi Mi 8 centrado verticalmente y nivelado sobre un monumento de centrado forzoso. Configuración de coordenadas ENU y orientación de la antena. . . . .	134
5.25. Disponibilidad de los satélites duales GPS y Galileo para el periodo de evaluación de 07:00-18:00 hrs (UTC-7). . . . .	138
6.1. Distribución de las 13 estaciones GNSS del IGS utilizadas en el experimento 2. . . . .	155
6.2. Representación 3D del puente Isla Musalá. . . . .	156
6.3. Estrategias del experimento cinemático: (a) rotación de las coordenadas topocéntricas y, (b) estación de referencia en la azotea de la FACITE. . . . .	156
6.4. Análisis de calidad de las estaciones GNSS utilizadas en el experimento. . . . .	159
6.5. Diagrama de barras de las componentes E, N y U obtenidas para las 13 estaciones IGS con los software de código abierto. . . . .	160
6.6. Error cuadrático medio para cada componente ENU de los software de código abierto evaluados en este Capítulo 6. . . . .	161
6.7. Diagrama de barras de las coordenadas E, N y U para las estaciones IGS obtenidas en los servicios PPP en línea evaluados en este Capítulo 6. . . . .	162
6.8. Errores cuadráticos medios de los servicios PPP en línea evaluados en este Capítulo 6. . . . .	163
6.9. Series de tiempo de los desplazamientos 3D del puente Isla Musalá. . . . .	165
6.10. Error cuadrático medio de las series de tiempo de los desplazamientos 3D del puente Isla Musalá. . . . .	166
7.1. Puente El Carrizo: (a) geometría y dimensiones del puente (editado de Gómez-Martínez et al. (2021)), y (b) vista actual del puente. . . . .	175
7.2. Diseño experimental de la evaluación de los receptores GNSS de orden geodésico Geomax Zenith 25. . . . .	177

7.3. Instrumentación de los receptores GNSS: (a) estación de referencia y, (b) receptor rover fijo en el parapeto del puente El Carrizo. . . . .	177
7.4. Trayectoria de los satélites GPS y GLONASS durante el monitoreo sobre el puente El Carrizo. . . . .	178
7.5. Rotación de las coordenadas ENU al sistema local 3D del puente El Carrizo.	180
7.6. Valores de <i>SNR</i> y <i>multipath</i> : (a) <i>multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para GPS y GLONASS de la estación de referencia GNSS, (b) <i>SNR</i> en $L_1$ y $L_2$ para GPS y GLONASS de la estación de referencia, (c) <i>multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado A del tablero del puente, (d) <i>SNR</i> en $L_1$ y $L_2$ para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado A del tablero del puente, (e) <i>multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado B del tablero del puente, y (f) <i>SNR</i> en $L_1$ y $L_2$ para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado A del tablero del puente. . . . .	184
7.7. Desplazamientos locales estáticos 3D del puente El Carrizo obtenidas en el software científico TRACK. . . . .	186
7.8. Histogramas de las diferencias de coordenadas obtenidas en el software TRACK y RTKLib v2.4.2. . . . .	186
7.9. (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto A-TRACK. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.	188
7.10. (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto B-TRACK. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.	189
7.11. (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto A-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.	190
7.12. (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS+GLONASS para el punto A-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.	191
7.13. (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto B-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.	191
7.14. (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS+GLONASS para el punto B-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.	192
7.15. Instrumentación de las antenas GNSS de orden geodésico y de bajo costo: (a) antena ANN-MB-00 y receptor Geomax Zenith 25 colocados sobre el parapeto del puente El Carrizo, (b) tornillo de centrado preciso y plano de tierra para la antena de bajo costo ANN-MB-00. . . . .	195

7.16. Seguimiento de los satélites GNSS observados por los receptores de bajo costo ZED-F9P durante el experimento. . . . .	196
7.17. Valores de la relación señal/ruido (SNR) para las señales GPS $L_1$ y $L_2$ registradas con el receptor GMZ25 y F9P: (a) SNR para las señales GPS del receptor F9P sobre el punto A, (b) SNR para las señales GPS del receptor F9P sobre el punto B, (c) SNR para las señales GPS del receptor GMZ25 sobre el punto A, y (d) SNR para las señales GPS del receptor GMZ25 sobre el punto B. . . . .	198
7.18. <i>Multipath</i> de las mediciones GPS para la frecuencia $L_1$ y $L_2$ adquiridas con el receptor de orden geodésico GMZ25 y de bajo costo F9P. (a) <i>Multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para el receptor F9P ubicado en el punto A, (b) <i>Multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para el receptor F9P ubicado en el punto B, (c) <i>Multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para el receptor GMZ25 ubicado en el punto A, y (d) <i>Multipath</i> en $L_1$ y $L_2$ para el receptor GMZ25 ubicado en el punto B. . . . .	199
7.19. Desplazamientos estáticos del puente El Carrizo para las tres componentes del lado A. La línea de color azul representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor Geomax Zenith 25. La línea de color rojo representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor de bajo costo ZED-F9P. . . . .	201
7.20. Desplazamientos estáticos del puente El Carrizo para las tres componentes del lado B. La línea de color azul representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor Geomax Zenith 25. La línea de color rojo representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor de bajo costo ZED-F9P. . . . .	202
7.21. (Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto A obtenidas desde mediciones GNSS con receptores de bajo costo. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante. . . . .	203
7.22. (Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto B obtenidas desde mediciones GNSS con receptores de bajo costo. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante. . . . .	204
7.23. Instrumentación del receptor GNSS Geomax Zenith 25 y el Xiaomi Mi 8: (a) separación de mas de dos metro entre el receptor GNSS y el teléfono inteligente, (b) montura del Xiaomi Mi 8 sobre la base nivelante. . . . .	209
7.24. Configuración del experimento para la evaluación del Xiaomi Mi 8. . . . .	210
7.25. Gráficos del cielo y seguimiento de los satélites GNSS observados por el Xiaomi Mi 8 y el receptor GNSS Geomax Zenith 25. (a) para mediciones $L_1/E_1/L_5/E_{5a}$ del Xiaomi Mi 8. (b) para mediciones $L_1/L_2$ del receptor GNSS Geomax Zenith 25. . . . .	211
7.26. Valos de $C/N_0$ para las señales $L_1/E_1$ y $L_5/E_{5a}$ de la constelación GPS y Galileo. . . . .	213
7.27. Valores de <i>multipath</i> en cm: (a) geomax zenith 25, y (b) Xiaomi Mi 8. . . . .	214

7.28.Deslizamiento de ciclo (líneas rojas) en satélites GNSS de cuatro constelaciones: GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. . . . . 215

7.29.Desplazamientos estáticos medidos sobre el puente El Carrizo en las tres componentes con el receptor GNSS de orden geodésico y el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. . . . . 217

7.30.(Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el lado B obtenidas desde mediciones GNSS del receptor GNSS Geomax Zenit 25. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante. . . . . 218

7.31.(Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS+Galileo para el lado B obtenidas desde mediciones GNSS del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante. . . . . 219



# Índice de tablas

2.1. Características de las tecnologías de los sensores presentados. Fuente: Moreno-Gomez et al. (2018). . . . .	29
3.1. Rendimiento del receptor ZED-F9P en diferentes modos GNSS. Fuente: u blox (2021). . . . .	36
3.2. GNSS y señales compatibles en ZED-F9P. Fuente: u blox (2021). . . . .	37
3.3. Características técnicas del receptor Mosaic-X5. Fuente: Septentrio (2021). . . . .	38
3.4. Desplazamientos del centro de fase (PCO) y la variación con respecto al punto de referencia de la antena (ARP) para las bandas L1 y L2 GPS. Estos valores corresponden a una medición sobre un plano de tierra circular de 120 mm. Fuente: U-blox (2023a). . . . .	41
3.5. Estrategias de procesamiento del software RTKLIB (versión demo5_b34b). . . . .	43
3.6. Estrategias de procesamiento del software PRIDE-PPPAR II. . . . .	44
3.7. Niveles teóricos mínimos y máximos de potencia recibida para las señales GNSS. . . . .	46
3.8. Puntajes SNR de las señales GNSS evaluadas ordenados de mayor a menor. . . . .	53
3.9. Integridad de las observaciones de código y fase medidas desde el receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P. . . . .	59
3.10. Integridad de las observaciones de código y fase medidas desde el receptor GNSS de bajo costo Mosaic-X5. . . . .	59
3.11. Análisis estadístico de los errores para cada criterio de evaluación en el posicionamiento relativo. . . . .	62
4.1. Resumen estadístico de las coordenadas topocéntricas del punto B. . . . .	85
4.2. Resumen de los resultados alcanzados con respecto a los ángulos de elevación. . . . .	86
4.3. Media y desviación estándar de la detección de los desplazamientos verticales acumulados simulados. . . . .	94
4.4. Nivel de ruido para las tres componentes muestreadas a 1 Hz. . . . .	97
5.1. Señales compatibles con el chip GNSS BCM47755. Fuente: Broadcom (2021). . . . .	111
5.2. Descripción de los valores DOP. . . . .	121
5.3. Valores DOP para las pruebas del experimento 1. . . . .	121
5.4. Valores DOP para las pruebas del experimento 2. . . . .	123
5.5. Valores DOP para cada constelación GNSS del experimento 3. . . . .	126

5.6. Sesgos del centro de fase de la antena en centímetros del Xiaomi Mi 8 con respecto al PR. . . . .	134
5.7. Estrategias de procesamiento para el software RTKLib demo5 b34g. . . . .	135
5.8. Resumen estadístico de errores estáticos del posicionamiento relativo. . . . .	136
6.1. Resumen de opciones de procesamiento PPP para los software estudiados. . . . .	155
6.2. Principales características de los servicios en línea para el procesamiento PPP. . . . .	157
6.3. Principales características de los software de código abierto para el procesamiento PPP . . . . .	157
6.4. Magnitudes de las componentes ENU máximas y mínimas obtenidas con los software de código abierto evaluados. . . . .	160
6.5. Magnitudes de las componentes ENU máximas y mínimas obtenidas desde los servicios PPP en línea. . . . .	163
6.6. Desplazamientos máximos y mínimos, desviación estándar y error cuadrático medio de las series de tiempo generadas con las diferentes plataformas de procesamiento de datos GNSS-PPP. . . . .	165
6.7. Incertidumbre total de los software de código abierto y servicios PPP en línea. . . . .	167
7.1. Estrategias de procesamiento utilizadas por el software RTKLib v2.4.2 y TRACK. . . . .	179
7.2. Puntuación de los valores <i>SNR</i> y su relación con la calidad de la señal GNSS. . . . .	182
7.3. Resumen del análisis de calidad de las mediciones GNSS. . . . .	183
7.4. Resumen estadístico de los desplazamientos estáticos obtenidos desde el software RTKLib considerando diferentes combinaciones GNSS. . . . .	185
7.5. Resumen estadístico de las diferencias entre los desplazamientos estáticos obtenidos por el software RTKLib y TRACK. . . . .	185
7.6. Frecuencias modales del puente El Carrizo en Hz, emitidas por el Instituto Mexicano del Transporte. . . . .	187
7.7. Porcentaje del error en % entre la diferencia de los valores de referencia y los medidos. . . . .	189
7.8. Resumen de los parámetros de calidad de las observaciones GNSS del receptor GMZ25 y ZED-F9P. . . . .	200
7.9. Resumen estadístico de los desplazamientos estáticos de los lados A y B del puente El Carrizo. . . . .	202
7.10. Resumen estadístico de las frecuencias de los modos de vibrar de los lados A y B de la sección atirantada del puente El Carrizo. . . . .	204
7.11. Número de satélites rastreados por bandas de frecuencia durante el experimento de recopilación de datos. . . . .	212
7.12. Número de saltos de ciclo por constelación GNSS. . . . .	215
7.13. Estrategias de procesamiento utilizados en el software RTKLib. . . . .	216
7.14. Resumen estadístico de los desplazamientos estáticos obtenidos con el receptor GNSS Geomax Zenith 25 y el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. . . . .	217
7.15. Porcentaje del error en la extracción de la frecuencia de los modos de vibrar del puente El Carrizo con mediciones GNSS del GMZ25 y Xiaomi Mi 8. . . . .	220

# Acrónimos

AASSHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
APC	Antenna Phase Center
APPS	Automatic Precise Positioning Service
ARP	Antenna Reference Point
BKG	Federal Agency for Cartography and Geodesy
C/N0	Carrier-to-Noise density
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
CMC	Code-Minus-Carrier phase
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CORS	Continuously Operating Reference Station
CSRS-PPP	Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning
DCB	Differential Code Biases
DD	Doubles Differences
DOP	Dilution Of Precision
ECEF	Earth-Centered, Earth-Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FCC	Federal Communications Commission
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transform
GAGAN	GPS and GEO Augmented Navigation
GAPS	GPS Analysis and Positioning Software
GIPSYX	GNSS-Inferred Positioning SYstem X
GLAB	GNSS LABORatory tool
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ICD	Interface Control Documents
ICOLD	International Commission On Large Dams
IFCB	Inter-Frequency Code Bias
IFPB	Inter-Frequency Phase Bias
IGS	International GNSS Service

---

IMT	Instituto Mexicano del Transporte
IRSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ISB	Inter-System Bias
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LAMBDA	Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjusment
LHCP	Left-Hand Circular Polarization
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MEO	Medium Earth Orbit
MG-APP	Multi-GNSS Automatic Precise Positioning
MSAS	Multi-Functional Satellite Augmentation System
NGS	National Geodetic Survey
NRTK	Network RTK
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OTF-AR	On-The-Fly Ambiguity Resolution
PCO	Phase Centre Offset
PCV	Phase Center Variation
PPP	Precise Point Positioning
PPP-AR	Precise Point Positioning-Ambiguity Resolution
PPP-GNSS	Precise Point Positioning-Global Navigation Satellite System
PPPLIB	Precise Point Positioning Library
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RHCP	Right-Handed Circular Polarization
RINEX	Receiver INdependent EXchange
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time Kinematics
RTS	Robotic Total Station
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SGG	School of Geodesy and Geomatics
SHM	Structural Health Monitoring
SICT	Secretaria de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes
SNR	Signal-to-Noise Ratio

# Capítulo 1

## Introducción

*“La ciencia es más que un simple conjunto de conocimientos: es una manera de pensar”*

Carl Sagan (1934-1996)

### 1.1. Introducción

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) son una herramienta eficiente y confiable para obtener posicionamiento tridimensional preciso (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). El avance que ha tenido la tecnología GNSS en el desarrollo de algoritmos de procesamiento, hardware de recolección de observaciones y nuevas señales GNSS ha implicado que sea cada vez más utilizada en diversas áreas de investigación por su alta precisión (Paziewski et al., 2019). Las áreas que se han beneficiado de la alta precisión de los GNSS son la ingeniería sísmica mediante el monitoreo de terremotos (Psimoulis et al., 2018; Xu et al., 2013), las ciencias climatológicas para estudiar las condiciones del clima (Koji et al., 2022; Lu et al., 2016; Xu et al., 2023; Zhou et al., 2023), las ciencias espaciales para conocer y explorar la atmósfera (Coster et al., 2017; Melgarejo-Morales et al., 2020), la geofísica para investigar las deformaciones de la corteza (Geng et al., 2016; Marquez-Azua y DeMets, 2009) y la ingeniería estructural para realizar monitoreo de la salud de diversas obras (Vazquez-Becerra et al., 2017; Vazquez-Ontiveros et al., 2023c, 2020). En años recientes, los sismólogos han utilizado las mediciones muestreadas a altas frecuencias por la tecnología GNSS para compararlas con las series de tiempo generadas en los sismógrafos para el estudio del comportamiento de las ondas sísmicas (Geng et al., 2016) e incluso una nueva rama de la sismología nace, denominada *GNSS Seismogeodesy* (Geng et al., 2017, 2022; Larson et al., 2003; Shu et al., 2018; Xin et al., 2021). Por otro lado, el rápido crecimiento en la electrónica de los receptores satelitales GNSS de orden geodésico ha mejorado bastante la forma de medir, es decir, el seguimiento a diversas constelaciones GNSS considerando frecuencias de muestreo altas (hasta 100 Hz) es posible. Las mediciones a frecuencias de muestreo altas ayudan a

que el tiempo de convergencia de las soluciones sea menor y la ambigüedad sea resuelta en menor tiempo para algunas técnicas de procesamiento GNSS (Choy et al., 2017). Sin embargo, las observaciones a frecuencias de muestreo altas presentan una mayor sensibilidad a las fuentes de error (Choy et al., 2017), y aumentan la complejidad de las series de tiempo al momento de su interpretación y análisis. Otra de las deficiencias que presentan las mediciones a altas frecuencias, es al momento de llevar a cabo el post-procesamiento, ya que no existe un software de uso comercial que soporte las observaciones multiconstelaciones a frecuencias de muestreo altas para periodos largos de medición (Paziewski et al., 2019).

Una de las aplicaciones de la tecnología GNSS que inicia a finales de la década de los 90's es la relacionada al monitoreo de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés). Uno de los estudios pioneros sobre el SHM con GPS se reportó en Lovse et al. (1995), donde registraron exitosamente los desplazamientos dinámicos de la Torre Calgary en Alberta, Canadá. Los desplazamientos estuvieron alrededor de 16 mm con una frecuencia fundamental de 0.36 Hz en la torre. Ashkenazi y Roberts (1997) ilustraron los experimentos de uso de la técnica cinemática GNSS para monitorear la respuesta dinámica del Puente Humber en Reino Unido. Demostraron que la tecnología GNSS se puede utilizar para determinar las características de deformación de los puentes en tiempo real. La técnica de procesamiento de observaciones GNSS utilizada en estos trabajos, fue la bien conocida DD (*Doubles Differences*) (Tang et al., 2017) o posicionamiento relativo. Esta técnica requiere de por lo menos dos receptores GNSS, uno como estación de referencia y el otro como rover (Vazquez-Ontiveros et al., 2020). Este método es capaz de alcanzar precisiones milimétricas, sin embargo, presenta altos costos y en ocasiones es difícil de llevar a cabo cuando no es posible colocar la estación de referencia en una zona estable. Una alternativa al método de DD, es el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP, por sus siglas en inglés). PPP es una técnica de posicionamiento en la que no se analizan las líneas de base, en cambio, las coordenadas de los puntos se determinan utilizando un solo receptor (Berber et al., 2017). El método PPP fue propuesto por Anderle (1976) y mejorado por Zumberge et al. (1997). Por otro lado, la técnica PPP requiere de diversos productos precisos para poder alcanzar precisiones altas, estos productos son las efemérides precisas, correcciones a los relojes del satélite y receptor, parámetros dinámicos de la tierra, modelos atmosféricos, parámetros de la antena del receptor y satélite, sesgos y retrasos del hardware, parámetros atmosféricos, parámetros de corrección de la orientación de los satélites, entre otros (Héroux y Kouba, 2001; Sanz Subirana et al., 2013). Además, la técnica PPP es capaz de ejecutar dos principales tipos de levantamientos: (1) estáticos y (2) cinemáticos (Berber et al., 2017). Por otro lado, en el método PPP se presentan dos inconvenientes que tienen un papel importante en la precisión del método: el tiempo de convergencia y la resolución de la ambigüedad flotante/entera (Choy et al., 2017; Yigit et al., 2021). El tiempo de convergencia se define como el tiempo requerido para que las estimaciones de posición o ambigüedad alcancen un nivel específico de precisión y no se desvíen más allá de este nivel después de alcanzarlo, y la ambigüedad es el número de ciclos de la señal al ser emitida por el satélite hasta llegar a la antena (Choy et al., 2017).

Existe otro factor importante que debe ser tomado en cuenta cuando se aplica el método PPP: el software de procesamiento. El software de procesamiento a utilizar debe considerar las fuentes de error que influyen en el método PPP, soportar archivos de observación

GNSS grandes ( $> 1$  gb), modelos para el procesamiento de las señales multi-GNSS y resolver ambigüedades enteras. Para el procesamiento por el método PPP-GNSS existen software científicos/académicos (Bernese, GipsyX, RTKLib, Net\_Diff, gLab, PPPH), software comerciales (GrafNav, Infinity) y plataformas GNSS de procesamiento en línea (CSRS-PPP, APPS, GAPS, magicGNSS, servicio de postprocesamiento Trimble Center Point RTX) (Alkan et al., 2016; Lipatnikov y Shevchuk, 2019; Vazquez-Ontiveros et al., 2023b). Cada uno de estos software presenta sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, el software científico/académico requiere de personal calificado y con conocimiento teórico GNSS. Usualmente algunos software científicos requieren de un pago de licencia. Por otro lado, muchas organizaciones, institutos de investigación y universidades han desarrollado sus propios servicios de procesamiento GNSS en línea. Estos servicios suelen ser gratuitos y tienen muchas ventajas al ser utilizados ampliamente en todo el mundo. Sin embargo, los servicios en línea presentan algunas deficiencias como: la falta de diferentes estrategias de solución a diferencia del software comercial y científico, dificultades para enviar archivos de gran tamaño. Sin embargo, una de las plataformas más utilizadas hoy en día para el procesamiento de datos PPP en modo estático y cinemático, es el servicio en línea CSRS-PPP (Berber et al., 2017; Erol et al., 2020; Vazquez-Ontiveros et al., 2020; Yigit y Gurlek, 2017). Las precisiones alcanzadas con CSRS-PPP pueden llegar al orden de los milímetros (Kaloop et al., 2018; Vazquez-Ontiveros et al., 2023b; Yigit, 2016).

Por lo tanto, considerando los receptores geodésicos modernos es posible obtener mediciones multi-constelaciones a frecuencias de muestreo de hasta 100 Hz, y procesando en un software que considere las fuentes de error del método PPP, es posible alcanzar precisiones en el orden de los milímetros. De esta manera, la tecnología GNSS a través del método absoluto PPP representa una herramienta potencial para el monitoreo de estructuras, como presas, puentes y edificios (Gaxiola-Camacho et al., 2021; Guzman-Acevedo et al., 2019; Kaloop et al., 2018; Vazquez-Becerra. et al., 2017; Vazquez-Ontiveros et al., 2023c, 2020). Los parámetros que suelen ser extraídos de estructuras con la tecnología GNSS son los desplazamientos estáticos y dinámicos, así como también las frecuencias modales (Moschas y Stiros, 2011). Los desplazamientos a corto y a largo plazo son indicadores del comportamiento de la estructura y de la integridad de la misma. Por lo tanto, medir desplazamientos sobre estructuras en ocasiones suele ser complejo, debido a la geometría de la estructura o el lugar geográfico donde está ubicado. El acelerómetro es un instrumento que en ocasiones suele ser utilizado para calcular desplazamientos sobre estructuras (Hong et al., 2008). Sin embargo, el acelerómetro no es capaz de medir desplazamientos de manera directa, y es necesario realizar una doble integración a los datos de aceleración, lo que puede dar lugar a varios errores asociados a las constantes producidas en el proceso matemático (Moschas y Stiros, 2011). Este problema puede resolverse utilizando instrumentos que registran desplazamientos directos como el LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Sin embargo, las vibraciones, los cambios de temperatura y campos magnéticos afectan el desempeño de los sensores LVDT (Moreu et al., 2015). Estos instrumentos son los más usados en los sistemas SHM. Por otro lado, y considerando las ventajas descritas anteriormente de la tecnología GNSS, esta presenta una posible alternativa/complemento del acelerómetro y LVDT. Por lo cual, se han reportado estudios donde desarrollan sistemas SHM sobre estructuras implementando los GNSS (Carrión et al., 2017; Chen et al., 2014; Meng et al., 2018).

Consecuentemente, los instrumentos como los receptores de orden geodésico, los acelerómetros triaxiales, los LVDT e inclinómetros suelen tener precios muy altos en el mercado, por lo cual, hace que diferentes instituciones civiles o académicas no tengan acceso a estos instrumentos. Una alternativa a la solución de adquisición de instrumentos GNSS para diferentes instituciones sería los receptores de bajo costo. Ya que estos instrumentos actualmente se han hecho populares por el bajo precio con el cual se encuentran en el mercado y por la precisión que se puede alcanzar cuando se realiza una medición en condiciones ideales. Para el caso de los receptores GNSS de bajo costo, se han llevado a cabo una serie de investigaciones donde los utilizan para evaluar el desempeño en precisión (Hamza et al., 2021, 2020, 2023). En un primer trabajo, Cina y Piras (2015) investigaron el desempeño de un receptor GNSS (u-blox 5T de una frecuencia) de bajo costo, con el fin de verificar si este tipo de receptores se pueden utilizar para el monitoreo de deslizamiento de tierras. Por otro lado, Biagi et al. (2016) demostraron que es posible obtener precisiones milimétricas con un receptor GNSS de bajo costo ublox- Neo-7P de única frecuencia. Para el caso de sensores de aceleración de bajo costo, se ha demostrado que estos pueden alcanzar precisiones muy altas una vez siendo calibrados, como es el caso del trabajo reportado por Cina et al. (2019), donde muestran los resultados alcanzados de las mediciones de inclinación utilizando acelerómetros MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) de bajo costo. La precisión angular reportada con el acelerómetro de bajo costo fue de algunas centésimas de grado. Por otro lado, una tecnología utilizada a nivel mundial, que en principio tenía como objetivo la comunicación entre usuarios, hoy en día es capaz de llevar a cabo miles de trabajos diferentes siendo el caso de medir diferentes magnitudes con los sensores que trae incorporado, es decir, los teléfonos celulares inteligentes. Los teléfonos inteligentes representan una herramienta indispensable en la vida de las personas, y hoy en día los servicios de geolocalización proporcionados por los teléfonos inteligentes han tenido una mejora (Chen et al., 2019). Gracias a los avances en la electrónica, existen teléfonos inteligentes que son capaces de registrar observaciones GNSS de doble frecuencia, como es el caso del Xiaomi Mi 8 que es capaz de alcanzar precisiones inferiores a los 22 cm utilizando el método PPP (Wu et al., 2019), y hasta 5 cm en posicionamiento relativo (Vazquez-Ontiveros et al., 2023a).

Considerando los receptores GNSS de bajo costo, es posible llevar a cabo sistemas de monitoreo de la salud estructural con un costo inferior a los comúnmente desarrollados. Una de las ventajas que presentan los instrumentos de bajo costo en la filosofía SHM, es la motivación a la innovación y desarrollo de nuevos algoritmos que permitan manipular de manera directa las magnitudes medidas. Los alcances en posicionamiento que han logrado los receptores GNSS de bajo costo son significativos y comparables con los de orden geodésico. Estos receptores son capaces de detectar desplazamientos y frecuencias modales en tiempo real sobre puentes flexibles, haciendolos instrumentos ideales para las pruebas de carga. Durante las pruebas de carga estáticas en los puentes, es necesario visualizar la deflexión o desplazamiento que causa el peso de los vehículos en tiempo real y conociendo otras variables de la estructura, los ingenieros son capaces de tomar decisiones en el instante. Además, la tecnología GNSS de bajo costo no solamente puede medir desplazamientos estáticos, sino que gracias a la alta tasa de muestreo que algunos receptores tienen es posible extraer propiedades dinámicas de los puentes, como los desplazamientos dinámicos y frecuencias modales. También, estos equipos pueden automatizarse y trans-

mitir los desplazamientos de manera remota a través de algún método de transferencia de datos. Construir un sistema SHM sobre un puente atirantado con tecnología GNSS de bajo costo es una de las alternativas más prometedoras en el área de la ingeniería. Estos sistemas SHM de bajo costo resultan atractivos por dos cosas: (1) la inversión destinada por parte de las empresas o institutos encargados de evaluar las estructuras, y (2) la alta confiabilidad en detectar y registrar variables estáticas y dinámicas de la estructura.

## 1.2. Planteamiento del Problema

Una gran cantidad de obras de ingeniería a nivel mundial están llegando y sobrepasando su periodo de vida útil, lo que conlleva a que diferentes dependencias gubernamentales y privadas hagan procesos de monitoreo sobre estas obras para determinar el estado estructural en la que se encuentran. Sin embargo, el porcentaje de estructuras que son monitoreadas periódicamente es muy bajo. Dejando a un lado a estructuras importantes en el desarrollo de un país al no ser monitoreadas. Por otro lado, los procesos de monitoreo son muy costosos y requieren de personal con conocimiento en el área, lo que hace difícil para muchos países poder mantener una estructura con un sistema SHM moderno.

En México, las estructuras que han sido monitoreadas con mayor periodicidad son los puentes, principalmente los de grande alcance por su importancia en la comunicación del país. Pero, aun así, existen puentes localizados en entornos urbanos que desde su construcción nunca han sido monitoreados, representando un problema grave para la sociedad que a diario hace uso de estos. Por otro lado, la infraestructura de presas a nivel nacional carece de estudios estructurales, sin considerar que muchas de ellas ya cuentan con más de 50 años en operación bajo condiciones extremas, principalmente por los fenómenos naturales. Los edificios son las estructuras que tienen mayor impacto cotidiano en la sociedad, ya que muchas personas viven en edificios o trabajan en ellos. Siendo esto un motivo para que los edificios localizados en zonas de riesgo sísmico cuenten con sistemas de monitoreo permanente para detectar cualquier anomalía en su comportamiento que pueda ocasionar su colapso, ocasionando pérdidas humanas. Sin embargo, en ciudades localizadas en zonas de riesgo sísmico, en su mayoría no cuentan con estos sistemas de monitoreo, representando un problema.

Los sistemas SHM están conformados por una serie de instrumentos que ayudan a medir diferentes magnitudes sobre una estructura. Por lo tanto, es indispensable que la confiabilidad de estas magnitudes sea precisa para poder tomar decisiones. Sin embargo, estos instrumentos suelen ser costosos, haciendo que sea difícil su adquisición y derivando a un número pequeño de estructuras que han sido monitoreadas. Los altos costos presentan un posible problema para que se lleven a cabo los sistemas SHM sobre estructuras, por lo cual, se requieren nuevos sistemas que reduzcan los costos pero que se mantenga la confiabilidad de adquisición de las magnitudes, así como la creación de nuevos algoritmos de procesamiento que sean capaces de obtener resultados fiables y precisos.

## 1.3. Justificación

El mundo está lleno de estructuras estacionarias, algunas pequeñas, otras enormes, otras nuevas, la mayoría muy antiguas, como edificios, presas o puentes. Los edificios incluyen complejos de oficinas, edificios de apartamentos o plantas de energía. La característica común entre estas grandes estructuras es que son fundamentales en la vida cotidiana de una sociedad: los puentes son utilizados por peatones, automóviles, camiones y trenes y millones de personas viven en edificios. Cualquier daño en estas estructuras puede resultar en situaciones que amenacen la vida y graves pérdidas financieras. Por lo tanto, controlar y monitorear la salud de estas estructuras con diferentes metodologías inteligentes de bajo costo es imprescindible para detectar cualquier irregularidad o anomalía que pueda ser un signo de daño y que pueda provocar problemas futuros.

En este sentido, el periodo de tiempo durante el cual la estructura es capaz de desempeñar las funciones para la cual fue proyectada, sin necesidad de intervenciones no previstas se le llama vida útil de una edificación. En diversas ciudades a nivel mundial existen obras de ingeniería que están o que ya han culminado su periodo de vida útil, esto requiere que exista un mayor control en los monitoreos sobre estas obras para determinar cual es la integridad en la que se encuentran y poder realizar rehabilitaciones o en el peor de los casos, proyectar su segura destrucción y reconstrucción. Por otro lado, es importante que las ciudades cuenten con diversas obras de ingeniería que ayuden al crecimiento económico regional y mejoren el aprovechamiento del territorio para el beneficio de la sociedad. Llevar a cabo los procesos de SHM requiere de diferentes metodologías de medición, donde estas deben tener alta exigencias en sus precisiones. Otro factor importante por considerar en estos procesos, es la facilidad de instrumentar la estructura, ya que esto significa ahorro de tiempo y costo. La tecnología GNSS a través de sus diferentes métodos de procesamiento ha representado una técnica muy atractiva para ser utilizada en los procesos de SHM en estructuras, al ser fácil de usar y por la alta precisión al obtener desplazamientos dinámicos y semi-estáticos al igual que extracción de frecuencias modales. La ventaja de la tecnología GNSS sobre los métodos comúnmente utilizados a base de sensores como LVDT, acelerómetros, cámaras fotográficas, escáner, láser, estación total, es que no requiere de un sistema estable de referencia, sino, que utiliza los satélites que orbitan la tierra como referencia y obtienen el desplazamiento de manera directa.

Por otro lado, según CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), en México hay más de 4 mil 462 presas, donde 667 de ellas están consideradas como grandes, de acuerdo con los estándares internacionales de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés) por su capacidad de almacenamiento. En Sinaloa hay 12 presas en funcionamiento, estas estructuras están distribuidas en todo su territorio, donde el objetivo de las presas es almacenar agua y la producción de energía eléctrica. Sin embargo, algunas presas cuentan con más de 50 años de servicio y actualmente no existen reportes técnicos del estado estructural de las presas que definan su seguridad. Conociendo la importancia que tienen estas presas en el desarrollo de la agricultura en Sinaloa. Es necesario evaluarlas con las metodologías desarrolladas en este trabajo de investigación.

La Red Federal de Carreteras de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SCT) está compuesta por 9 mil 167 puentes, donde 311 de estos están localizados en Sinaloa. Los puentes sufren deterioro en su estructura por la constante interacción

de los vehículos que los circulan y también al ser sometidos a cargas de vientos y en algunas ocasiones a sismos. Es necesario monitorear los puentes para determinar el grado de seguridad en que se encuentran, sin embargo, en Sinaloa solamente se han monitoreado 2 de 311 puentes por parte de la SCT (El Baluarte y El Carrizo). Debido principalmente al elevado costo que se requiere para monitorear este tipo de puentes. Por otro lado, dentro de las ciudades importantes de Sinaloa, existen puentes que están mal construidos y algunos están sobrepasando su período de vida útil. Requiriendo por parte de las autoridades competentes la realización de estudios continuos sobre estas estructuras para evaluar las condiciones de seguridad.

En resumen, la pertinencia de esta tesis doctoral se justifica por el desarrollo e implementación de metodologías novedosas y de bajo costo, las cuales tienen por objetivo extraer desplazamientos semi-estáticos, dinámicos y propiedades modales sobre estructuras. Estas metodologías serán de carácter único, lo cual justifica su pertinencia, ya que integrará la eficiencia de diversos sensores con base en sus características de extracción de respuesta estructural. Al final, estas técnicas serán capaces de extraer variables de interés sobre obras civiles como puentes, edificios y presas de manera precisa y eficiente. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo se basa en extraer variables de interés sobre las estructuras para su posterior análisis.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. General**

Desarrollar e implementar metodologías novedosas que permitan extraer propiedades estáticas y dinámicas en estructuras a través de la aplicación de receptores GNSS de bajo costo, validadas mediante diversos instrumentos de alta precisión.

### **1.4.2. Específicos**

- Diseñar, desarrollar y calibrar metodologías alternas con tecnología GNSS de bajo costo, que permitan evaluar la integridad estructural en diversas obras de ingeniería.
- Establecer un sistema de bajo costo que permita monitorear desplazamientos horizontales y verticales en tiempo real a través de la tecnología GNSS.
- Desarrollar un algoritmo para extraer propiedades dinámicas en puentes a partir de las series temporales medidas por receptores GNSS de bajo costo.
- Analizar la calidad de las señales GNSS medidas desde un teléfono inteligente.
- Extraer desplazamientos semi-estáticos, dinámicos y frecuencia fundamental de un puente desde observaciones GNSS de un teléfono inteligente.
- Analizar las precisiones de mediciones GNSS a partir del tiempo de convergencia, considerando la solución de ambigüedad PPP-AR.

- Seleccionar y analizar un software científico/académico que permita procesar datos GNSS a frecuencias de muestreo altas por la técnica PPP, considerando soluciones de ambigüedad flotantes y enteras.

## 1.5. Hipótesis

Mediante observaciones GNSS de receptores de bajo costo y teléfonos inteligentes, es posible extraer desplazamientos semi-estáticos, dinámicos y propiedades modales de obras civiles como puentes con una precisión milimétrica.

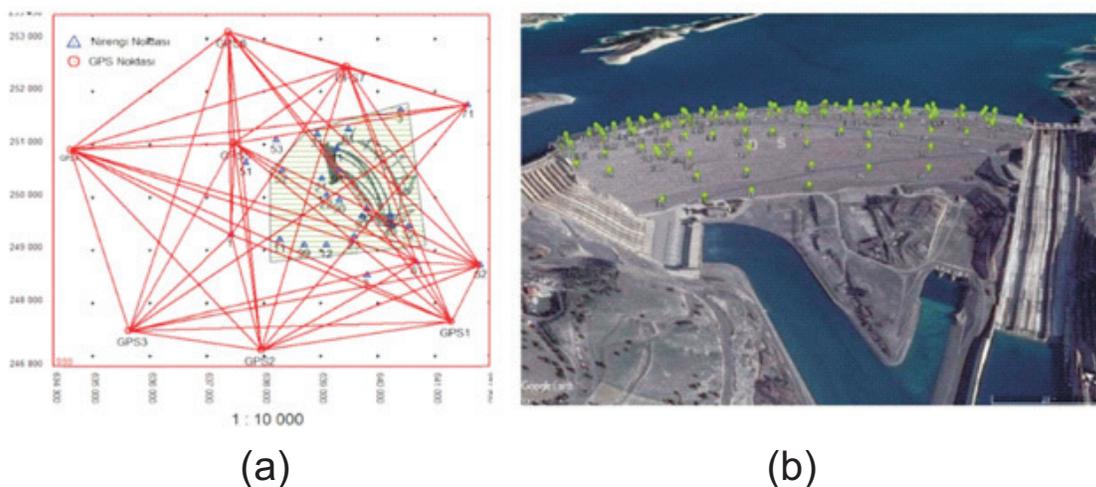
## 1.6. Antecedentes

Se han llevado a cabo diferentes investigaciones donde utilizan la tecnología GNSS para monitorear estructuras como puentes (dos Santos et al., 2019; Guzman-Acevedo et al., 2019; Meng et al., 2019; Vazquez-Becerra. et al., 2017; Vazquez-Ontiveros et al., 2020), presas (Acosta et al., 2018; Vazquez-Ontiveros et al., 2023c; Xi et al., 2018; Yavaşoğlu et al., 2018) y edificios (Tamura et al., 2002). Además, diversos estudios de laboratorio han sido publicados, donde se establecen las condiciones ideales para las mediciones GNSS. Por ejemplo, mesas vibratorias (Paziewski et al., 2019), y vigas modeladas (Kaloop et al., 2018; Yigit y Gurlek, 2017) han sido utilizadas para la calibración de las mediciones GNSS. Es importante mencionar que las condiciones reales de medición GNSS sobre un puente o un edificio son muy diferentes a las pruebas de laboratorio, esto lleva a los investigadores a lidiar con diferentes fuentes de error existentes sobre las estructuras.

Las técnicas de procesamiento de datos GNSS más utilizadas en el monitoreo de estructuras son: diferencias dobles (DD), RTK-GNSS (*Real Time Kinematic-GNSS*) y posicionamiento puntual preciso (PPP). Tang et al. (2017) y Yigit y Gurlek (2017) demostraron que la técnica PPP es una alternativa potencial al DD en el monitoreo de la salud estructural al encontrar diferencias en el posicionamiento en el orden de los milímetros. Por otro lado, Paziewski et al. (2019) lograron medir amplitudes en una mesa vibratoria de 1.3 mm utilizando la técnica PPP a una frecuencia de muestro alta, demostrando la alta precisión que se puede alcanzar con esta técnica al considerar la mayoría de las fuentes de error existentes para el método.

En Yavaşoğlu et al. (2018) estudiaron el comportamiento mecánico de la presa Ataturk a lo largo de un período de tiempo de más de 10 años. La presa Ataturk mide 169 m de altura y tiene la capacidad de almacenar un volumen total de 84, 500 hm<sup>3</sup>. Es la presa más grande del Turquía. Se realizaron periódicamente seguimientos de la deformación de la presa para determinar los desplazamientos horizontales mediante mediciones convencionales (terrestres) de 2006 a 2013 y técnicas basadas en satélites (GNSS) de 2007 a 2013 (11 períodos para mediciones terrestres y 9 períodos para GNSS). Se establecieron 25 estaciones de referencia fuera de la zona de deformación y 217 puntos en la zona de deformación. Se realizaron observaciones GNSS en las 25 estaciones de referencia con al menos 10 h de observaciones, intervalos de datos de 5 s y 10° de máscara de elevación. Por otro lado, los puntos de los objetos se midieron con base en al menos 5 estaciones de

referencia durante 40 minutos de duración con las mismas propiedades de intervalo de datos y máscara de elevación. Esto se puede ver en la Figura 1.1. Los receptores GNSS utilizados fueron: 4 receptores geodésicos GNSS Topcon Hiper GGD y PLUS, 3 Sokkia GRX1, 3 Ashtech Z-Xtreme con antena geodésica IV y 3 Thales Z-Max y antena.

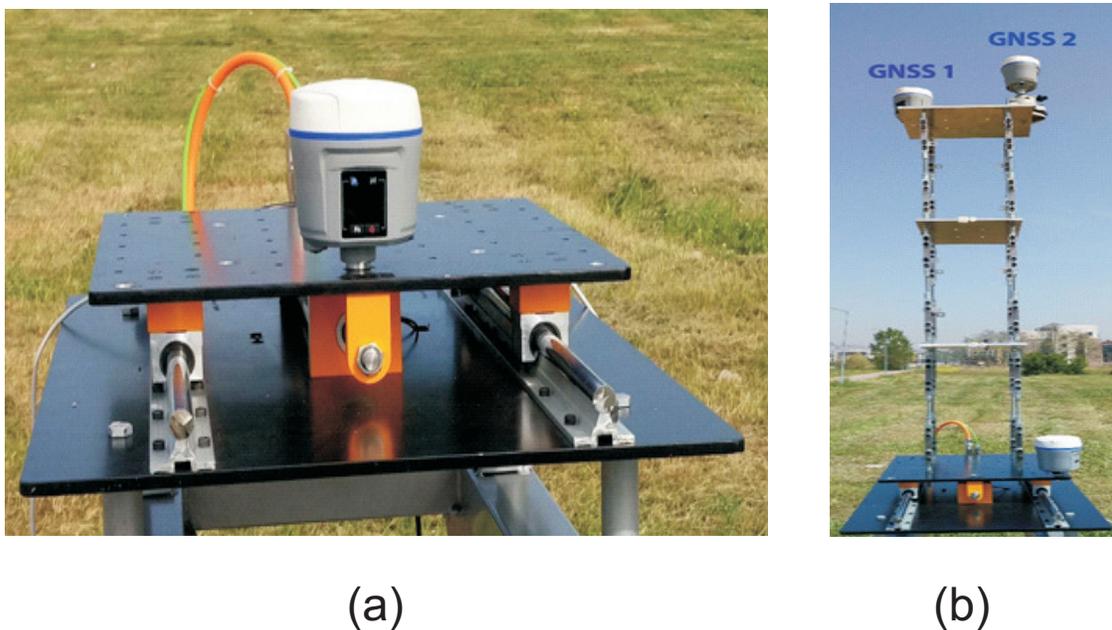


**Figura 1.1:** (a) red de estaciones de referencia, (b) red de puntos de deformación. Fuente: [Yavaşoğlu et al. \(2018\)](#).

Para procesar los datos GNS, utilizaron el software Leica Geo Office con órbitas finales IGS. Los resultados finales demuestran que el punto de deformación con mayor desplazamiento se localiza en la sección media de la presa, con 21.1 cm en la dirección río arriba y río abajo entre 2006-2013. La velocidad media mensual en el punto fue de 2.3 mm. En resumen, el estudio demostró que la presa, después de 8 años de ser construida, se estabilizó y la velocidad de deformación disminuyó.

También, se encuentra el reciente estudio de [Yigit et al. \(2021\)](#), donde reportan el desempeño del método PPP-GNSS y PPP-AR de alta velocidad para el monitoreo de la salud estructural, a partir de pruebas dinámicas con una mesa vibratoria y un modelo escala de una estructura, considerando GNSS-diferencial y el sensor LVDT como referencia. Para evaluar el desempeño de las metodologías PPP, se generaron oscilaciones armónicas en la mesa vibratoria con amplitudes que van desde 5 a 10 mm y frecuencias entre 0.1 y 3 Hz. También, con la estructura a escala se generaron movimientos de suelo similares a los ocurridos en un terremoto real, el terremoto de Kobe de 1995.

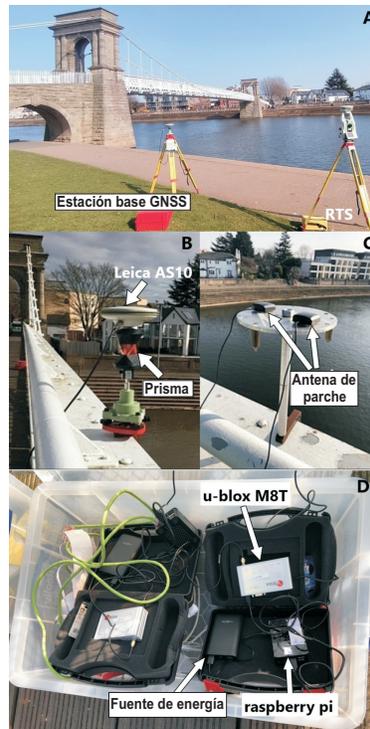
En la Figura 1.2 se observa la configuración experimental que se llevó a cabo. El sensor LVDT midió a una frecuencia de muestreo de 100 Hz, se utilizaron dos receptores GNSS de doble frecuencia CHC, uno se colocó sobre la mesa vibratoria (ver Figura 1.2a) y el otro como estación de referencia a 60 metros de la mesa vibratoria, la frecuencia de muestreo fue de 20 Hz (GPS y GLONASS), y los movimientos sobre la mesa empezaron después de 50 minutos de medición de los receptores GNSS para alcanzar el proceso de solución de ambigüedad entera fija para posicionamiento relativo y PPP-AR y solución de ambigüedad flotante estable para PPP, respectivamente.



**Figura 1.2:** (a) mesa vibratoria, y (b) modelo a pequeña escala en mesa vibratoria. Fuente: [Yigit et al. \(2021\)](#).

El procesamiento de los datos GNSS se llevo a cabo en el software RTKLib para posicionamiento relativo y PPP tradicional, y para PPP-AR fue Net\_Diff. Como resultados, las oscilaciones armónicas sobre la mesa vibratoria demostraron que las frecuencias derivadas de los métodos de posicionamiento GNSS relativo, PPP y PPP-AR son similares a los resultados alcanzados por el sensor LVDT. Las diferencias en las amplitudes tomando como referencia el LVDT, no excedieron los 0.5 mm para el posicionamiento relativo y PPP-AR, y 0.9 mm para el PPP tradicional. De esta manera, demuestran que el método PPP-AR y PPP tradicional son métodos potenciales para extraer frecuencias naturales y desplazamientos en estructuras.

Con respecto a los receptores GNSS de bajo costo, se han reportado diferentes estudios donde evalúan esta tecnología para detectar desplazamientos en postproceso y tiempo real sobre puentes ([Mahato et al., 2020](#); [Xue, 2022](#); [Xue et al., 2022](#)). Por ejemplo, en [Xue y Psimoulis \(2023\)](#) evaluaron el rendimiento de dos receptores GNSS de alta frecuencia y bajo costo frente a la estación total robótica (RTS, por sus siglas en inglés) y receptor GNSS de grado geodésico para monitorear propiedades dinámicas de un puente colgante peatonal. En resumen, analizando las series temporales GNSS de los receptores de bajo costo demostraron que esta tecnología es capaz de estimar las principales frecuencias dominantes del puente con una precisión similar a la de los receptores GNSS de grado geodésico. Además, las diferencias de la amplitud de la respuesta del puente entre el receptor de bajo costo y el geodésico fue de 3 mm. Los autores concluyeron que es posible utilizar receptores GNSS de bajo costo para monitorear desplazamientos dinámicos con una frecuencia de 1 a 3 Hz. En la Figura 1.3 se ilustra el experimento realizado por [Xue y Psimoulis \(2023\)](#) donde se observa el puente colgante peatonal y los instrumentos evaluados.



**Figura 1.3:** (a) Panel superior: puente peatonal Wilford sobre el río Trent y la ubicación de la estación GNSS de referencia, así como también la estación total robotica; (b) antena de grado geodésico Leica AS10 ubicada en el tramo medio (ubicación c) instrumentada con prismas reflectantes para las mediciones con el RTS; (c) las dos antenas de bajo costo sobre un plano de tierra; (d) dos receptores GNSS de bajo costo, cada uno de ellos conectado a una antena de bajo costo. Fuente: Xue y Psimoulis (2023).

## 1.7. Esquema de la tesis

El presente documento de tesis doctoral consta de 9 capítulos, los cuales son descritos brevemente a continuación:

- El [Capítulo 1](#) es una breve introducción de los objetivos de investigación que se intentan alcanzar en esta tesis.
- El [Capítulo 2](#) describe los conceptos básicos del Monitoreo de la Salud Estructural y los instrumentos comúnmente utilizados.
- En el [Capítulo 3](#) se describe la evaluación de la calidad de observaciones y el posicionamiento de receptores GNSS de bajo costo. Además, se propone una estrategia de análisis de la relación señal ruido en función de valores teóricos.
- En el [Capítulo 4](#) se propone un sistema de monitoreo de desplazamientos dinámicos en tiempo real utilizando receptores GNSS de bajo costo.

- La calidad de las observaciones GNSS y el rendimiento del posicionamiento 3D de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 es evaluada en el [Capítulo 5](#).
- El rendimiento en posicionamiento por el método PPP en modo estático y dinámico de diferentes software de código abierto y servicios en línea es evaluado en el [Capítulo 6](#).
- En el [Capítulo 7](#) se describe la aplicación de los receptores GNSS de grado geodésico, de bajo costo y teléfonos inteligentes para monitorear desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias naturales sobre un puente atirantado.
- Finalmente, el [Capítulo 8](#) resume las conclusiones principales y destaca las contribuciones de esta tesis. Además, se mencionan los trabajos futuros.

# Referencias

- Acosta, L. E., De Lacy, M., Ramos, M. I., Cano, J. P., Herrera, A. M., Avilés, M., y Gil, A. J. (2018). Displacements study of an earth fill dam based on high precision geodetic monitoring and numerical modeling. *Sensors*, 18(5):1369.
- Alkan, R. M., Ilci, V., y Ozulu, I. M. (2016). Web-based gnss data processing services as an alternative to conventional processing technique. *FIG Working Week 2016 Proceedings. New Zealand: Christchurch*.
- Anderle, R. J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. *sdp*, 1:47–75.
- Ashkenazi, V. y Roberts, G. (1997). Experimental monitoring of the humber bridge using gps. In *Proceedings of the institution of civil engineers-civil engineering*, volume 120, pages 177–182. Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- Berber, M. M., Ustun, A., y Yetkin, M. (2017). Static and kinematic ppp using online services: a case study in florida. *Journal of spatial science*, 62(2):337–352.
- Biagi, L., Grec, F. C., y Negretti, M. (2016). Low-cost gnss receivers for local monitoring: experimental simulation, and analysis of displacements. *Sensors*, 16(12):2140.
- Carrión, F. J., Quintana, J. A., y Crespo, S. E. (2017). Shm of a stayed bridge during a structural failure, case study: the rio papaloapan bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2):139–151.
- Chen, B., Gao, C., Liu, Y., y Sun, P. (2019). Real-time precise point positioning with a xiaomi mi 8 android smartphone. *Sensors*, 19(12):2835.
- Chen, B., Wang, X., Sun, D., y Xie, X. (2014). Integrated system of structural health monitoring and intelligent management for a cable-stayed bridge. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Choy, S., Bisnath, S., y Rizos, C. (2017). Uncovering common misconceptions in gnss precise point positioning and its future prospect. *GPS solutions*, 21(1):13–22.
- Cina, A., Manzino, A. M., y Bendea, I. H. (2019). Improving gnss landslide monitoring with the use of low-cost mems accelerometers. *Applied Sciences*, 9(23):5075.
- Cina, A. y Piras, M. (2015). Performance of low-cost gnss receiver for landslides monitoring: test and results. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5-7):497–514.

- Coster, A. J., Goncharenko, L., Zhang, S.-R., Erickson, P. J., Rideout, W., y Vierinen, J. (2017). Gns observations of ionospheric variations during the 21 august 2017 solar eclipse. *Geophysical Research Letters*, 44(24):12–041.
- dos Santos, R. C., Larocca, A. P. C., de Araújo Neto, J. O., Barbosa, A. C. B., y Oliveira, J. V. M. (2019). Detection of a curved bridge deck vibration using robotic total stations for structural health monitoring. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9(1):63–76.
- Erol, S., Alkan, R. M., Ozulu, İ. M., y İlçi, V. (2020). Impact of different sampling rates on precise point positioning performance using online processing service. *Geo-spatial Information Science*, pages 1–11.
- Gaxiola-Camacho, J. R., Vazquez-Ontiveros, J. R., Guzman-Acevedo, G. M., Bennett, R. A., Reyes-Blanco, J. M., y Vazquez-Becerra, G. E. (2021). Real-time probabilistic structural evaluation of bridges using dynamic displacements extracted via gps technology. *Journal of Surveying Engineering*, 147(2):04021002.
- Geng, J., Jiang, P., y Liu, J. (2017). Integrating gps with glonass for high-rate seismogeodesy. *Geophysical research letters*, 44(7):3139–3146.
- Geng, J., Wen, Q., Zhang, Q., Li, G., y Zhang, K. (2022). Gns observable-specific phase biases for all-frequency ppp ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 96(2):11.
- Geng, T., Xie, X., Fang, R., Su, X., Zhao, Q., Liu, G., Li, H., Shi, C., y Liu, J. (2016). Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-gns observations: Application to the 2015 mw 7.8 nepal earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43(1):161–167.
- 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.
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., y Sterle, O. (2021). Performance evaluation of low-cost multi-frequency gns receivers and antennas for displacement detection. *Applied Sciences*, 11(14).
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., y Sterle, O. (2020). Testing multi-frequency low-cost gns receivers for geodetic monitoring purposes. *Sensors*, 20(16).
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., y Pavlovčič-Prešeren, P. (2023). Low-cost dual-frequency gns receivers and antennas for surveying in urban areas. *Sensors*, 23(5):2861.
- 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 Collins, J. (2012). *Global positioning system: theory and practice*. 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. In *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, volume 6932, page 693228. International Society for Optics and Photonics.
- Kaloop, M. R., Yigit, C. O., Dindar, A. A., Elsharawy, M., y Hu, J. W. (2018). Evaluation of the high-rate gnss-ppp method for vertical structural motion. *Survey Review*, 0(0):1–13.
- Koji, A. K., Van Malderen, R., Pottiaux, E., y Van Schaeybroeck, B. (2022). Understanding the present-day spatiotemporal variability of precipitable water vapor over ethiopia: a comparative study between era5 and gps. *Remote Sensing*, 14(3):686.
- Larson, K. M., Bodin, P., y Gomberg, J. (2003). Using 1-hz gps data to measure deformations caused by the denali fault earthquake. *Science*, 300(5624):1421–1424.
- Lipatnikov, L. y Shevchuk, S. (2019). Cost effective precise positioning with gnss. *International Federation of Surveyors (FIG), FIG Publication*, (74).
- 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.
- Lu, C., Li, X., Li, Z., Heinkelmann, R., Nilsson, T., Dick, G., Ge, M., y Schuh, H. (2016). Gnss tropospheric gradients with high temporal resolution and their effect on precise positioning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(2):912–930.
- Mahato, S., Shaw, G., Santra, A., Dan, S., Kundu, S., y Bose, A. (2020). Low cost gnss receiver rtk performance in forest environment. In *2020 URSI Regional Conference on Radio Science (URSI-RCRS)*, pages 1–4. IEEE.
- Marquez-Azua, B. y DeMets, C. (2009). Deformation of mexico from continuous gps from 1993 to 2008. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(2).
- Melgarejo-Morales, A., Vazquez-Becerra, G. E., Millan-Almaraz, J., Pérez-Enríquez, R., Martínez-Félix, C. A., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2020). Examination of seismionospheric anomalies before earthquakes of mw 5.1 for the period 2008–2015 in oaxaca, mexico using gps-tec. *Acta Geophysica*, 68(5):1229–1244.
- Meng, X., Nguyen, D. T., Owen, J. S., Xie, Y., Psimoulis, P., y Ye, G. (2019). Application of geoshm system in monitoring extreme wind events at the forth road bridge. *Remote Sensing*, 11(23):2799.
- Meng, X., Nguyen, D. T., Xie, Y., Owen, J. S., Psimoulis, P., Ince, S., Chen, Q., Ye, J., y Bhatia, P. (2018). Design and implementation of a new system for large bridge monitoring—geoshm. *Sensors*, 18(3):775.
- Moreu, F., Jo, H., Li, J., Kim, R. E., Cho, S., Kimmle, A., Scola, S., Le, H., Spencer Jr, B., y LaFave, J. M. (2015). Dynamic assessment of timber railroad bridges using displacements. *Journal of Bridge Engineering*, 20(10):04014114.

- 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.
- Paziewski, J., Sieradzki, R., y Baryla, R. (2019). Detection of structural vibration with high-rate precise point positioning: Case study results based on 100 hz multi-gnss observables and shake-table simulation. *Sensors*, 19(22):4832.
- Psimoulis, P. A., Houlié, N., y Behr, Y. (2018). Real-time magnitude characterization of large earthquakes using the predominant period derived from 1 hz gps data. *Geophysical Research Letters*, 45(2):517–526.
- Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J., y Hernández-Pajares, M. (2013). Gnss data processing, vol. i: Fundamentals and algorithms. *ESA communications, ESTEC TM-23/L, Noordwijk, the Netherlands*.
- Shu, Y., Fang, R., Geng, J., Zhao, Q., y Liu, J. (2018). Broadband velocities and displacements from integrated gps and accelerometer data for high-rate seismogeodesy. *Geophysical Research Letters*, 45(17):8939–8948.
- 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.
- Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the juarez bridge using gps technology. *Measurement*, 110:146 – 153.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Martinez-Felix, C. A., Melgarejo-Morales, A., Retegui-Schiettekatte, L., Vazquez-Becerra, G. E., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2023a). Assessing the quality of raw gnss observations and 3d positioning performance using the xiaomi mi 8 dual-frequency smartphone in northwest mexico. *Earth Science Informatics*.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Padilla-Velazco, J., Gaxiola-Camacho, J. R., y Vázquez-Becerra, G. E. (2023b). Evaluation and analysis of the accuracy of open-source software and online services for ppp processing in static mode. *Remote Sensing*, 15(8).
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Ruiz-Armenteros, A. M., de Lacy, M. C., Gaxiola-Camacho, J. R., Anaya-Díaz, M., y Vázquez-Becerra, G. E. (2023c). Risk evaluation of the sanalona earth-fill dam located in mexico using satellite geodesy monitoring and numerical modeling. *Remote Sensing*, 15(3):819.

- Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2020). Implementation of ppp-gnss measurement technology in the probabilistic shm of bridge structures. *Measurement*, page 108677.
- Wu, Q., Sun, M., Zhou, C., y Zhang, P. (2019). Precise point positioning using dual-frequency gnss observations on smartphone. *Sensors*, 19(9):2189.
- Xi, R., Zhou, X., Jiang, W., y Chen, Q. (2018). Simultaneous estimation of dam displacements and reservoir level variation from gps measurements. *Measurement*, 122:247–256.
- Xin, S., Geng, J., Zeng, R., Zhang, Q., Ortega-Culaciati, F., y Wang, T. (2021). In-situ real-time seismogeodesy by integrating multi-gnss and accelerometers. *Measurement*, 179:109453.
- 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.
- Xu, Y., Ma, L., Zhang, F., Chen, X., y Yang, Z. (2023). Accuracy analysis of real-time precise point positioning—estimated precipitable water vapor under different meteorological conditions: A case study in hong kong. *Atmosphere*, 14(4):650.
- Xue, C. (2022). *Assessment of the performance of low-cost GNSS receivers for deformation monitoring application*. PhD thesis, University of Nottingham.
- Xue, C. y Psimoulis, P. A. (2023). Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost gnss receivers. *Engineering Structures*, 284:115993.
- Xue, C., Psimoulis, P. A., y Meng, X. (2022). Feasibility analysis of the performance of low-cost gnss receivers in monitoring dynamic motion. *Measurement*, 202:111819.
- Yavaşoğlu, H. H., Kalkan, Y., Tiryakioğlu, İ., Yigit, C., Özbey, V., Alkan, M. N., Bilgi, S., y Alkan, R. M. (2018). Monitoring the deformation and strain analysis on the ataturk dam, turkey. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1):94–107.
- Yigit, C. O. (2016). Experimental assessment of post-processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, natural hazards and risk*, 7(1):360–383.
- Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Anil Dindar, A., Bezcioglu, M., y Tiryakioğlu, I. (2021). Investigating performance of high-rate gnss-ppp and ppp-ar for structural health monitoring: Dynamic tests on shake table. *Journal of Surveying Engineering*, 147(1):05020011.
- 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.

- Zhou, L., Fan, L., y Shi, C. (2023). Evaluation and analysis of remotely sensed water vapor from the nasa viirs/snpp product in mainland china using gps data. *Remote Sensing*, 15(6):1528.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., y Webb, F. (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.

# Capítulo 2

## Monitoreo de la Salud Estructural (SHM)

### 2.1. Introducción

El proceso de implementación de una estrategia de identificación de daños para la infraestructura de ingeniería aeroespacial, civil y mecánica se conoce como monitoreo de la salud estructural (SHM) ([Chen y Ni, 2018](#); [Farrar y Worden, 2010](#)). El daño se entiende como cambios en las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los materiales de estos sistemas, incluidos los cambios en las condiciones de frontera y la conectividad del sistema, que afectan negativamente el rendimiento del sistema. El monitoreo de la salud estructural tiene múltiples aplicaciones. La filosofía SHM evalúa el estado de la salud estructural y, a través del procesamiento e interpretación de datos adecuados, puede predecir la vida restante de la estructura ([Giurgiutiu, 2014](#)). Muchos sistemas de infraestructura aeroespacial y civil están en su vida útil o algunos otros la han superado; sin embargo, se prevé que permanecerán en servicio durante un período prolongado. El SHM aborda el problema del envejecimiento de las estructuras, que es una de las principales preocupaciones de la comunidad de ingenieros. El monitoreo de la salud estructural es un área donde el objetivo principal es la verificación del estado o la salud de las estructuras con el fin de asegurar un desempeño adecuado y ahorro de costos de mantenimiento mediante una red de sensores adjunta a la estructura, monitoreo continuo y algoritmos. Se derivan diferentes beneficios de la implementación del SHM, algunos de ellos son: conocimiento sobre el comportamiento de la estructura bajo diferentes cargas y diferentes cambios ambientales, determinación del estado actual con el fin de verificar la integridad de la estructura y predecir si una estructura funciona correctamente o si necesita ser mantenida o reemplazada, y por lo tanto, reducir los costos de mantenimiento ([Tibaduiza Burgos, 2013](#)).

Una estrategia del SHM consta de muchos componentes importantes que incluyen redes de detección, procesamiento y análisis de datos, evaluación de daños y toma de decisiones. Las estrategias SHM tienen el gran potencial de ofrecer importantes beneficios económicos y de seguridad. La infraestructura civil comprende puentes, edificios, torres, tuberías, túneles, presas y otros tipos de estructuras. Su funcionamiento continuo, seguro y económico depende en gran medida del mantenimiento y la gestión adecuados. Para

evaluar las estrategias de gestión óptimas para la infraestructura civil existente, es importante y necesaria una evaluación precisa de la seguridad presente y futura (Ettouney y Alampalli, 2016). Mantener una infraestructura civil segura y confiable para el uso diario es fundamental para el bienestar de la sociedad. Por lo tanto, la salud estructural se puede establecer como su capacidad actual para proporcionar el nivel de servicio previsto de una manera segura y rentable contra los peligros esperados durante su vida útil (Chen y Ni, 2018).

A pesar de la metodología de diseño necesaria inicialmente utilizada, las estructuras de ingeniería civil se deterioran con el tiempo. Este deterioro se debe a varias razones, que incluyen fallas causadas por cargas de tráfico cíclico, efectos de factores ambientales (por ejemplo, corrosión del acero, carbonatación del hormigón) y envejecimiento de los materiales de construcción. Además, el deterioro puede ser causado por eventos extremos poco frecuentes como terremotos, huracanes e inundaciones. Por lo tanto, la salud estructural se verá afectada por factores operativos y ambientales, incluidas las condiciones de carga normales, los entornos actuales y futuros y los peligros esperados durante la vida útil. Todos estos factores son variables con incertidumbres, por lo que es difícil definir la salud estructural en términos de su antigüedad y uso y su nivel de seguridad para resistir acciones naturales severas. Con el fin de evaluar de manera confiable la salud estructural y mantener la seguridad estructural, es esencial el monitoreo continuo en servicio de la estructura. Los desastres naturales graves, como los terremotos y los tifones, generan demandas de una evaluación rápida del estado de las estructuras civiles (Brownjohn et al., 2011). Actualmente, la evaluación del estado de la infraestructura civil existente, como los puentes, depende en gran medida de la inspección visual. Esta metodología de evaluación de condiciones subjetiva e inexacta se ha identificado como la barrera técnica más crítica para una gestión eficaz de la infraestructura. Por ejemplo, el estado de los puentes se expresa típicamente en términos de índices subjetivos sobre la base de la inspección visual únicamente. Por lo tanto, es difícil evaluar con precisión la condición estructural a partir de datos de inspección visual inexactos, incluso cuando esto puede ser realizado por expertos (Aktan et al., 1998). Estos problemas han impulsado la investigación y el desarrollo sobre la observación e interpretación continua del desempeño a gran escala de las estructuras de ingeniería civil durante su vida útil.

Las aplicaciones de monitoreo de la salud basadas en sensores avanzados y el monitoreo en tiempo real de la infraestructura civil ofrecen un gran potencial para una administración de infraestructura informada y efectiva. El control de la salud es necesario para las estructuras de ingeniería civil, ya que pueden presentar un deterioro prematuro, daños estructurales y problemas de rendimiento, o incluso pueden haber envejecido más allá de su vida útil prevista. El monitoreo de la salud se puede utilizar para rastrear las respuestas de una estructura junto con las entradas, si es posible, durante un período suficiente para determinar anomalías, detectar deterioro y evaluar daños para la toma de decisiones. Los métodos de evaluación de daños que utilizan datos modales de vibración medidos, como frecuencias naturales y formas modales, son prometedores para la evaluación de la salud de las estructuras de ingeniería (Bicanic y Chen, 1997; chen, 1998). El monitoreo de la salud puede evaluar el desempeño de las estructuras civiles de manera proactiva utilizando datos medidos y algoritmos de interpretación de datos, para evaluar correctamente la condición actual y predecir la vida útil restante (Chen y Ni, 2018).

El monitoreo de la salud estructural se define como el proceso de implementación de una estrategia de evaluación de la salud e identificación de daños para las estructuras de ingeniería. La técnica SHM utiliza sistemas de detección e instalaciones de hardware y software asociadas para monitorear el desempeño estructural y los entornos operativos de las estructuras de ingeniería. También, el SHM implica la observación de una estructura a lo largo del tiempo, utilizando la respuesta estructural muestreada periódicamente y las mediciones del entorno operativo de una serie de sensores y luego la evaluación del estado actual y el rendimiento futuro de la estructura. Si se considera una evaluación con la filosofía SHM a largo plazo, el resultado de este proceso es información actualizada periódicamente con respecto a la capacidad de la estructura para realizar su función prevista, considerando el inevitable envejecimiento y degradación que resultan de los entornos operativos (Farrar et al., 2003). Además, el SHM se adopta para una evaluación rápida del estado a fin de proporcionar información rápida y confiable sobre la integridad de la estructura después de eventos extremos, como un terremoto o una explosión (Chen y Ni, 2018).

Aunado a lo anterior, la técnica SHM tiene como objetivo identificar daños estructurales y evaluar la salud de la estructura utilizando datos monitoreados. El daño se define aquí como cambios en el material y/o propiedades geométricas de una estructura, que afectan el estado actual y el desempeño futuro de la estructura. Los objetivos de una estrategia SHM pueden describirse en los siguientes cinco niveles (Farrar et al., 2009):

- **Nivel I:** Detección de daños, que proporciona una indicación cualitativa de que podría haber daños en la estructura.
- **Nivel II:** Localización de daños, dando información sobre la probable posición del daño.
- **Nivel III:** Clasificación de daños, dando información sobre el tipo de daño.
- **Nivel IV:** Evaluación de daños, dando una estimación de la extensión del daño.
- **Nivel V:** Pronóstico de daños, dando información sobre la seguridad de la estructura, por ejemplo estimación de la vida útil restante.

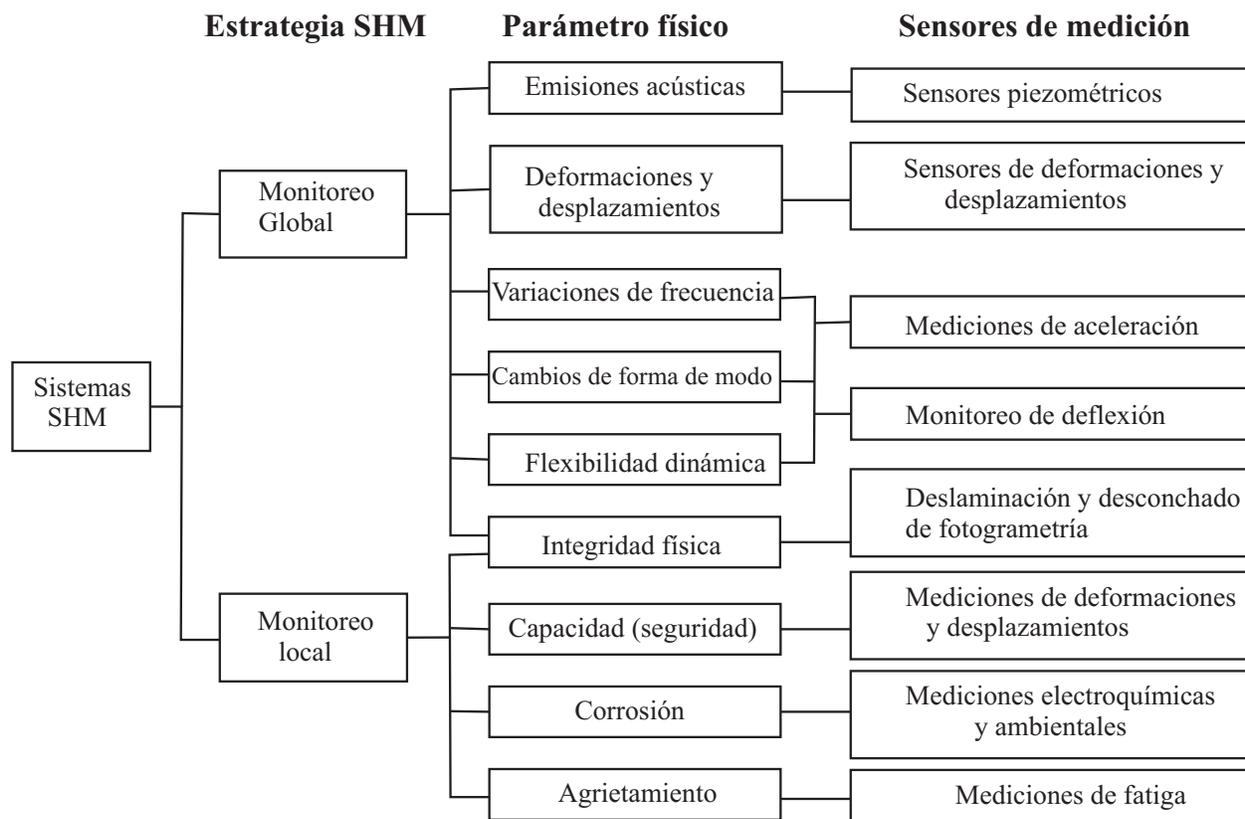
El nivel en el orden indicado anteriormente representa un mayor conocimiento del estado de daño. Un nivel superior generalmente requiere información disponible sobre todos los niveles inferiores. Los dos primeros niveles, detección y localización de daños, generalmente se pueden lograr utilizando métodos de detección de daños basados en vibraciones a partir de mediciones de respuesta dinámica estructural. Para identificar el tipo de daño, los datos de las estructuras con los tipos específicos de daño deben estar disponibles para su correlación con los datos medidos. Los modelos analíticos suelen ser necesarios para alcanzar los niveles cuarto y quinto, evaluación y pronóstico de daños. En general, estos dos niveles pueden no lograrse sin primero identificar el tipo de daño presente. Las estimaciones de la carga futura, junto con los modelos predictivos de deterioro, son necesarias para lograr el nivel final para el pronóstico de daños.

Las estrategias SHM ofrecen información útil para optimizar la planificación del mantenimiento de las estructuras de ingeniería en servicio. Para asegurar una operación confiable

y programar el trabajo de mantenimiento y reparación de manera rentable, es necesario monitorear y evaluar continuamente el desempeño estructural y tener una estimación precisa de la vida útil restante. Por lo tanto, la estrategia SHM integrada con la gestión del ciclo de vida es necesaria para calibrar la evaluación estructural y las predicciones, para permitir la operación y el mantenimiento óptimos de las estructuras de ingeniería y, eventualmente, para operar las estructuras más allá de su vida de diseño original.

## 2.2. Estrategia y técnica SHM

Las estrategias de SHM pueden clasificarse generalmente en dos grupos: globales y locales. En general, las estrategias de monitoreo tanto globales como locales proporcionan diferentes tipos de información y respaldan diferentes tipos de análisis. La Figura 2.1 muestra las estrategias de seguimiento locales y globales, los tipos de información recopilada y los tipos de medición asociados (Frangopol y Messervey, 2009).



**Figura 2.1:** Estrategias de monitoreo de salud estructural para estructuras de ingeniería civil. Fuente: traducido de Frangopol y Messervey (2009).

La selección de una estrategia de seguimiento adecuada depende en gran medida de la estructura en cuestión, el tipo de análisis o ambos. Por ejemplo, se debe elegir un enfoque de monitoreo global cuando la accesibilidad a partes específicas de la estructura es

imposible. Para un sistema de monitoreo global, los acelerómetros serían un instrumento apropiado para medir la respuesta dinámica (es decir, aceleraciones) de la estructura sujeta a vibración forzada o ambiental. Los datos de aceleración medidos se pueden utilizar para extraer parámetros modales como frecuencias naturales y formas modales. Estos datos modales extraídos se pueden utilizar para actualizar los parámetros estructurales del modelo analítico o para identificar daños estructurales utilizando técnicas globales de SHM. Sin embargo, en los casos en que se analiza un mecanismo de falla estructural específico en un área local, como grietas o fatiga, puede ser necesaria información sobre el material local y las propiedades geométricas, así como el estado de tensión, para evaluar la condición estructural a nivel local. Normalmente, se pueden utilizar técnicas de prueba no destructivas como el ultrasonido para identificar el daño local en la estructura.

Las estrategias de monitoreo global han sido la herramienta tradicional utilizada para evaluar la seguridad de grandes estructuras de ingeniería civil, como puentes. Idealmente, mediante el uso de parámetros medidos, el monitoreo de la salud de las estructuras civiles tiene la capacidad de identificar la ubicación y la gravedad de los daños en las estructuras cuando se producen. Sin embargo, los métodos de SHM globales existentes, como algunos métodos de detección de daños basados en vibraciones (Avcı et al., 2021), solo pueden determinar si el daño está presente en alguna parte de la estructura completa. Estos métodos globales son importantes para verificar si se han producido daños en la estructura. Una vez que se detecta la presencia de daños, se puede realizar un examen más detallado de la estructura para determinar la ubicación exacta y la gravedad del daño. Luego, se adoptan métodos locales de SHM, como ondas guiadas para medir el estado de tensión o técnicas de corrientes parásitas para localizar grietas, para determinar la ubicación exacta y la extensión del daño. Las pruebas no destructivas, utilizadas aquí como método local de SHM, a menudo requieren mucho tiempo y son costosas, y el acceso no siempre es posible (Chang et al., 2003). Por lo tanto, las estrategias de SHM tanto globales como locales son necesarias en el monitoreo de la salud de las grandes estructuras civiles.

## 2.3. Sensores utilizados en el SHM

A través del tiempo, diversos colapsos y daños de estructuras de ingeniería civil debido a un sistema SHM inadecuado se han informado en diversos estudios (Delatte Jr, 2008; Love et al., 2013). Por ejemplo, el derrumbe de la presa Dale Dyke (En Reino Unido) debido a la formación de grietas en el terraplén, ocurrido en 1864 (Brownjohn, 2007). En la década de 1940, un caso muy conocido de colapso fue el ocurrido en el puente Tacoma Narrows debido a la activación del modo de torsión de vibración por viento (Billah y Scanlan, 1991). Un caso de colapso recientemente fue el ocurrido en la Universidad Internacional de Florida en 2018, donde un puente peatonal se derrumbó debido al ajuste excesivo de los cables que provocaron el crecimiento de grietas (Cao et al., 2020). Por lo tanto, los colapsos de estructuras mencionados anteriormente resaltan la importancia y necesidad de contar con un sistema SHM preferencialmente en tiempo real que permitan la evaluación continua de la integridad estructural con el fin de evitar pérdidas económicas y humanas. Un enfoque importante en una estrategia SHM es la correcta selección de los sensores a utilizar para medir las variables físicas de interés (Moreno-Gomez et al., 2018).

Registrar las propiedades físicas de una estructura es una tarea fundamental en el SHM, ya que permite detectar cualquier cambio significativo y así permitir una toma de acciones a tiempo para restaurar la estructura.

Según [Amezquita-Sanchez y Adeli \(2016\)](#), un sistema SHM se puede estructurar en tres etapas: (1) monitoreo de la señal, (2) procesamiento y (3) su interpretación. La primera etapa consiste en los sensores para medir las propiedades físicas de las estructuras, donde se puede dividir en tres grupos ([Gattulli et al., 2016](#)): cinemáticos (desplazamientos, velocidad y aceleración), mecánicas (fuerzas, deformaciones, tensiones) y ambientales (viento y temperatura). También, en la etapa de monitoreo de señales se requiere de una instrumentación adecuada y un sistema de adquisición de datos para posteriormente procesarlos. Es claro, que la magnitud de salida del sensor determina la instrumentación requerida. También, influye en la calidad de la señal registrada. Cuando se realiza una mala instrumentación se pueden derivar dos problemas: uno relacionado con la pérdida de información y otro con la necesidad de establecer una técnica de procesamiento de señales compleja para compensar la información perdida, esto para evitar una mala interpretación de las mismas. Entonces, conocer las principales características de los sensores utilizados en los sistemas SHM es fundamental, esto debido a que este conocimiento ayuda a tomar la decisión correcta al momento de seleccionar el sensor y su implementación en alguna estructura de prueba.

### 2.3.1. Sensores cinemáticos

Los sensores cinemáticos en aplicaciones SHM mide el movimiento inducido por una fuerza externa sobre la estructura, como las ondas sísmicas, el tráfico, vibraciones inducidas por el hombre, vientos fuertes, entre otras ([Moreno-Gomez et al., 2018](#)). Este movimiento se captura midiendo el desplazamiento, la velocidad o la aceleración de la estructura. A continuación, se presentan los sensores cinemáticos más utilizados en los sistemas SHM.

- **Acelerómetros:** es un dispositivo que registra los movimientos oscilatorios causados por la presencia de vibraciones inducidas, las cuales provocan aceleraciones cambiantes en la estructura de estudio. Generalmente, hay cuatro tipos de tecnologías de funcionamiento en los acelerómetros que se utilizan en la filosofía SHM: dispositivos capacitivos, piezoeléctricos, de equilibrio de fuerza y microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés).
  - 1.- Un acelerómetro capacitivo mide la capacitancia entre dos placas, una placa puede moverse mediante una masa inercial y la otra placa está fija a la caja interna del sensor. Por lo cual, cuando el sensor es sometido a vibraciones, la placa con masa inercial se moverá variando así la distancia a la placa fija, causando que el valor de la capacitancia también varíe.
  - 2.- Un acelerómetro piezoeléctrico reemplaza las dos placas del capacitivo por un material piezoeléctrico que genera una corriente eléctrica, siendo proporcional a la presión aplicada al material, es decir, cuando la presión es mayor, mayor será la señal de salida.

- 3.- Un acelerómetro de fuerza está compuesto por tres partes diferenciadas: un sensor que mide el desplazamiento de una masa sísmica, un actuador que determina la fuerza antes mencionada para mantener la masa en su ubicación, y un servoamplificador que decodifica las señales creadas por el actuador para producir las señales eléctricas necesarias para tener la fuerza necesaria.
  - 4.- Un acelerómetro MEMS en ocasiones está formado por varios capacitores microfabricados, lo que permite reducir el tamaño del capacitor. Debido a que el acelerómetro MEMS comparte la misma tecnología de detección, su principio de funcionamiento es similar al del acelerómetro capacitivo. Este tipo de acelerómetro ha ganado popularidad por los bajos precios en los que se pueden encontrar en el mercado. Estos acelerómetros son los más utilizados en aplicaciones SHM ([Gattulli et al., 2016](#)).
- **Sensores de velocidad:** son dispositivos que capturan también los movimientos inducidos por las fuentes antes mencionadas. Se han utilizado dos tipos diferentes de sensores de velocidad en la estrategia SHM: los basados en el efecto Doppler y los electromecánicos ([Gattulli et al., 2016](#)).
    - 1.- Un sensor de velocidad electromecánico lo compone un imán permanente y dos bobinas suspendidas a su alrededor. Y según la ley de Faraday, cuando los hilos de una bobina interactúan con un imán permanente, se producirá una corriente eléctrica donde su intensidad dependerá de la velocidad con la que las bobinas cortan el campo magnético del imán permanente. Cuando más se mueven las bobinas, mayor será la corriente producida, por lo cual, la salida de este sensor se obtiene restando las señales creadas por las dos bobinas.
    - 2.- Un vibrómetro láser Doppler (LDV, por sus siglas en inglés) es un dispositivo compuesto por un fotodetector y un procesador de señal. El dispositivo LDV funciona de la siguiente manera: un rayo láser de frecuencia modulada se refleja en la estructura (puente, edificio) provocando un cambio de frecuencia (desplazamiento Doppler) en el rayo reflejado. La nueva frecuencia se compara con la frecuencia de referencia, donde el procesador de señal demodula y procesa la diferencia para estimar la velocidad del objeto (estructura).
  - **Sensores de desplazamiento:** estos dispositivos están caracterizados principalmente por un transductor de base resistiva, un transformador diferencial lineal variable (LVDT) o satélites GNSS para medir el desplazamiento de una estructura civil.
    - 1.- Un dispositivo transductor basado en resistencia lo componen una resistencia variable, ya sea lineal o rotacional, que cuentan con tres pines físicos. Un pasador de ajuste conecta a la estructura y al dispositivo, la variación de este pasador cambiará el valor de resistencia total.
    - 2.- El dispositivo LVDT está compuesto por un núcleo de níquel-hierro rodeado por un devanado primario y dos secundarios, los cuales están conectados en serie. Entonces, cuando se aplica un voltaje al devanado primario, se induce un voltaje a los devanados secundarios; por lo tanto, cuando el núcleo se mueve

sobre los devanados, se creará dos voltajes diferentes en función de su posición con respecto a los devanados secundarios.

- 3.- El dispositivo o receptor GPS/GNSS, su principio de funcionamiento consiste en obtener un posicionamiento en un determinado tiempo, entonces, la variación del posicionamiento con respecto al tiempo define al desplazamiento. El GPS/GNSS tiene la capacidad de medir los desplazamientos de una estructura en los tres ejes.

### 2.3.2. Sensores mecánicos

Medir las propiedades mecánicas como la fatiga, fuerza, deformación, corrosión, grietas, entre otras, es una tarea esencial en el SHM sobre infraestructural civil. En los últimos años, diferentes tecnologías de sensores han sido propuestos para medir las propiedades mecánicas sobre estructuras. A continuación, se revisan los sensores mecánicos más comunes:

- Detección de fatiga.
- Medición de fuerza: galga extensométrica de cuerda vibrante.
- Deformación: galgas extensométricas, transductores piezoeléctricos y galgas extensométricas de cuerda vibrante.
- Corrosión.
- Detección y cuantificación de grietas.

### 2.3.3. Sensores ambientales

La interacción de variables ambientales como la temperatura y el viento sobre las construcciones, juega un papel importante en la estimación de las propiedades físicas de las estructuras civiles. Por ejemplo, un aumento de la temperatura producirá un aumento en la longitud de los materiales; por lo cual, la rigidez de estos materiales es modificada, al igual que los parámetros modales. Por otro lado, medir la velocidad del viento es un factor clave en la infraestructura civil debido a que puede generar una fuerza excesiva que podría modificar la concentración de tensiones. Por lo tanto, el monitoreo continuo de estas variables ambientales puede ayudar a disponer de mejores algoritmos para estimar las propiedades mecánicas deseadas. A continuación, se describen los sensores utilizados para medir temperatura y viento:

- Un dispositivo **anemómetro** mide la velocidad del viento de forma precisa y sencilla. Existen cuatro tecnologías que están comercialmente disponibles. Un anemómetro mecánico, un anemómetro basado en ultrasonido, anemómetros con tecnología láser.
- 1.- Un anemómetro mecánico comúnmente se construye con varios golpes, que se fijan en los brazos horizontales, que están conectados a una varilla vertical. Por

lo cual, cuando más fuerte sopla el viento, más rápido se mueve la varilla. Este movimiento generado por el viento en la varilla se traduce a una señal eléctrica mediante un generador, que después se convierte en el valor instantáneo de la velocidad.

- 2.- Un anemómetro basado en ultrasonido contiene varios pares de transmisores y receptores de sonido que se montan formando ángulos de  $90^\circ$ . Entonces, el viento afectará a algunos de los haces sonoros, es decir, provocará una desviación de su trayectoria, llegando un poco antes o después que los demás. Consecuentemente, la diferencia de velocidad se puede utilizar para detectar la velocidad del viento.
  - 3.- Anemómetro con tecnología o interferómetro láser, que mide la velocidad siguiendo la siguiente estrategia: utiliza un rayo láser y dividiéndolo en dos mediante un espejo, se pueden generar dos haces, donde uno de ellos sirve como referencia y no estar sometido al viento, mientras que el otro (haz de medición) se ve afectado; luego, se combinan los dos haces, y se obtiene un patrón de referencia, o mejor conocido como conjunto de franjas de interferencia. Finalmente, la velocidad del viento se estima midiendo los espacios de las franjas.
- La variable de la temperatura puede proporcionar información sobre las condiciones internas de la estructura, por ejemplo, la fatiga, agrietamiento y afluencia. También, debido a que algunos sensores son afectados por la temperatura, su medición se convierte en una preocupación importante para aplicar correcciones a los sensores y así tener mediciones confiables. Para medir la temperatura se utilizan diferentes sensores, termopares, detectores de temperatura por resistencia (RTD, por sus siglas en inglés) y termografía.
    - 1.- Los dispositivos termopares utilizan el efecto Seebeck para medir la temperatura. Este efecto consiste en que cuando dos metales diferentes se unen por sus extremos y son sometidos a una diferencia de temperatura, se producirá un voltaje, y la magnitud del voltaje dependerá de los metales utilizados.
    - 2.- Los RTD son dispositivos que están compuestos por un trozo de alambre fino que está rodeado por una carcasa de cerámica o vidrio. Este tipo de sensores son uno de los más precisos debido a que tienen una relación lineal entre resistencia y temperatura. Su circuito de acondicionamiento utiliza una fuente de voltaje fijo, y debido a la relación mencionada, cualquier cambio en el voltaje se reflejará en la temperatura.
    - 3.- Los dispositivos de termografía funcionan a partir de energía infrarroja. Para medir esta energía se utilizan cámaras termográficas. Las imágenes obtenidas se conocen como termogramas.

Los sensores mencionados en las secciones [2.3.1](#), [2.3.2](#) y [2.3.3](#) miden principalmente propiedades físicas primarias, que en la mayoría de los sistemas SHM pueden usarse para evaluar la condición real de la estructura; sin embargo, algunas propiedades mecánicas necesitan mediciones de propiedades secundarias. En la [Tabla 2.1](#) se resumen todos los

sensores comúnmente más utilizados en los sistemas SHM. Para una mayor información detallada acerca de los sensores mencionados, el autor de esta tesis doctoral recomienda consultar [Moreno-Gomez et al. \(2018\)](#).

**Tabla 2.1:** Características de las tecnologías de los sensores presentados. Fuente: [Moreno-Gomez et al. \(2018\)](#).

Tipo de sensor	Variable	Tecnología de sensores	Características relevantes	Aplicaciones principales	Facilidad de instalación		
Cinemática	Aceleración	Capacitivo	Puede detectar oscilaciones de baja frecuencia. No afectado por condiciones externas.	Detección de los daños. Identificación del sistema	Fácil		
		Piezoelectrico	Ideal para detectar oscilaciones superiores a 0.5 Hz. Requiere compensación de temperatura.				
		MEMS	Compromiso razonable para detectar oscilaciones de baja y alta frecuencia. Bajo costo.				
		Servo	Puede detectar oscilaciones de frecuencia ultrabaja. Excelente sensibilidad.				
	Velocidad	Efecto Doppler	Alta sensibilidad. Sin contacto.	Detección de daños. Identificación del sistema.	Complejo		
		Electromecánico	Utilizado primario para medir vibraciones de alta frecuencia. Silencioso.				
Giroscopio		Puede mejorar los algoritmos para detectar el sitio donde ocurrió el daño.	Detección de daños.	Fácil			
Desplazamiento	Resistor	Alta linealidad. Buena resolución.	Detección de longitud de grieta. Identificación del sistema.	Fácil			
		LVDT	No afectado por condiciones externas.		Detección de daños. Identificación del sistema.		
	GPS/GNSS	Mala resolución. Los modos de baja frecuencia sólo s detectan.	Identificación del sistema.	Medio			
	Óptico	Resolución mejorada en comparación con instrumentos basados en GPS/GNSS. Se pueden inducir modos espurios.					
Mecánico	Detección de fatiga	Tensión	El sensor falla antes del colapso de la pieza. Se requiere más estudios para determinar el mejor compromiso en la longitud de las rayas.	Detección de daños	Fácil		
		Corrientes Eddy	Puede detectar el estado inicial de la grieta. Puede medir cambios sutiles en la longitud de la grieta.				
		AE	Puede detectar el estado inicial de la grieta resultante.				
		Ondas ultrasónicas	La estimación de la longitud de la grieta es más compleja, ya que el sensor no sigue una relación lineal.				
	Medición de fuerza	Células de carga	Requiere compensaciones de temperatura. La salida es proporcional a la carga aplicada	Elevar momento de desastre	Medio		
		Tensión	Medidor de tensión	La deformación es proporcional a la tensión. Generalmente se utiliza para aplicaciones estáticas.		Deformación. Evaluación y predicción del desempeño.	Medio
			Piezoelectrico	Sensibilidad mejorada. Se utiliza principalmente en aplicaciones dinámicas.			
	Corrosión	Medidor de tensión de cuerda vibrante	Ofrece aislamiento de ruido. Las muestras se pueden leer a varios kilómetros de distancia de la estructura instrumentada.				
			Impedancia	Utiliza dos frecuencias diferentes para medir la velocidad de corrosión. Puede detectar las etapas iniciales.			
			RFID	la versión original no puede detectar las primeras etapas. Se utiliza un sensor basado en diodo varactor para realiza la detección antes mencionada.	Detección de daños	Medio	
			Corrientes de Foucault	No se puede detectar las etapas iniciales del año. Sigue una relación lineal.			
		AE	Necesidad de esquema de filtrado para evitar errores de cálculo en la velocidad de corrosión.				
Ondas magnéticas		Se requieren más pruebas para determinar la mejor frecuencia para detectar la corrosión en su etapa más temprana.					
Grieta		AE	Necesidad de esquemas de filtrado para evitar errores de cálculo. Se requieren algoritmos complejos para localizar el sitio de la grieta si se adquieren señales débiles.	Detección de daños	Medio		
		Tensión	Es necesario utilizar varios sensores para tener una cobertura adecuada de toda la superficie de la estructura.		Medio		
	Termografía	Se debe utilizar un láser para mejorar la detectabilidad de la grieta. Sin contacto.	Complejo				
	Ondas ultrasónicas	Se requiere tratamiento superficial. Se necesitan algoritmos complejos.					
	Georradar	Excelente resolución espacial. Requiere una plataforma de implementación potente ya que utiliza una gran cantidad de memoria.	Medio				
	Transductores piezoeléctricos	Es necesario utilizar varios sensores para tener una cobertura adecuada de toda la superficie de la estructura. Trabaja mejor en estructuras metálicas.	Fácil				
	Vibraciones	Se requiere la fusión de algoritmos complejos para detectar, localizar y cuantificar las grietas. Es necesario utilizar varios sensores para tener una cobertura adecuada de toda la superficie de la estructura.					
Ambientales	Viento	Sensor de movimiento de efecto Hall	Es necesario utilizar varios sensores para tener una cobertura adecuada de toda la superficie de la estructura.		Medio		
		Anemómetro	Se utiliza para medir las fuerzas de excitación para algoritmos de identificación del sistema.	Diseño. Identificación del sistema de control de vibraciones	Fácil		
	Temperatura	Termopares	Sólo son lineales en un cierto rango de operación. Requiere circuitos de compensación para mitigar la temperatura ambiental.	Identificación del sistema	Fácil		
		IDT Termografía	Rango de operación lineal. Costoso.	control de vibraciones. Pronostico.	Medio		



# Referencias

- Aktan, A. E., Helmicki, A. J., y Hunt, V. J. (1998). Issues in health monitoring for intelligent infrastructure. *Smart Materials and Structures*, 7(5):674.
- Amezquita-Sanchez, J. P. y Adeli, H. (2016). Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23:1–15.
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., y Inman, D. J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to machine learning and deep learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147:107077.
- Bicanic, N. y Chen, H.-P. (1997). Damage identification in framed structures using natural frequencies. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40(23):4451–4468.
- Billah, K. Y. y Scanlan, R. H. (1991). Resonance, tacoma narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks. *American Journal of Physics*, 59(2):118–124.
- Brownjohn, J. M. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):589–622.
- Brownjohn, J. M., De Stefano, A., Xu, Y.-L., Wenzel, H., y Aktan, A. E. (2011). Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 1(3-4):79–95.
- Cao, R., El-Tawil, S., y Agrawal, A. K. (2020). Miami pedestrian bridge collapse: Computational forensic analysis. *Journal of Bridge Engineering*, 25(1):04019134.
- Chang, P. C., Flatau, A., y Liu, S. (2003). Health monitoring of civil infrastructure. *Structural health monitoring*, 2(3):257–267.
- chen, H. (1998). *Structural Damage Identification Using Vibration Modal Data*. PhD thesis, Department of Civil Engineering, Glasgow University, UK.
- Chen, H.-P. y Ni, Y.-Q. (2018). *Structural health monitoring of large civil engineering structures*. Wiley Online Library.

- 
- Delatte Jr, N. J. (2008). *Beyond failure: Forensic case studies for civil engineers*. American Society of Civil Engineers.
- Etouney, M. M. y Alampalli, S. (2016). *Infrastructure health in civil engineering: Theory and components*. CRC press.
- Farrar, C. R., Sohn, H., Hemez, F. M., Anderson, M. C., Bement, M. T., Cornwell, P. J., Doebling, S. W., Schultze, J., Lieven, N., y Robertson, A. (2003). Damage prognosis: current status and future needs. *Los Alamos National Laboratory, LA*, 176:177–178.
- Farrar, C. R. y Worden, K. (2010). An introduction to structural health monitoring. *New Trends in Vibration Based Structural Health Monitoring*, pages 1–17.
- Farrar, C. R., Worden, K., y Dulieu-Barton, J. (2009). Principles of structural degradation monitoring. *Encyclopedia of structural health monitoring*.
- Frangopol, D. M. y Messervey, T. B. (2009). Maintenance principles for civil structures. *Encyclopedia of structural health monitoring*.
- Gattulli, V., Lepidi, M., y Potenza, F. (2016). Dynamic testing and health monitoring of historic and modern civil structures in italy. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(1):71.
- Giurgiutiu, V. (2014). Chapter 1 - introduction. In Giurgiutiu, V., editor, *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors (Second Edition)*, pages 1–19. Academic Press, Oxford, second edition edition.
- Love, P. E., Lopez, R., y Edwards, D. J. (2013). Reviewing the past to learn in the future: Making sense of design errors and failures in construction. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(7):675–688.
- Moreno-Gomez, A., Perez-Ramirez, C. A., Dominguez-Gonzalez, A., Valtierra-Rodriguez, M., Chavez-Alegria, O., y Amezcua-Sanchez, J. P. (2018). Sensors used in structural health monitoring. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25:901–918.
- Tibaduiza Burgos, D. A. (2013). Design and validation of a structural health monitoring system for aeronautical structures.

# Capítulo 3

## Evaluación de la calidad de observaciones y rendimiento del posicionamiento 3D de receptores GNSS de bajo costo de doble frecuencia

### 3.1. Introducción

Las observaciones de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) adquiridas por receptores geodésicos se han utilizado ampliamente en aplicaciones científicas y profesionales, ya que estos receptores tienen capacidades en términos de mitigación del *multipath*, calidad de las observaciones y reducción de ruido (Li et al., 2023b). Sin embargo, la adquisición de receptores geodésicos por parte de universidades e institutos de investigación de bajo presupuesto se les dificulta por su elevado costo. Por otro lado, debido al rápido crecimiento en el desarrollo tecnológico orientado a la fabricación, los receptores y antenas GNSS están cambiando hacia la miniaturización y a diseños más ligeros (Amami et al., 2014). Algunas empresas comerciales han desarrollado conjuntos de chips o módulos GNSS de bajo costo por solamente 100-300 dólares. Por ejemplo, la empresa U-blox (u blox, 2021) desarrolló el primer módulo GNSS de bajo costo de alta precisión multi-frecuencia y multi constelaciones (ZED-F9P). La empresa Broadcom desarrolló el primer chip GNSS de doble frecuencia con capacidad de seguimiento multi-constelación para teléfonos inteligentes (BCM47755). Además, la empresa unicorecomm y Septentrio tienen módulos GNSS que son capaces de seguir todas las señales GNSS disponibles actualmente.

El desarrollo de estos receptores GNSS de bajo costo ha ocasionado un nueva área de investigación (Odolinski y Teunissen, 2016, 2017). Se han llevado a cabo numerosos estudios que analizan el rendimiento de los receptores GNSS de bajo costo en el posicionamiento (Paziewski, 2022), PPP en tiempo real (Li et al., 2023b), reflectometría GNSS (Fagundes et al., 2021; Ichikawa et al., 2019; Karegar et al., 2022), monitoreo de la ionosfera (Yi et al., 2021; Zhao et al., 2018), monitoreo de la troposfera y vapor de agua

(Barindelli et al., 2018; Marut et al., 2022; Stkeiak y Paziewski, 2022), monitoreo de la salud estructural (Bellone et al., 2016; Caldera et al., 2022; Manzini et al., 2022; Xue et al., 2022a,b), RTK (Janos et al., 2022; Li et al., 2023a; Luo et al., 2021). En general, las investigaciones concluyen que los receptores y antenas GNSS de bajo costo presentaron una relación señal ruido (SNR, por sus siglas en inglés) más baja, y un nivel de ruido más alto con respecto a los geodésicos. También, las antenas GNSS de bajo costo se caracterizan por no tener parámetros de calibración y presentar errores graves del *multipath* (Zhang et al., 2019). Zhang et al. (2021) analizaron los errores sistemáticos *multipath*, el sesgo de código diferencial (DCB, por sus siglas en inglés) y el sesgo entre sistemas (ISB, por sus siglas en inglés) para receptores GNSS de bajo costo considerando un nuevo método basado en el modelo sin geometría y corregido por la ionosfera, concluyendo que la calidad de las observaciones dependen de la antena receptora. Paziewski (2022) analizó la calidad de las observaciones y evaluó el rendimiento del posicionamiento puntual preciso sin ionosfera. Concluyó que los receptores de bajo costo equipados con antenas de parche presentaron registros de SNR menores y una dependencia de elevación de SNR más débil que los equipos tradicionales geodésicos. En Semler et al. (2019) se estudió el módulo GNSS ZED-F9P en combinación con una antena de parche, y alcanzó una precisión de centímetros en el posicionamiento 3D. En Hamza et al. (2020) se evalúa la precisión del receptor ZED-F9P con la antena de parche ANN-MB y se investigó su potencial para la detección de desplazamientos. Se encontró que el receptor ZED-F9P puede detectar desplazamientos mayores a 10 mm con un alto nivel de confiabilidad a través de la técnica de posprocesamiento DD (diferencias dobles). En Krietemeyer et al. (2020) utilizaron receptores de bajo costo de doble frecuencia en combinación con diferentes antenas para la estimación del retardo cenital troposférico (ZTD, por sus siglas en inglés). Una de las características más importantes en los receptores GNSS de bajo costo es la capacidad que tienen para muestrear, principalmente cuando se utiliza para estudiar el comportamiento dinámico de una estructura. Un método para encontrar los desplazamientos del centro de fase (PCO, por sus siglas en inglés) de las antenas de bajo costo sin parámetros de calibración fue establecido por Krietemeyer et al. (2022). Este método consiste en una calibración relativa para encontrar tanto los PCO, como la variación del centro de fase (PCV, por sus siglas en inglés). En Öğütçü et al. (2023) investigaron el rendimiento de la integridad y la calidad de las observaciones de un receptor GNSS u-blox ZED-F9P de bajo costo comparándolo con un receptor GNSS de grado geodésico. Además, evaluaron la disponibilidad de los canales de señal de época y fase/código, la relación señal-ruido (SNR), el *multipath* y los saltos de ciclo para el receptor de bajo costo y grado geodésico. Encontraron que la disponibilidad de época del receptor de grado geodésico y de bajo costo es comparable entre ellos. Por otro lado, la disponibilidad de canales de señal de fase/código del receptor de grado geodésico fue mayor que la del receptor de bajo costo. Al igual que otros estudios, los valores de SNR fueron menores en el receptor de bajo costo, mientras que el *multipath* fue ligeramente mayor, con respecto al receptor de grado geodésico.

Generalmente, los estudios de evaluación de los receptores GNSS de bajo costo se enfocan al rendimiento del posicionamiento (Hamza et al., 2021, 2020; Janos y Kuras, 2021; Nie et al., 2020; Paziewski, 2022) y muy pocos en la evaluación de la calidad de la señal (Öğütçü et al., 2023; Paziewski, 2022). Entender la calidad de la adquisición de la señal

desde un receptor GNSS de bajo costo es de importancia ya que es un indicador primordial en el posicionamiento final. Por lo cual, analizar la calidad de la señal GNSS de receptores de bajo costo es indispensable en el área del posicionamiento, navegación y tiempo. Además, un tópico que muy pocos investigadores han profundizado es la antena de bajo costo y sus parámetros de calibración. Por lo tanto, el objetivo principal de este capítulo 3 es evaluar la calidad de la señal GNSS observada desde dos diferentes receptores y antenas GNSS de bajo costo en términos de integridad, relación señal-ruido, *multipath* y saltos de ciclo para cada satélite observado. Consecuentemente, se propone un método para evaluar la calidad de la señal GNSS en términos de la relación señal-ruido a partir de valores teóricos. También, se evalúa el rendimiento en posicionamiento tridimensional del receptor ZED-F9P considerando parámetros de calibración para la antena ANN-MB-00 a través de los métodos de procesamiento GNSS, diferencias dobles (DD) y posicionamiento puntual preciso con resolución de ambigüedad (PPP-AR, por sus siglas en inglés).

Este capítulo 3 está organizado de la siguiente manera: en la Sección 3.2 se proporciona una breve descripción de los receptores GNSS de bajo costo evaluados. En la Sección 3.3 se describe la configuración experimental y las estrategias de adquisición de datos. Los criterios para la evaluación de la calidad de la señal GNSS y la descripción del método propuesto son mencionados en la Sección 3.4. El análisis de los resultados es descrito en la Sección 3.5. Finalmente, las discusiones y conclusiones son presentadas en la Sección 3.6 y 3.7, respectivamente.

## 3.2. Receptores GNSS de bajo costo

### 3.2.1. Módulo ZED-F9P

El 26 de abril de 2018, la empresa u-blox (un proveedor global de tecnologías líderes de posicionamiento y comunicación inalámbrica) anunció el lanzamiento del módulo GNSS multibanda ZED-F9P con posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK) multifrecuencia integrada (u-blox, 2021). El módulo ZED-F9P tiene un tamaño de tan solo 22x17x2.4 mm y utiliza tecnología de la plataforma u-blox F9P para alcanzar un rendimiento robusto de posicionamiento de alta precisión en segundos (U-blox, 2023b). Además, ZED-F9P es el primer receptor multifrecuencia de bajo costo que utiliza simultáneamente señales GNSS de las cuatro constelaciones GNSS globales (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou). Por otro lado, la combinación de señales GNSS de multifrecuencia ( $L_1/L_2/L_5$ ) y la tecnología RTK hacen que el módulo ZED-F9P alcance una precisión en el nivel centimétrico en segundos. También, ZED-F9P tiene una alta tasa de muestreo que permite su uso en aplicaciones altamente dinámicas como en el monitoreo de estructuras.

La placa de aplicación C099-F9P lanzada en septiembre de 2019, fue utilizada para evaluar el receptor u-blox ZED-F9P-01B. C099-F9P puede funcionar en modo RTK y transmitir correcciones RTCM a través de serial, Wi-Fi o Bluetooth y es fácilmente configurable con el software de evaluación u-center (U-Center, 2021). En la Tabla 3.1 se presenta el rendimiento del receptor ZED-F9P en diferentes modos GNSS, y en la Tabla 3.2 se mues-

tran las señales GNSS admitidas. Para el caso de este estudio, se utilizó la placa C099-F9P junto con la antena de parche ANN-MB-00 (Ver Figura 3.1). La antena GNSS activa multibanda ( $L_1, L_2/E_{5b}/B2I$ ) ANN-MB-00 de u-blox admite GPS, GLONAS, Galileo y BeiDou. Está especialmente diseñada para aplicaciones GNSS que requieran alta precisión en la ubicación. Algunas características de la antena se mencionan enseguida:

- Peso 173 g (cable incluido).
- Tamaño 60x82x22.5 mm.
- Conectores (elección): SMA, SMB, MCX.
- Montaje base magnética, opción de instalación fija.
- Frecuencia: Banda:  $L_1$ : 1559-1606 MHz, Banda  $L_2/E_{5b}/B2I$ : 1197-1249 MHz.
- Impedancia 50 ohmios.
- Ganancia máxima (más de 15 cm de diámetro del plano de tierra): Banda  $L_1$ : 3.5 dBic, Banda  $L_2/E_{5b}/B2I$ : 0-2 dBic.
- Polarización circular hacia la derecha (RHCP, por sus siglas en inglés).
- Nivel de protección IP67.



**Figura 3.1:** Receptor y antena GNSS de bajo costo utilizados: a) placa C099-F9P, y b) antena GNSS ANN-MB-00.

**Tabla 3.1:** Rendimiento del receptor ZED-F9P en diferentes modos GNSS. Fuente: [u-blox \(2021\)](#).

GNSS		GPS+GLO+GAL+BDS	GPS+GLO+GAL	GPS+GAL	GPS+GLO	GPS+BDS	GPS
Adquisición	Cold start	25 s	25 s	30 s	26 s	28 s	30 s
	Hot start	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s
	Aided start	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s	2 s
Update	RTK	8 Hz	10 Hz	15 Hz	15 Hz	15 Hz	20 Hz
	PVT	10 Hz	12 Hz	20 Hz	25 Hz	25 Hz	25 Hz
	RAW	20 Hz	20 Hz	25 Hz	25 Hz	25 Hz	25 Hz
Tiempo convergencia	RTK	< 10 s	< 10 s	< 10 s	< 10 s	< 10 s	< 30 s

**Tabla 3.2:** GNSS y señales compatibles en ZED-F9P. Fuente: [u-blox \(2021\)](#).

GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
L1 C/A (1575.42 MHz)	L1OF (1602 MHz + $k \cdot 562.5$ kHz, $k = -7, \dots, 5, 6$ )	E1-B/C (1575.42 MHz)	B1I (1561.098 MHz)
L2C (1227.60 MHz)	L2OF (1246 MHz + $k \cdot 437.5$ kHz, $k = -7, \dots, 5, 6$ )	E5b (1207.140 MHz)	B2I (1207.140 MHz)

### 3.2.2. Módulo Mosaic-X5

El Mosaic-X5 es el módulo GNSS más compacto de la compañía Septentrio, ofrece un rendimiento de posicionamiento a nivel centímetro. Es un receptor GNSS de múltiples frecuencias y múltiples constelaciones en un módulo de montaje, y está diseñado para aplicaciones de mercado masivo como robótica y sistemas autónomos que admiten todas las señales de satélites GNSS actuales y futuras ([Septentrio, 2023a](#)). Además, el Mosaic-X5 (kit de evaluación) tiene un sistema de monitoreo Avanzado de Integridad Autónoma del Receptor (RAIM+, por sus siglas en inglés) que comprende de mecanismos de detección de fallas del receptor en todos los niveles, incluida la generación de mediciones, control de calidad y algoritmos de navegación. Las mediciones defectuosas causadas por un alto *multipath* o una ionosfera activa son detectadas y se eliminan de la solución ([Septentrio, 2023a](#)). En la Figura 3.2 se ilustra el kit de evaluación Septentrio integrado por el receptor Mosaic-X5 y la antena de bajo costo TW7972. La Tabla 3.3 contiene las principales características del receptor GNSS de bajo costo de la compañía Septentrio. La antena GNSS patentada TW7972 e impulsada por empresa Tallysman, es una antena GNSS magnética de triple frecuencia + antena GNSS de banda L. TW7972 es una antena liviana de alta precisión que admite GPS/QZSS- $L_1/L_2/L_5$  de triple frecuencia, GLONASS- $G_1/G_2/G_3$ , Galileo- $E_1/E_{5a}/E_{5b}$ , BeiDou- $B_1/B_2/B_{2a}$ , NavIC- $L_5$ , incluido el sistema de aumentación basado en satélites (SBAS, por sus siglas en inglés) disponible en la región de operación (WASS (Norteamérica), EGNOS (Europa), MSAS (Japón) o GAGAN (India)), además de la cobertura de servicios de corrección en banda L, y están especialmente diseñados para un posicionamiento preciso de tripe frecuencia. Algunas especificaciones de la antena TW7972 se enlistan a continuación ([Septentrio, 2023b](#)):

**Figura 3.2:** Receptor y antena GNSS utilizados: a) Mosaic-X5, y b) antena GNSS.

**Tabla 3.3:** Características técnicas del receptor Mosaic-X5. Fuente: [Septentrio \(2021\)](#).

<b>GNSS</b>	GPS: L1 C/A, L1C, L1PY, L2C, L2P, L5 GLONASS: L1 C/A, L2 C/A, L2P, L3, CDMA BEIDOU: B1I, B1C, B2a, B2I, B3 GALILEO: E1, E5a, E5b, E6 QZSS: L1 C/A, L1C, L2C, L5, L6 SBAS: EGNOS, WAAS, GAGAN, MSAS
<b>Protocolos</b>	Formato binario septentrio SBF NMEA 0183, v2.3, v3.03, v4.0 RINEX v2.x, v3.x RTCM v2.x, v3.x CMR v2.0
<b>Vel. Max. Muestreo</b>	100 Hz
<b>Tiempo.Converg</b>	Cold start <45 s Warm start <20 s Re-adquisición 1 s
<b>Desempeño de seguimiento</b>	Tracking 20 dB-Hz Adquisición 33 dB-Hz

### 3.3. Configuración experimental y adquisición de datos

Se llevaron a cabo dos experimentos enfocados al rendimiento de los receptores GNSS de bajo costo. El primer experimento consistió en una medición GNSS de periodo largo para evaluar la calidad de la señal recibida por cada receptor. En el segundo experimento, se realizaron mediciones GNSS sobre monumentos de centrado forzoso con coordenadas conocidas para evaluar dos métodos de posicionamiento: relativo y posicionamiento puntual preciso con resolución de ambigüedad entera. En las siguientes secciones se describe de manera detallada cada uno de los experimentos establecidos.

#### 3.3.1. Pruebas estáticas de largo periodo de medición

El objetivo principal de este experimento fue evaluar la calidad de las observaciones GNSS obtenidas desde un receptor de bajo costo equipado con una antena GNSS de bajo costo para un periodo de medición largo que permitiera la visibilidad de todos los satélites disponibles al Noroeste de México. Por lo cual, fue necesario ubicar un sitio que estuviera libre de obstáculos para evitar fuentes de error de *multipath* y discontinuidad en la señal GNSS. En la azotea de una casa-habitacional ubicada en una zona rural, se diseñó y construyó un monumento de centrado forzoso con dimensiones de 1 metro de altura por 40 centímetros de diámetro, tal como se ilustra en la Figura 3.3. Sobre este monumento de concreto, se llevaron a cabo dos mediciones GNSS de 24 horas a una frecuencia de muestreo de 10 Hz. El primer conjunto de datos GNSS se adquirió el 26 de mayo de 2021 con el kit de evaluación u-blox C099-F9P compuesto por el receptor GNSS ZED-F9P y equipado con la antena de parche ANN-MB-00, y el segundo conjunto fue adquirido el 16 de julio de 2021 con el receptor GNSS Mosaic-X5 equipado con la antena de parche TW7972. Los

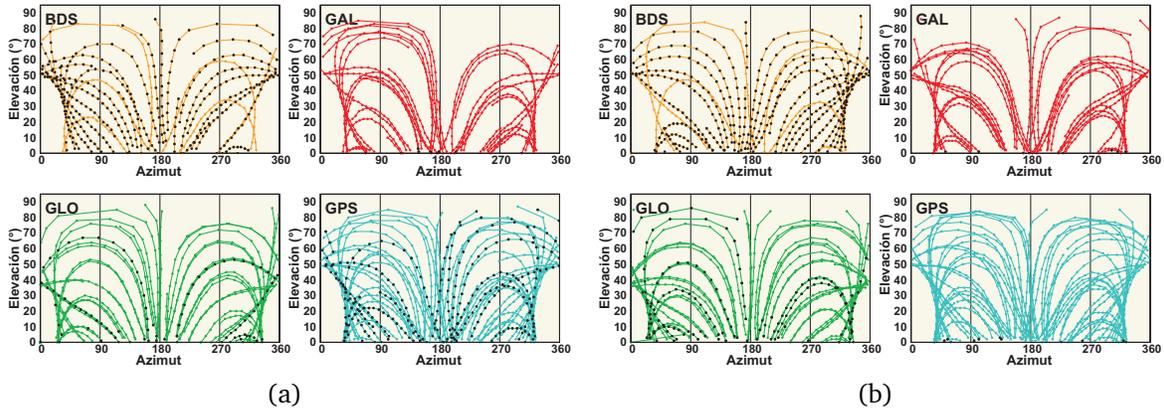
receptores GNSS de bajo costo empleados captan las señales GPS L1 C/A y L2C, Galileo E1-B/C y E5b, GLONASS G1 y G2, así como señales BeiDou B1I y B2I, para el caso del ZED-F9P, y GPS L5, Galileo E5a, E6, GLONASS L3 y BeiDou B1C, B2a y B3 para el Mosaic-X5, es decir, un número mayor de señales GNSS para este último receptor. La configuración del receptor ZED-F9P fue establecida desde el software U-Center (U-Center, 2021) y RXLogger para el receptor Mosaic-X5. Las mediciones se almacenaron en formato “UBX” para el ZED-F9P y “SBF” para el Mosaic-X5, en una laptop HP. Para garantizar que las mediciones GNSS tuvieran un efecto menor de *multipath*, se colocó debajo de las antenas GNSS de bajo costo un disco de metal reflejante como un plano de tierra (u blox, 2021).

Para la conversión de los formatos binarios *UBX* y *SBF* a RINEX 3.03 se utilizó la paquetería RTCONV del software RTKLib (versión demo5\_b34b) y la herramienta SBF Converter, respectivamente. La versión RINEX 3.03 fue seleccionada debido a la compatibilidad con las constelaciones actuales GPS, GLONASS, Galileo, QZSS y BeiDou y observaciones de sistemas de aumento basados en el espacio (SBAS), mientras que las versiones anteriores de 3.02 no son compatibles con BeiDou y QZSS ([http://www.epncb.oma.be/\\_documentation/formats/rinex.php](http://www.epncb.oma.be/_documentation/formats/rinex.php)).



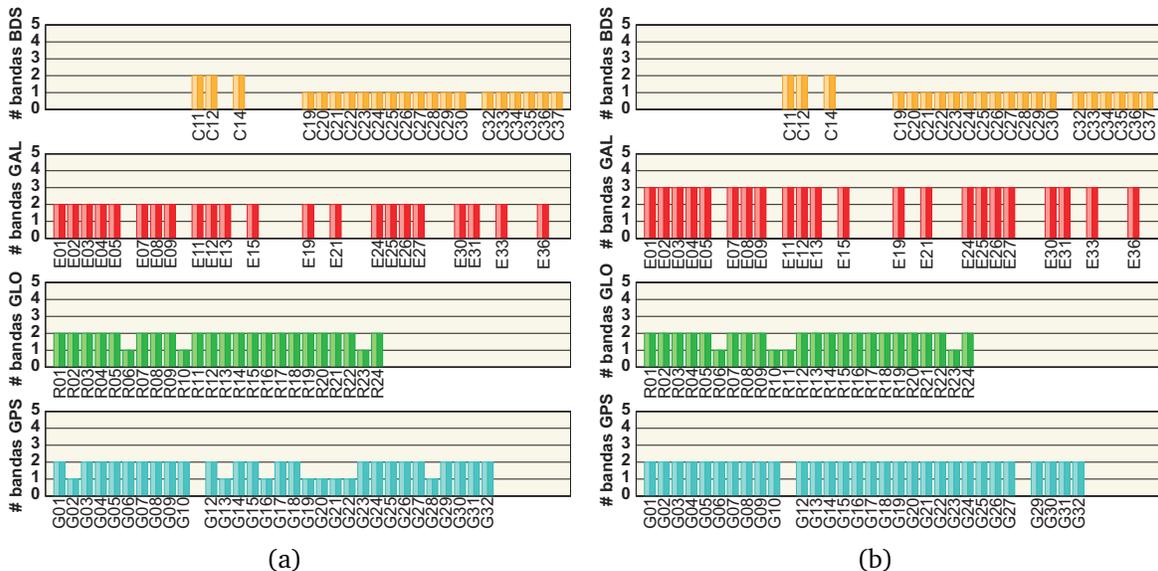
**Figura 3.3:** Monumento de concreto.

La Figura 3.4 ilustra la trayectoria de los satélites GNSS en el cielo durante cada medición de 24 hrs. Existe una mínima diferencia entre la trayectoria de algunos satélites correspondientes a las constelaciones BeiDou y Galileo entre las mediciones de ambos receptores, y esto es debido a la diferencia de la época de medición. También, en el caso de Galileo, se observa un número mayor de satélites que se localizaron sobre el azimut  $180^\circ$  para el receptor Mosaic-X5, y que no se alcanzaron a observar con el receptor ZED-F9P, esto es por la mayor compatibilidad en señales que tiene el Mosaic-X5.



**Figura 3.4:** Trayectoria de los satélites en el cielo durante la medición de 24 horas con los receptores GNSS de bajo costo: a) ZED-F9P y b) Mosaic-X5.

En la Figura 3.5a se ilustra el número de satélites GNSS disponibles durante la medición del receptor ZED-F9P. Durante 24 horas de medición estuvieron disponibles 21 satélites BeiDou y solamente 3 de ellos fueron compatibles con frecuencias duales, 22 satélites Galileo de frecuencia doble, 24 satélites GLONASS y solamente 21 de ellos fueron compatibles con frecuencias duales, y 31 satélites GPS donde solamente 23 satélites fueron de frecuencia doble. Esto es debido a que el receptor ZED-F9P no es compatible con la banda L2 de GPS del bloque IIR. La Figura 3.5b ilustra los satélites GNSS disponibles durante la medición del Mosaic-X5 donde únicamente la constelación de Galileo mostró frecuencias triples en sus observaciones. Además, no se registró el satélite G28. En total, estuvieron disponibles 98 satélites GNSS para el ZED-F9P y 97 para el Mosaic-X5.



**Figura 3.5:** Bandas disponibles para cada satélite GNSS observado: (a) receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P y, (b) receptor GNSS de bajo costo Mosaic-X5. GLO:GLONASS, GAL:Galileo, BDS:BeiDou.

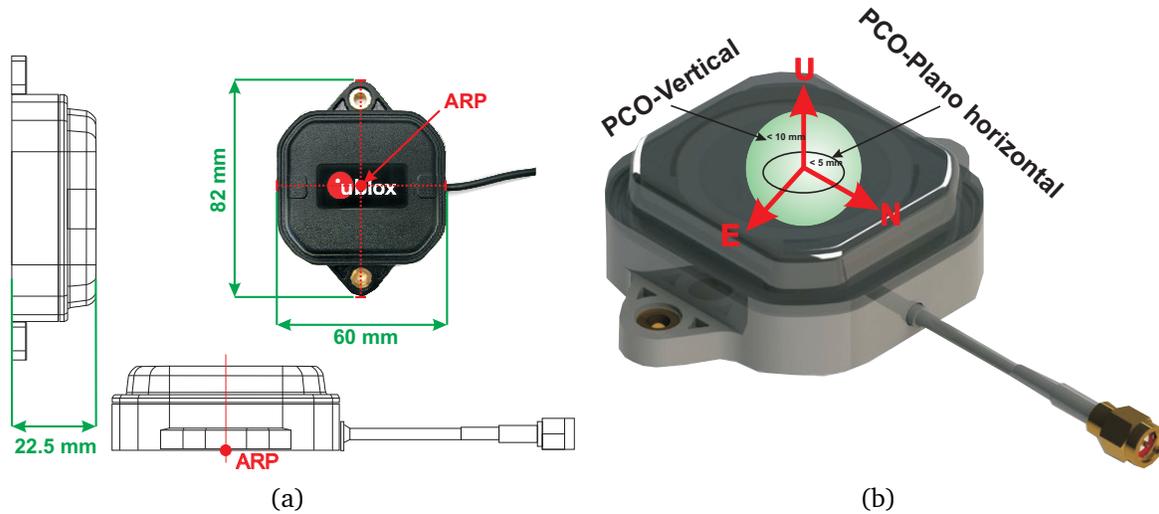
### 3.3.2. Posicionamiento 3D

El posicionamiento 3D desde receptores GNSS de bajo costo ya se ha evaluado en un conjunto de estudios llevados a cabo principalmente en países europeos y asiáticos (Hamza et al., 2021, 2020, 2023; Kazmierski et al., 2023) y algunos en México (Romero-Andrade et al., 2021a,b). Estos trabajos han resaltado usar antenas GNSS de bajo costo, particularmente el modelo ANN-MB-00 de la empresa u-blox, y alcanzar precisiones milimétricas. Sin embargo, este modelo de antena no cuenta con parámetros de calibración emitidos por un organismo internacional (NGS, 2023) y considerando los errores que causan los desplazamientos del centro de fase (PCO) de la antena en el posicionamiento, es importante evaluar el rendimiento de este modelo de antena en el posicionamiento tridimensional. El fabricante de la antena ANN-MB-00 reporta la geometría y ubicación del punto de referencia de la antena (ARP) y los desplazamientos aproximados del centro de fase (U-blox, 2023a). En la Tabla 3.4 se muestran los valores para los desplazamientos absolutos del centro de fase de la antena en las bandas  $L_1$  y  $L_2$ . El desplazamiento del centro de fase se da en milímetros con respecto al punto de referencia de la antena (definido en la Figura 3.6). La dirección Norte es hacia el conector del cable, mientras que la dirección Up es normal al plano de tierra de la antena, hacia el elemento de la antena. Los desplazamientos del centro de fase de la antena ANN-MB-00 reportados por el fabricante se midieron sobre un plano de tierra circular de 120 mm de diámetro, por lo cual, cualquier cambio en el tamaño o la forma del plano de tierra puede afectar el desplazamiento del centro de fase (U-blox, 2023a).

**Tabla 3.4:** Desplazamientos del centro de fase (PCO) y la variación con respecto al punto de referencia de la antena (ARP) para las bandas L1 y L2 GPS. Estos valores corresponden a una medición sobre un plano de tierra circular de 120 mm. Fuente: U-blox (2023a).

GNSS	Frecuencia	Desplazamientos del centro de fase (PCO)		Variación del centro de fase (PCV)
		Plano horizontal	UP	Sobre todo azimut/elevación
GPS L1 C/A	1575.42 MHz	<5 mm en todas las direcciones	8.9 mm	<5 mm
GPS L2C	1227.60 MHz	<5 mm en todas las direcciones	7.6 mm	<10 mm

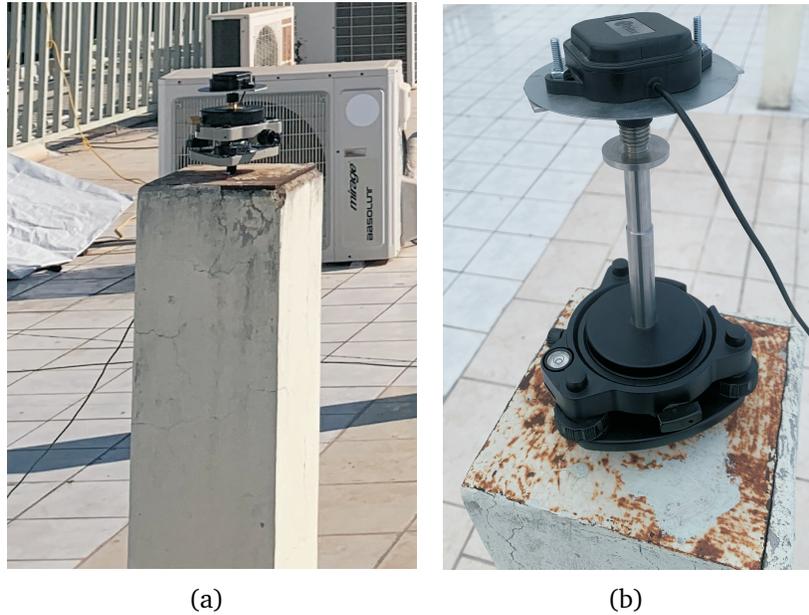
Los errores causados por los PCOs en el posicionamiento final están en el orden de los centímetros (Teunissen y Montenbruck, 2017). Entonces, si no se corrigen los valores de la Tabla 3.4 en el procesamiento de datos GNSS cuando se utiliza la antena ANN-MB-00 es imposible alcanzar una precisión posicional menor o igual a 5 mm en la componente horizontal y 9 mm en la vertical. La Figura 3.6b ilustra la variación que puede tener el centro de fase de la antena cuando no se consideran los parámetros de calibración de la antena de bajo costo. La esfera color verde representa la precisión que puede alcanzar la componente vertical, y la elipse color negro la componente horizontal, si no son consideradas las correcciones. Es decir, el punto de interés estaría en los límites de la esfera y elipse.



**Figura 3.6:** Características geométricas de la antena GNSS ANN-MB-00: (a) Dimensiones de la geometría, y (b) desplazamientos del centro de fase. Editado de: U-blox (2023a).

Para evaluar el desempeño de los receptores GNSS de bajo costo equipados con antenas de bajo costo en el posicionamiento 3D considerando la calibración de la antena ANN-MB-00 obtenida mediante el método propuesto por Kriemeyer et al. (2022) (<https://gnss-antcal.citg.tudelft.nl/>) y la reportada en Kriemeyer et al. (2020), fue diseñado un experimento sobre dos monumentos de centrado forzoso ubicados en la azotea de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio. En mediciones pasadas con equipo de grado geodésico y utilizando el método relativo se les dieron coordenadas precisas a los dos monumentos de centrado forzoso, donde estas coordenadas se establecieron como referencia para la evaluación del posicionamiento alcanzado por el receptor GNSS ZED-F9P equipado con la antena ANN-MB-00. Dos métodos de procesamiento GNSS fueron utilizados: posicionamiento relativo estático y Posicionamiento Puntual Preciso con Resolución de ambigüedad (PPP-AR, por sus siglas en inglés) en modo estático. Para el método relativo estático se instrumentaron los dos monumentos de centrado forzoso con los receptores GNSS de bajo costo equipados con la antena ANN-MB-00. El monumento E se estableció como punto de referencia y el B como rover, tal como se ilustra en la Figura 3.7. Para hacer coincidir el ARP de la antena ANN-MB-00 con el punto de referencia del monumento de centrado forzoso fue necesario construir un sistema que permitiera centrar y nivelar la antena. La altura de la antena se midió desde la base metálica del monumento hasta la base del disco metálico (plano de tierra) donde se encuentra el ARP de la antena (Ver Figura 3.6). El tiempo de adquisición de datos fue de 2 horas con una frecuencia de muestreo de 5 Hz. Se estableció un ángulo de elevación de  $12^\circ$  y se siguió a todas las constelaciones GNSS disponibles (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou). Para el procesamiento de datos GNSS con el método relativo estático y PPP-AR en modo estático se utilizó el software de código abierto RTKLib (versión demo5\_b34b) (Everett et al., 2022; Takasu, 2013) y el software científico PRIDE-PPPAR (Geng et al., 2019), respectivamente. PRIDE-PPPAR es el software de código abierto para el procesamiento de datos GNSS con la técnica PPP en modo estático que alcanza el mejor desempeño en posicionamiento (Vazquez-Ontiveros

et al., 2023). La estrategia de procesamiento para el software RTKLib y PRIDE-PPPAR se describe en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.



**Figura 3.7:** Diseño experimental para evaluar el posicionamiento 3D con equipo de bajo costo: (a) Pilar rover B, y (b) Pilar de referencia E.

**Tabla 3.5:** Estrategias de procesamiento del software RTKLIB (versión demo5\_b34b).

Elemento	Estrategia
Solución	Estático relativo
Sistema GNSS	GPS
Frecuencias	L1 y L2
Observables	Código y fase
Corrección de la antena del receptor	FileK.atx reportado por <a href="#">Kriemeyer et al. (2020)</a> . FileA.atx determinado por el autor a través del método propuesto por <a href="#">Kriemeyer et al. (2022)</a> .
Frecuencia de muestreo	5 Hz
Ángulo de elevación	10°
Ionosfera	Efemérides transmitidas
Troposfera	Saastamoinen
Efemérides	Transmitidas
Ambigüedades	Fix and hold
Coordenadas de salida	ECEF (WGS84)

Para determinar el impacto del archivo de calibración de la antena ANN-MB-00 se utilizaron dos archivos file.atx, el obtenido por el autor a través de observaciones propias con la antena de bajo costo y enviados al servidor de calibración relativa propuesto por

Krietemeyer et al. (2022), y el obtenido en el estudio Krietemeyer et al. (2020). Es importante mencionar que el archivo de calibración file.atx determinado por Krietemeyer et al. (2020) para la antena ANN-MB-00 fue incorporado en una de las últimas actualizaciones del software científico GAMIT/GLOBK (igs14\_2196\_plus.atx, 22 septiembre 2023 ) (<http://geoweb.mit.edu/gg/updates.php>).

**Tabla 3.6:** Estrategias de procesamiento del software PRIDE-PPPAR II.

Elemento	Estrategia
Órbitas y reloj	Wuhan finales (Geng et al., 2022a,b)
Productos AR	Wuhan sesgos de código/fase
Correcciones de antena satelital	IGS14.atx actualizado para GPS, compensación PCO y PCV.
Corrección de la antena del receptor	FileK.atx reportado por Krietemeyer et al. (2020). FileA.atx determinado por el autor a través del método propuesto por Krietemeyer et al. (2022).
Modelo de ajuste	Procesamiento por lotes con ajuste por mínimos cuadrados
Modo de procesamiento	Estático
Sistema GNSS	GPS
Frecuencias	L1 y L2
Observables	Código y fase
Frecuencia de muestreo	5 Hz
Ángulo de elevación	10°
Efecto ionosférico	Efectos ionosféricos de primer y segundo orden eliminados mediante combinación lineal IF y archivo IONEX, respectivamente.
Estimación del retraso húmedo-zenith	Función de mapeo VMF1
Fase wind-up	Corregida
Detección de saltos de ciclo	Combinación Hatch-Melbourne-Wubbena + libre de geometría
Tierra sólida, cargas de mareas terretres y mareas polares	Convencionales IERS
Coordenadas de salida	ECEF (WGS84)

En el método relativo estático se establecieron 5 criterios de evaluación en el desempeño del archivo de calibración en el posicionamiento tridimensional final:

- 1 Estación **Base** con parámetros de **Calibración** reportados por Krietemeyer y estación **Rover Sin** parámetros de **Calibración (BCK-RSC)**.
- 2 Estación **Base** con parámetros de **Calibración** reportados por Krietemeyer y estación **Rover Con** parámetros de **Calibración** reportados por Krietemeyer (**BCK-RCCK**).
- 3 Estación **Base** con parámetros de **Calibración** obtenidos por el Autor y estación **Rover Sin** parámetros de **Calibración (BCA-RSC)**.
- 4 Estación **Base** con parámetros de **Calibración** obtenidos por el Autor y estación **Rover Con** parámetros de **Calibración** obtenidos por el Autor (**BCA-RCCA**).

- 5 Estación Base Sin parámetros de Calibración y estación Rover Sin parámetros de Calibración (**BSC-RSC**).

En el caso del método de Posicionamiento Puntual Preciso con Resolución de Ambigüedad (PPP-AR) se definieron solamente 3 criterios sobre la antena ANN-MB-00 del monumento B:

- 1 Estación Rover Con parámetros de Calibración reportados por Krietemeyer para PPP-AR (**RCCKPPP**).
- 2 Estación Rover Con parámetros de Calibración obtenidos por el Autor para PPP-AR (**RCCAPPP**).
- 3 Estación Rover Sin parámetros de Calibración para PPP-AR (**RSCPPP**).

### 3.4. Análisis de calidad de las señales GNSS

En esta Sección 3.4 se evalúa la calidad de la señal GNSS de los receptores de bajo costo utilizando tres indicadores importantes: la relación señal-ruido (SNR), *multipath* de pseudorange y la integridad de las observables. Además, se propone un método novedoso para evaluar la calidad de la señal basado en los valores teóricos de la relación señal-ruido para cada frecuencia de las cuatro constelaciones GNSS globales (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou). Para analizar la calidad de las observaciones GNSS se utilizó el software Anubis (Vaclavovic y Dousa, 2016) debido a que permite realizar un análisis profundo a todas las constelaciones GNSS (TEQC solo permite GPS, GLONASS y Galileo en RINEX versión 2.11) y a diferentes versiones de RINEX. El tamaño de los archivos de observación generados por el receptor ZED-F9P y Mosaic-X5 fue de 4.2 Gb y 4.55 Gb, respectivamente. Debido al tamaño de los archivos RINEX fue necesario ejecutar el software Anubis desde la terminal de Linux (Ubuntu 20.04) porque en Windows se presentó un problema de desbordamiento de memoria.

#### 3.4.1. Propuesta de análisis SNR

La intensidad de la señal GNSS se mide utilizando la relación señal-ruido, que es un indicador de la calidad del funcionamiento de los receptores/antenas GNSS y de la calidad de las observaciones de fase portadora y pseudorange. Los fabricantes de antenas y receptores GNSS de grado geodésico analizan los valores de SNR de las observaciones para mejorar las especificaciones técnicas de sus productos y la adquisición de la señal. En Langley (1997) se describe que la SNR se ve afectada por fuentes de ruido térmico, como la temperatura de la antena y del receptor, que implican el flujo de los electrones dentro del hardware del receptor. La temperatura de ruido ( $T$ ) para un receptor común en condiciones normales de uso es de aproximadamente 290 K, lo que deriva a una densidad de ruido de -204 Dbw/Hz cuando es considerada la constante de Boltzmann  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K. Por otra parte, la potencia de la portadora recibida ( $C$ ) está influenciada por diversos factores, entre ellos la potencia de salida del transmisor del satélite, los cambios en las pérdidas

espaciales, el diagrama de ganancia de la antena receptores y las pérdidas de señal entre el cable de la antena y el receptor. Por ejemplo, la potencia nominal de la portadora recibida para el GPS  $L_1$  C/A es de aproximadamente -158.5 dBW, lo que representa el nivel mínimo de señal referenciado a una ganancia de 0 dB para una antena isotrópica con polarización circular. Además, la potencia máxima recibida (C-MAX) de una señal GNSS es crucial para calcular la posible interferencia. La determinación de la potencia máxima recibida para una señal GNSS implica considerar las pérdidas y ganancias del medio de propagación de la señal, incorporando factores espaciales y físicos tales como: potencia de transmisión de RF, ganancia equivalente de la antena transmisora hacia la antena receptora, ganancia de potencia máxima recibida con respecto a la antena de referencia, pérdida de propagación en el espacio libre en un ángulo de nadir dado, la mínima pérdida atmosférica posible maximizando la potencia recibida y la pérdida de polarización. Además, los valores de potencia mínima y máxima del receptor GNSS aumentan en función del ángulo de elevación del satélite ( $e$ ) con respecto a la antena receptora. Por ejemplo, la potencia máxima recibida por GPS para cada frecuencia varía en aproximadamente 2.3 dBW en ángulos de elevación de 0 a 90 grados (Betz, 2015).

**Tabla 3.7:** Niveles teóricos mínimos y máximos de potencia recibida para las señales GNSS.

GNSS	Banda/Bloque	Potencia mínima recibida [dB-Hz]	Potencia máxima recibida [dB-Hz]
GPS <sup>ab</sup>	L1 C/A	45.5	51
	L1 C	47	51
	L2-II-IIA-IIR	39.5	46
	L2-IIF	42.5	46
	L5	46.1	54
GLONASS <sup>c</sup>	G1	43	48.8
	G2	37	48.8
Galileo <sup>d</sup>	E1	47	52
	E5	49	54
	E6	49	54
BeiDou <sup>e</sup>	B1I	41	45
	B1C-MEO	45	49
	B1C-IGSO	43	47
	B2A	48	52
	B3I	41	45

<sup>a</sup>GPS-ICD (2021a)

<sup>b</sup>GPS-ICD (2021b)

<sup>c</sup>GLONASS-ICD (2008)

<sup>d</sup>Galileo-ICD (2021)

<sup>e</sup>BeiDou-ICD (2019)

La información sobre el diseño de la interfaz para cada sistema de navegación por satélite (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou) se describe formalmente en su respectivo documento de control de interfaz (ICD, por sus siglas en inglés). Estos documentos ICD

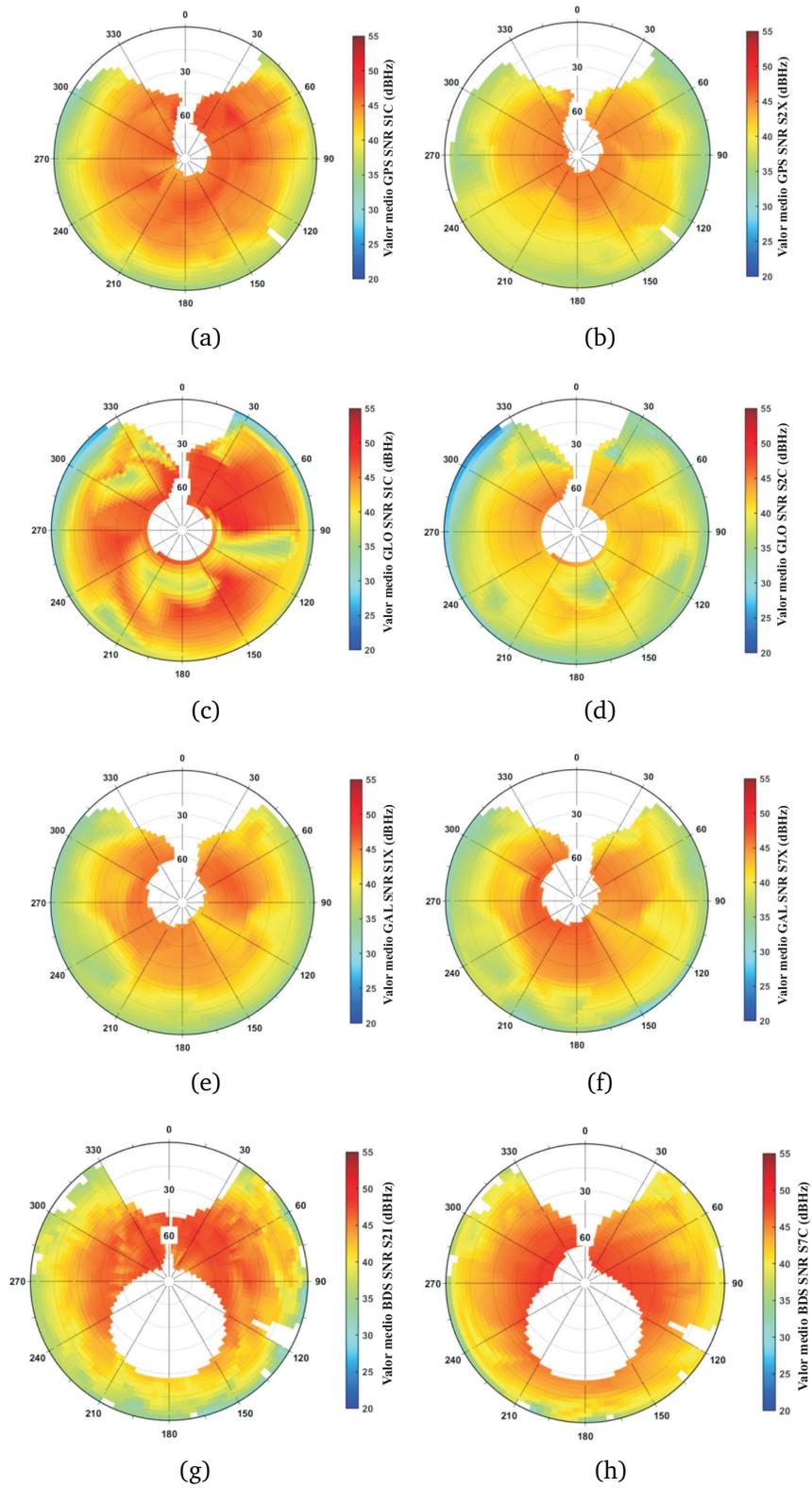
contienen detalles, constantes, parámetros, definiciones y procedimiento esenciales relacionados con la interfaz del sistema GNSS. Cada organismo gubernamental responsable del respectivo sistema GNSS mantiene y actualiza su ICD con cada nuevo número. En esta Sección 3.4.1, la información de cada ICD se utilizó para calcular la media de la potencia mínima teórica recibida en unidades de dBW para cada sistema de navegación por satélite, banda de frecuencias y bloque de satélites. Además, se utilizó la densidad de ruido de un receptor terrestre promedio para convertir cada valor a dB-Hz. Los resultados se resumen en la Tabla 3.7.

### 3.4.2. Intensidad de la señal GNSS

Los valores SNR de las observaciones de los receptores GNSS de bajo costo se analizaron considerando dos factores: (1) el ángulo de elevación de los satélites GNSS, y (2) el valor SNR teórico propuesto en la Tabla 3.7. Para (1) se construyeron mapas del cielo con valores SNR para cada señal GNSS observada y en (2) se determinó el porcentaje SNR observado con respecto al máximo teórico SNR para todos los satélites y frecuencias GNSS disponibles.

#### *Receptor ZED-F9P*

El ángulo de elevación tiene un papel importante en la calidad de la señal GNSS, esto debido a las obstrucciones y el medio de propagación por donde viaja la señal. Cuando el ángulo de elevación es bajo la antena recibe señales provenientes del horizonte, estas señales tienen una mayor trayectoria recorrida y por lo tanto una mayor interacción con la atmosfera lo cual degrada su calidad al ser un medio dispersivo. Las señales recibidas desde el cenit tienen mejor calidad ya que no viajan una trayectoria grande en la atmosfera. Lo mencionado anteriormente se ilustra en la Figura 3.8. La intensidad de la señal (SNR) se mide en dB-Hz y tiene una variación para cada frecuencia. En la Figura 3.8a se ilustra el efecto del ángulo de elevación en la intensidad de la señal GNSS. La barra de colores al lado del gráfico del cielo representa el valor SNR de la intensidad de la señal reflejado en un color. Cuando la señal es recibida desde un ángulo de elevación bajo, la intensidad tiene un SNR menor a 37 dB-Hz y se representa de un tono verdoso ( $< 7^\circ$ ). Cuando la señal es recibida entre los ángulos  $7^\circ$  y  $15^\circ$  (en ocasiones hasta los  $30^\circ$ ) la intensidad de la señal tiene un SNR mayor a 37 dB-Hz, pero menor a 42 dB-Hz y se representa en un tono amarillo. Cuando la señal es recibida desde un ángulo de elevación  $> 30^\circ$  se espera que la intensidad de la señal aumente con valores de SNR entre  $42^\circ$  y  $55^\circ$ , esto se representa con un tono de color rojo. Sin embargo, los valores de intensidad SNR no solamente dependen del ángulo de elevación, sino también de la calidad de la antena. Una antena de parche (por ejemplo, ANN-MB-00) difícilmente va a alcanzar valores de SNR mayores a 50 dB-Hz. Además, cada frecuencia GNSS tiene una intensidad diferente y esto se observa en la variación de la tonalidad de colores entre las Figuras 3.8a y 3.8b, siendo para  $L_1$  y  $L_2$  de GPS, respectivamente, para el caso del receptor GNSS ZED-F9P. Por otro lado, en la Figura 3.8c se observa que la señal  $G_1$  de GLONASS alcanzó la tonalidad de mayor intensidad y la señal  $G_2$  (Ver Figura 3.8d) la de menor.



**Figura 3.8:** Efecto de la relación señal-ruido (SNR) sobre las señales GNSS: a)S1C-GPS, b)S2X-GPS, c)S1C-GLONASS, d)S2C-GLONASS, e)S1X-GAL, f)S7X-GAL, g)S2I-BDS y h)S7I-BDS.

Las señales  $L_1$  y  $G_1$  presentaron valores de intensidad SNR mayores a las  $L_2$  y  $G_2$ , esto es debido a las características físicas de las señales (Leclère et al., 2018). Galileo fue la constelación con menor intensidad en valores SNR, tal como se observa en las Figuras 3.8e y 3.8f que no alcanzan un tono rojo en el cenit. Para BeiDou, ambas señales presentaron valores altos de intensidad SNR en el cenit. Debido a la geometría de los satélites MEO de BeiDou no fue posible recibir señales de ángulos de elevación mayores a  $30^\circ$  en un rango de azimut  $150^\circ$ - $210^\circ$ .

También, se analizó el porcentaje de puntuación SNR para cada satélite GNSS y frecuencia disponible para el receptor GNSS ZED-F9P. El porcentaje corresponde a la calidad de la señal con respecto al valor máximo teórico de SNR. Es decir, se podrán registrar valores de SNR para  $L_1$  y  $L_2$  iguales, pero al ser comparados con los valores teóricos y transformados a porcentaje, estos serán diferentes. De esta manera, el usuario tendrá un valor de porcentaje que identifique de manera correcta la calidad de la señal GNSS. La Figura 3.9 ilustra los porcentajes de puntuación SNR para cada satélite y frecuencia observada.

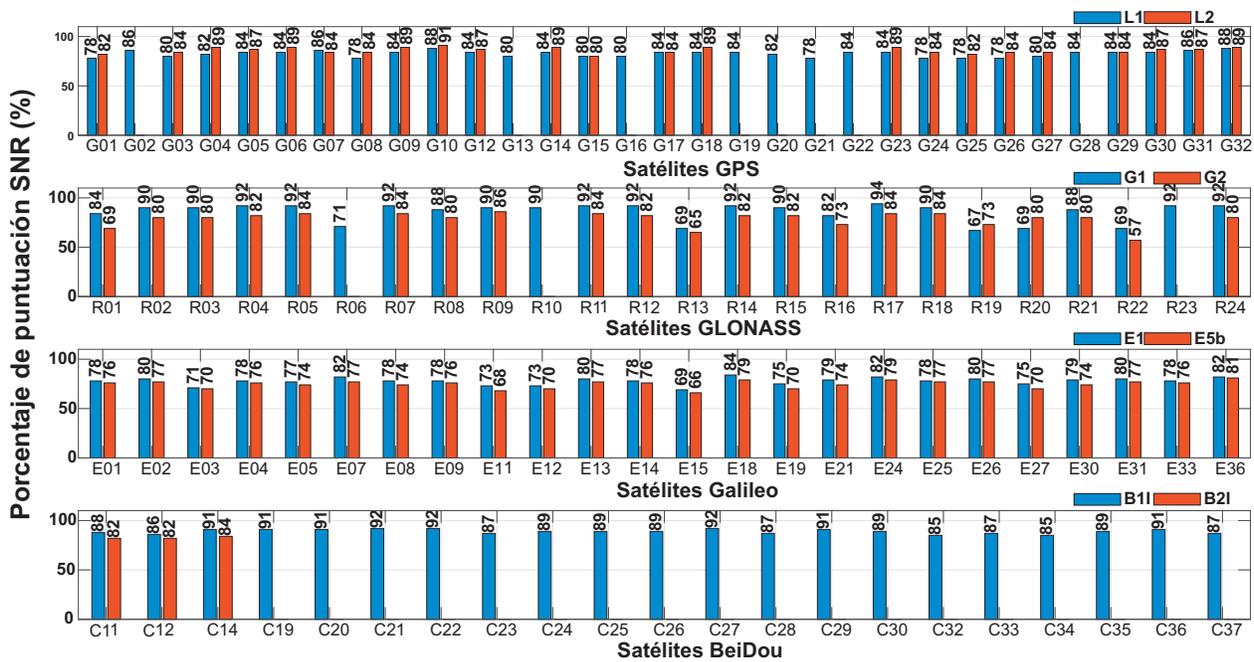


Figura 3.9: Porcentaje de puntuación SNR para cada satélite GNSS observado desde el receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P.

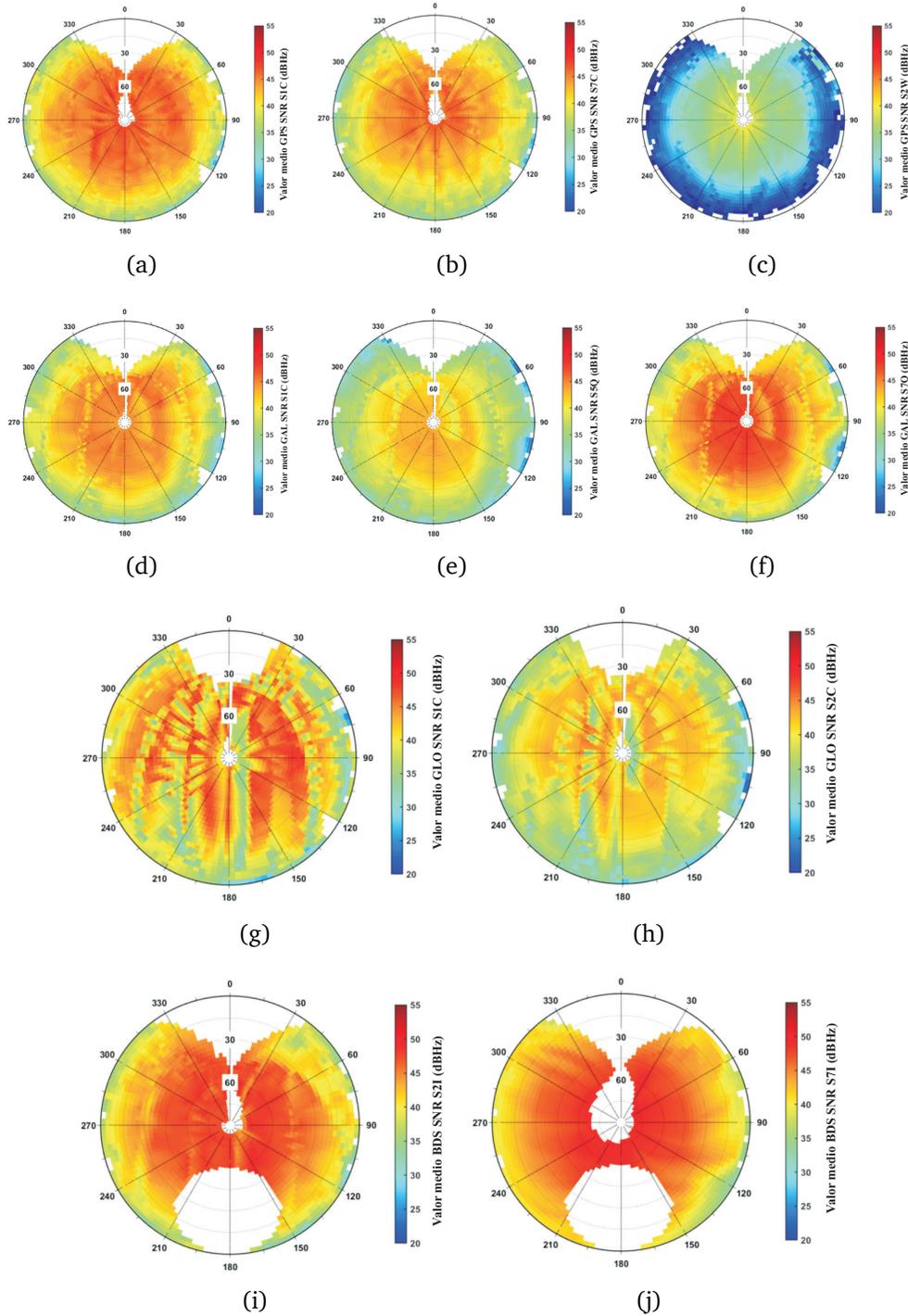
GLONASS fue la constelación que alcanzó los porcentajes más altos en la mayoría de sus satélites ( $G_1$ ) y esto se comprueba con lo descrito en la Figura 3.9. Las señales de los satélites GPS alcanzaron porcentajes similares con valores en promedio mayores a 80% y menores a 90%. Las señales de Galileo presentaron porcentajes inferiores a las de GPS en sus dos frecuencias, sin embargo, fue la constelación con mayor estabilidad en el seguimiento de las señales. Se observa que algunos satélites GPS y GLONASS no tienen valores

de porcentaje en la segunda señal, esto es debido principalmente a las características del hardware del receptor ZED-F9P (compatibilidad de señales). Por otro lado, BeiDou solo registra una segunda señal en 3 satélites ( $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{14}$ ) y una única en 19. Esto se debe a que el módulo ZED-F9P no es compatible con la señal  $B3I$  del bloque BDS-3 y solamente los satélites de órbita MEO pertenecientes al bloque BDS-2 transmiten  $B1I$  y  $B2I$  (compatibles con el ZED-F9P).

#### *Receptor Mosaic-X5*

Como se observa en la Tabla 3.3, el receptor Mosaic-X5 es compatible con un número mayor de señales GNSS, sin embargo, la limitante es la antena GNSS que no es compatible con estas señales. Para GPS se logró seguir la señal  $L2P$  la cual se expresa como  $C2W$ ,  $L2W$ ,  $D2W$  y  $S2W$  en la información del archivo RINEX 3.00, es decir, aplicando la técnica seguimiento Z bajo AS (Antispoofing de GPS) para recuperar pseudorange y fase portadora en la banda “código P” usa el atributo W (Romero, 2020). En el caso de la constelación Galileo la señal E5a fue rastreada y analizada. En la Figura 3.10 se ilustran los valores SNR en dB-Hz con respecto al ángulo de elevación y azimut para todas las constelaciones y señales GNSS disponibles en el receptor Mosaic-X5. La intensidad de la señal  $L_1$  y  $L_2$  de GPS fue similar a las alcanzadas por el receptor ZED-F9P, y para el caso de la señal  $L2P$  mostró un rendimiento bajo con valores de SNR de hasta 18 dB-Hz y en ningún caso superó los 40 dB-Hz. En la Figura 3.10c se ilustra el comportamiento de esta señal con respecto a la tonalidad del color, donde rojo significa una señal intensa y azul una señal débil. Las señales  $E_1$  y  $E_{5b}$  alcanzaron valores SNR superiores a la señal  $E_{5a}$ , y  $E_{5b}$  presentó un comportamiento ligeramente mejor que los medidos por el ZED-F9P. Las señales  $G_1$  y  $G_2$  de GLONASS presentaron valores de SNR similares a las alcanzadas por el ZED-F9P, al igual que la constelación BeiDou ( $B1I$  y  $B2I$ ). En la Figura 3.10g y 3.10h se observan franjas que definen el seguimiento de algunos satélites GLONASS que presentaron valores SNR bajos y esto generó una interpolación incorrecta. También, se observa en la Figura 3.10 que el receptor Mosaic-X5 equipado con la antena TW7972 recibió señales GNSS desde ángulos de elevación cercanos a  $90^\circ$  y en la Figura 3.8 se ilustra que el receptor ZED-F9P equipado con la antena ANN-MB-00 registró observaciones desde ángulos de elevación menores. En general, los valores SNR alcanzados por cada constelación y cada frecuencia dependen principalmente por el tipo de modulación de la portadora y la densidad espectral de potencia de la señal cuando se transmite desde el satélite, ya que esto define el ancho de banda mínimo requerido para recibirla (potencia mínima recibida utilizando una antena GNSS es de -152 dBW) (Tawk et al., 2012). Además, de la interacción de la señal GNSS en medios dispersivos (atmosfera) durante su viaje y los obstáculos alrededor de la antena GNSS, son también consecuencias de variaciones en la relación señal ruido (SNR).

Para cada satélite disponible de las cuatro constelaciones GNSS, se aplicó la propuesta de evaluación para la relación señal ruido (SNR) denominada porcentaje de puntuación SNR. En la Figura 3.11 se ilustra el porcentaje alcanzado para cada satélite GNSS observado. Para el receptor Mosaic-X5 estuvieron disponibles 2 señales más ( $L2P$  y  $E_{5a}$  de GPS y Galileo, respectivamente) que el receptor ZED-F9P.



**Figura 3.10:** Efecto de la relación señal ruido las mediciones del receptor MOSAIC-X5 para las señales: a)S1C-GPS, b)S2X-GPS, c)S1C-GLONASS, d)S2C-GLONASS, e)S1X-GAL, f)S7X-GAL, g)S2I-BDS y h)S7I-BDS.

El 72% de los satélites GPS presentaron un porcentaje de puntuación SNR mayor en la señal *L2C*. El 100% de los satélites GPS presentaron el menor porcentaje de puntuación

SNR en la señal  $L2P$ . Mientras que los porcentajes alcanzados por  $L_1$  mostraron una diferencia de aproximadamente 8% con respecto a  $L2C$ . El porcentaje de puntuación SNR en promedio alcanzado por los satélites GPS para la señal  $L_1$ ,  $L2C$  y  $L2P$  fue del 80, 87 y 60%, respectivamente. Para los satélites GLONASS, el 88% presentó la mayor puntuación SNR en la señal  $G_1$  con diferencias menores a 10% con respecto a  $G_2$ . El porcentaje de puntuación SNR promedio alcanzado por los satélites GLONASS para la señal  $G_1$  y  $G_2$  fue del 81 y 78%, respectivamente. Los satélites  $R02$  y  $R07$  fueron los únicos en alcanzar valores de puntuación SNR de 92%. Las observaciones de las tres señales compatibles para la constelación Galileo estuvieron disponibles en todos los satélites observados. El 68% de los satélites Galileo alcanzaron un porcentaje de puntuación SNR mayor en la señal  $E_1$ . Mientras el 100% de los satélites presentaron el porcentaje de puntuación SNR menor en  $E_{5a}$ . El porcentaje de puntuación SNR promedio alcanzado por los satélites Galileo para la señal  $E_1$ ,  $E_{5a}$  y  $E_{5b}$  fue de 77, 67, y 76%, respectivamente. Finalmente, debido a que el Mosaic-X5 es compatible con las señales  $B1I$  y  $B2I$  solo se siguieron 3 satélites BeiDou del bloque BDS-2 que transmiten la señal  $B2I$ . Por lo tanto, el 100% de los satélites alcanzaron el porcentaje de puntuación SNR en la señal  $B1I$ . El porcentaje de puntuación SNR promedio alcanzado por los satélites BeiDou para la señal  $B1I$  y  $B2I$  fue de 90% y 83%, respectivamente.

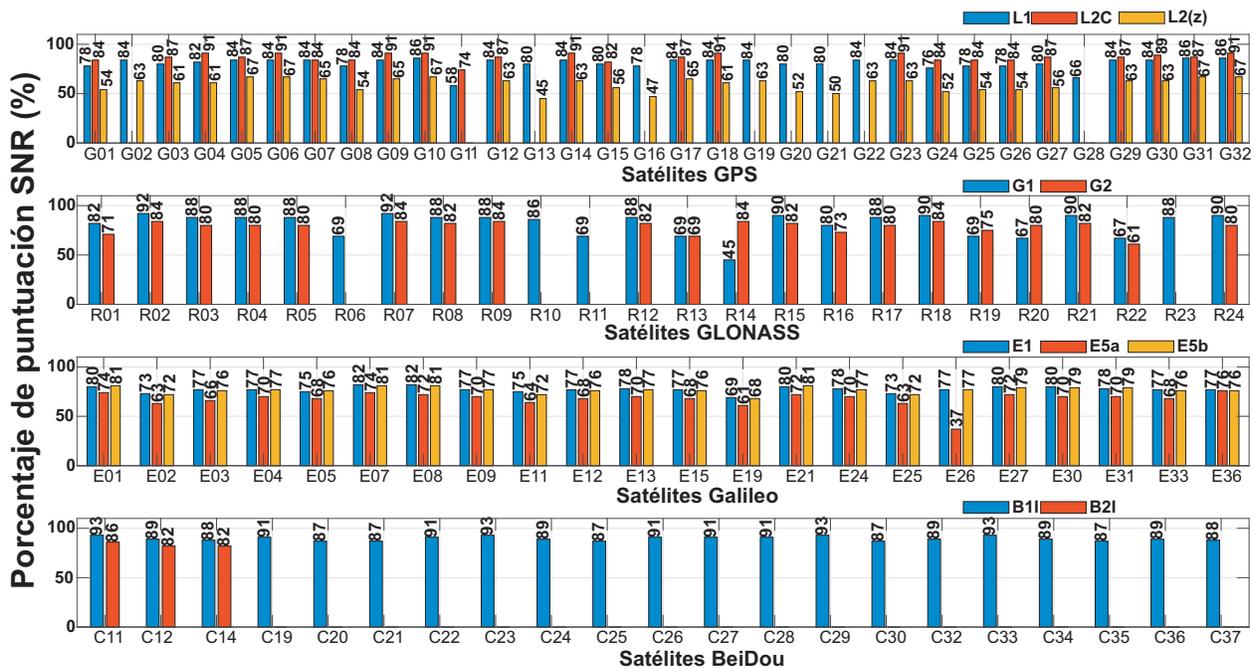


Figura 3.11: Porcentaje de puntuación SNR para cada satélite GNSS observado desde el receptor GNSS de bajo costo Mosaic-X5.

Para determinar un indicador de calidad para todas las señales GNSS observadas por el receptor ZED-F9P y Mosaic-X5, las señales se clasificaron en función del promedio del porcentaje de puntuación SNR. En la Tabla 3.8 se muestran los puntajes SNR ordenados

de mayor a menor. Se puede ver que la señal  $B1I$  de BeiDou alcanza la primera posición para ambos receptores GNSS.  $L2C$  de GPS ocupa el segundo sitio con una diferencia de 3 % para ambos receptores GNSS de bajo costo. La señal con la calidad más baja en común para los receptores fue  $E_{5b}$  de Galileo.

**Tabla 3.8:** Puntajes SNR de las señales GNSS evaluadas ordenados de mayor a menor.

Orden	ZED-F9P		Mosaic-X5	
	Señal GNSS	Porcentaje	Señal GNSS	Porcentaje
1	B1I	89	B1I	90
2	L2C	86	L2C	87
3	G1	85	B2I	83
4	L1	82	G1	81
5	B2I	82	L1	80
6	G2	78	G2	78
7	E1	77	E1	77
8	E5b	74	E5b	76
9	-	-	E5a	67
10	-	-	L2P	60

### 3.4.3. Análisis del *multipath*

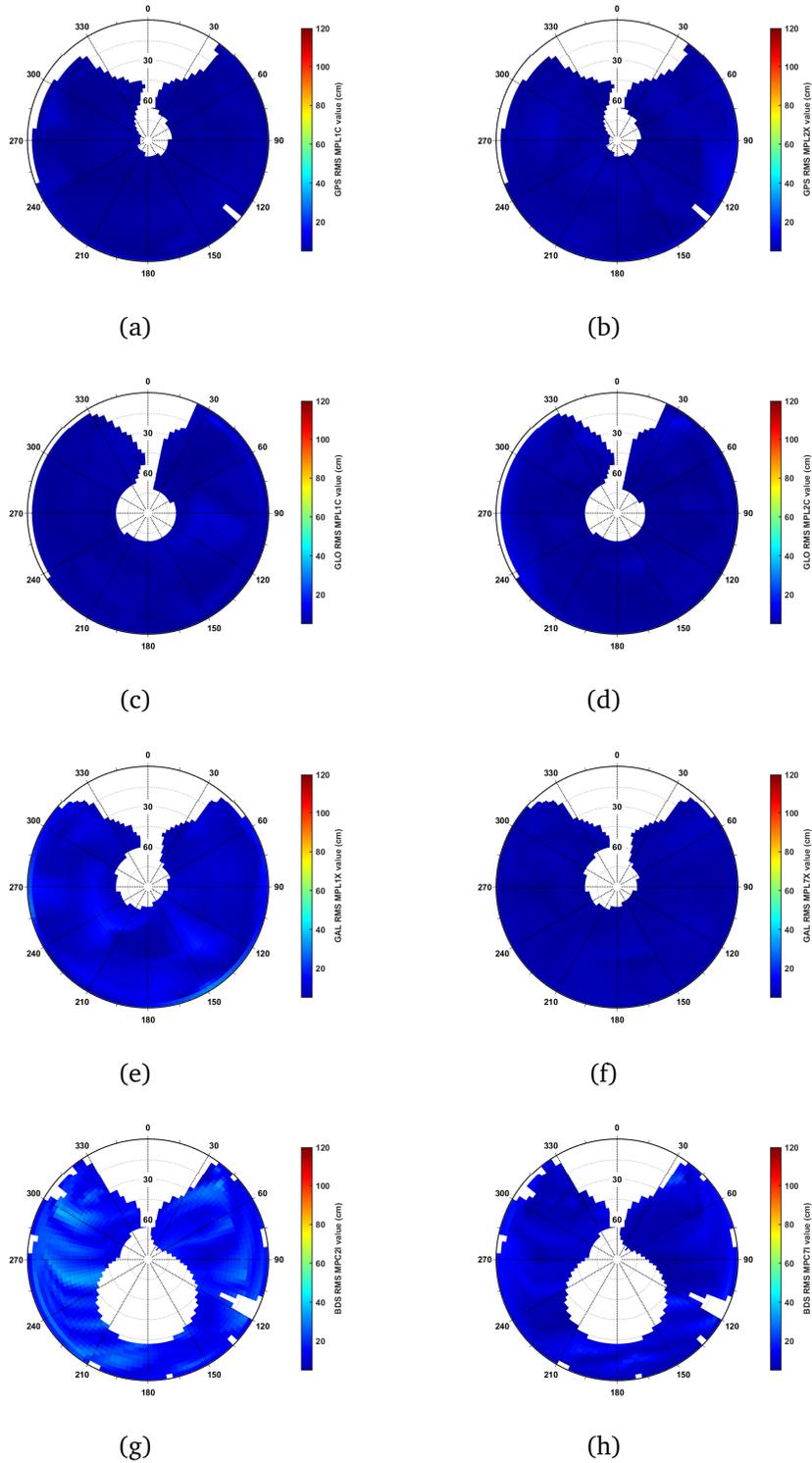
El error de *multipath* afecta seriamente en la exactitud posicional GNSS, esto debido a que no se puede corregir a través de un modelo empírico ni eliminarse mediante diferentes técnicas (Su et al., 2022). Actualmente, se han abordado tres enfoques para mitigar el *multipath* (Zhang et al., 2019). El primer enfoque consiste en el entorno de la medición con *multipath* bajo, que suele ser en un campo abierto (Park et al., 2004). El segundo enfoque aborda la gama de los receptores y antenas GNSS con capacidades de rechazar el *multipath* (Bétaille et al., 2006). En tercer lugar, consiste en un enfoque de postprocesamiento de datos (Bock et al., 2000). Esta sección 3.4.3 considera únicamente el segundo enfoque, es decir, el impacto de la antena GNSS. La función de la antena receptora es recibir la señal emitida por el satélite y recuperar la señal original eliminando en la medida de lo posible el desorden y la señal de interferencia (Teunissen y Montenbruck, 2017). La antena polarizada es la antena anti-*multipath* más común. La señal LOS (*Line of Sight*) es una onda polarizada circularmente hacia la derecha, y la señal después del número impar de reflexiones es una onda polarizada circularmente hacia la izquierda. Por lo cual, la antena polarizada circularmente a la derecha puede rechazar la señal polarizada circularmente a la izquierda; la señal recibida por la antena con polarización circular derecha solo contiene la señal LOS y el número par de señales reflejadas. Lo que hace que la antena polarizada realice efectivamente el efecto de mitigación de *multipath* (Granger y Simpson, 2008). Las antenas GNSS de bajo costo ANN-MB-00 y TW7279 evaluadas en este capítulo 3 están polarizadas circularmente a la derecha, lo cual ayuda a reducir el impacto del *multipath* en el posicionamiento. Por otro lado, existen antenas diseñadas para reducir el *multipath*, las denominadas *choke ring*. El diseño de estas antenas es reducir el bajo ángulo de elevación

de la antena y la ganancia hacia atrás mediante el diseño del patrón de antena (Tranquilla et al., 1994). La ganancia de la antena receptora en la dirección donde es recibida la señal con *multipath* debe ser pequeña y se puede reducir el número de señales reflejadas. Este diseño suprime el *multipath* desde debajo del nivel del suelo. Por lo tanto, los valores de *multipath* extraídos y calculados a partir de las ecuaciones 5.1 y 5.1 del capítulo 5 utilizando el software Anubis sobre las mediciones de 24 hrs para los receptores y antenas GNSS de bajo costo fueron analizados.

#### Receptor GNSS ZED-F9P

Se generaron figuras del cielo del *multipath* y se evaluó el efecto del ángulo de elevación, así como también la señal observada. En la Figura 3.12 se observan los valores del *multipath* para todas las constelaciones y frecuencias medidas por el receptor ZED-F9P. Debido a la posición estratégica de la antena ANN-MB-00 el *multipath* fue bajo en el orden de los 10 cm principalmente para la constelación GPS y GLONASS. En el caso de la señal  $E_1$  y  $B1I$  de Galileo y BeiDou, respectivamente, se observa una tonalidad azul un poco más suave que el resto de las señales (Ver Figura 3.12e y Figura 3.12g). También, se observa en la Figura 3.12 que el ángulo de elevación no tiene un impacto considerable en el *multipath* (entorno libre de obstrucciones para la antena GNSS).

En la Figura 3.13 se ilustra el *multipath* para cada satélite multi-frecuencia GNSS observado por el receptor ZED-F9P+ANN-MB-00. El color de cada barra representa la frecuencia disponible en cada satélite GNSS. De los 71 satélites GNSS observados por el receptor ZED-F9P todos alcanzaron valores promedios de *multipath* inferiores a los 30 cm. Algunos investigadores consideran las directrices publicadas por el IGS (IGS, 2023b) para evaluar la calidad de las observaciones adquiridas por receptores GNSS de bajo costo. Sin embargo, esto no es del todo correcto ya que el IGS recomienda que se apliquen estas directrices a receptores y antenas de grado geodésico que se consideran una estación de referencia en operación continua (CORS, por sus siglas en inglés) de la red IGS. En primer lugar, en la Tabla 4 del documento “Directrices para estaciones de referencia en operación continua en el IGS” (IGS, 2023a) menciona que las antenas utilizadas en una estación IGS deben tener calibración absoluta disponible en el formato IGS ANTEX actual. Además, se recomienda el uso de una antena *choke-ring* con elementos Dorne-Margolin, entre otras directrices que no coinciden con las características de los equipos GNSS de bajo costo. Por lo tanto, los valores de *multipath* para una antena GNSS de bajo costo ANN-MB-00 o TW7972 son más altos que los de una antena *choke-ring*, entonces, evaluar la calidad de las observaciones GNSS medidas desde un receptor y antena de bajo costo considerando las directrices del IGS no es recomendado. Considerando las condiciones óptimas de medición para los receptores y antenas GNSS de bajo costo evaluados en este Capítulo 3 se considera una medición con valores de *multipath* menores a los 20 cm como una calidad alta y confiable para realizar postprocesamiento. Entonces, considerando que los valores promedio del *multipath* de las frecuencias  $L_1$  y  $L_2$  para GPS fueron 11.21 y 10.78 mm, respectivamente; y para las frecuencias  $G_1$  y  $G_2$  de GLONASS fueron 14.04 y 13.76 mm, respectivamente; las frecuencias  $E_1$  y  $E_{5b}$  de Galileo fueron 19.87 y 9.41 mm, respectivamente, y las frecuencias  $B1I$  y  $B2I$  de BeiDou fueron 12.66 y 7 mm, respectivamente, por lo tanto, las observables registradas



**Figura 3.12:** Efecto del *multipath* sobre las señales GNSS: a)L1C-GPS, b)L2X-GPS, c)L1C-GLONASS, d)L2C-GLONASS, e)L1X-GAL, f)L7X-GAL, g)C2I-BDS y h)C7I-BDS.

por el receptor ZED-F9P están dentro de lo recomendado por el autor. Además, estos

valores de *multipath* estuvieron por debajo del límite recomendado por el IGS, que es de 30 cm (Ver Tabla 9 de IGS (2023a)). En resumen, la señal que presentó el mayor y menor error de *multipath* fue  $E_1$  y  $E_{5b}$ , respectivamente.

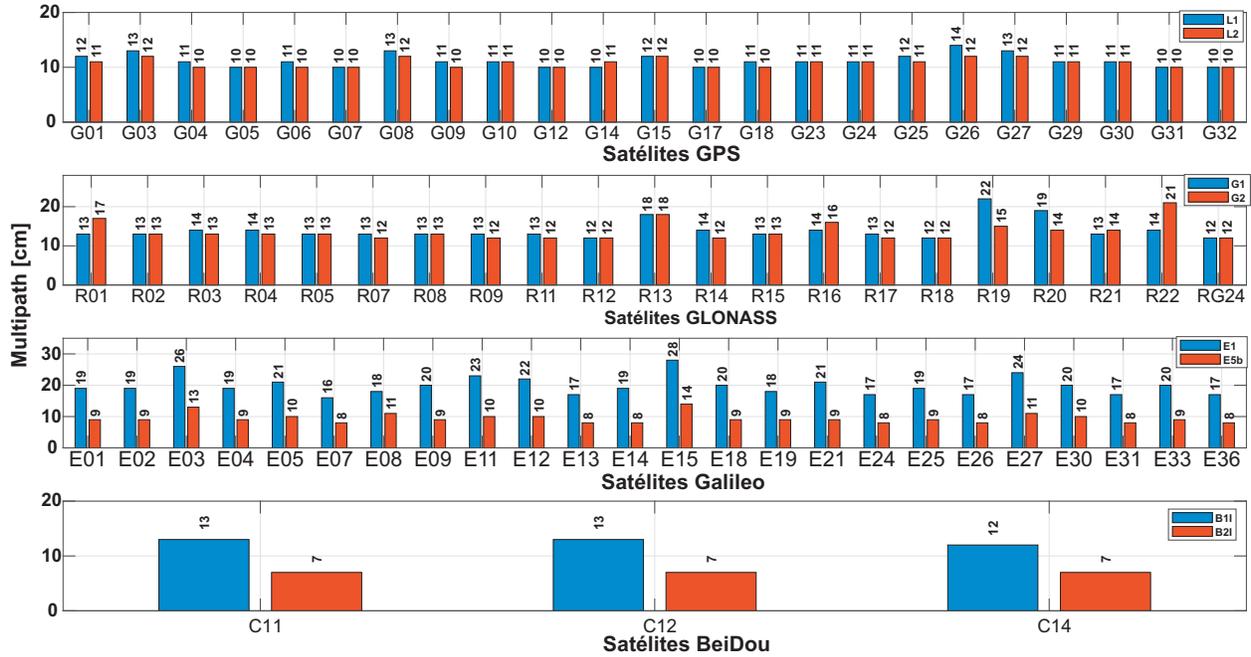
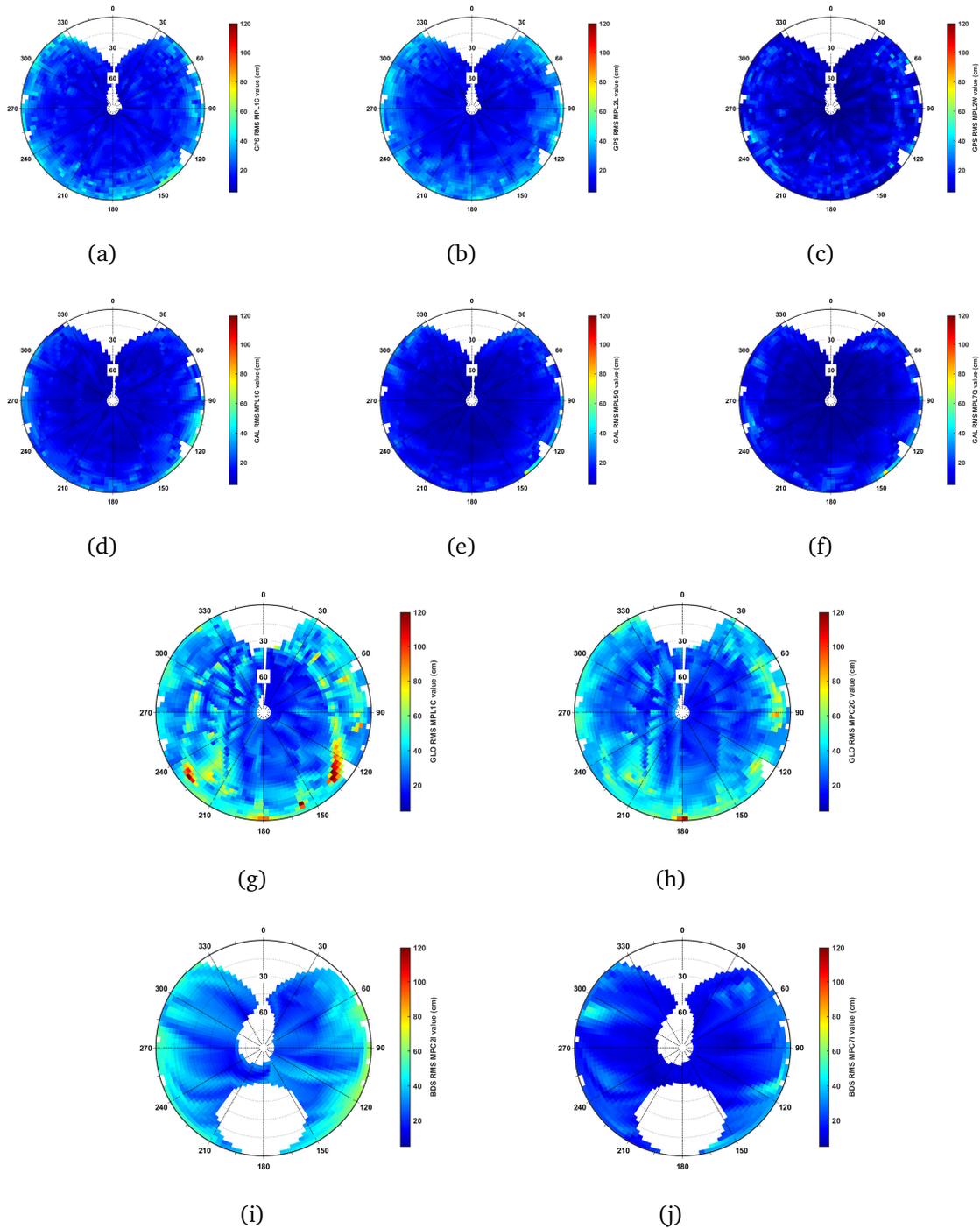


Figura 3.13: *Multipath* para los satélites GNSS observados desde el receptor GNSS ZED-F9P.

### Receptor GNSS Mosaic-X5

La Figura 3.14 ilustra los valores del *multipath* para las observaciones GNSS registradas por el receptor Mosaic-X5. Dos señales más fueron analizadas (GPS:  $L2P$  y Galileo:  $E_{5a}$ ). Para la antena TW7972 los valores de *multipath* fueron más susceptible al ángulo de elevación, esto se puede ver en las Figuras 3.14a, b, c, g,h,i y j. Además, los valores de *multipath* para algunos satélites de GLONASS fue alto tal como se observa en la Figura 3.14g, donde hay tonalidades rojas que representan valores de *multipath* de hasta 100 cm. Para el caso de la constelación BeiDou, los gráficos de cielo *multipath* no representan los valores reales del resto de satélites GNSS ya que fueron generados únicamente por 3 satélites. La Figura 3.15 ilustra los valores del *multipath* para los satélites multi-frecuencia GNSS observados por el receptor Mosaic-X5. Los valores promedio de *multipath* alcanzado por las frecuencias  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L2W$  GPS fueron de 18.93, 20.13 y 6.9 cm, respectivamente. En el caso de las señales de GLONASS,  $G_1$  y  $G_2$ , estas alcanzaron valores promedio de *multipath* de 34.25 y 33.1 cm, respectivamente. Los valores promedio de *multipath* para las señales  $E_1$ ,  $E_{5a}$  y  $E_{5b}$  de Galileo fueron 12.90, 11.04 y 8.68 cm, respectivamente. Las frecuencias  $B1I$  y  $B2I$  de BeiDou mostraron valores promedio de *multipath* de 30 y 16 cm, respectivamente. La variación entre los valores promedio de cada satélite está en función del azimut y ángulo de elevación del satélite en el momento que fue observado.



**Figura 3.14:** Efecto del *multipath* en las mediciones del receptor MOSAIC-X5 para las señales: a)S1C-GPS, b)S2X-GPS, c)S1C-GLONASS, d)S2C-GLONASS, e)S1X-GAL, f)S7X-GAL, g)S2I-BDS y h)S7I-BDS.

Por otro lado, la diferencia de valores *multipath* para cada señal es debido a las características de rendimiento de cada frecuencia. Las frecuencias disponibles para el receptor

Mosaic-X5  $E_{5a}$  y  $L2W$  no lo fueron para el ZED-F9P, siendo estas señales las que alcanzaron el *multipath* más bajo. Esto demuestra la importancia que tiene seleccionar las frecuencias de las constelaciones GNSS, ya que ayuda a mejorar las soluciones finales ya sea en el posicionamiento en tiempo real o en postproceso.

El receptor y antena GNSS de bajo costo que fue menos afectado por el *multipath* en todos los satélites y frecuencias GNSS observadas fue el ZED-F9P y ANN-MB-00, sin considerar las dos señales disponibles únicamente en el Mosaic-X5.

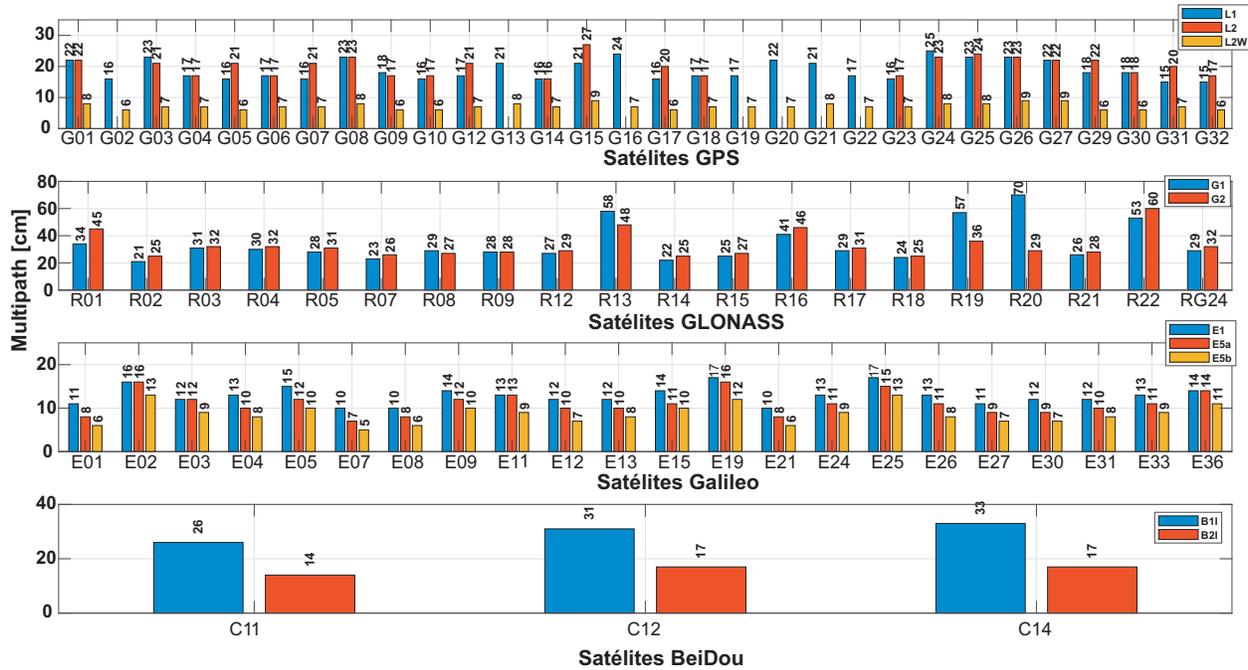


Figura 3.15: *Multipath* para los satélites GNSS observados desde el receptor GNSS Mosaic-X5.

### 3.4.4. Análisis de la integridad y saltos de ciclo

La integridad de las observables se representa por el porcentaje de observaciones disponibles sobre el horizonte con respecto al número de observaciones esperadas (Bruyninx et al., 2019; Vaclavovic y Dousa, 2016). El criterio recomendado por el IGS para la integridad de las observaciones de cada IGS CORS deben ser superiores al 95 % para un ángulo de elevación de 5°. Sin embargo, considerando la complejidad de seguir las señales de la banda  $L_5$  de los receptores GNSS (Leclère et al., 2018) hace que los equipos de bajo costo sean más susceptibles a perder el seguimiento de estas bandas y por lo tanto sea difícil superar los 95 %. Por lo cual, el autor recomienda un valor superior al 90 %. Para el caso de estudio evaluado en este capítulo 3, las Tablas 3.9 y 3.10 contienen la integridad de los observables código y fase para todas las frecuencias GNSS observadas por el receptor ZED-F9P y el Mosaic-X5, respectivamente. Se observa que el receptor ZED-F9P presentó una integridad inferior al 90 % en la frecuencia  $L_2$  de GPS,  $G_2$  de GLONASS y  $B1I/B2I$  de BeiDou. Esto también se debe a la baja potencia que tienen las señales de la constelación

BeiDou, y para GPS sea debido a la complejidad del receptor para seguir la  $L_2$ . En  $G_2$  fue debido a la complejidad de rastrear la fase portadora por el receptor (Leclère et al., 2018). En general, la segunda frecuencia ( $L_2/G_2/E_{5b}/B2I$ ) de las 4 constelaciones GNSS observadas por el receptor ZED-F9P presentaron una integridad más baja.

**Tabla 3.9:** Integridad de las observaciones de código y fase medidas desde el receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P.

GNSS	Frecuencia	Observable	# satélites	Obs/Esperadas	Obs/Disponibles	Relación en %
GPS	L1	Código	31	933,229	928,058	99.45
		Fase		932,678	925,143	99.19
	L2	Código	23	932,546	686,157	73.58
		Fase		931,734	681,681	73.16
GLONASS	G1	Código	24	704,473	696,367	98.85
		Fase		703,180	689,995	98.12
	G2	Código	21	679,379	614,875	90.51
		Fase		678,319	602,951	88.89
Galileo	E1	Código	22	692,613	689,759	99.59
		Fase		692,467	689,694	99.60
	E5b	Código	22	692,911	691,767	99.83
		Fase		692,467	689,694	99.60
BeiDou	B1I	Código	21	855,159	608,359	71.14
		Fase		854,856	606,602	70.96
	B2I	Código	7	852,454	111,377	13.07
		Fase		852,416	111,321	13.06

**Tabla 3.10:** Integridad de las observaciones de código y fase medidas desde el receptor GNSS de bajo costo Mosaic-X5.

GNSS	Frecuencia	Observable	# satélites	Obs/Esperadas	Obs/Disponibles	Relación en %
GPS	L1	Código	30	926,870	920,935	99.36
		Fase		926,855	915,902	98.82
	L2	Código	23	926,822	700,437	75.57
		Fase		926,776	697,360	75.25
	L2W	Código	30	926,798	913,631	98.58
		Fase		926,793	913,601	98.58
GLONASS	G1	Código	24	684,214	672,002	98.22
		Fase		684,157	656,780	96.00
	G2	Código	20	683,441	562,187	82.26
		Fase		683,405	547,810	80.16
Galileo	E1	Código	22	713,174	708,391	99.33
		Fase		713,156	703,438	98.64
	E5b	Código	22	713,169	706,267	99.03
		Fase		713,134	693,550	97.25
	E5a	Código	22	713,198	708,986	99.41
		Fase		713,165	706,922	99.12
BeiDou	B1I	Código	21	869,049	665,591	76.59
		Fase		869,023	663,137	76.31
	B2I	Código	3	868,992	111,951	12.88
		Fase		868,992	111,846	12.87

Para el caso del receptor Mosaic-X5, la frecuencia  $L_2$ ,  $G_2$  y  $B1I/B2I$  de GPS, GLONASS y BeiDou, respectivamente, fueron las de menor integridad debido a los mismos motivos

del receptor ZED-F9P descritos en el párrafo anterior. Las señales de Galileo fueron las que alcanzaron la integridad más alta, cercana a 100% en los dos receptores GNSS de bajo costo. Esto es debido a que la señal  $E_5$  es actualmente la señal GNSS con mayor ancho de banda espectral (51.15 MHz) (IG, 2023) presentando ventajas en una fuerte capacidad *anti-multipath* y una alta precisión de observación.

Los saltos de ciclo (*cycle slip*/o/*slps*) es otro de los criterios de evaluación de calidad en las observaciones GNSS establecido por el IGS (IGS, 2023a). Las observaciones de fase de portadora GNSS de alta calidad desempeñan un papel clave en el posicionamiento cinemático o estático de alta precisión. Sin embargo, debido a problemas de seguimiento interno del receptor GPS o a la interrupción de la señal de la antena del satélite, las observaciones continuas de la fase portadora original se destruyen, generando deslizamientos de ciclo (Wu et al., 2010). Por lo tanto, detectar y reparar con precisión los saltos de ciclo es un paso de preprocesamiento importante en aplicaciones y posicionamiento de fase portadora GPS de alta precisión. El IGS recomienda que una estación debe tener un número bajo de saltos de ciclo (< 1 por cada 1000 observaciones). Por lo cual, o/*slps* se representa como CSR, y se calcula con la siguiente Ecuación:

$$CSR = \frac{1000}{o/slps} \quad (3.1)$$

Los saltos de ciclo encontrados por el software Anubis para el receptor ZED-F9P fue de 4693 y 6000 para el Mosaic-X5. Aplicando la Ecuación 3.1 se obtienen CRS= 0.21 y 0.23 para ZED-F9P y Mosaic-x5, respectivamente. Estos valores de CSR satisfacen los recomendados por el IGS, aun cuando no son equipos de orden geodésico.

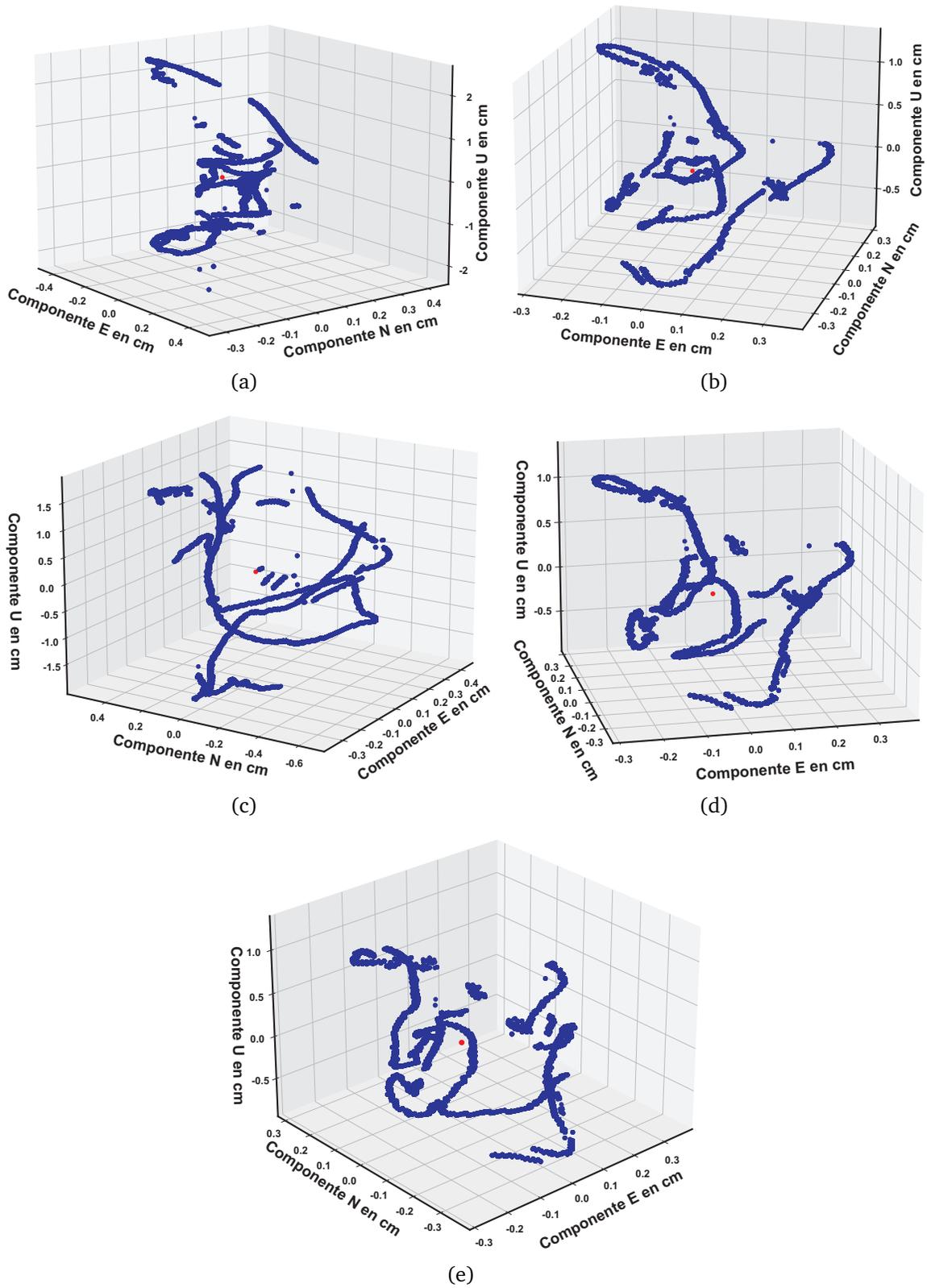
## 3.5. Resultados y análisis

### 3.5.1. Evaluación del posicionamiento 3D

En esta sección 3.5.1 se analizan los resultados alcanzados por el receptor ZED-F9P y antena ANN-MB-00 en el posicionamiento relativo y absoluto. En la Sección 3.5.1.1 se reporta el análisis del método relativo estático, y el absoluto estático en la Sección 3.5.1.2.

#### 3.5.1.1. Posicionamiento relativo

Las coordenadas ECEF por época de salida del software RTKLIB fueron transformadas a coordenadas topocéntricas ENU considerando como origen del sistema las coordenadas de referencia del punto B. Las coordenadas de referencia de los puntos E y B fueron llevadas a la misma época e ITRF del día del experimento. De esta manera se trabaja bajo un mismo sistema estándar para todas las coordenadas, así, cualquier análisis proveniente de las diferencias de las coordenadas de referencia y las obtenidas en este capítulo son debido a los alcances de los equipos de bajo costo y el método de procesamiento.



**Figura 3.16:** Comportamiento tridimensional para cada uno de los criterios: (a)BCK-RSC, (b)BCK-RCK, (c)BCA-RSC, (d)BCA-RCCA y (e) BSC-RSC. El círculo rojo representa el punto de referencia.

En este caso, las coordenadas ENU representan las diferencias entre el punto de referencia B y las coordenadas obtenidas por el método relativo (Vazquez-Ontiveros et al., 2023). Fueron establecidos 4 indicadores de calidad para evaluar el rendimiento en posicionamiento del receptor y antena de bajo costo a partir de la variación de los parámetros de calibración de la antena. Estos indicadores son: máximos (*Max*) y mínimos (*Min*), desviación estándar ( $\sigma$ ) y el error cuadrático medio (RMSE). En la Figura 3.16 se ilustra el comportamiento tridimensional de las coordenadas ENU correspondientes a los criterios; (a) BCK-RSC, (b) BCK-RCCK, (c) BCA-RSC, (d) BCA-RCCA, y (e) BSC-RSC. Se observa que los 5 criterios tienen un comportamiento similar en la componente horizontal, con valores máximos y mínimos inferiores a 7 mm. La componente vertical presentó diferencias con mayor magnitud, de hasta 2.36 y -2.1 cm para el criterio BCK-RSC. En general, la distribución de los datos para todos los criterios fue similar. En la Tabla 3.11 se resumen los parámetros de calidad propuestos en esta Sección 3.3.2. Se estableció el RMSE como indicador en determinar cuál de los criterios evaluados alcanzó el mejor rendimiento en posicionamiento.

Los criterios BCK-RCCK, BCA-RCCA y BSC-RSC presentaron los mismos valores de RMSE, teniendo como significado que los parámetros de calibración de la antena ANN-MB-00 obtenidos por el método propuesto en Kriemeyer et al. (2020) aun no son confiables y deben ser estudiados a través de otra técnica, ya que los resultados fueron los mismos con y sin parámetros de calibración. Sin embargo, cuando se utilizan los parámetros de calibración únicamente en la estación de referencia los valores RMSE son mayores. En general, los parámetros de calibración obtenidos por el método de Kriemeyer et al. (2020) no tienen un impacto considerable en el rendimiento del posicionamiento con antenas GNSS de bajo costo. Además, las exactitudes (RMSE) alcanzadas por el receptor y antena GNSS de bajo costo en el posicionamiento estático fueron altas. Por lo cual, es posible alcanzar precisiones en la componente horizontal y vertical menores a los 5 mm y 10 mm, respectivamente.

**Tabla 3.11:** Análisis estadístico de los errores para cada criterio de evaluación en el posicionamiento relativo.

Criterio	Errores en el posicionamiento tridimensional en cm											
	E				N				U			
	Max	Min	$\sigma$	RMSE	Max	Min	$\sigma$	RSME	Max	Min	$\sigma$	RMSE
BCK-RSC	0.44	-0.43	0.13	0.15	0.42	-0.3	0.13	0.13	2.36	-2.1	0.97	0.97
BCK-RCCK	0.34	-0.27	0.14	0.14	0.28	-0.35	0.14	0.14	1.23	-0.8	0.47	0.47
BCA-RSC	0.42	-0.34	0.19	0.19	0.52	-0.63	0.34	0.34	1.72	-1.81	0.86	0.86
BCA-RCCA	0.35	-0.27	0.14	0.14	0.28	-0.35	0.14	0.14	1.23	-0.81	0.47	0.47
BSC-RSC	0.34	-0.26	0.14	0.14	0.28	-0.35	0.14	0.14	1.23	-0.81	0.47	0.47

### 3.5.1.2. Posicionamiento Puntual Preciso

El archivo IGS14\_2223.atx utilizado por el software PRIDE-PPPAR fue modificado para establecer los criterios de evaluación descritos en la sección 3.3.2. PRIDE-PPPAR tiene

como solución una única época cuando se elige el modo estático en PPP-AR. Por lo tanto, para evaluar el impacto de los parámetros de calibración en el posicionamiento con el método PPP-AR-estático se determinaron las diferencias de las coordenadas ENU (las coordenadas XYZ se transformaron a ENU tomando como origen del sistema topocéntrico las coordenadas del punto B) de cada criterio con respecto a las de referencia del punto B. Las diferencias de las coordenadas se ilustran en la Figura 3.17. Es notable que para el método PPP con respecto al relativo estático, los valores de las diferencias son grandes, en el orden de los decímetros. Es importante mencionar que estas grandes diferencias no son únicamente por los parámetros de calibración de la antena, sino de otros factores importantes como la ausencia de otras constelaciones GNSS, ya que se consideró solamente GPS (los parámetros de calibración solo incluyen GPS) y es bien sabido que una solución PPP-AR multi-GNSS es más precisa (Bahadur y Nohutcu, 2020). Entonces, considerando únicamente el impacto de la calibración de la antena ANN-MB-00 en la variación del posicionamiento, se encontró que fueron mejores las soluciones de posicionamiento cuando no se utilizaron los parámetros de calibración de la antena a cuando se utilizaron. Además, fue más precisa la calibración reportada por Kriemeyer et al. (2020) que la determinada por el autor en el servicio propuesto por Kriemeyer et al. (2022). En el criterio RCCKPPP se observa una diferencia menor a 1 mm en la componente N, esto es debido a otros factores propios del método PPP y no de los parámetros de calibración de la antena. La componente vertical del criterio RCCAPPP fue la que alcanzó la diferencia más alta, con valores mayores a 75 cm.

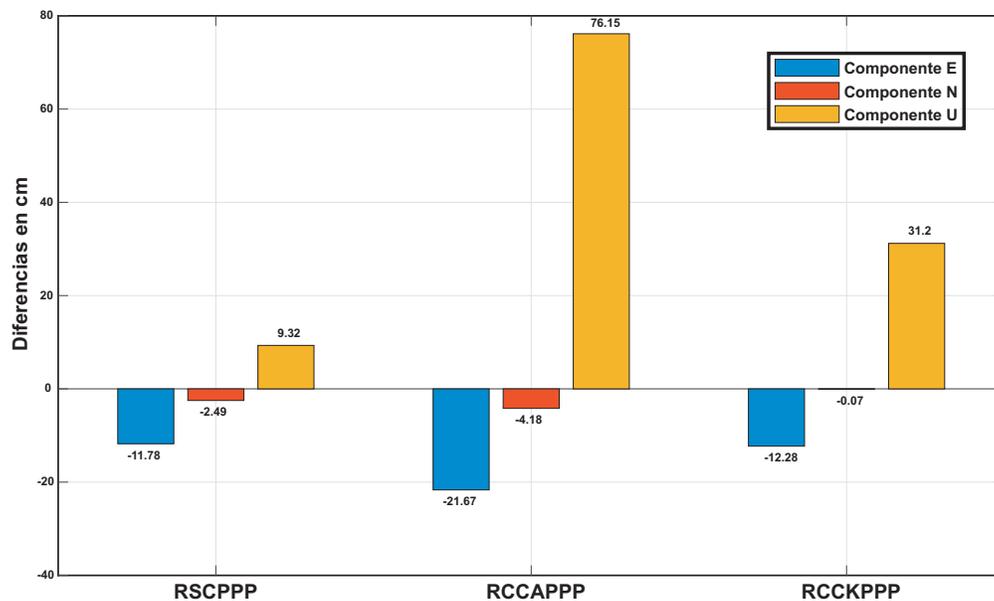


Figura 3.17: Diferencias entre las coordenadas obtenidas por PPP y las de referencia.

## 3.6. Discusiones

En este Capítulo 3, se evalúa la calidad de las observaciones GNSS recopiladas por dos receptores de bajo costo equipados con antenas de parche, a saber, ZED-F9P+ANN-MB-00 y Mosaic-X5-TW7972. Además, el rendimiento en posicionamiento a través del método PPP-AR y relativo estático considerando archivos de calibración de la antena ANN-MB-00 obtenidos por diferentes estrategias fue evaluado. En primer lugar, una evaluación de la señal GNSS recopilada por receptores de bajo costo considerando como indicador de calidad el *multipath* y el SNR para cada uno de los satélites GNSS observados, no se ha llevado a cabo en la literatura científica. También, la integridad de las observables y los saltos de ciclo fueron evaluados y establecidos como indicadores de calidad. Además, un novedoso método de evaluación de la señal GNSS a partir de los valores SNR fue propuesto, donde este método considera los valores SNR teóricos como referencia. Tal como se mencionó en la Sección 3.4, algunos autores recomiendan evaluar la calidad de la señal considerando los criterios del IGS, aun cuando los receptores GNSS y antenas sean de bajo costo. Por otro lado, los criterios del IGS no están dirigidos para observaciones GNSS de bajo costo. Sin embargo, pueden servir como referencia para proponer otros puntajes de criterio en la evaluación de la señal. Paziowski (2022) evaluó la señal GNSS adquirida por receptores ZED-F9P y una variación de antenas GNSS de grado geodésico y de bajo costo considerando como referencia las mediciones de un receptor y antena de grado geodésico. Este estudio lo desarrolló en una zona donde se encuentran obstáculos generadores de *multipath*, además el experimento fue llevado a cabo en la ciudad de Olsztyn en Polonia, donde la geometría y visibilidad de satélites GNSS es diferente a las de México. Por otro lado, Paziowski (2022) evaluó el *multipath* a partir de la combinación lineal de código menos fase portadora (CMC, por sus siglas en inglés) únicamente para algunos satélites GNSS. La integridad y los saltos de ciclo no son evaluados, así como también, el desempeño de la antena de bajo costo considerando archivos de parámetros de calibración en el posicionamiento. Por lo tanto, el trabajo reportado en este capítulo 3 es original y novedoso al considerar nuevas estrategias de evaluación para todos los satélites GNSS disponibles durante la medición. También, un estudio de calidad de la señal GNSS de receptores de bajo costo para todos los satélites, frecuencias y constelaciones disponibles adquiridas con un ángulo de elevación de  $0^\circ$  ayuda a entender el comportamiento del SNR y *multipath* con respecto al ángulo de elevación. Consecuentemente, mejores modelos estocásticos dependientes de la elevación y los umbrales SNR pueden ser propuestos.

Con respecto al posicionamiento, no se han encontrado trabajos donde evalúen el posicionamiento preciso con receptores y antenas GNSS de bajo costo a partir de los parámetros de calibración de la antena. Por otro lado, las precisiones reportadas en algunos estudios; Hamza et al. (2021, 2020), Kazmierski et al. (2023) son similares a las alcanzadas en este Capítulo 3, sin embargo, estos estudios no explican como llevaron las coordenadas al ARP de las antenas GNSS de bajo costo sin parámetros de calibración desde el PCO. Finalmente, con respecto a las mediciones de 10 Hz durante 24 horas, resultó ser un problema al momento del análisis y procesamiento. Esto debido al gran almacenamiento que ocupan estas mediciones, en promedio 4 Gb.

## 3.7. Conclusiones

En el presente trabajo, se evaluó la calidad de la señal GNSS recopilada por receptores y antenas GNSS de doble frecuencia de bajo costo, a decir, ZED-F9P+ANN-MB-00 y el Mosaic-X5-TW7972 en un periodo de observación de 24 hrs. Los indicadores de calidad fueron el *multipath*, SNR, integridad y saltos de ciclo. También, se propuso una estrategia de evaluación de los valores SNR medidos con respecto a los teóricos. Además, el rendimiento en posicionamiento del receptor y antena ZED-F9P+ANN-MB-00 fue evaluado considerando parámetros de calibración relativos de la antena a partir de dos métodos de procesamiento: relativo estático y PPP-AR en modo estático. Los resultados alcanzados en este capítulo 3 derivan a las siguientes conclusiones:

- 98 y 97 satélites GNSS estuvieron disponibles durante 24 hrs de observaciones con los receptores GNSS de bajo costo ZED-F9P y Mosaic-X5, respectivamente.
- Como era de esperarse, la intensidad de la señal GNSS para el receptor y antena ZED-F9P+ANN-MB-00 presentó los mayores valores SNR en ángulos de elevación altos. Sin embargo, la señal  $G_2$  de GLONASS no siguió esta tendencia. Las señales  $L_1$ ,  $G_1$ ,  $B1I$  y  $B2I$  fueron las que presentaron los mayores valores SNR en ángulos de elevación altos.
- El análisis del porcentaje de puntuación SNR mostró que los satélites de GLONASS y BeiDou fueron los que alcanzaron el porcentaje más alto, con valores de hasta 93 %. Los satélites Galileo presentaron los porcentajes más bajos.
- La señal  $L_1$ ,  $E_{5b}$ ,  $B1I$  y  $B2I$  del receptor y antena Mosaic-X5+TWD7279 alcanzaron los valores de intensidad de la señal más altos cuando el ángulo de elevación es mayor a los 30°. Siendo, la señal  $L2W$  de GPS la que presentó el peor rendimiento, con valores SNR de hasta 20 dB-Hz cuando el ángulo de elevación es menor a 15°.
- El receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P equipado con la antena de bajo costo ANN-MB-00 alcanzó precisiones en el posicionamiento tridimensional menores a 10 mm cuando se utilizaron los parámetros de calibración de la antena aplicando el método de procesamiento relativo estático. Sin embargo, cuando no se utilizaron los parámetros de calibración, igualmente presentó precisiones similares a los 10 mm.
- Analizando las diferencias de las coordenadas finales de una sola época obtenidas por posicionamiento relativo estático, se encontró que el criterio más preciso fue el BSC-RSC, es decir, sin parámetros de calibración. Estos resultados demuestran que no es necesario utilizar archivos con parámetros de calibración en las antenas de bajo costo ANN-MB-00.
- Las coordenadas resultantes del método PPP-AR fueron menos precisas que el relativo estático. La precisión mas alta se obtuvo cuando no se aplicaron los parámetros de calibración de la antena ANN-MB-00, con diferencias de -11, 2.5 y 9 cm para la componente E, N y U, respectivamente.

- La integridad de las observables fue similar para los dos receptores y antenas GNSS de bajo costo evaluados. La primera señal ( $L_1$ ,  $G_1$  y  $B1I$ ) de las constelaciones GPS, GLONASS y BeiDou alcanzó un porcentaje de integridad mayor a la segunda ( $L_2$ ,  $G_2$  y  $B2I$ ). Galileo fue la constelación con la mayor integridad para todas las frecuencias.
- Los dos receptores GNSS de bajo costo presentaron dificultades para rastrear las señales  $L_2$ ,  $G_2$  y  $B2I$  de GPS, GLONASS y BeiDou, respectivamente.
- Galileo fue la única constelación con una integridad mayor al 90% en todas sus señales, y para el caso contrario, fue BeiDou la que alcanzó valores de integridad menores a 77%.
- Los valores de salto de ciclo para los dos receptores GNSS fueron menores al recomendado por el IGS, con  $CSR = 0.21$  y  $0.23$  para el ZED-F9P y Mosaic-X5, respectivamente.

# Referencias

- Amami, M. M., Smith, M. J., y Kokkas, N. (2014). Low cost vision based personal mobile mapping system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40:1–6.
- Bahadur, B. y Nohutcu, M. (2020). Multi-gnss ppp: An alternative positioning technique for establishing ground control points. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 7(1):88–92.
- Barindelli, S., Realini, E., Venuti, G., Fermi, A., y Gatti, A. (2018). Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern italy by geodetic and low-cost gnss receivers. *Earth, Planets and Space*, 70:1–18.
- BeiDou-ICD (2019). Beidou interface control document (bds-sis-icd-b1i-3.0 for b1).china satellite navigation office, <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/201902/P020190227593621142475.pdf>. [Web; accedido el 28-09-2023].
- Bellone, T., Dabove, P., Manzano, A., y Taglioretti, C. (2016). Real-time monitoring for fast deformations using gnss low-cost receivers. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2):458–470.
- Bétaille, D. F., Cross, P. A., y Euler, H.-J. (2006). Assessment and improvement of the capabilities of a window correlator to model gps multipath phase errors. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 42(2):705–717.
- Betz, J. W. (2015). *Engineering satellite-based navigation and timing: global navigation satellite systems, signals, and receivers*. John Wiley & Sons.
- Bock, Y., Nikolaidis, R. M., de Jonge, P. J., y Bevis, M. (2000). Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the global positioning system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12):28223–28253.
- Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A., y Pottiaux, E. (2019). Gnss metadata and data validation in the euref permanent network. *GPS solutions*, 23:1–14.
- Caldera, S., Barindelli, S., Sansò, F., y Pardi, L. (2022). Monitoring of structures and infrastructures by low-cost gnss receivers. *Applied Sciences*, 12(23):12468.
- Everett, T., Taylor, T., Lee, D.-K., y Akos, D. M. (2022). Optimizing the use of rtklib for smartphone-based gnss measurements. *Sensors*, 22(10).

- Fagundes, M. A. R., Mendonça-Tinti, I., Iescheck, A. L., Akos, D. M., y Geremia-Nievinski, F. (2021). An open-source low-cost sensor for snr-based gnss reflectometry: Design and long-term validation towards sea-level altimetry. *GPS Solutions*, 25(2):73.
- Galileo-ICD (2021). Galileo interface control document (galileo-os-sis-icd-2.0 for e1, e6 and e5).european gnss (galileo) open service, [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo\\_OS\\_SIS\\_ICD\\_v2.0.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf). [Web; accedido el 28-09-2023].
- Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., y Zhang, K. (2019). Pride ppp-ar: an open-source software for gps ppp ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 23(4):1–10.
- Geng, J., Wen, Q., Zhang, Q., Li, G., y Zhang, K. (2022a). Gnss observable-specific phase biases for all-frequency ppp ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 96(2):11.
- Geng, J., Zhang, Q., Li, G., Liu, J., y Liu, D. (2022b). Observable-specific phase biases of wuhan multi-gnss experiment analysis center’s rapid satellite products. *Satellite Navigation*, 3(1):1–15.
- GLONASS-ICD (2008). Glonass interface control document (l1 and l2).russian institute of space device engineering, <http://gauss.gge.unb.ca/GLONASS.ICD.pdf>. [Web; accedido el 28-09-2023].
- GPS-ICD (2021a). Gps interface control document (is-gps-200 for l1 and l2). u.s. national coordination office for space-based positioning, navigation, and timing, <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200M.pdf>. [Web; accedido el 28-09-2023].
- GPS-ICD (2021b). Gps interface control document (is-gps-705 for l5). u.s. national coordination office for space-based positioning, navigation, and timing, <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705H.pdf>. [Web; accedido el 28-09-2023].
- Granger, R. y Simpson, S. (2008). An analysis of multipath mitigation techniques suitable for geodetic antennas. In *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, pages 2755–2765.
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., y Sterle, O. (2021). Performance evaluation of low-cost multi-frequency gnss receivers and antennas for displacement detection. *Applied Sciences*, 11(14).
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., y Sterle, O. (2020). Testing multi-frequency low-cost gnss receivers for geodetic monitoring purposes. *Sensors*, 20(16).
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., y Pavlovčič-Prešeren, P. (2023). Low-cost dual-frequency gnss receivers and antennas for surveying in urban areas. *Sensors*, 23(5):2861.
- Ichikawa, K., Ebinuma, T., Konda, M., y Yufu, K. (2019). Low-cost gnss-r altimetry on a uav for water-level measurements at arbitrary times and locations. *Sensors*, 19(5):998.

- IG (2023). Inside gnss-getting to e5 with ease: An altboc double-sideband receiver based on single-sideband correlation. <https://insidegnss.com/getting-to-e5-with-ease-an-altboc-double-sideband-receiver-based-on-single>. [Web; accedido el 10-08-2023].
- IGS (2023a). Guidelines for continuously operating reference stations in the igs. [https://files.igs.org/pub/resource/guidelines/Guidelines\\_for\\_Continuously\\_Operating\\_Reference\\_Stations\\_in\\_the\\_IGS\\_v1.0.pdf](https://files.igs.org/pub/resource/guidelines/Guidelines_for_Continuously_Operating_Reference_Stations_in_the_IGS_v1.0.pdf). [Web; accedido el 10-08-2023].
- IGS (2023b). New guidelines for igs cors. <https://igs.org/news/igs-cors-guidelines/>. [Web; accedido el 10-08-2023].
- Janos, D. y Kuras, P. (2021). Evaluation of low-cost gnss receiver under demanding conditions in rtk network mode. *Sensors*, 21(16):5552.
- Janos, D., Kuras, P., y Ortyl, Ł. (2022). Evaluation of low-cost rtk gnss receiver in motion under demanding conditions. *Measurement*, 201:111647.
- Karegar, M. A., Kusche, J., Geremia-Nievinski, F., y Larson, K. M. (2022). Raspberry pi reflector (rpr): A low-cost water-level monitoring system based on gnss interferometric reflectometry. *Water Resources Research*, 58(12):e2021WR031713.
- Kazmierski, K., Dominiak, K., y Marut, G. (2023). Positioning performance with dual-frequency low-cost gnss receivers. *Journal of Applied Geodesy*, (0).
- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., y ten Veldhuis, M.-C. (2020). High quality zenith tropospheric delay estimation using a low-cost dual-frequency receiver and relative antenna calibration. *Remote Sensing*, 12(9).
- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., y ten Veldhuis, M.-C. (2022). A field calibration solution to achieve high-grade-level performance for low-cost dual-frequency gnss receiver and antennas. *Sensors*, 22(6).
- Langley, R. B. (1997). Gps receiver system noise. *GPS world*, 8(6):40–45.
- Leclère, J., Landry Jr, R., y Botteron, C. (2018). Comparison of l1 and l5 bands gnss signals acquisition. *Sensors*, 18(9):2779.
- Li, L., Yuan, Y., y Zhang, P. (2023a). On low-cost gnss observables under different grades of antennas: Receiver-related biases and rtk results. *Measurement*, 214:112771.
- Li, X., Gou, H., Li, X., Shen, Z., Lyu, H., Zhou, Y., Wang, H., y Zhang, Q. (2023b). Performance analysis of frequency-mixed ppp-rtk using low-cost gnss chipset with different antenna configurations. *Satellite Navigation*, 4(1):1–18.
- Luo, X., Schaufler, S., Branzanti, M., y Chen, J. (2021). Assessing the benefits of galileo to high-precision gnss positioning—rtk, ppp and post-processing. *Advances in Space Research*, 68(12):4916–4931.

- Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Brossault, M.-A., Botton, S., Ortiz, M., y Dumoulin, J. (2022). Performance analysis of low-cost gnss stations for structural health monitoring of civil engineering structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(5):595–611.
- Marut, G., Hadas, T., Kaplon, J., Trzcina, E., y Rohm, W. (2022). Monitoring the water vapor content at high spatio-temporal resolution using a network of low-cost multi-gnss receivers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60:1–14.
- NGS (2023). National geodetic survey-antenna calibrations. <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/?manu=C-Nav>. [Web; accedido el 16-08-2023].
- Nie, Z., Liu, F., y Gao, Y. (2020). Real-time precise point positioning with a low-cost dual-frequency gnss device. *Gps Solutions*, 24:1–11.
- Odolinski, R. y Teunissen, P. J. (2016). Single-frequency, dual-gnss versus dual-frequency, single-gnss: a low-cost and high-grade receivers gps-bds rtk analysis. *Journal of geodesy*, 90(11):1255–1278.
- Odolinski, R. y Teunissen, P. J. (2017). Low-cost, high-precision, single-frequency gps–bds rtk positioning. *GPS solutions*, 21(3):1315–1330.
- Öğütçü, S., Alçay, S., Duman, H., Özdemir, B. N., y Koray, Ü. (2023). Data integrity and quality analysis of low cost zed-f9p u-blox gnss receiver. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 11(3):660–667.
- Park, K.-D., Nerem, R., Schenewerk, M., y Davis, J. (2004). Site-specific multipath characteristics of global igs and cors gps sites. *Journal of Geodesy*, 77:799–803.
- Paziewski, J. (2022). Multi-constellation single-frequency ionospheric-free precise point positioning with low-cost receivers. *GPS solutions*, 26(1):23.
- Romero, I. (2020). The receiver independent exchange format version 3.05. *International GNSS Service Files*, <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf>.
- Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M. E., Vega-Ayala, A., Hernández-Andrade, D., Vázquez-Ontiveros, J. R., y Sharma, G. (2021a). Positioning evaluation of single and dual-frequency low-cost gnss receivers signals using ppp and static relative methods in urban areas. *Applied Sciences*, 11(22):10642.
- Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M. E., Vázquez-Ontiveros, J. R., Hernández-Andrade, D., y Cabanillas-Zavala, J. L. (2021b). Sampling rate impact on precise point positioning with a low-cost gnss receiver. *Applied Sciences*, 11(16).
- Semler, Q., Mangin, L., Moussaoui, A., y Semin, E. (2019). Development of a low-cost centimetric gnss positioning solution for android applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Septentrio (2021). mosaic-x5 gnss module receiver evaluation kit with gnss antenna. [Web; accedido el 27-07-2021].

- Septentrio (2023a). mosaic-x5 development kit. <https://www.septentrio.com/en/products/gps/gnss-receiver-modules/mosaic-x5-devkit-0>. [Web; accedido el 1-10-2023].
- Septentrio (2023b). Tw7972-magnetic triple-band gnss antenna + l-band. <https://www.septentrio.com/en/products/gps/gnss-antennas/gps/gnss-antennas/tw7972>. [Web; accedido el 1-10-2023].
- Stkeiak, K. y Paziewski, J. (2022). On the quality of tropospheric estimates from low-cost gnss receiver data processing. *Measurement*, 198:111350.
- Su, M., Feng, W., Qiao, L., Qiu, Z., Zhang, H., Zheng, J., y Yang, Y. (2022). An improved time-domain multipath mitigation method based on the constraint of satellite elevation for low-cost single frequency receiver. *Advances in Space Research*, 69(10):3597–3608.
- Takasu, T. (2013). Rtklib ver. 2.4. 2 manual. *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*, 29:49.
- Tawk, Y., Botteron, C., Jovanovic, A., y Farine, P.-A. (2012). Analysis of galileo e5 and e5ab code tracking. *GPS solutions*, 16:243–258.
- Teunissen, P. J. y Montenbruck, O. (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*, volume 10. Springer.
- Tranquilla, J. M., Carr, J., y Al-Rizzo, H. M. (1994). Analysis of a choke ring groundplane for multipath control in global positioning system (gps) applications. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 42(7):905–911.
- u-blox (2021). U-blox. <https://www.u-blox.com/en/product/c099-f9p-application-board>. [Web; accedido el 24-05-2021].
- U-blox (2023a). Ann-mb series-multi-band, high precision gnss antennas. [https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ANN-MB\\_DataSheet\\_UBX-18049862.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ANN-MB_DataSheet_UBX-18049862.pdf). [Web; accedido el 28-10-2023].
- U-blox (2023b). u-blox announces the first high precision gnss module based on u-blox f9 technology. <https://www.u-blox.com/en/press-releases/u%E2%80%9191blox-announces-first-high-precision-gnss-module-based-u%E2%80%9191blox-f9-technology>. [Web; accedido el 1-10-2023].
- U-Center (2021). U-center, gnss evaluation software for windows. <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>. [Web; accedido el 24-06-2021].
- Vaclavovic, P. y Dousa, J. (2016). G-nut/anubis: Open-source tool for multi-gnss data monitoring with a multipath detection for new signals, frequencies and constellations. In Rizos, C. y Willis, P., editors, *IAG 150 Years*, pages 775–782, Cham. Springer International Publishing.

- Vazquez-Ontiveros, J. R., Padilla-Velazco, J., Gaxiola-Camacho, J. R., y Vázquez-Becerra, G. E. (2023). Evaluation and analysis of the accuracy of open-source software and online services for ppp processing in static mode. *Remote Sensing*, 15(8).
- Wu, Y., Jin, S., Wang, Z., y Liu, J. (2010). Cycle slip detection using multi-frequency gps carrier phase observations: a simulation study. *Advances in space research*, 46(2):144–149.
- Xue, C., Psimoulis, P., Horsfall, A., Zhang, Q., y Meng, X. (2022a). Assessment of the accuracy of low-cost multi-gnss receivers in monitoring dynamic response of structures. *Applied Geomatics*, pages 1–12.
- Xue, C., Psimoulis, P. A., y Meng, X. (2022b). Feasibility analysis of the performance of low-cost gnss receivers in monitoring dynamic motion. *Measurement*, 202:111819.
- Yi, D., Bisnath, S., Naciri, N., y Vana, S. (2021). Effects of ionospheric constraints in precise point positioning processing of geodetic, low-cost and smartphone gnss measurements. *Measurement*, 183:109887.
- Zhang, Z., Li, B., Gao, Y., y Shen, Y. (2019). Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency c/n0 data. *GPS Solutions*, 23:1–13.
- Zhang, Z., Yuan, H., Li, B., He, X., y Gao, S. (2021). Feasibility of easy-to-implement methods to analyze systematic errors of multipath, differential code bias, and inter-system bias for low-cost receivers. *GPS Solutions*, 25(3):116.
- Zhao, C., Yuan, Y., Zhang, B., y Li, M. (2018). Ionosphere sensing with a low-cost, single-frequency, multi-gnss receiver. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(2):881–892.

# Capítulo 4

## Monitoreo de desplazamientos dinámicos en tiempo real mediante receptores GNSS de bajo costo de alta frecuencia: Una posibilidad al monitoreo de puentes de gran envergadura

### 4.1. Introducción

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) se han convertido en una herramienta esencial dentro del campo del Monitoreo de la Salud estructural (SHM), debido a la capacidad de monitorear desplazamientos sobre puentes, presas y edificios ([Guzman-Acevedo et al., 2019](#); [Lovse et al., 1995](#); [Vazquez-Becerra. et al., 2017](#); [Vazquez-Ontiveros et al., 2022, 2023a,b, 2020](#); [Xi et al., 2021](#); [Yigit et al., 2022](#); [Zhou et al., 2023](#)). Monitorear desplazamientos horizontales y verticales sobre puentes de largo alcance es un proceso de suma importancia para los departamentos encargados de vigilar las estructuras nacionales debido a que los desplazamientos en puentes son parámetros para evaluar su desempeño estructural ([Carrión et al., 2017](#)). Los desplazamientos son indicadores de seguridad, es decir, cuando cierto desplazamiento horizontal o vertical está por encima de los límites establecidos por normativas como AASTHO ([AASTHO, 2010](#); [Kim et al., 2018](#); [Powell, 2008](#)), significa que la estructura puede estar en riesgo estructural. Por lo cual, los departamentos de vigilancia deben monitorear los puentes constantemente e identificar posibles daños relacionados con desplazamientos atípicos, según el reglamento aplicado.

Monitorear desplazamientos horizontales y verticales sobre puentes localizados en ríos, cañones u océanos es uno de los retos a los cuales se han enfrentado los ingenieros en los últimos años ([Vazquez-Ontiveros et al., 2020](#)). El LVDT es un sensor electromecánico utilizado para medir desplazamientos con una precisión de 0.01 mm ([Oku Topal y Akpınar,](#)

2022). Para instrumentar sensores LVDT en puentes es necesario considerar una superficie de referencia, la cual define el cambio de posición del LVDT con respecto a ella, es decir, un desplazamiento. Sin embargo, establecer esta superficie de referencia no es posible por el paso de ríos o por la distancia que existe entre una superficie fija y un punto del tablero. Por otro lado, en ocasiones se miden otras magnitudes como es el caso de la aceleración, en donde se aplica una integral doble y se obtiene el desplazamiento (Guzman-Acevedo et al., 2019). Esta técnica no siempre es recomendada por los ingenieros encargados de monitorear puentes debido al nivel de ruido alcanzado (Vazquez-Ontiveros et al., 2020). Desde la década de los 90's, la tecnología GNSS se ha aplicado en la detección de desplazamientos en puentes (Ashkenazi et al., 1996; Ashkenazi y Roberts, 1997; Brown et al., 1999) y ha demostrado ser una herramienta potencial en detectar desplazamientos en el orden de los milímetros (Chen et al., 2018; Roberts et al., 2000; Yigit et al., 2021). Tener una respuesta en tiempo real de los desplazamientos de un puente ocasionados por la carga del tráfico y del viento es de vital interés para tomar decisiones en el instante y evitar algún posible siniestro que involucre la vida humana. La técnica RTK-GNSS (*Real Time Kinematic-Global Navigation Satellite System*) ofrece posicionamiento cinemático en tiempo real y permite conocer las coordenadas de un punto en el instante con una precisión del centímetro (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). El primer sistema RTK-GNSS se desarrolló en 1994, implementando técnicas que abordan las diferentes fuentes de error de los GNSS (Kim et al., 2023). La técnica RTK-GNSS presenta características de proporcionar posicionamiento de alta precisión en tiempo real y bajo cualquier condición climatológica, ocasionando ampliamente su aplicación en el monitoreo de la salud estructural en puentes (Xi et al., 2023). Además, no solo puede determinar desplazamientos de alta precisión, sino también monitorear la vibración estructural en tiempo real (Martín et al., 2015; Meng et al., 2007; Moschas y Stiros, 2011; Nickitopoulou et al., 2006).

El primer estudio en monitorear desplazamientos en tiempo real sobre un puente aplicando la tecnología GNSS fue el reportado por Ashkenazi et al. (1996). Con un par de receptores de doble frecuencia Ashtech ZXII y telemetría para la transmisión de las correcciones por parte de la estación de referencia hacia el rover, registraron los desplazamientos del puente Humber ubicado en Reino Unido. Ashkenazi et al. (1996) concluyeron que los resultados sugieren que los desplazamientos laterales del puente son de naturaleza armónica simple, debido a la carga del viento. Posteriormente, en los últimos 26 años la comunidad científica ha llevado a cabo una serie de evaluaciones con la técnica RTK sobre puentes, desde sistemas complejos de monitoreo SHM (Kim et al., 2018; Kim y Sohn, 2020; Meng et al., 2016; Xi et al., 2023; Xiong et al., 2019) hasta pruebas de rendimiento en laboratorio para evaluar el ruido en series de tiempo muestreadas a 100 Hz (Qu et al., 2022). Sin embargo, establecer un sistema RTK con equipo de grado geodésico representa un alto costo (< \$2,500.00 dólares). Una alternativa emergente como solución a los altos precios son los receptores GNSS de bajo costo o también conocidos como de mercado masivo (Dabove y Manzino, 2014; Robustelli et al., 2023). Algunos receptores GNSS de bajo costo pueden gestionar correcciones diferenciales transmitidas por una red RTK (NRTK). Algunos también pueden almacenar datos crudos.

En Takasu y Yasuda (2009) se reporta el primer trabajo experimental RTK con equipo

de bajo costo. Ellos demostraron el rendimiento del receptor GPS de una frecuencia LEA 4T en RTK conectándose al servicio NTRIP para recibir correcciones a 1 Hz de la estación de referencia más cercana de aproximadamente 6.1 km. Las precisiones alcanzadas fueron de 0.03, 0.05 y 0.08 m para las componentes Este, Norte y Vertical, respectivamente. En otro estudio, [Bellone et al. \(2016\)](#) evaluaron el rendimiento de receptores GNSS de bajo costo de una frecuencia para monitorear deslizamientos de tierra en tiempo real. Para esto, diseñan un dispositivo que simula desplazamientos de deslizamiento de tierra y estos son registrados por el receptor GNSS de bajo costo en modo RTK utilizando una red NRTK compuesta por receptores de grado geodésico y administrada por el software red *SpiderNet* de la empresa Leica Geosystems®. También, en [Dabove \(2019\)](#) se estudió el receptor multi-constelación de frecuencia única de la empresa u-blox M8T bajo las metodologías RTK y NRTK para aplicaciones de catastro. Reportaron precisiones en el orden de los centímetros considerando una línea de base menor a 3 km para RTK, y 0.02 m cuando se emplea la técnica NRTK. Otros estudios sobre RTK de frecuencia única utilizando receptores GNSS de bajo costo se pueden encontrar en [Dabove y Manzano \(2014\)](#); [Garrido-Carretero et al. \(2019\)](#); [Wiśniewski et al. \(2013\)](#). Con la llegada del primer receptor GNSS de bajo costo multi-constelación y multi-frecuencia, a decir, el u-blox ZED-F9P, varios científicos analizaron y evaluaron el rendimiento en posicionamiento. Entre ellos, se encuentra el estudio reportado por [Wielgocka et al. \(2021\)](#) donde evaluaron la precisión en el posicionamiento alcanzado por el receptor ZED-F9P utilizando dos métodos: estático y RTK. En modo estático reportaron valores RMSE de 11, 17 y 15 mm para las componentes N, E y U, respectivamente. Mientras en modo RTK, 20 y 53 mm para la componente horizontal y vertical, respectivamente. Concluyeron que los parámetros del fabricante para RTK no se cumplían. También, [Janos y Kuras \(2021\)](#) evaluaron la precisión en posicionamiento del ZED-F9P utilizando una red RTK considerando diferentes condiciones de terreno y antenas de diferentes grados. Ellos concluyeron que el receptor ZED-F9P equipado con una antena de parche de bajo costo presenta mediciones precisas solamente en condiciones de cielo abierto, alcanzando RMSE de 0.009, 0.001 y 0.027 m para las componentes E, N y U, respectivamente.

La motivación principal para desarrollar esta investigación fue debido a la necesidad de conocer el rendimiento de los receptores GNSS de bajo costo equipados con antenas de parche de bajo costo en modo RTK a partir del método clásico de base única conformado por una estación maestra de bajo costo ubicada en un punto con coordenadas conocidas, y un receptor móvil de bajo costo al cual se le desean dar coordenadas en tiempo real. En las investigaciones reportadas anteriormente, utilizan el método de base única y red RTK, estando ambos conformados por equipo geodésico costoso y eliminando la esencia de Sistema RTK de bajo costo. En este estudio, el objetivo es evaluar los resultados alcanzados por el receptor ZED-F9P a través del método RTK de base única considerando combinaciones multi-GNSS, diferentes frecuencias de muestreo y ángulos de elevación, para el posicionamiento tridimensional, la detección de desplazamientos horizontales y verticales simulados, y el nivel de ruido en las series temporales estacionarias. Además, se estudia el desempeño del receptor a partir de 4 indicadores de precisión: tiempo en fijar ambigüedades, porcentaje de ambigüedades resueltas, error cuadrático medio y el porcentaje de error en detectar desplazamientos verticales. El resto del documento está

organizado de la siguiente manera: la sección 4.2 describe el protocolo NTRIP, la metodología de posicionamiento RTK de base única se describe en la sección 4.3. La configuración experimental se describe en la sección 4.4. Los resultados del estudio se encuentran en la sección 4.5, mientras que las secciones 4.6 y 4.7 muestran las discusiones y conclusiones del presente trabajo, respectivamente.

## 4.2. Protocolo NTRIP

Transporte en red de RTCM a través del protocolo de Internet (NTRIP, por sus siglas en inglés) es un protocolo abierto desarrollado por la Agencia Federal de Cartografía y Geodesia (BKG, por sus siglas en inglés) y certificado por RTCM (He et al., 2014). La primera versión (lanzada en septiembre de 2004) de NTRIP fue similar al sistema de radio por Internet. Por otro lado, la versión 2.0 que fue publicada en 2011, ganó mayor popularidad y actualmente se usa ampliamente. NTRIP es un protocolo genérico y sin estado basado en el protocolo de transferencia de hipertexto HTTP/1.1. El protocolo NTRIP se ha convertido en un estándar RTCM para transmitir datos de corrección diferencial (por ejemplo, en el formato RTCM-104) en tiempo real desde los sistemas GNSS a usuarios estáticos o móviles a través de Internet (BKG, 2023).

NTRIP se implementa en tres componentes de software del sistema: *NTRIPClients*, *NTRIPServers* y *NTRIPCasters*. *NTRIPCaster* es el programa de servidor HTTP real, mientras que *NTRIPClient* y *NTRIPServer* actúan como clientes HTTP. La relación entre estos tres componentes se ilustra en la Figura 4.1.

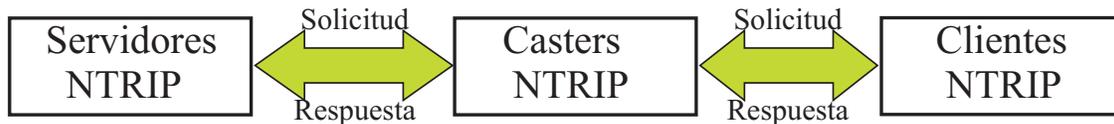


Figura 4.1: Sistema NTRIP.

El servidor NTRIP (*NTRIPSever*) es el responsable de transmitir el flujo de datos en tiempo real desde una estación de referencia o maestra a un *Caster* NTRIP (*NTRIPCaster*). *Caster* NTRIP actúa como un servidor HTTP que recibe datos RTCM de uno o más servidores NTRIP y, a su vez, transmite los datos RTCM a uno o más clientes NTRIP a través de Internet. *Caster* NTRIP está diseñado para administrar el acceso web de los servidores NTRIP y los clientes NTRIP. NTRIP se implementa en términos de puntos de montaje, número de puerto, contraseña y nombre de usuario, establecidos para las estaciones de referencia. El cliente NTRIP recibe datos RTCM en tiempo real desde un *Caster* NTRIP para aplicarlos como correcciones en tiempo real a un receptor GNSS móvil o estático (He et al., 2014).

### 4.3. Posicionamiento Cinemático en Tiempo Real (RTK)

RTK-GNSS es una técnica que aplica una estrategia de diferenciación para eliminar los retrasos correlacionados espacialmente entre la estación de referencia y la estación móvil en tiempo real para la obtención de posicionamiento relativo con una alta precisión (Paziewski y Wielgosz, 2017; Xi et al., 2023). Las ventajas principales que ofrece RTK es la eliminación de los errores relacionados con el receptor y satélite debido a la diferenciación de observaciones. También, disminuye las fuentes de error relacionadas con la atmosfera, como el retardo ionosférico y troposférico cuando la línea de base es corta. La estrategia clásica para el posicionamiento en modo RTK es el método de base única (Dabove, 2019). Para entender el posicionamiento con la técnica RTK es necesario definir algunos conceptos y ecuaciones de observación relacionadas con el posicionamiento diferencial. Las ecuaciones de observación de la fase portadora y pseudorange entre el receptor  $r$  ( $A$ , receptor base y  $B$ , receptor móvil) y el satélite  $s$  ( $i$  y  $j$ ) se expresan como (Alkan et al., 2020; Dabove, 2019):

$$P_{r,i}^s(t) = \rho_r^s(t) - cdT_r(t) + cdt^s(t) + \alpha_i I_r^s(t) + T_r^s(t) + M_{r,i}^s(t) + E_r^s(t) + \epsilon_r^s(t) \quad (4.1)$$

$$\Phi_{r,i}^s(t) = \rho_r^s(t) - cdT_r(t) + cdt^s(t) - \alpha_i I_r^s(t) + T_r^s(t) + M_{r,i}^s(t) + E_r^s(t) + \lambda_i N_{r,i}^s + \epsilon_r^s(t)$$

Donde  $P_{r,i}^s$  y  $\Phi_{r,i}^s$  representan las mediciones de pseudodistancia y fase portadora en unidades de longitud, respectivamente, entre el satélite  $s$  y el receptor  $r$  en la  $i$ -ésima frecuencia.  $\rho_r^s$  es el rango geométrico entre el satélite  $s$  y el receptor  $r$  en metros.  $cdT_r$  y  $cdt^s$  corresponden al error del reloj del receptor y satélite en segundos, respectivamente, multiplicados por la velocidad de la luz ( $c$ ).  $\alpha_i I_r^s$  es el retraso de la propagación ionosférica con un coeficiente conocido  $\alpha = f_1^2/f_i^2$  que depende de la  $i$ -ésima frecuencia.  $T_r^s$  es el retardo de propagación troposférico, el error de *multipath*  $M_{r,i}^s$ , el error de efemérides  $E_r^s$ , la ambigüedad de la fase portadora se multiplica por la longitud de onda  $\lambda_i N_{r,i}^s$  y, finalmente, los errores aleatorios  $\epsilon_r^s$ . En esta ecuación 4.1, todos los elementos dependen del tiempo excepto la ambigüedad de la fase portadora.

Se calcula la corrección de pseudodistancia (*PRC*) y la corrección de la fase portadora (*CPC*) en el receptor de la estación base ( $A$ ). Las correcciones diferenciales se pueden expresar en las siguientes Ecuaciones 4.2 y 4.3, donde se ignora el error *multipath* y los errores aleatorios:

$$PRC_A^s(t) = \rho_A^s(t) - R_A^s(t) - cdt^s(t) - cdT_A(t) = \alpha I_A^s(t) - T_A^s(t) - E_A^s(t) \quad (4.2)$$

$$CPC_A^s = \rho_A^s(t) - \Phi_A^s(t) - \lambda N_A^s - cdt^s(t) - cdT_A(t) = -\alpha I_A^s(t) - T_A^s(t) - E_A^s(t) \quad (4.3)$$

Luego, las correcciones se transmiten al receptor móvil ( $B$ ) y las observaciones de pseudodistancia y fase portadora corregidas son calculadas con las siguientes Ecuaciones 4.4 y 4.5:

$$P_B^s(t)_{Corregida} = P_B^s(t) + PRC_A^s(t) = \rho_B^s(t) - cdT_{AB}(t) + \delta E_{AB}^s(t) - \delta I_{AB}^s(t) + \delta T_{AB}^s(t) \quad (4.4)$$

$$\Phi_B^s(t)_{Corregida} = \rho_B^s(t) + CPC_A^s(t) = \rho_B^s(t) - cdT_{AB}(t) - \lambda N_{AB}^s(t) + \delta I_{AB}^s(t) + \delta T_{AB}^s(t) + \delta E_{AB}^s(t) \quad (4.5)$$

Cuando la longitud de la línea de base conformada por el receptor A y B es inferior a 10 km, los errores derivados por los retrasos atmosféricos y los errores de efemérides se desprecian ya que se consideran casi iguales en ambos lugares (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Por otro lado, cuando la distancia supera los 10 km, estos errores aumentan y se deben modelar espacialmente (Wübbena et al., 1996). Las correcciones diferenciales se pueden transmitir a través de un enlace de comunicación (radio, GSM, NTRIP) entre ambos receptores. Según las Ecuaciones 4.4 y 4.5, en RTK se consideran las mediciones de pseudodistancia y de la fase portadora, lo que permite alcanzar precisiones en la posición a nivel de centímetros en tiempo real si se resuelve la resolución de ambigüedad (Aykut et al., 2015). Actualmente, existen muchos métodos de resolución de ambigüedad, pero la técnica más utilizada en mediciones en tiempo real es la llamada *On-The-Fly* (Aykut et al., 2015).

## 4.4. Configuración experimental

Para probar el rendimiento del receptor GNSS ZED-F9P de doble frecuencia mediante el posicionamiento RTK de base única fueron diseñados 3 experimentos. El primer experimento consistió en evaluar la exactitud posicional alcanzada por el receptor GNSS de bajo costo. Analizar el rendimiento en la detección de desplazamientos horizontales y verticales fue el objetivo del segundo experimento. Finalmente, el tercer experimento consistió en estudiar el nivel de ruido de diferentes series temporales de desplazamientos. Uno de los principales objetivos de esta investigación es mantener la esencia del término *bajo costo*, es decir, utilizar los instrumentos de bajo costo en todo momento. Por lo cual, el receptor GNSS ZED-F9P equipado con la antena de parche ANN-MB-00 (ambos de la empresa u-blox) fue utilizado en los 3 experimentos. ZED-F9P permite el funcionamiento RTK con alta frecuencia (hasta 20 Hz) y precisiones centimétricas en condiciones de buena visibilidad de satélites. También, el receptor tiene un rango amplio de temperatura y capacidades de comunicación, bajo consumo de energía. Además, es compatible con las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou, lo que garantiza formar hasta 15 combinaciones GNSS. Por otro lado, la antena ANN-MB-00 es capaz de recibir multifrecuencias de los GNSS. ANN-MB-00 actualmente no cuenta con parámetros de calibración emitidos por el NGS (NGS, 2023), y únicamente el fabricante presenta los desplazamientos del centro de fase (PCO) de 8.9 mm y 7.6 mm en el plano vertical para las señales L1 y L2, respectivamente, y menos de 5 mm en el plano horizontal para ambas frecuencias. Sin embargo, en esta investigación no se utilizaron los PCO del fabricante, sino, los encontrados por la metodología propuesta en Krietemeyer et al. (2020, 2022). Por lo tanto, es posible cargar un

archivo de calibración de antena en el receptor GNSS ZED-F9P.

Para el establecimiento del sistema NTRIP fue necesario utilizar el servicio EMLID como *Caster* NTRIP y el software RTKLib (versión demo5 b34g) (Everett et al., 2022; Takasu et al., 2007; Takasu y Yasuda, 2009). El módulo STRSVR de RTKLib se configuró como el servidor NTRIP para transmitir las correcciones GNSS en tiempo real del receptor ZED-F9P establecido como estación de referencia al *Caster* NTRIP EMLID. Por otro lado, el módulo RTKNAVI de RTKLib ingresa datos de observación (mediciones de pseudorange y fase portadora) del receptor ZED-F9P establecido como rover o móvil, y datos de flujo (correcciones GNSS, RTCM) provenientes de un *caster* NTRIP. RTKNAVI utiliza el método LAMBDA modificado para corregir ambigüedades de números enteros (Dabove y Manzano, 2014). RTKNAVI representa el Cliente NTRIP. Para más información acerca de las configuraciones del software RTKLib para lograr posicionamiento RTK, visitar el manual <sup>1</sup> Takasu (2013); Takasu et al. (2007).

Los parámetros de interés encontrados en el archivo de salida generado por RTKNAVI son las coordenadas ENU, número de satélites, solución fija/flotante, fecha y hora, precisiones de, dn y du.

#### 4.4.1. Posicionamiento 3D

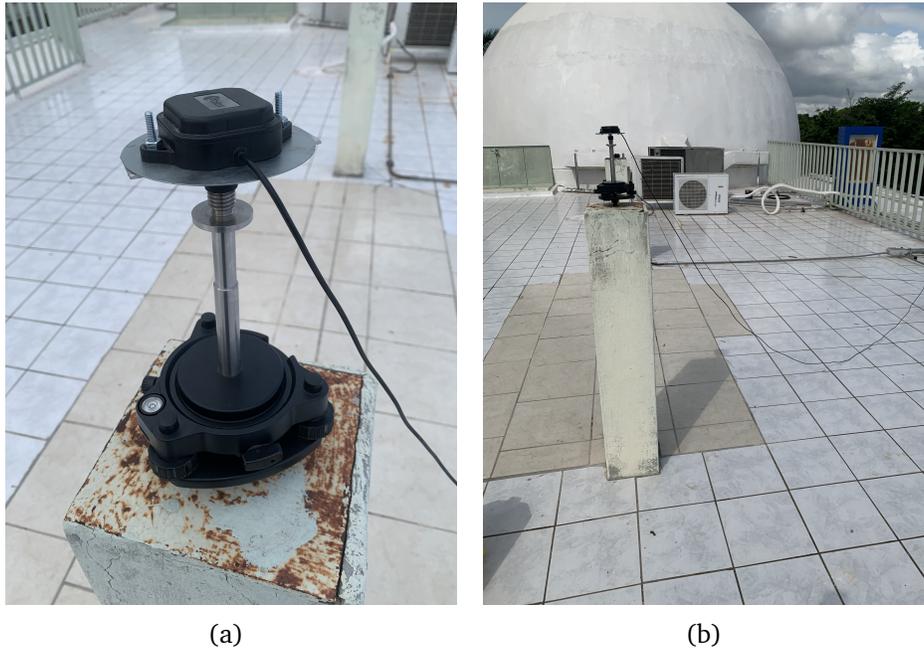
Sobre dos monumentos de centrado forzoso ubicados en la azotea de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa, se instrumentaron las antenas ANN-MB-00 con la ayuda de una base nivelante. También, se utilizó un disco metálico (plano de tierra) debajo de las antenas para disminuir el *multipath* (Kriemeyer et al., 2020). En experimentos pasados, se les dieron coordenadas precisas (coordenadas de referencia) a los monumentos con equipo de grado geodésico utilizando el método de posicionamiento relativo. La localización de las estaciones móvil y base se ilustran en la Figura 4.2a y 4.2b, respectivamente.

El receptor y antena GNSS instrumentados en el monumento E se establecieron como estación de referencia para la solución RTK, y con ayuda de una computadora personal a través del módulo strsvr se transmitieron las correcciones RTCM al *caster* NTRIP. Por otro lado, el monumento B fue establecido como punto rover, es decir, donde se obtendrán coordenadas precisas con el método RTK. La conexión de los instrumentos GNSS de bajo costo del punto B se hicieron con una laptop marca HP. El experimento se llevó a cabo el día 11 de mayo del 2023 y las observaciones estáticas tuvieron una duración de 5 minutos. Se estableció un ángulo de elevación de 12 grados y se siguieron las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou a una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Únicamente se realizaron mediciones con la combinación G+R+E+C y G+R+E para considerar todas las constelaciones GNSS disponibles en México y evaluar si realmente la constelación BeiDou tiene un impacto positivo en la precisión. Las coordenadas ECEF del punto B se transformaron a coordenadas topocéntricas considerando como origen las coordenadas de referencia

---

<sup>1</sup><https://github.com/rtklibexplorer/RTKLIB/releases>

del punto B.



**Figura 4.2:** Configuración experimental para el posicionamiento 3D con el receptor GNSS de bajo costo en modo RTK: (a) antena ANN-MB-00 sobre el pilar B (ROVER), y (b) antena ANN-MB-00 sobre el pilar E (Punto de Referencia).

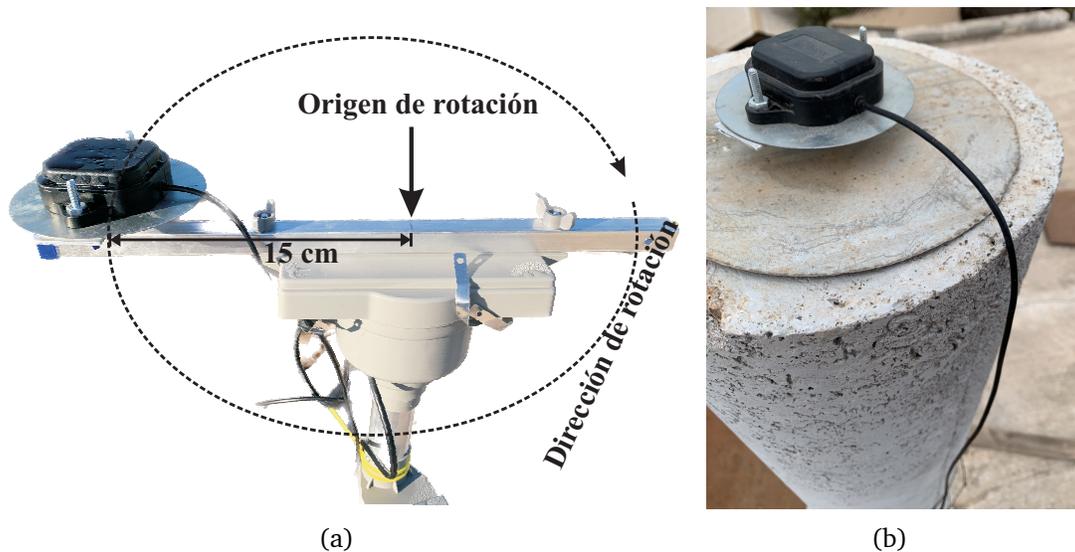
#### 4.4.2. Simulación de desplazamientos horizontales y verticales

Se diseñaron dos dispositivos que permitieran simular desplazamientos. El primero consistió en un servomotor capaz de girar a una velocidad de  $0.44 \text{ rad/s}$  y una barra de aluminio de  $45 \text{ cm}$  de largo centrada sobre el eje del servomotor. La antena ANN-MB-00 se colocó a una distancia de  $15 \text{ cm}$  del eje. La rotación del dispositivo generó un movimiento circular con un diámetro de  $30 \text{ cm}$ . El segundo dispositivo se trata de una barra vertical que se mueve manualmente gracias a un sistema de engranaje (hasta  $5 \text{ cm}$ ). En la parte superior de la barra se colocó la antena ANN-MB-00 y se niveló con la ayuda de dos niveles tubulares. Estos dos dispositivos fueron utilizados en diferentes pruebas para evaluar el rendimiento de los receptores GNSS ZED-F9P y la antena ANN-MB-00 en la detección de desplazamientos horizontales y verticales. Las pruebas se llevaron a cabo en la azotea de una casa habitación libre de obstáculos que pudieran ser fuentes de error (*multipath*) y el cielo abierto permitía tener disponibilidad de un número mayor de satélites GNSS. Aproximadamente a  $10 \text{ metros}$  de los dispositivos, sobre un monumento de concreto se estableció la estación de referencia para la solución RTK compuesta por el receptor ZED-F9P y la antena ANN-MB-00.

El objetivo de la prueba 1 fue evaluar el rendimiento de los receptores GNSS de bajo costo en detectar desplazamientos horizontales a través del seguimiento de una trayectoria

circular en tiempo real utilizando diferentes combinaciones GNSS, ángulos de elevación y frecuencias de muestreo. En la Figura 4.3a se ilustra el proceso de rotación del dispositivo 1, y en la Figura 4.3b se observa la estación de referencia quien transmite las correcciones al caster NTRIP. Se consideraron 15 combinaciones GNSS: (1) G+R+E+C, (2) G+R+E, (3) G+R, (4) G, (5) G+E, (6) G+C, (7) G+E+C, (8) G+R+C, (9) R+E+C, (10) R+E, (11) R+C, (12) E+C, (13) R, (14) E y (15) C), cuatro frecuencias de muestreo (1, 5, 10 y 20 Hz) y cuatro ángulos de elevación ( $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$  y  $15^\circ$ ). Se realizaron un total de 64 mediciones de 5 minutos sobre el dispositivo 1. Para evaluar el sistema de bajo costo en la detección de desplazamientos horizontales se utilizaron los siguientes indicadores de rendimiento (Luo et al., 2021):

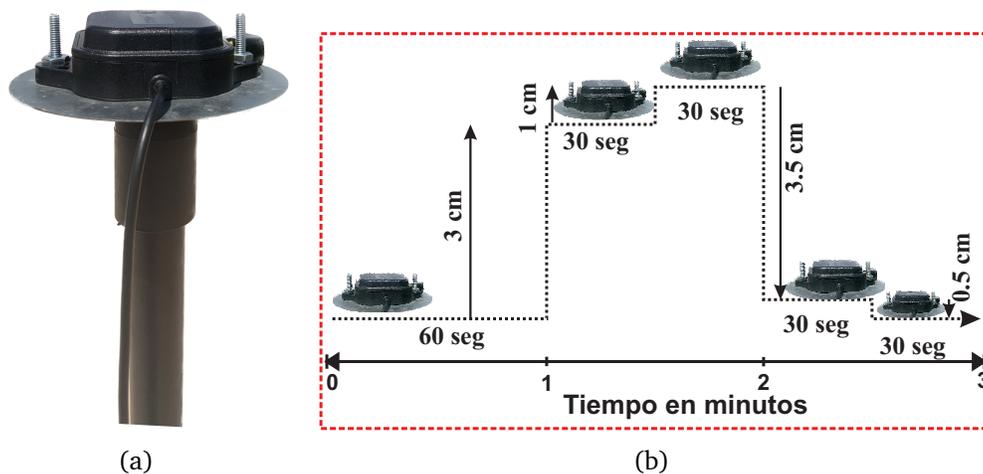
- **Disponibilidad:** Porcentaje de soluciones fijas RTK en relación con todas las soluciones obtenidas durante el periodo de 5 minutos.
- **RMSE:** Error cuadrático medio de las soluciones fijas RTK, considerando las coordenadas de referencia.
- **Tiempo en fijar ambigüedad:** Tiempo necesario para recuperar una solución fija RTK después de reinicializar las ambigüedades, es decir, cuando la recepción de la señal GNSS y el flujo de datos RTK no son interrumpidos.



**Figura 4.3:** Configuración experimental en la detección de desplazamientos horizontales: (a) Antena ANN-MB-00 sobre el servomotor rotativo, y (b) estación de referencia.

Para el caso de la prueba 2, el objetivo principal fue evaluar la detección de desplazamientos verticales a través de diferentes combinaciones GNSS (15 combinaciones), frecuencias de muestreo (mismas que la prueba 1) y un ángulo de elevación de  $12^\circ$ , debido a que en la prueba 1 se encontró que este ángulo fue el que alcanzó el mejor desempeño en

disponibilidad, RMSE y tiempo en fijar ambigüedad. Se establecieron 4 movimientos verticales simulados manualmente en un tiempo de 3 minutos. La prueba 2 inició con la antena ANN-MB-00 completamente estática, después de 60 segundos se generó un movimiento vertical hacia arriba de 3 cm, posteriormente, se generó nuevamente un movimiento hacia arriba de 1 cm, enseguida, un movimiento descendente de 3.5 cm fue generado, y finalmente, la antena se llevó a su posición original con un movimiento de 0.5 cm hacia abajo. Cada movimiento simulado se mantuvo durante 30 segundos. En la Figura 4.4a se observa la antena sobre la barra vertical y en Figura 4.4b se puede ver el esquema del orden de los desplazamientos verticales simulados manualmente. En total se hicieron 60 mediciones RTK de 3 minutos cada una. Para esta prueba 2 se estableció el porcentaje de éxito en la detección de desplazamientos verticales simulados como indicador de rendimiento del método RTK.

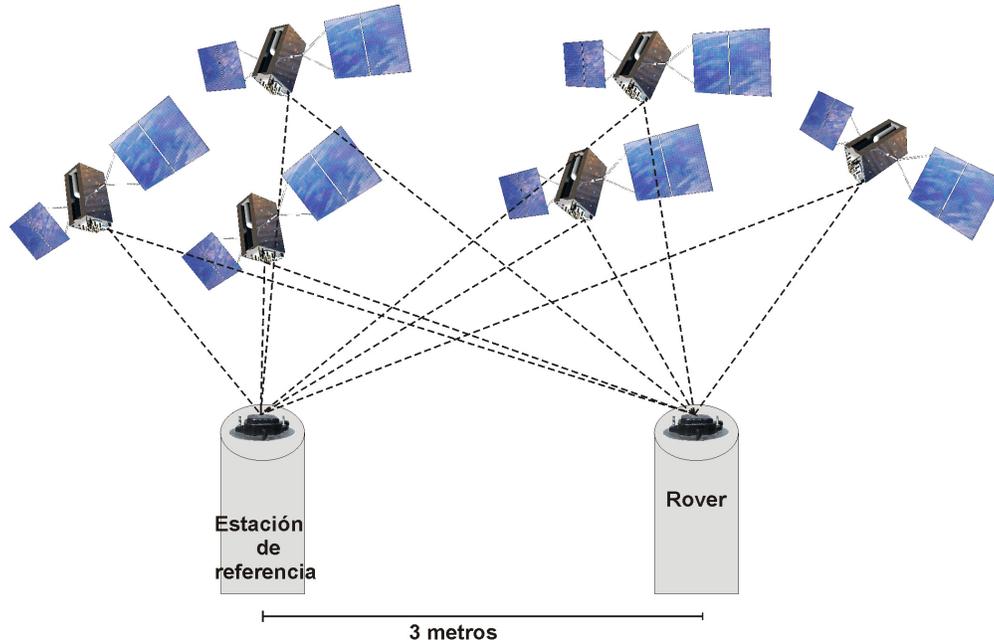


**Figura 4.4:** Configuración experimental en la detección de desplazamientos verticales: (a) dispositivo simulador de desplazamientos verticales y, (b) esquema del orden de los desplazamientos verticales simulados manualmente.

#### 4.4.3. Prueba estacionaria

El nivel de ruido en las series temporales de desplazamientos calculadas con la técnica RTK basadas en diferentes combinaciones GNSS debe ser estudiado para identificar la precisión en la estabilidad de las soluciones RTK. Por lo cual, se diseñó una prueba estacionaria para evaluar el nivel de ruido en las series temporales GNSS. Cerca del pilar de concreto (ver Figura 4.3b) (aproximadamente 3 m) se construyó un segundo pilar que garantizara la estabilidad de la antena ANN-MB-00 y no estuviera afectado por diversas fuentes generadoras de vibraciones. Se instrumentó la antena ANN-MB-00 sobre este segundo pilar como estación móvil y se realizaron mediciones RTK considerando únicamente 3 combinaciones GNSS, a decir, G, E y G+E, en un periodo de 10 minutos para cada frecuencia de muestreo, completando un total de 12 mediciones. Se estableció un ángulo de elevación de  $12^\circ$  y las condiciones de medición fueron favorables al presentar un cielo abierto. Para evaluar la precisión de las series temporales de desplazamientos se utilizaron

los siguientes indicadores: desviación estándar ( $\sigma$ ), media ( $\mu$ ) y el error cuadrático medio (RMSE). Para el cálculo del RMSE se consideró el 0 como referencia esto debido a que la antena está en reposo y por lo tanto no debe registrar desplazamientos, y las oscilaciones registradas son debido al nivel de ruido del propio sistema RTK de bajo costo. La Figura 4.5 ilustra la estrategia metodológica del experimento 3.



**Figura 4.5:** Configuración experimental para estudiar el nivel de ruido en las series temporales de desplazamientos obtenidas por la técnica RTK.

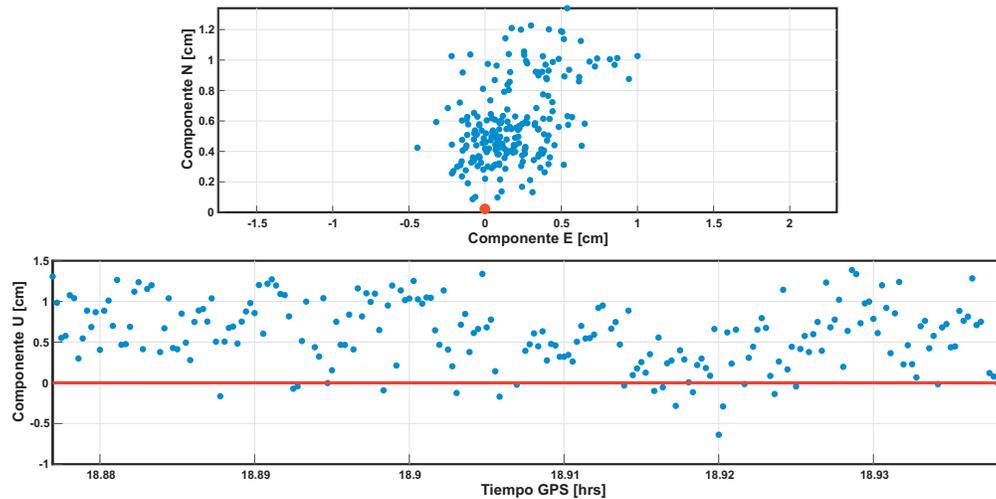
## 4.5. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados de los experimentos descritos en la sección anterior. La primera parte describe la evaluación de la precisión posicional de los receptores GNSS de bajo costo, mientras que la segunda parte analiza el rendimiento del receptor de bajo costo en la detección de desplazamientos horizontales y verticales. Finalmente, en la tercera parte se realiza un análisis del ruido de las series temporales estacionarias.

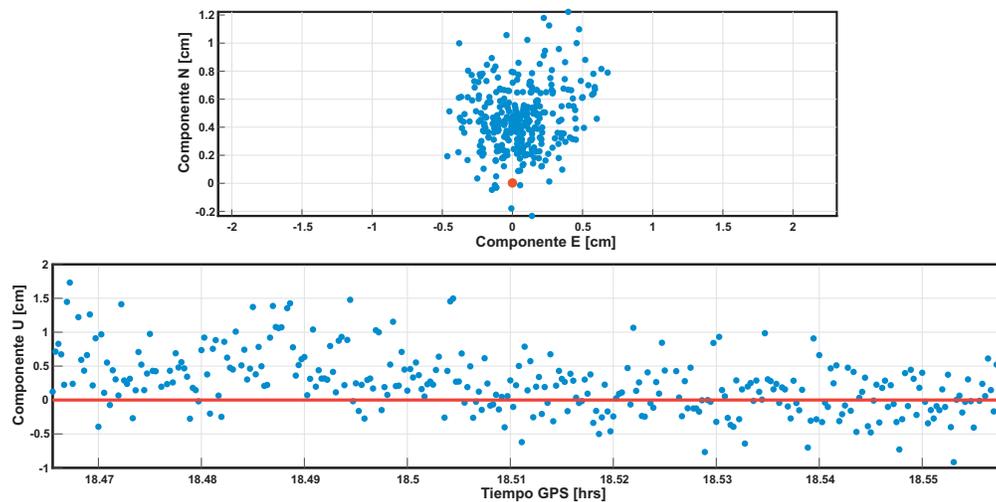
### 4.5.1. Análisis del posicionamiento 3D

Los resultados finales del experimento 1 fueron las coordenadas ENU estimadas del monumento B. En las Figuras 4.6 y 4.7 se ilustra la dispersión del posicionamiento para la combinación GNSS: G+R+E+C y G+R+E, respectivamente. También, se calcularon algunas estadísticas elementales como el error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar, media y el valor mínimo y máximo de los residuos de referencia. Las soluciones alcanzadas por la combinación GNSS G+R+E presentaron un mejor comportamiento posicional horizontal al presentar una dispersión más compacta (Ver Figura 4.7) que las alcanzadas por

la combinación G+R+E+C (Ver Figura 4.6). Por otro lado, las soluciones RTK de G+R+E para la componente vertical oscilaron sobre la línea de referencia, mientras que las soluciones RTK de G+R+E+C estuvieron por encima. Por lo tanto, la media de las soluciones G+R+E ( $\mu = 2.4$  mm) estuvo más cercana al origen (0) que la media de la combinación G+R+E+C ( $\mu = 5.9$  mm).



**Figura 4.6:** Residuos de referencia del punto B pertenecientes a la combinación G+R+E+C: (arriba) residuos de referencia de las componentes horizontales, y (abajo) los residuos de referencia de la componente vertical. El punto y línea color naranja es la posición de referencia para la componente horizontal y vertical, respectivamente.



**Figura 4.7:** Residuos de referencia del punto B pertenecientes a la combinación G+R+E: (arriba) residuos de referencia de las componentes horizontales, y (abajo) los residuos de referencia de la componente vertical. El punto y línea color naranja es la posición de referencia para la componente horizontal y vertical, respectivamente.

**Tabla 4.1:** Resumen estadístico de las coordenadas topocéntricas del punto B.

Componentes	Coordenadas topocéntricas en cm					Combinación GNSS
	$\mu$	$\sigma$	Max	Min	RMSE	
E	0.18	0.24	1.00	-0.44	0.30	G+R+E+C
N	0.58	0.26	1.34	0.08	0.63	
U	0.59	0.39	1.38	-0.63	0.71	
E	0.05	0.22	0.67	-0.46	0.22	G+R+E
N	0.45	0.23	1.22	-0.23	0.50	
U	0.24	0.44	1.73	-0.91	0.5	

En la Tabla 4.1 se encuentra la estadística básica de los residuos de referencia. El RMSE se consideró como el indicador de precisión de este análisis. La combinación G+R+E presentó el mejor desempeño en posicionamiento para las tres componentes, con valores de RMSE menores a 0.5 cm. También, los residuos de referencia máximos y mínimos fueron menores a  $\pm 1.8$  cm para las tres componentes. Por otro lado, la incorporación de la constelación BeiDou en las soluciones RTK deteriora la precisión en un porcentaje bajo. Sin embargo, debido al número alto de satélites GNSS disponibles a cualquier hora del día en México garantiza que las precisiones en posicionamiento tridimensional sean altas, aun sin considerar la constelación BeiDou. El posicionamiento tridimensional en tiempo real con una precisión milimétrica alcanzado con la tecnología satelital GNSS de bajo costo es posible.

#### 4.5.2. Análisis de desplazamientos simulados

##### *Horizontales*

El ángulo de elevación permite ignorar señales que vienen contaminadas debido a la trayectoria de viaje cercana al horizonte. Por lo cual, un ángulo de elevación bajo permite la visibilidad de un número alto de satélites, pero es susceptible a recibir señales débiles que afecten la precisión. Por otro lado, un ángulo de elevación elevado permite recibir señales más fuertes (menos contaminación), pero una visibilidad menor a satélites. Por lo tanto, seleccionar un ángulo de elevación es garantía de soluciones precisas en las mediciones GNSS. En este caso de estudio, se utilizó la técnica RTK para darle seguimiento a una trayectoria circular únicamente con la combinación G+R+E+C y con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, modificando el ángulo de elevación en cada prueba de 5 minutos. El tiempo en fijar ambigüedad y el porcentaje de ambigüedad resuelta fueron los indicadores de calidad para seleccionar el ángulo de elevación con el mejor desempeño. La Tabla 7.1 resume los resultados de los indicadores de calidad con respecto a los ángulos de elevación analizados.

Si bien, el ángulo de elevación de  $12^\circ$  fue el que tardó el menor tiempo en fijar soluciones y el segundo en alcanzar los valores con mayor porcentaje de ambigüedad, y debido

a la poca diferencia con el ángulo de elevación de 15°, se seleccionaron los 12° como el ángulo de elevación con el mejor desempeño según los indicadores establecidos.

**Tabla 4.2:** Resumen de los resultados alcanzados con respecto a los ángulos de elevación.

Ángulo de elevación	Tiempo en fijar ambigüedad (segundos)	% de ambigüedad
8°	58	47.5
10°	34	50.5
12°	25	87.4
15°	34	89.4

El seguimiento a una trayectoria circular con la técnica RTK considerando combinaciones GNSS y muestreadas a 1, 5, 10 y 20 Hz se ilustra en las Figuras 4.8a, 4.8b, 4.8c y 4.8d, respectivamente. El círculo rojo corresponde a la trayectoria de referencia. Debido a que las combinaciones R, C y R+C no alcanzaron soluciones fijas fueron ignoradas por los grandes márgenes de error. Para la frecuencia de muestreo de 1 Hz, las combinaciones R+E, G+E+C y E+C alcanzaron valores RMSE de 0.84, 0.91 y 0.94 cm en un tiempo (en fijar ambigüedad) de 48, 33 y 38 segundos, y con un porcentaje de ambigüedad de 83.5, 86.9 y 87.3 % respectivamente. Es importante resaltar que no existe una correlación entre estos indicadores de rendimiento ya que se observa que para el RMSE de 0.84 cm se obtuvo un 83.5 % de ambigüedad resuelta. Esto es debido a que en ocasiones existen pérdidas u obstrucciones de la señal recibida por la antena GNSS, ó por inestabilidad en el flujo de datos cuando el Internet es interrumpido. G+R fue la combinación con el peor rendimiento al alcanzar un RMSE de 4.66 cm. Para el resto de las combinaciones GNSS, los valores de RMSE estuvieron en un rango de 1 a 3.09 cm. También, para todas las combinaciones GNSS el porcentaje de ambigüedad fue menor a 90 %, donde G+E+C alcanzó el valor más bajo de 32 %. El tiempo en fijar ambigüedades fue menor a los 60 segundos para las 12 combinaciones GNSS evaluadas. G+R+E+C fue la combinación que alcanzó el menor tiempo en fijar ambigüedades, con 22 segundos. En la Figura 4.8a, las trayectorias circulares correspondientes a las combinaciones G+E+C, G+R+E y G+R presentan un desfase con respecto al círculo rojo de referencia. Esto es debido al bajo porcentaje de ambigüedades resueltas (en el caso de G+R+E y G+E+C) y posiblemente al método de resolución de ambigüedad que aplica el software (G+R) (Everett et al., 2022).

Las trayectorias circulares registradas a 5 Hz con la técnica RTK presentaron valores de RMSE menores a 1.1 cm en un tiempo de fijación de ambigüedad de 5 segundos con hasta el 97.8 % de ambigüedades resueltas. Con respecto a las trayectorias registradas a 1 Hz se observa una mejora significativa en todos los indicadores de rendimiento. R+E+C y R+E fueron las combinaciones con el mejor desempeño con valores RMSE de 0.44 cm. Cuando se aumenta el número de satélites GNSS se reduce el tiempo en fijar ambigüedades. El 91.66 % de las combinaciones alcanzó un tiempo en fijar ambigüedades menores a los 20 segundos. También, el 75 % de las combinaciones resolvió ambigüedades mayores al 90 %.

En la Figura 4.8c se observan las trayectorias circulares muestreadas a 10 Hz, es no-

table la mayor dispersión de las soluciones RTK con respecto a las frecuencias de 1 y 5 Hz. Los valores de RMSE del 100 % de las combinaciones estuvieron por encima de 1 cm, hasta 6.42 cm. El 83 % de las combinaciones alcanzaron soluciones fijas de ambigüedad en menos de 30 segundos y solo el 58 % resolvió más del 90 % de ambigüedades. Aunque G+R+E, G+R y R+E solucionaron más del 94 % de ambigüedades, presentaron un desfase con respecto a la trayectoria de referencia. Esto es posiblemente debido al alto flujo de datos entre el receptor GNSS y el caster NTRIP derivando a errores sistemáticos. La combinación G fue la que alcanzó el mejor valor de RMSE con 1.12 cm. Con 4 segundos en fijar la ambigüedad, G+R+E+C, G+R+E y G+E+C fueron las combinaciones con el menor tiempo. También, fueron las combinaciones con el mayor número de satélites disponibles. G+R fue la combinación en alcanzar el peor rendimiento con valores RMSE de 6.42 cm.

Finalmente, las trayectorias circulares definidas a 20 Hz se ilustran en la Figura 4.8d. Estas trayectorias son definidas en un tiempo de fijación de ambigüedades menor al resto de las frecuencias de muestreo, con 1.5 segundos la combinación G+R+E+C alcanzó el mejor tiempo. El 83 % de las combinaciones tardaron menos de 10 segundos en fijar la solución. También, el 58 % de las combinaciones resolvió más de 90 % de ambigüedades. Los valores de RMSE no superaron los 2 cm en todas las combinaciones analizadas. La frecuencia de muestreo de 20 Hz presentó mejor rendimiento que 10 Hz y 1 Hz.

Las Figuras 4.9 y 4.10 resumen 2 de los indicadores de rendimiento, RMSE y Tiempo en fijar ambigüedad, para las 4 frecuencias de muestreo y las 12 combinaciones GNSS, respectivamente. En la Figura 4.9, sobre la fila correspondiente a 5 Hz se encuentran las barras de menor tamaño (menor valor de RMSE). También, se observa que un aumento del RMSE después de los 5 Hz, y en 20 Hz disminuye. G+R+E y G+R fueron las combinaciones GNSS más susceptibles a las frecuencias de muestreo. Por otro lado, en la Figura 4.10 es apreciable el impacto de la frecuencia de muestreo en el tiempo en fijar ambigüedades. La forma escalonada que definen las combinaciones GNSS en los tiempos de cada frecuencia de muestreo demuestra que cuando la frecuencia de muestreo aumenta, disminuye el tiempo en fijar ambigüedades. En G, R+E+C y E se muestran tiempos mayores a 60 segundos sin importar la frecuencia de muestreo, esto se debe principalmente (en este estudio) al pequeño número de satélites GNSS disponibles en el momento en que se llevaba a cabo este experimento.

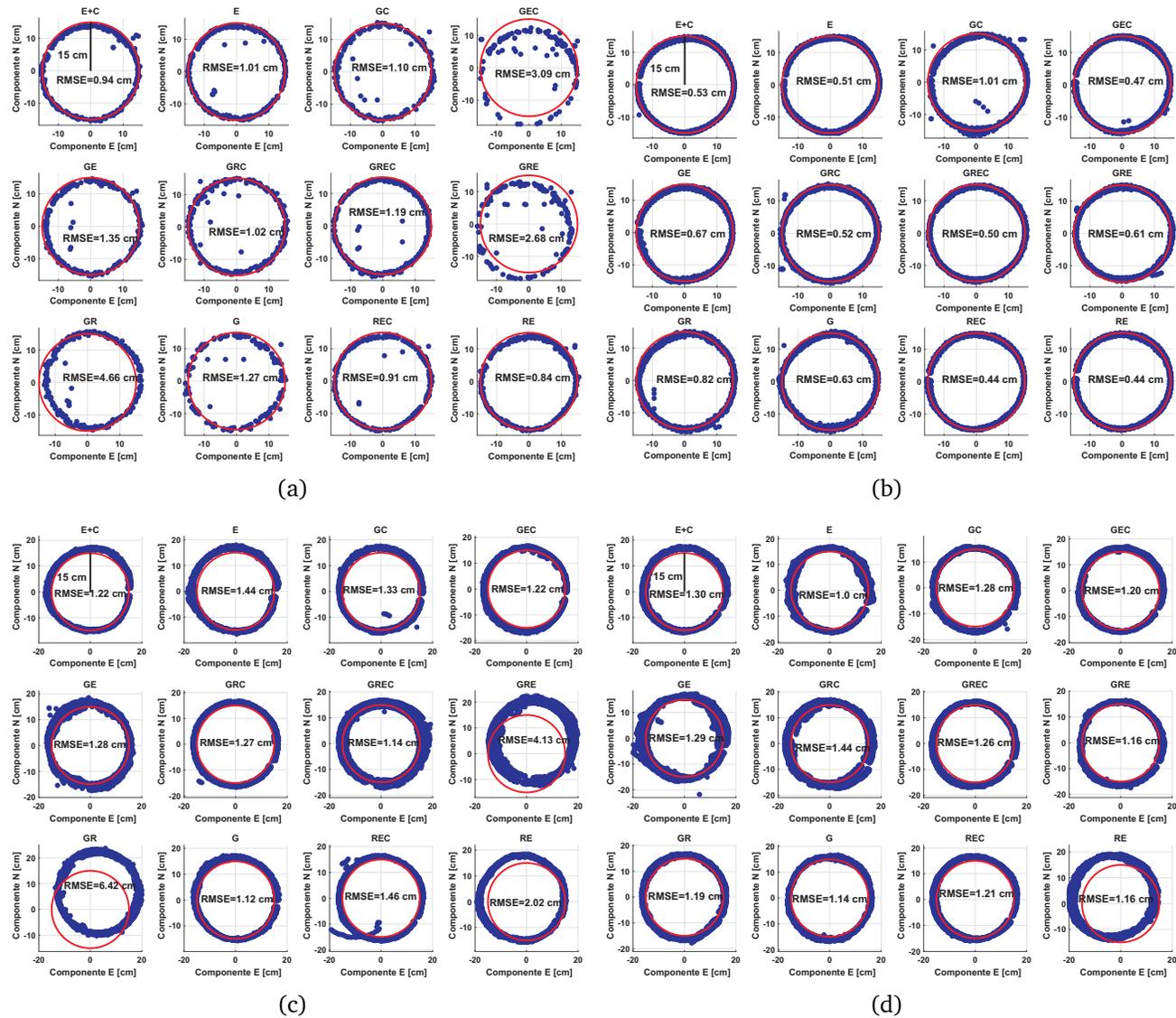
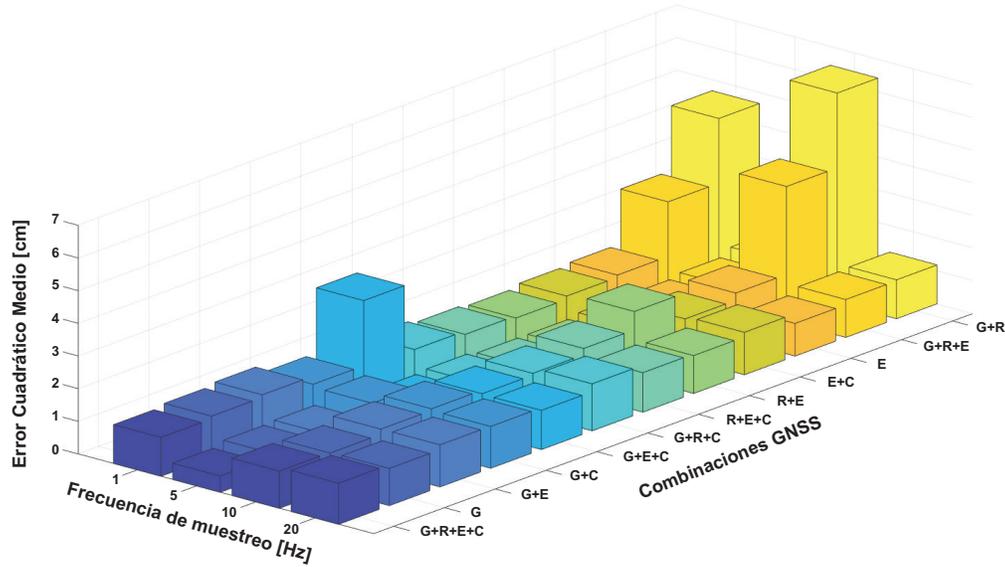
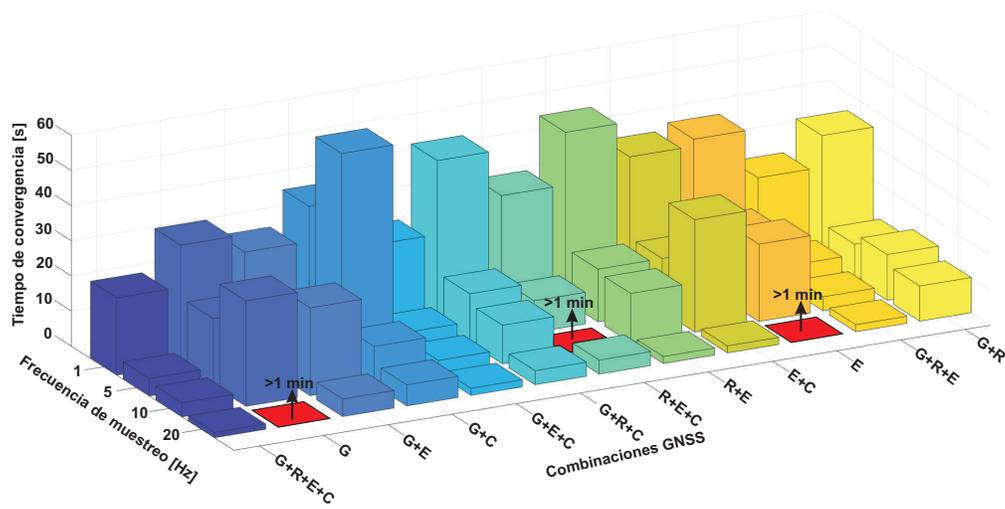


Figura 4.8: Seguimiento de la trayectoria circular con una frecuencia de muestreo de: (a) 1 Hz, (b) 5 Hz, (c) 10 Hz y (d) 20 Hz.



**Figura 4.9:** Error cuadrático medio en cm de las trayectorias circulares registradas a partir de diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo.

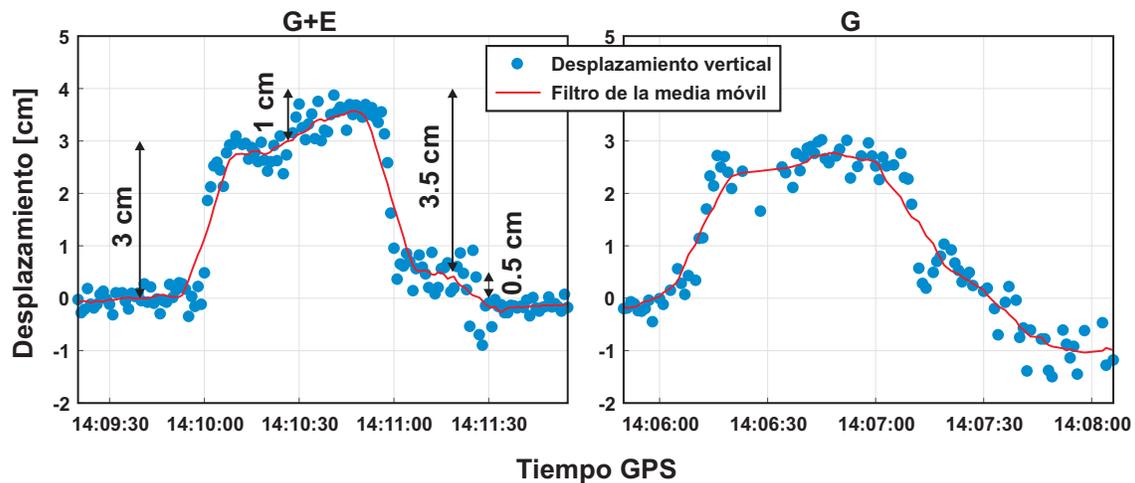


**Figura 4.10:** Tiempo en fijar la primera solución durante la medición de las trayectorias circulares medidas a partir de diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo.

### Verticales

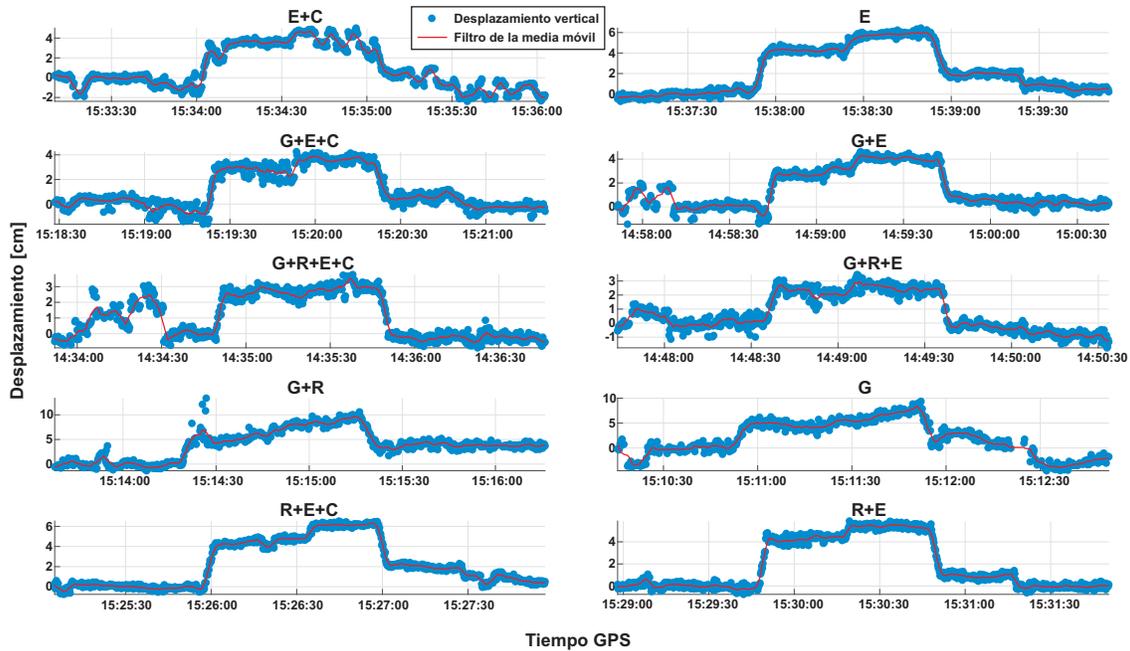
Cuando se llevan a cabo pruebas de carga estáticas sobre puentes, los desplazamientos en la componente vertical es una de las variables más evaluadas en el Monitoreo de la Salud estructural (Gómez-Martínez et al., 2021; Vazquez-Ontiveros et al., 2020). Las pruebas de carga se llevan a cabo en tiempos cortos, esto para no obstruir el tráfico. Por lo tanto, conocer la respuesta de los desplazamientos verticales en tiempo real sobre puentes

debe ser preciso. Por lo cual, se definieron 3 minutos para evaluar el rendimiento de la técnica RTK con equipo GNSS de bajo costo, ya que el tiempo en iniciar a medir estos desplazamientos de manera precisa (soluciones fijas) debe ser el menor posible. Esto limita a diferentes combinaciones GNSS en no alcanzar soluciones fijas en tiempos cortos, tal es el caso de la frecuencia de muestreo de 1 Hz, donde únicamente dos combinaciones (G+E y G) lograron registrar los desplazamientos verticales simulados. En la Figura 4.11 se ilustra el comportamiento de las soluciones RTK alcanzadas (puntos azules) con respecto a los desplazamientos de referencia simulados. Para una cuantificación más precisa de los desplazamientos medidos en modo RTK, se aplicó el filtro de la media móvil para suavizar las series temporales (línea roja). Los desplazamientos registrados se representaron en porcentaje de éxito, según sea el movimiento medido (3, 1, 3.5 o 0.5 cm).



**Figura 4.11:** Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical.

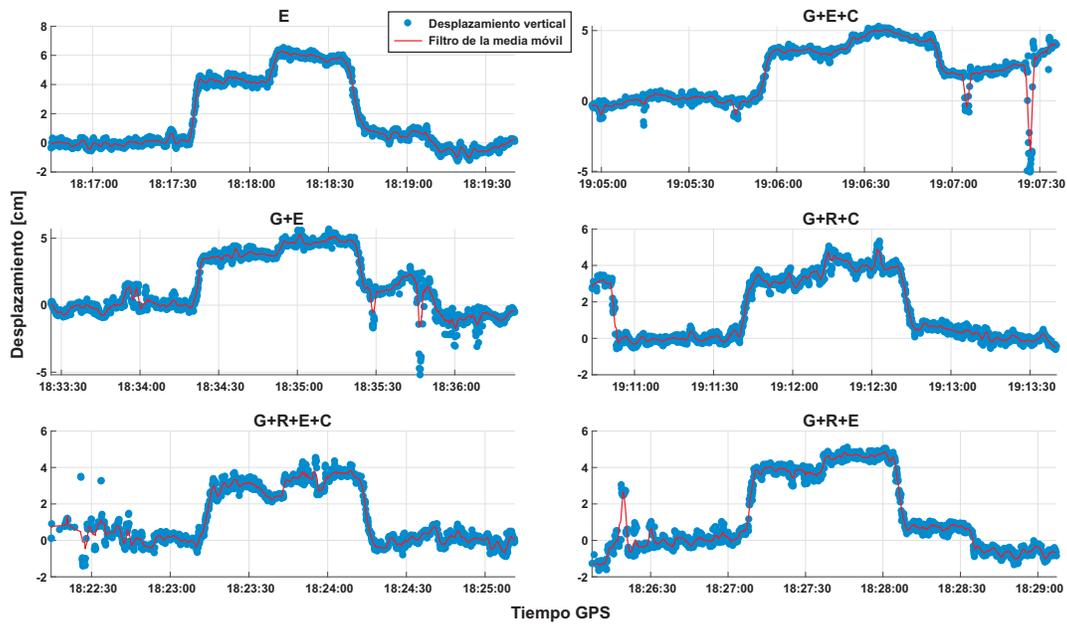
Por otro lado, debido al aumento en la frecuencia de muestreo a 5 Hz, fue posible alcanzar soluciones fijas en un tiempo menor para 10 combinaciones GNSS. En la Figura 4.12 se observan los desplazamientos verticales medidos a partir de diferentes combinaciones GNSS y muestreados a 5 Hz. Es importante mencionar que la componente vertical en las mediciones GNSS es la que presenta la menor precisión (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Entonces, cualquier alteración en la geometría de los satélites, señales débiles u obstrucciones en la señal puede alterar significativamente la precisión. La combinación G+R+E+C fue la que presentó el peor rendimiento debido al cambio del DOP (dilución de la precisión) que ocasionaban los satélites BeiDou. Además, E, G, R+E+C y R+E fueron las combinaciones con el mejor rendimiento al ser capaz de detectar el cambio en posicionamiento de 5 mm. También, G y E son las constelaciones bases para cualquier combinación GNSS, por eso, los desplazamientos detectados por esas constelaciones fueron las que obtuvieron el mayor porcentaje de éxito.



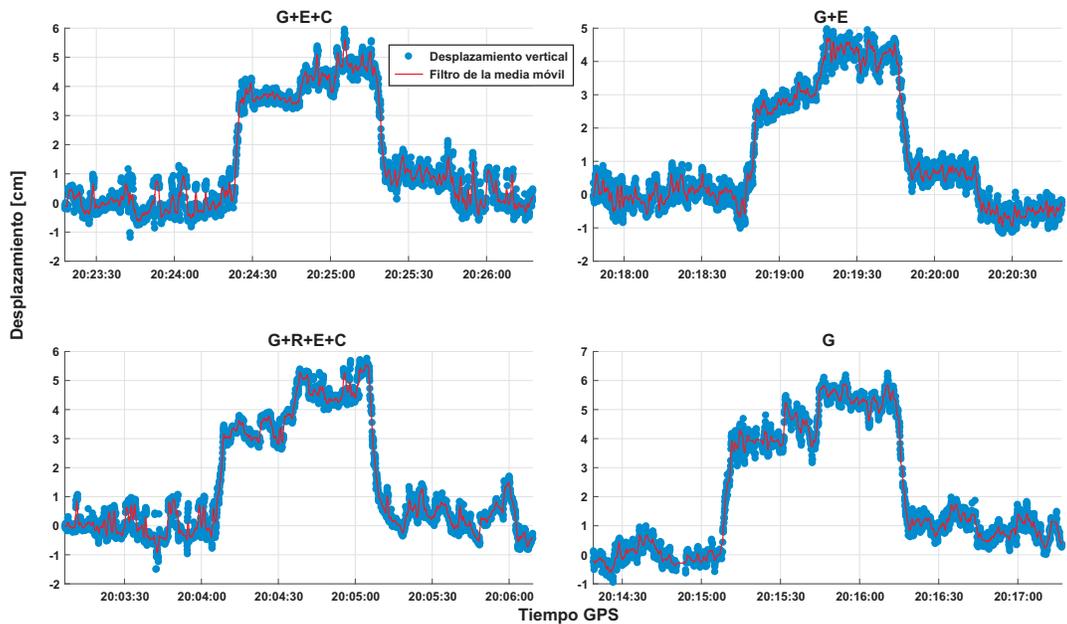
**Figura 4.12:** Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 5 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical.

En el caso de la frecuencia de muestreo de 10 Hz, solamente 6 combinaciones GNSS alcanzaron soluciones fijas en menos de 60 segundos. El aumento en la frecuencia de muestreo más allá de los 5 Hz ocasiona una mayor inestabilidad en las soluciones tal como se observa en las Figuras 4.13 y 4.14 correspondientes a las frecuencias de muestreo 10 y 20 Hz, respectivamente. E fue la combinación con mejor rendimiento en la frecuencia de muestreo de 10 Hz. Por otro lado, solamente 4 combinaciones GNSS alcanzaron soluciones fijas para la frecuencia de 20 Hz. Las series temporales de las cuatro combinaciones contienen mayores errores sistemáticos. Obtener posicionamiento a 20 Hz con equipo GNSS de bajo costo es muy costoso para el hardware del receptor, también, el flujo de datos es mayor y es necesario tener cuidado con la velocidad de transferencia, ya sea por parte del receptor de referencia o por el móvil.

La Figura 4.15 resume el porcentaje de detección de los movimientos simulados manualmente para las cuatro frecuencias de muestreo. La frecuencia de muestreo de 5 Hz obtuvo un número mayor de combinaciones GNSS capaces de detectar los movimientos verticales, sin embargo, G+E fue la única combinación en alcanzar porcentajes mayores al 90 % para los movimientos simulados. El resto de las combinaciones alcanza un porcentaje alto en detectar uno o dos movimientos solamente. En la frecuencia de muestreo de 1 Hz, G+E alcanzó más del 70 % para los cuatro movimientos. Nuevamente, G+E para las frecuencia de muestreo de 10 y 20 Hz fue la combinación en alcanzar los porcentajes de éxito más altos, sin embargo, no fue posible detectar el movimiento de los 5 mm. Esto es debido a que la oscilación de la serie temporal de estas frecuencias es de aproximadamente 5 mm.



**Figura 4.13:** Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 10 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical.



**Figura 4.14:** Movimientos verticales simulados detectados a partir de una frecuencia de muestreo de 20 Hz. Los puntos azules representan las soluciones RTK y la línea roja es el suavizado de la serie temporal de la componente vertical.

Para el resto de las combinaciones GNSS evaluadas, el porcentaje de éxito en detectar

los movimientos es bajo y en algunos casos solo detectan 1 movimiento. Las mediciones a partir de una sola constelación no son capaces de alcanzar porcentajes altos, lo que significa que en RTK la disponibilidad de observaciones multi-constelación es el principal causante de la alta precisión alcanzada por este método. Es bien sabido que la constelación GPS y Galileo son las de mayor número de satélites disponibles en México. Por lo cual, en las soluciones RTK son las que mayor aporte tienen. Tal como se observa en la detección de desplazamientos verticales de hasta 5 mm.

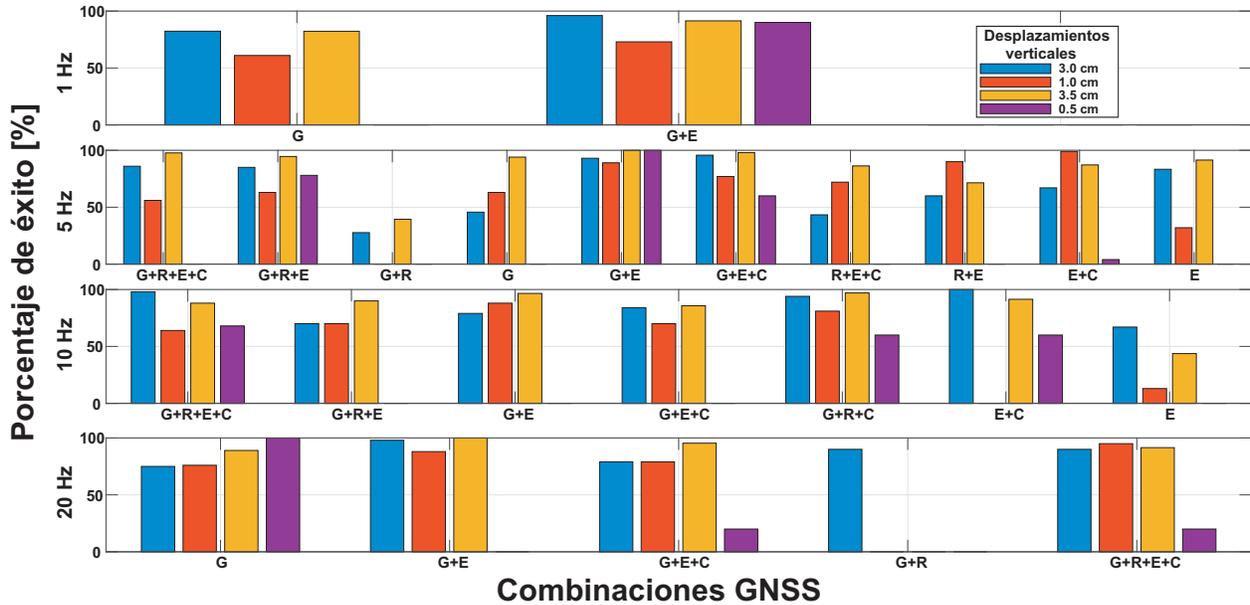


Figura 4.15: Porcentaje de error en la detección de desplazamientos verticales para diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo.

Por otro lado, en la Tabla 4.3 se encuentra la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de la detección de cada desplazamiento acumulado simulado a partir de las cuatro frecuencias de muestreo. La combinación G+E muestreada a 5 Hz alcanzó una media de  $2.8 \pm 0,3$  cm en detectar 3 cm. El desplazamiento de 4 cm acumulado (3+1 cm) se detectó con una media de  $4.07 \pm 0,2$  cm. Los 0.5 cm fueron detectados con una media de  $0.54 \pm 0,25$  cm. Estos indicadores estadísticos demuestran que la frecuencia de muestreo de 5 Hz y la combinación de las constelaciones G+E representan la opción más precisa para detectar desplazamientos verticales con una precisión menor a los 3 mm. También, se encontró que para otras combinaciones GNSS y frecuencia de muestreo es posible detectar desplazamientos con un éxito alto, pero con una precisión baja, por ejemplo: la combinación E+C muestreada a 5 Hz fue capaz de detectar el desplazamiento vertical simulado de 3 cm con un éxito cercano al 100 % pero con una precisión cercana a los 6 mm.

**Tabla 4.3:** Media y desviación estándar de la detección de los desplazamientos verticales acumulados simulados.

Frecuencia de muestreo	Combinaciones GNSS	Desplazamientos verticales acumulados en cm									
		0		3		4		0.5		0	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1 Hz	G+E	0	0.17	2.5	0.73	3.46	0.23	0.48	0.33	-0.16	0.12
	G	0	0.27	2.39	0.29	2.7	0.22	0.34	0.40	-0.95	0.34
5 Hz	E+C	-0.36	0.58	3.32	0.58	3.8	0.8	0	0.6	-1.3	0.62
	E	0	0.3	4.26	0.21	5.75	0.28	1.93	0.20	0.63	0.30
	G+E+C	0	0.5	2.8	0.4	3.6	0.28	0.59	0.33	-0.2	0.25
	G+E	0	0.22	2.8	0.3	4.07	0.2	0.54	0.25	0.3	0.2
	G+R+E+C	0.63	0.95	2.6	0.27	2.97	0.32	-0.28	0.21	-0.24	0.25
	G+R+E	0.16	0.47	2.21	0.40	2.5	0.33	-0.28	0.25	-0.89	0.28
	G+R	0	0.75	5.3	1.45	8.39	0.89	3.85	0.71	3.76	0.39
	G	-0.5	1.4	4.59	0.72	6.33	1.02	2.46	0.82	-3.07	0.81
	R+E+C	0	0.24	4.45	0.32	6.15	0.16	1.99	0.21	0.7	0.35
	R+E	0	0.28	4.27	0.30	5.40	0.20	0.91	0.20	-0.04	0.18
10 Hz	E	0	0.24	4.26	0.21	5.91	0.25	0.61	0.22	-0.43	0.33
	G+E+C	0	0.38	3.53	0.19	4	0.6	1.97	0.66	2.45	2.66
	G+E	0	0.51	3.7	0.26	4.78	0.27	1.12	1.25	-0.94	0.46
	G+R+C	0	0.21	3.24	0.31	4	0.33	0.4	0.25	-0.07	0.21
	G+R+E+C	0.14	0.57	2.99	0.29	3.48	0.38	0.04	0.36	-0.07	0.3
	G+R+E	0	0.69	3.80	0.24	4.63	0.18	0.71	0.16	-0.66	0.22
20 Hz	G+E+C	0	0.41	3.62	0.20	4.56	0.41	0.97	0.30	0.19	0.47
	G+E	0	0.33	2.78	0.27	4.28	0.32	0.65	0.22	-0.53	0.23
	G+R+E+C	0	0.42	3.3	0.33	4.76	0.43	0.45	0.36	0.22	0.62
	G	0	0.33	4.17	0.49	5.41	0.31	1.17	0.31	0.79	0.34

### 4.5.3. Prueba estacionaria

Las series temporales de los desplazamientos 3D estacionarios muestreados a 1, 5, 10 y 20 Hz para las combinaciones E, G+E y G se ilustran en la Figura 4.16a, 4.16b, 4.16c y 4.16d, respectivamente. Es notable visualmente que las series temporales muestreadas a 1 Hz son las que presentan la mayor estabilidad en las tres componentes ENU (Ver Figura 4.16a) para las combinaciones E, G+E y G. La combinación E alcanzó el RMSE más bajo, con valores de 0.07, 0.05 y 0.86 cm para las componentes Este, Norte y U (vertical), respectivamente. Como es bien sabido, la componente horizontal es más precisa que la vertical (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). También, la estabilidad en las componentes Este y Norte es menor a 1 mm lo cual resalta la capacidad de la técnica RTK con equipos GNSS de bajo costo. Además, la constelación Galileo representa una opción alternativa potencial a la GPS debido a las nuevas señales civiles que se han incorporado mejorando drásticamente la precisión (Luo et al., 2021). También, las desviaciones estándar se calcularon para cuantificar el nivel de ruido en las series temporales, las cuales se ilustran en la figura 4.17. Como se muestra en la figura 4.17, se generaron los histogramas de las series temporales y se ajusta la función de densidad de probabilidad normal. El ruido de la frecuencia de muestreo 1 Hz tiene un mejor ajuste visual con la distribución normal, y para 5, 10 y 20 Hz la combinación G muestra el mejor ajuste.

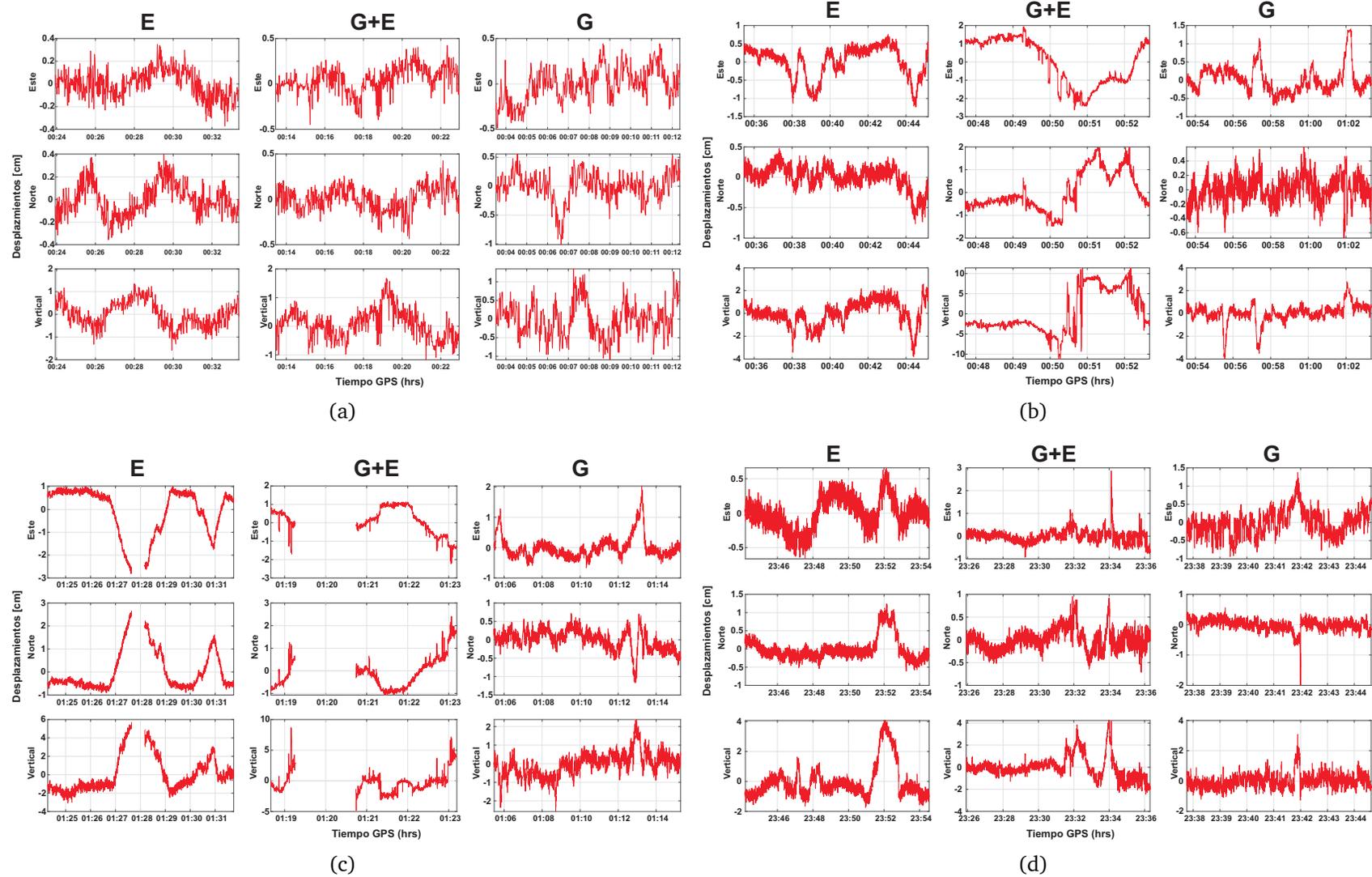


Figura 4.16: Ruido en las series temporales multi-GNSS muestreadas a: (a) 1Hz, (b) 5 Hz, (c) 10 Hz y (d) 20 Hz.

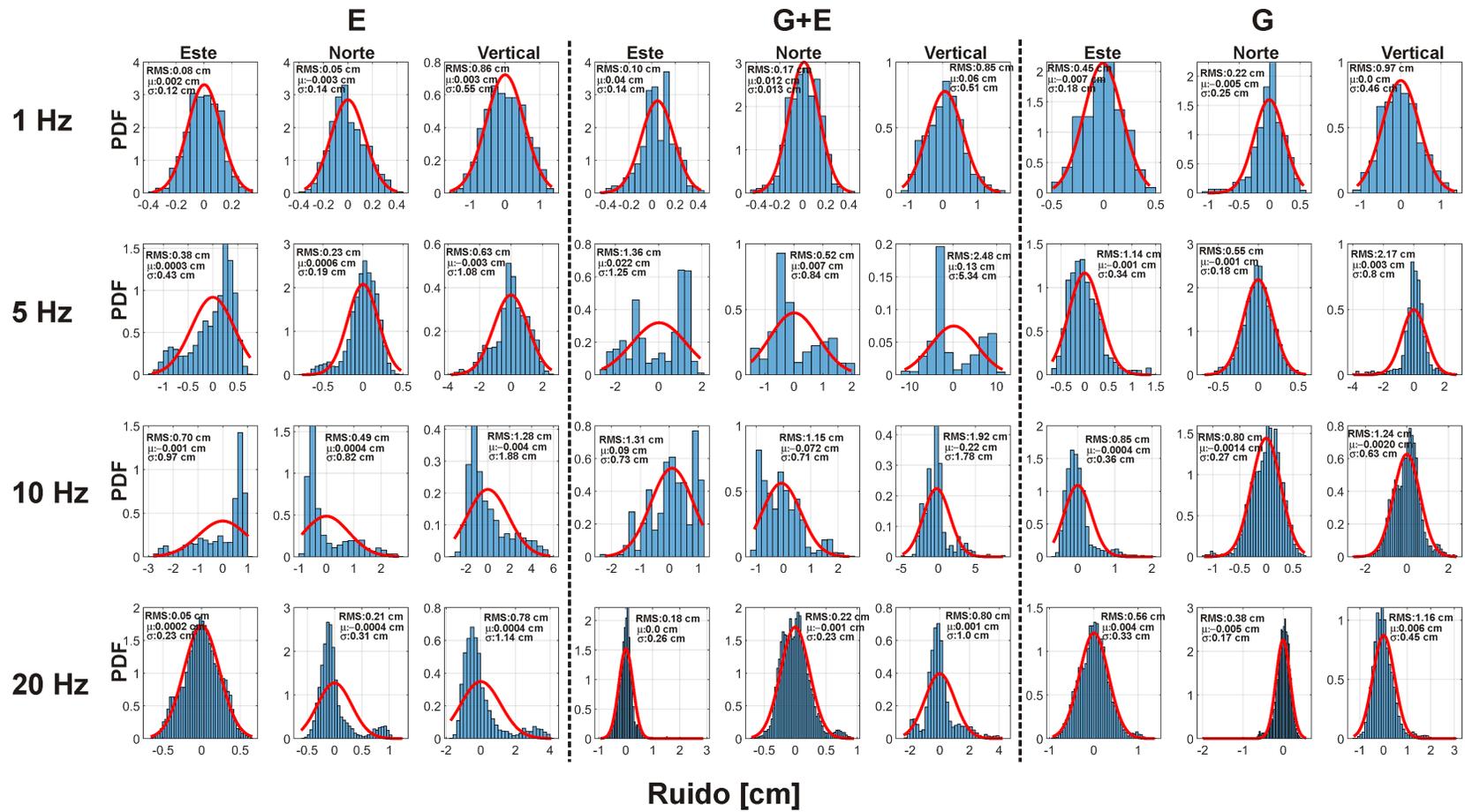


Figura 4.17: Histogramas de errores de las series temporales ajustadas a una distribución normal para las combinaciones GNSS E, G+E y G.

En la Tabla 4.4 se puede encontrar la información general que describe el nivel de ruido para la frecuencia de muestreo de 1 Hz y combinaciones GNSS.

**Tabla 4.4:** Nivel de ruido para las tres componentes muestreadas a 1 Hz.

Combinación GNSS	# de satélites promedio	Tiempo converger (segundos)	% de ambigüedad	Evaluación del ruido de las series temporales en cm								
				Este			Norte			Vertical		
				$\mu$	$\sigma$	RMSE	$\mu$	$\sigma$	RMS	$\mu$	$\sigma$	RMSE
G	8	8	89.2	-0.007	0.18	0.45	-0.005	0.25	0.22	0	0.46	0.97
E	8	42	92.7	0.002	0.12	<b>0.08</b>	0	0.14	<b>0.05</b>	0.003	0.55	<b>0.86</b>
G+E	16	32	94.9	0.04	0.14	0.10	0.012	0.13	0.17	0.06	0.51	<b>0.85</b>

En la Tabla 4.4 se encuentra el número promedio de los satélites observados para cada combinación GNSS, y es importante resaltar que la combinación G y E presentaron el mismo número de satélites. Sin embargo, E mostró mejor rendimiento que G en el porcentaje de ambigüedades resueltas y el RMSE. La diferencia entre las estadísticas básicas para las 3 combinaciones GNSS son bastante pequeñas que para fines prácticos se pueden considerar similares. Por otro lado, G alcanzó un tiempo en fijar ambigüedades 525 % más rápido que E. Para este caso, el tiempo en fijar ambigüedades no se consideró como un indicador de precisión debido al largo tiempo (10 minutos) que tardo cada prueba.

## 4.6. Discusión

La técnica de posicionamiento GNSS en tiempo real más conocida y precisa es la técnica cinemática en tiempo real (RTK), donde se utilizan dos receptores GNSS para determinar el valor de ambigüedad entero en tiempo real y obtener precisión en un nivel centimétrico/subcentimétrico. Actualmente, existen redes de estaciones geodésicas permanentes que proporcionan correcciones diferenciales denominadas redes RTK (NRTK). Estas redes RTK están gestionadas por centros de control, que operan y transmiten correcciones diferenciales al receptor móvil. Se han llevado a cabo diferentes estudios donde evalúan el rendimiento de la técnica RTK utilizando receptores GNSS de bajo costo (Bellone et al., 2016; Dabove y Di Pietra, 2019; Dabove et al., 2020; Janos y Kuras, 2021). Sin embargo, estos trabajos reportados dependen de la infraestructura de una red RTK y sus configuraciones, limitándose a la frecuencia de muestreo definida por la red y las correcciones multi-GNSS. Además, en algunos países estas redes son privadas y el usuario debe pagar una membresía costosa para poder recibir correcciones. Por lo tanto, en este Capítulo 4 se aborda una estrategia que permite configurar la frecuencia de muestreo y las correcciones multi-GNSS a partir del establecimiento de una estación de referencia de bajo costo para soluciones RTK.

Si bien, las precisiones alcanzadas en este estudio son similares a las reportadas en otros trabajos, pero manteniendo la esencia de bajo costo. En Dabove (2019) reportaron precisiones centimétricas utilizando equipo de bajo costo de una frecuencia y estableciendo una estación maestra de bajo costo. No establecieron el valor RMSE como indicador de precisión y solo evaluaron las diferencias de las coordenadas de referencia y las estimadas

con la media y desviación estándar. Tampoco, utilizaron combinaciones GNSS, diferentes frecuencias de muestreo y ángulos de elevación. Por lo cual, el estudio reportado en el presente Capítulo 4 está más completo que todos los estudios reportados en la literatura científica. Además, las precisiones del posicionamiento reportadas en este Capítulo 4 (nivel milimétrico) son más precisas que las alcanzadas por [Dabove \(2019\)](#).

Por otro lado, el rendimiento del receptor ZED-F9P equipado con la antena ANN-MB-00 fue alto al detectar desplazamientos horizontales y verticales inferiores a 1 cm en tiempo real, siendo mejores que las reportadas por [Bellone et al. \(2016\)](#). Estas precisiones garantizan su aplicación en la detección de desplazamientos semi-estáticos en puentes. Además, el nivel de ruido de las series temporales multi-GNSS medidas en modo RTK por el receptor GNSS de bajo costo fue similar al del receptor GNSS de grado geodésico PolarRx5s-Septentrio evaluado en [Qu et al. \(2022\)](#).

## 4.7. Conclusiones y recomendaciones

En este Capítulo 4, se evaluó el rendimiento de los receptores GNSS de bajo costo ZED-F9P en combinación con antenas de parche ANN-MB-00 en el posicionamiento tridimensional, en la detección de desplazamientos horizontales y verticales en tiempo real considerando combinaciones GNSS, diferentes frecuencias de muestreo y ángulos de elevación. Además, también se estudió el nivel de ruido en las series temporales estacionarias. Los resultados en este Capítulo 4 llevan a las siguientes conclusiones:

### *Posicionamiento tridimensional estático*

- El receptor GNSS de bajo costo en combinación con una antena GNSS de bajo costo alcanzó una alta precisión posicional con valores RMSE de 0.22, 0.5 y 0.5 cm para la componente Este, Norte y Vertical, respectivamente, aplicando la estrategia de posicionamiento RTK.
- La combinación G+R+E mostró mejor rendimiento posicional que G+R+E+C, indicando que la constelación BeiDou no tiene un aporte a la mejora de la precisión y se recomienda ignorarla.
- La precisión posicional alcanzada es bastante buena y aceptada en aplicaciones como el monitoreo geodésico donde las precisiones milimétricas son requeridas.

### *Desplazamientos horizontales*

- La frecuencia de muestreo de 5 Hz alcanzó el mejor rendimiento en seguir la trayectoria circular con un RMSE general menor a 1 cm en todas las combinaciones GNSS establecidas.
- Las combinaciones G+R+E+C, R+E+C y R+E obtuvieron los mejores valores de RMSE de 5, 4.4 y 4.4 mm, respectivamente.

- La combinación G+R+E+C obtuvo el menor tiempo en alcanzar soluciones fijas de ambigüedad, con 5 segundos, caso contrario, G+C fue la combinación con el mayor tiempo, 60 segundos.
- Las frecuencias de muestreo de 1 y 10 Hz presentaron el peor rendimiento con valores de RMSE de hasta 4 cm.
- Las mediciones GNSS en tiempo real con frecuencias de muestreo altas presentan un mayor ruido, por lo cual, la trayectoria circular es definida con mayor inestabilidad con respecto a frecuencias de muestreo menores.
- El tiempo en fijar la primera solución y el porcentaje de ambigüedades resueltas está directamente relacionado con el número de satélites disponibles durante la medición GNSS.
- La constelación GLONASS y BeiDou no tienen un impacto en el aumento de la precisión.
- GPS y Galileo son las constelaciones base para todas las combinaciones GNSS, es decir, son las constelaciones que mayor aporte tienen en la precisión final.
- El ángulo de elevación de 12° fue el que alcanzó el mejor rendimiento, con un tiempo menor en fijar ambigüedades para las combinaciones GNSS.

#### *Desplazamientos verticales*

- La frecuencia de muestreo de 5 Hz fue la que registró los desplazamientos verticales con mayor éxito. También, fue la que logró el mayor número de combinaciones GNSS en alcanzar soluciones fijas (10/15).
- La frecuencia de muestreo de 1 Hz fue la que presentó el mayor tiempo en alcanzar soluciones fijas, limitando únicamente a dos combinaciones GNSS (G y G+E).
- La combinación G+E fue la que mejor resultado alcanzó en las 4 frecuencias de muestreo evaluadas.
- Ignorando las combinaciones R, C y R+C, con una frecuencia de muestreo de 5 Hz, G+R fue la combinación con el menor porcentaje de éxito en la detección de desplazamientos verticales.

#### *Ruido de las series temporales multi-GNSS*

- La frecuencia de muestreo de 1 Hz fue la que presentó el menor ruido, con desviaciones estándar de 0.12, 0.14 y 0.86 cm para las componentes Este, Norte y vertical, respectivamente, utilizando mediciones GNSS únicamente con la constelación Galileo. Sin embargo, G y G+E también alcanzaron desviaciones estándar menores a 1 cm.

- Las frecuencias de muestreo de 5 y 10 Hz fueron las que mayor ruido presentaron, con desviaciones estándar mayor a 1 cm en la componente horizontal y hasta 5 cm en la vertical.
- Las series temporales únicamente de GPS presentaron el menor ruido en las frecuencias de muestreo de 5, 10 y 20 Hz, y para 1 Hz fue Galileo.

#### *Generales*

Los receptores GNSS de bajo costo son capaces de detectar desplazamientos verticales de 5 mm en tiempo real, y horizontales de 4 mm. También, las series temporales multi-GNSS estáticas presentan desviaciones estándar del ruido en las tres componentes menores a 1 cm. En este Capítulo 4 se demostró el potencial de los receptores GNSS de bajo costo para aplicaciones de monitoreo de la salud estructural en puentes, principalmente en pruebas de carga estáticas.

# Referencias

- AASTHO (2010). Lrfd bridge design specification, 1ra ed., american association of state highway and transportation officials.
- Alkan, R. M., Erol, S., İlçi, V., y Ozulu, İ. M. (2020). Comparative analysis of real-time kinematic and ppp techniques in dynamic environment. *Measurement*, 163:107995.
- Ashkenazi, V., Dodson, A., Moore, T., y Roberts, G. (1996). Real time otf gps monitoring of the humber bridge. *Surveying World*, 4(4):26–28.
- Ashkenazi, V. y Roberts, G. (1997). Experimental monitoring of the humber bridge using gps. In *Proceedings of the institution of civil engineers-civil engineering*, volume 120, pages 177–182. Thomas Telford-ICE Virtual Library.
- Aykut, N. O., Gülal, E., y Akpınar, B. (2015). Performance of single base rtk gnss method versus network rtk. *Earth Sciences Research Journal*, 19(2):135–139.
- Bellone, T., Dabove, P., Manzano, A., y Taglioretti, C. (2016). Real-time monitoring for fast deformations using gnss low-cost receivers. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2):458–470.
- BKG (2023). Ntrip - networked transport of rtcm via internet protocol. <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/about>. [Web; accedido el 28-07-2023].
- Brown, C., Karuma, R., Ashkenazi, V., Roberts, G., y Evans, R. (1999). Monitoring of structures using the global positioning system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-structures and Buildings*, 134(1):97–105.
- Carrión, F. J., Quintana, J. A., y Crespo, S. E. (2017). Shm of a stayed bridge during a structural failure, case study: the rio papaloapan bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2):139–151.
- Chen, Q., Jiang, W., Meng, X., Jiang, P., Wang, K., Xie, Y., y Ye, J. (2018). Vertical deformation monitoring of the suspension bridge tower using gnss: A case study of the forth road bridge in the uk. *Remote Sensing*, 10(3):364.
- Dabove, P. (2019). The usability of gnss mass-market receivers for cadastral surveys considering rtk and nrtk techniques. *Geodesy and Geodynamics*, 10(4):282–289.

- Dabove, P. y Di Pietra, V. (2019). Towards high accuracy gnss real-time positioning with smartphones. *Advances in Space Research*, 63(1):94–102.
- Dabove, P., Di Pietra, V., y Piras, M. (2020). Gnss positioning using mobile devices with the android operating system. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4):220.
- Dabove, P. y Manzano, A. M. (2014). Gps & glonass mass-market receivers: positioning performances and peculiarities. *Sensors*, 14(12):22159–22179.
- Everett, T., Taylor, T., Lee, D.-K., y Akos, D. M. (2022). Optimizing the use of rtklib for smartphone-based gnss measurements. *Sensors*, 22(10).
- Garrido-Carretero, M. S., Borque-Arancón, M. J., Ruiz-Armenteros, A. M., Moreno-Guerrero, R., Gil-Cruz, A. J., et al. (2019). Low-cost gnss receiver in rtk positioning under the standard iso-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement*, 137:168–178.
- 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.
- Gómez-Martínez, R., Sánchez-García, R., Escobar-Sánchez, J. A., Arenas-García, L. M., Mendoza-Salas, M. A., y Rosales-González, O. N. (2021). Monitoring two cable-stayed bridges during load tests with fiber optics. *Structures*, 33:4344–4358.
- He, Z., Tang, W., Yang, X., Wang, L., y Liu, J. (2014). Use of ntrip for optimizing the decoding algorithm for real-time data streams. *Sensors*, 14(10):18878–18885.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Collins, J. (2012). *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Janos, D. y Kuras, P. (2021). Evaluation of low-cost gnss receiver under demanding conditions in rtk network mode. *Sensors*, 21(16):5552.
- Kim, H., Hyun, C.-U., Park, H.-D., y Cha, J. (2023). Image mapping accuracy evaluation using uav with standalone, differential (rtk), and ppp gnss positioning techniques in an abandoned mine site. *Sensors*, 23(13):5858.
- Kim, K., Choi, J., Chung, J., Koo, G., Bae, I.-H., y Sohn, H. (2018). Structural displacement estimation through multi-rate fusion of accelerometer and rtk-gps displacement and velocity measurements. *Measurement*, 130:223–235.
- Kim, K. y Sohn, H. (2020). Dynamic displacement estimation for long-span bridges using acceleration and heuristically enhanced displacement measurements of real-time kinematic global navigation system. *Sensors*, 20(18):5092.
- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., y ten Veldhuis, M.-C. (2020). High quality zenith tropospheric delay estimation using a low-cost dual-frequency receiver and relative antenna calibration. *Remote Sensing*, 12(9).

- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., y ten Veldhuis, M.-C. (2022). A field calibration solution to achieve high-grade-level performance for low-cost dual-frequency gnss receiver and antennas. *Sensors*, 22(6).
- 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.
- Luo, X., Schaufler, S., Branzanti, M., y Chen, J. (2021). Assessing the benefits of galileo to high-precision gnss positioning–rtk, ppp and post-processing. *Advances in Space Research*, 68(12):4916–4931.
- Martín, A., Anquela, A., Dimas-Pagés, A., y Cos-Gayón, F. (2015). Validation of performance of real-time kinematic ppp. a possible tool for deformation monitoring. *Measurement*, 69:95–108.
- Meng, X., Dodson, A., y Roberts, G. W. (2007). Detecting bridge dynamics with gps and triaxial accelerometers. *Engineering Structures*, 29(11):3178–3184.
- Meng, X., Xie, Y., Bhatia, P., Sowter, A., Psimoulis, P., Colford, B., Ye, J., Skicko, M., Dimaiuro, M., Ge, M., et al. (2016). Research and development of a pilot project using gnss and earth observation (geoshm) for structural health monitoring of the forth road bridge in scotland.
- 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.
- NGS (2023). National geodetic survey-antenna calibrations. <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/?manu=C-Nav>. [Web; accedido el 16-08-2023].
- Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., y Stiros, S. (2006). Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with gps: Accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, 28(10):1471–1482.
- Oku Topal, G. y Akpınar, B. (2022). High rate gnss kinematic ppp method performance for monitoring the engineering structures: Shake table tests under different satellite configurations. *Measurement*, 189:110451.
- Paziewski, J. y Wielgosz, P. (2017). Investigation of some selected strategies for multi-gnss instantaneous rtk positioning. *Advances in Space Research*, 59(1):12–23.
- Powell, G. H. (2008). Displacement-based seismic design of structures. *Earthquake spectra*, 24(2):555–557.
- Qu, X., Shu, B., Ding, X., Lu, Y., Li, G., y Wang, L. (2022). Experimental study of accuracy of high-rate gnss in context of structural health monitoring. *Remote Sensing*, 14(19):4989.

- Roberts, G., Meng, X., y Dodson, A. (2000). Structural dynamic and deflection monitoring using integrated gps and triaxial accelerometers. In *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, pages 59–68.
- Robustelli, U., Cutugno, M., y Pugliano, G. (2023). Low-cost gnss and ppp-rtk: Investigating the capabilities of the u-blox zed-f9p module. *Sensors*, 23(13):6074.
- Takasu, T. (2013). Rtklib ver. 2.4. 2 manual. *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*, 29:49.
- Takasu, T., Kubo, N., y Yasuda, A. (2007). Development, evaluation and application of rtklib: a program library for rtk-gps. In *GPS/GNSS symposium*, pages 213–218.
- Takasu, T. y Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost rtk-gps receiver with an open source program package rtklib. In *International symposium on GPS/GNSS*, volume 1. International Convention Center Jeju Korea.
- Vazquez-Becerra., G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the juarez bridge using gps technology. *Measurement*, 110:146 – 153.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Martinez-Felix, C. A., Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Melgarejo-Morales, A., y Padilla-Velazco, J. (2022). Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on gps observations. *Advances in Space Research*, 69(1):319–330.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Padilla-Velazco, J., Gaxiola-Camacho, J. R., y Vázquez-Becerra, G. E. (2023a). Evaluation and analysis of the accuracy of open-source software and online services for ppp processing in static mode. *Remote Sensing*, 15(8).
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Ruiz-Armenteros, A. M., de Lacy, M. C., Gaxiola-Camacho, J. R., Anaya-Díaz, M., y Vázquez-Becerra, G. E. (2023b). Risk evaluation of the sanalona earth-fill dam located in mexico using satellite geodesy monitoring and numerical modeling. *Remote Sensing*, 15(3):819.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2020). Implementation of ppp-gnss measurement technology in the probabilistic shm of bridge structures. *Measurement*, page 108677.
- Wielgocka, N., Hadas, T., Kaczmarek, A., y Marut, G. (2021). Feasibility of using low-cost dual-frequency gnss receivers for land surveying. *Sensors*, 21(6).
- Wiśniewski, B., Bruniecki, K., y Moszyński, M. (2013). Evaluation of rtklib's positioning accuracy using low-cost gnss receiver and asg-eupos. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(1):79–85.

- Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G., Böder, V., Hankemeier, P., et al. (1996). Reducing distance dependent errors for real-time precise dgps applications by establishing reference station networks. In *PROCEEDINGS OF ION GPS*, volume 9, pages 1845–1852. Institute of Navigation.
- Xi, R., He, Q., y Meng, X. (2021). Bridge monitoring using multi-gnss observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*, 168:108303.
- Xi, R., Jiang, W., Xuan, W., Xu, D., Yang, J., He, L., y Ma, J. (2023). Performance assessment of structural monitoring of a dedicated high-speed railway bridge using a moving-base rtk-gnss method. *Remote Sensing*, 15(12):3132.
- Xiong, C., Yu, L., y Niu, Y. (2019). Dynamic parameter identification of a long-span arch bridge based on gnss-rtk combined with ceemdan-wp analysis. *Applied Sciences*, 9(7):1301.
- Yigit, C. O., Bezcioglu, M., Ilci, V., Ozulu, I. M., Alkan, R. M., Dindar, A. A., y Karadeniz, B. (2022). Assessment of real-time ppp with trimble rtx correction service for real-time dynamic displacement monitoring based on high-rate gnss observations. *Measurement*, 201:111704.
- Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Anil Dindar, A., Bezcioglu, M., y Tiryakioglu, I. (2021). Investigating performance of high-rate gnss-ppp and ppp-ar for structural health monitoring: Dynamic tests on shake table. *Journal of Surveying Engineering*, 147(1):05020011.
- Zhou, Q., Li, Q.-S., Han, X.-L., Lu, B., Wan, J.-W., y Xu, K. (2023). Improvement of gps displacement measurement accuracy for high-rise buildings by machine learning. *Journal of Building Engineering*, page 107581.



# Capítulo 5

## Evaluación de la calidad de observaciones GNSS y análisis del rendimiento en posicionamiento de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 para el Monitoreo de Salud Estructural

### 5.1. Introducción

Los teléfonos inteligentes se han vuelto una herramienta indispensable en la vida de las personas a nivel mundial, y los servicios GPS/GNSS que proporcionan los teléfonos inteligentes han beneficiado actualmente en la vida humana (Aggrey et al., 2020; Chen et al., 2019; Mahato et al., 2023; Tunalioglu et al., 2022). En 1999, la empresa de producción de teléfonos *Benefon Esc!* lanzó comercialmente el primer teléfono GPS disponible y desde entonces grandes cambios se han presentado (Robustelli et al., 2019). *Ericsson Mobility Report* en su edición de 2018 menciona que 4,800 millones de teléfonos inteligentes con chips GNSS integrados, están activos en todo el mundo (Ericsson, 2018). Desde 1999 hasta mayo de 2016, los observables de pseudorange, Doppler y fase portadora no estaban disponibles para los desarrolladores, ya que estos datos estaban protegidos por los fabricantes de chips, sin embargo, la situación cambió cuando en la conferencia anual del 2016 Google anunció que las mediciones GNSS estarían disponibles para las aplicaciones en el sistema operativo Android (Chen et al., 2019; Robustelli et al., 2019).

Después del anuncio de Google, los investigadores comenzaron a evaluar la calidad de las observaciones GNSS recopiladas por teléfonos inteligentes. Banville y Van Diggelen (2016) analizaron los datos GNSS recopilados por un teléfono inteligente Samsung Galaxy S7 que traía integrado un chip Broadcom 4774 GNSS, y demostraron su aplicación en una construcción de ingeniería, examinando la calidad de los datos con el fin de obtener información del posicionamiento. Los resultados que encontraron demostraron que la calidad de la antena y el ciclo de trabajo del receptor GNSS degradan la precisión. En el mismo

año, [Yoon et al. \(2016\)](#) aplicaron la corrección diferencial de los sistemas globales de navegación satelital a un teléfono inteligente sin acceder a datos sin procesar, y los resultados mostraron una mejora en la precisión de aproximadamente un 60 %. El estudio reportado por [Gim y Park \(2017\)](#), presenta una prueba de posicionamiento de pseudodistancia utilizando la tableta Nexus 9, y los resultados muestran que los errores de posicionamiento en la componente horizontal y vertical fueron de 3.05 y 3.82 m, respectivamente. Por otro lado, utilizando la misma tableta, [Realini et al. \(2017\)](#) realizaron un experimento de posicionamiento de diferencias dobles de fase portadora de frecuencia única y considerando diferentes estaciones de referencia, lograron obtener precisiones en el posicionamiento de 20 cm en 20 minutos. [Sikirica et al. \(2017\)](#) llevaron a cabo una prueba de posicionamiento de puntos de pseudodistancia en un lugar con condiciones favorables para la medición con un teléfono inteligente Huawei P10, y los resultados que obtuvieron fueron de aproximadamente 10 m en las direcciones N y E, y de 20 m para la dirección U.

Hasta mayo de 2018, los chips integrados en los teléfonos inteligentes eran de frecuencia única, en algunos casos eran múltiples constelaciones, pero la frecuencia única limitaba el rendimiento porque el error ionosférico no se podía mitigar, solamente se estimaba utilizando un modelo de frecuencia única como el de Klobuchar. Esta situación mejoró el 31 de mayo de 2018, cuando la empresa Xiaomi lanzó el primer teléfono inteligente GNSS de doble frecuencia del mundo con el chipset *Broadcom BCM47755* (Xiaomi mi 8) ([Chen et al., 2019](#); [Robustelli et al., 2019](#); [Wu et al., 2019](#)). *Broadcom BCM47755* es un chip GNSS de doble frecuencia, que es capaz de rastrear GPS (L1, C/A, L5), GLONASS (L1), BeiDou (B1), QZSS (L1, L2), Galileo (E1, E5a) ([Wu et al., 2019](#)). El Xiaomi mi 8 representó uno de los avances y desarrollos más importantes en el área del posicionamiento GNSS al nivel de decímetro con un teléfono inteligente. Uno de los primeros trabajos de evaluación del Mi 8, fue el llevado a cabo por el equipo FLAMINGO conformado por investigadores de la universidad de Nottingham, quienes evaluaron la calidad de las mediciones GNSS del teléfono inteligente Xiaomi mi 8, donde consideraron que la fase del operador no se vio afectada por el ciclo de trabajo y que la calidad de las observaciones de la frecuencia L5/E5 son mejor que la frecuencia L1/E1 ([Chen et al., 2019](#)).

Diferentes estudios se realizaron con mediciones de doble frecuencia del teléfono inteligente Xiaomi mi 8, como el descrito en [Wu et al. \(2019\)](#) que recopiló las observaciones del teléfono inteligente y llevó a cabo una prueba de posicionamiento PPP. Dos experimentos fueron realizados, utilizando datos de doble frecuencia y de única frecuencia, los errores de posicionamiento de frecuencia dual fueron 21.8, 4.1 y 11.0 cm para las direcciones E, N y U, respectivamente, y el tiempo de convergencia para 1 m fue 102 min. Para el caso de PPP con frecuencia única, el tiempo de convergencia para alcanzar errores menores a 1 m para las direcciones E y N fue poco más de 100 min. Se han desarrollado un gran número de estudios sobre la calidad de las observaciones GNSS de diferentes teléfonos inteligentes ([Altuntas y Tunalioglu, 2021](#); [Bahadur, 2022](#); [Dabove y Di Pietra, 2019](#); [Dabove et al., 2020](#); [Elmezayen y El-Rabbany, 2019](#); [Fortunato et al., 2019](#); [Lachapelle y Gratton, 2019](#); [Paziewski et al., 2021](#); [Realini et al., 2017](#); [Robustelli et al., 2021](#); [Specht et al., 2019](#); [Tomaščík y Varga, 2021](#); [Uradziński y Bakuła, 2020](#); [Wen et al., 2020](#); [Yi et al., 2021](#); [Zeng et al., 2022](#); [Zhang et al., 2018](#)).

No todos los teléfonos inteligentes pueden registrar datos crudos GNSS, en este sentido, se encuentra una lista de los teléfonos capaces de proporcionar mediciones crudas en el siguiente enlace <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss> . En este enlace también se puede encontrar la disponibilidad de constelaciones y la disponibilidad de las mediciones de fase, y todos los dispositivos deben ejecutar Android Nougat o posteriores versiones (Robustelli et al., 2019). Uno de los principales problemas a resolver para obtener un buen rendimiento del receptor GNSS del teléfono inteligente es el consumo de batería, esto debido a que diferentes proveedores implementan técnicas para mantener un bajo consumo de energía y la estrategia que más utilizan es el ciclo de trabajo: el receptor rastrea los datos GNSS durante 200 ms antes de apagarse durante 800 ms (Banville y Van Diggelen, 2016). Entonces, si no existe una continuidad de seguimiento, pueden ocurrir varios saltos de ciclo entre dos mediciones consecutivas, lo que limita el uso de técnicas de procesamiento como RTK-GNSS y PPP. Se han desarrollado apps para Android que son capaces de registrar mediciones GNSS crudas como: GnsLogger (GnsLogger, 2021), Geo ++RINEX Logger (Logger, 2021), rinexON (rinexON, 2021) y GNU Client (G-Nut, 2021). La aplicación GnsLogger fue desarrollada por Google junto con su código fuente en 2016, sin embargo, esta aplicación no permite guardar datos en formato RINEX, por lo cual, es necesario realizar alguna conversión. La aplicación Geo ++RINEX fue lanzada por la empresa Geo ++ en 2017. Geo ++RINEX proporciona directamente observables GNSS en formato RINEX, pero no proporciona datos de efemérides. La aplicación rinexON fue desarrollada por el equipo FLAMINGO a finales de junio de 2018, dicha aplicación proporciona directamente archivos de observación y navegación en formato RINEX 3.03 para el sistema Galileo, GPS y GLONASS.

Los teléfonos inteligentes que cuentan con un chip GNSS integrado les permite realizar mediciones de doble frecuencia representan una alternativa de aplicación para diferentes áreas de investigación. En Fortunato et al. (2019) se presentan dos aplicaciones diferentes para el Xiaomi Mi 8, ambas basadas en el enfoque variométrico y capaces de trabajar en tiempo real. Por otro lado, Elmezayen y El-Rabbany (2019) llevaron a cabo un estudio para determinar el desempeño de las mediciones del teléfono Xiaomi Mi 8 al ser procesadas con la técnica PPP en modo postprocesamiento y en tiempo real. La solución PPP logró una precisión de posicionamiento de nivel decimetro en el modo de postprocesamiento y el PPP en tiempo real se evaluó empleando el servicio en tiempo real NAVCAST obteniendo una precisión de posicionamiento de nivel decimetrico. Es bien sabido que uno de los parámetros más importantes en el método de procesamiento absoluto PPP es la resolución de ambigüedad entera, debido a esto, Wen et al. (2020) proponen una estrategia bastante novedosa para resolver ambigüedades en mediciones crudas de un teléfono Xiaomi Mi 8. Como resultado principal, se logró reemplazar la antena de parche del teléfono por una antena externa de orden geodésico Trimble Zephyr 2, y la señal GNSS de esta antena se dividió en dos ramas mediante un divisor, una se transmite al receptor Trimble NetR9 mientras que la otra es al modelo Mi 8. La antena externa fue alimentada principalmente por el receptor Trimble NetR9. Las soluciones alcanzadas lograron una precisión de nivel centimétrico y en comparación con las soluciones flotantes, las mejoras fueron de hasta un 61 %, 41 % y 48 %, para las componentes Este, Norte y Vertical, respectivamente. Existen

otros estudios donde utilizan un teléfono inteligente para evaluar diferentes fenómenos geofísicos (Fortunato et al., 2019). Sin embargo, los estudios orientados al monitoreo de la salud estructural son muy escasos, posiblemente debido a la precisión requerida en el SHM. Aun así, uno de los estudios más recientes es el llevado a cabo por Zeng et al. (2022), donde evalúan el posicionamiento cinemático en tiempo real y monitoreo de deformaciones utilizando un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. En esta investigación, se llevan a cabo un conjunto de mediciones sobre la azotea de un edificio de la universidad central sur en China, donde se instrumentó una estación de referencia de orden geodésico y la estación móvil, la cual fue el teléfono Xiaomi Mi 8. Se recopiló 5 horas de medición a un intervalo de muestreo de 1 segundo, los resultados de este experimento estuvieron en el orden de 1 y 2 cm para la componente horizontal y vertical, respectivamente. Por otro lado, también se diseñó un experimento que permitiera encontrar el desempeño en el monitoreo dinámico. Por lo tanto, sobre un dispositivo que simula deformación se fijó el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en posición vertical para garantizar una recepción adecuada de la señal. Este equipo puede moverse en las direcciones Este, Norte y Vertical y registrar el desplazamiento. El equipo fue desplazado una vez cada 30 minutos para simular la deformación dinámica. El desplazamiento horizontal se fijó en 2 cm por movimiento. Los resultados mostraron que el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 puede reconocer tendencias de deformación de 2 cm. Esta precisión alcanzada con la técnica RTK para un teléfono Xiaomi Mi 8 demuestra que es posible mejorarla a través de un post-procesamiento relativo o PPP con resolución de ambigüedad, aplicando los diferentes productos precisos existentes hoy en día.

Con el objetivo de aprovechar las características que posee el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8, y la capacidad que tiene para alcanzar a identificar deformaciones mínimas de 2 cm, en este Capítulo 5 se proponen cuatro estrategias de medición orientadas al monitoreo de la salud estructural: (1) evaluar la calidad de la señal GNSS en diferentes condiciones térmicas, (2) analizar el rendimiento de la orientación de la antena en posición horizontal y vertical en la recepción de señales GNSS, (3) revisar la calidad de la señal GNSS de 24 hrs para cada satélite disponible, y (4) evaluar el rendimiento en posicionamiento 3D. Una vez que se demuestre que la calidad de la señal GNSS y la precisión alcanzada en posicionamiento están dentro de los estándares de precisión requeridos en el monitoreo estructural, se tomarán como referencia en un segundo experimento, que consiste en identificar propiedades estáticas y dinámicas sobre el puente atirantado El Carrizo (Ver Sección 7.1).

Este capítulo 5 está organizado de la siguiente manera: en la Sección 5.2 se describe el chip GNSS embebido en el teléfono inteligente, las aplicaciones Android para recopilar observaciones GNSS se describen en la Sección 5.3. En la Sección 5.4 se explica la configuración experimental, el rendimiento en posicionamiento 3D se describe en la Sección 5.5. Las discusiones y conclusiones se encuentran en la Sección 5.6 y 5.7, respectivamente.

## 5.2. Chip GNSS Broadcom BCM47755

El concentrador de ubicación Broadcom BCM47755 es un dispositivo de un solo chip que combina las capacidades de reconocimiento de ubicación con las funciones típicas de un concentrador de sensores (Broadcom, 2021). La combinación proporciona beneficios sinérgicos que no se pueden lograr con varios circuitos integrados, como bajo consumo de energía, mayor precisión, espacio reducido y una lista de materiales más pequeña. El BCM47755 admite dos frecuencias ( $L_1 + L_5$ ) y, como resultado, logra una precisión a nivel de carril en exteriores y una resistencia mucho mayor a las señales *multipath* y reflejadas en escenarios urbanos, así como una mayor inmunidad a interferencias. Además, el BCM47755 incorpora numerosas tecnologías que permiten un consumo de energía ultra-bajo tanto en la función de ubicación como en la función de concentrador de sensores. El dispositivo cuenta con una ruta de RF de baja potencia, una configuración de CPU grande/pequeña compuesta por un Cortex-M4F (CM4) de 32 bits basado en RAM, un Cortex-M0 (CM0) basado en ARM, y está integrado en un procesador de 28 nm. BCM47755 puede recibir simultáneamente las siguientes señales que se muestran en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Señales compatibles con el chip GNSS BCM47755. Fuente: [Broadcom \(2021\)](#).

GNSS	Frecuencia 1	Frecuencia 2
<i>GPS</i>	$L_1$	$L_5$
<i>GLONASS</i>	$L_1$	-
<i>Galileo</i>	$E_1$	$E_{5a}$
<i>BeiDou</i>	$B_1$	-
<i>QZSS</i>	$L_1$	$L_5$

### Aplicaciones:

- Teléfonos inteligentes.
- Tables.
- Wearables.



**Figura 5.1:** Chip Broadcom BCM47755. Fuente: [Broadcom \(2021\)](#).

## 5.3. Apps para la recopilación de mediciones GNSS

En la última década, se han desarrollado diferentes aplicaciones para teléfonos inteligentes que permiten registrar mediciones GNSS en formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*). En [Mahato et al. \(2023\)](#) se analizan las capacidades de las aplicaciones de Android para realizar mediciones GNSS para la comunidad geoespacial y reportan una interesante clasificación de las aplicaciones en función de sus capacidades y usabilidad. Por otro lado, durante los estudios preliminares de esta investigación, se probaron algunas de las aplicaciones más utilizadas en diferentes estudios publicados, como *GEO++ Rinex Logger*, *GNSS Logger*, *Rinex On*, *Gnut Client*, y no se observaron diferencias significativas en los datos recopilados, por lo tanto, se decidió utilizar la app *Geo++ Rinex Logger* para la adquisición de datos en los diferentes experimentos que se llevaron a cabo, ya que es el más fácil de configurar y administrar durante el proceso de medición ([Pepe et al., 2021](#)). A continuación, se describen detalladamente las aplicaciones utilizadas:

### 5.3.1. Geo++ Rinex Logger

*Geo++ Rinex Logger*, es una aplicación desarrollada por la empresa alemana Geo++ GmbH (<https://www.geopp.de/>), utiliza los servicios API de Android más recientes para registrar las mediciones GNSS del teléfono inteligente en un archivo de formato RINEX. La aplicación permite registrar los datos de las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS para las frecuencias  $L_1$ ,  $L_5$ ,  $E_{1B}$ ,  $E_{1C}$ ,  $E_{5A}$ . El archivo de observación generado incluye mediciones de fase portadora, mediciones de pseudodistancia, intervalos delta acumulados, frecuencias Doppler y valores de ruido ([Logger, 2021](#); [Pepe et al., 2021](#)). En la Figura 5.2 se observa la interfaz de la aplicación *Geo++ RINEX Logger*.



Figura 5.2: Interfaz y logo de la aplicación *Geo++ Rinex Logger*. Fuente: [Logger \(2021\)](#).

### 5.3.2. GNSS Logger

GNSSLogger es una aplicación desarrollada por Google y permite el análisis y registro de datos de posicionamiento GNSS. Viene con las siguientes características ([GnssLogger, 2021](#)):

- **Pestaña inicio:** Controla varios registros de datos, como mediciones GNSS, GnsStatus, NMEA, mensajes de navegación, datos de sensores y RINEX.
- **Pestaña de registro:** Permite ver la ubicación y datos de medición, controlar el registro sin conexión mediante “Iniciar registro”, “Detener y enviar” y “Registro temporizado”, elimina los archivos de registro existentes en memoria.
- **Pestaña MAP:** Se visualiza en Google Map la ubicación proporcionada por el chipset GNSS en tiempo real.
- **Pestaña estatus:** Permite visualizar detalladamente la información de todos los satélites GNSS como GPS, Beidou (BDS), QZSS, GAL (Galileo), GLO (GLONASS) e IRNSS.
- **Pestaña de gráficas:** Permite visualizar la intensidad de la señal ( $C/N_0$ ), PR (pseudorange) y PRR (pseudorange) residual frente al tiempo.
- **Pestaña skyplot:** Permite visualizar los datos de los satélites GNSS visibles mediante un diagrama del cielo y ver el  $C/N_0$  promedio de todos los satélites a la vista y los usados en el fijo.

En la Figura 5.3 se observa la interfaz de las diferentes pestañas descritas anteriormente y el logo de la aplicación GNSS Logger.

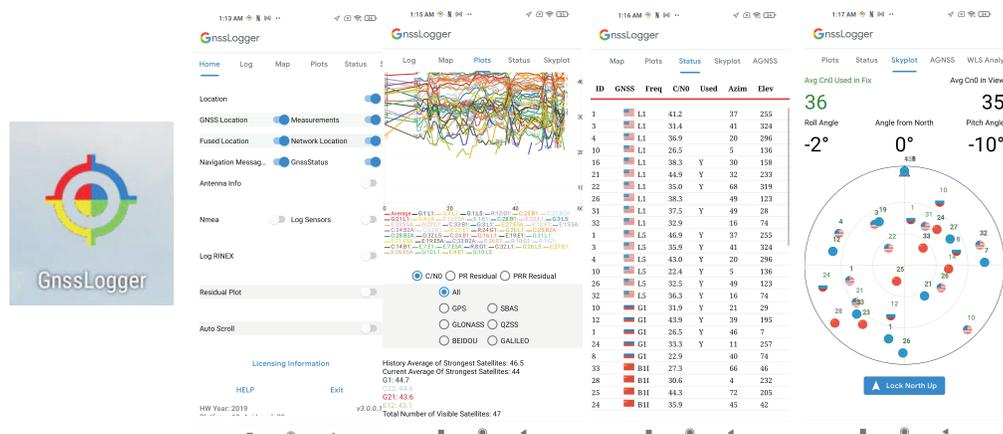


Figura 5.3: Interfaz y logo de la aplicación GNSS Logger. Fuente: [GnssLogger \(2021\)](#).

### 5.3.3. RINEX ON

*Rinex ON* fue lanzada por el Grupo de trabajo de mediciones crudas de GSA (*European GNSS Agency*), en el *Workshop “GNSS Raw Measurements”* (GSA, 2017), titulado “*From research to comercial use*” (De la investigación al uso comercial) el 30 de mayo de 2018. La aplicación *rinex On* utiliza las medidas de la nueva API de mediciones GNSS de Android para producir archivos de mensajes de observación y navegación RINEX a partir del chipset GNSS de Android. También, se incluyen varias herramientas GNSS para usar en el campo, como un planificador de satélites, un registro NMEA, un gráfico de intensidad de la señal de satélite y una pantalla de rendimiento (*rinexON*, 2021). En la Figura 5.4 se puede ver el interfaz y logo de la aplicación *rinexON*.

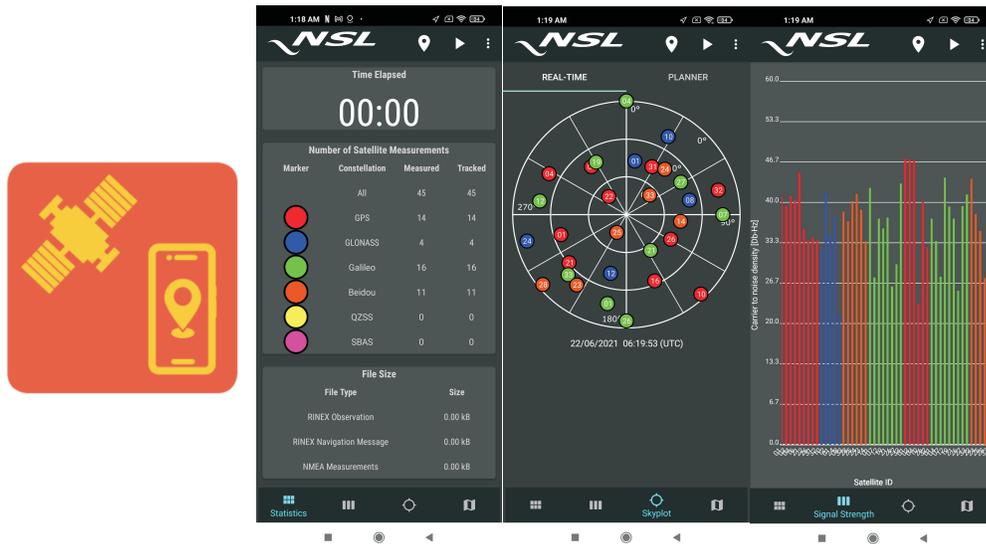


Figura 5.4: Interfaz y logo de la aplicación *RINEX ON*. Fuente: *rinexON* (2021).

## 5.4. Configuración experimental y adquisición de datos

La adquisición de datos se llevó a cabo utilizando el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. El Xiaomi Mi 8 pertenece a la empresa Xiaomi y tiene un diseño con una anchura de 7.48 cm, una altura de 15.49 cm, un grosor de 0.76 cm, un peso de 179 gramos, tiene una pantalla de 6.21 pulgadas y una batería de 3400 mAh, así como también una cámara dual de 12 MP+12MP. Contiene el sistema operativo Android 8.0 + MIUI 9.5 y cuenta con un procesador Qualcomm SDM845 Snapdragon 845, 64 bits. El Xiaomi mi 8 contiene 4 núcleos de procesamiento (CPU, Unidad Central de Procesamiento): 4 x 2.8 GHz Kryo. Tiene una memoria RAM de 6 GB LPDDR4x y 64 GB de almacenamiento. Un chip Broadcom BCM47755 de doble frecuencia está integrado en el Xiaomi Mi 8, que es capaz de rastrear las señales GPS  $L_1$  C/A, GLONASS  $L_1$ , BeiDou (BDS)  $B_1$ , QZSS  $L_1$ , Galileo (GAL)  $E_1$ , GPS  $L_5$ , Galileo  $E_{5a}$  y QZSS  $L_5$  (Xiaomishop, 2021). El teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 satisface los requisitos que se necesitan en esta investigación, los cuales son: mediciones GNSS de do-

ble frecuencia de código y fase, generación de archivos de navegación y observación, un estado del arte lo bastante amplio donde han probado su desempeño en posicionamiento, relación calidad/costo. En la Figura 5.5 se puede ver el teléfono inteligente Xiaomi mi 8.



**Figura 5.5:** Teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Fuente: [Xiaomishop \(2021\)](#).

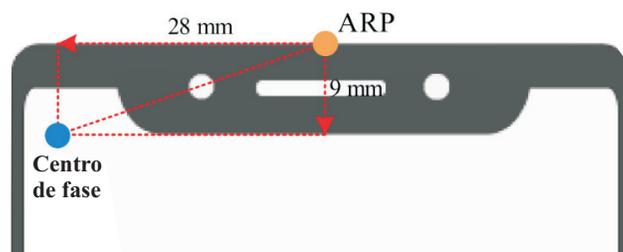
Para evaluar la señal de las multi-constelaciones GNSS, así como también, el desempeño en posicionamiento y estabilidad de las coordenadas de mediciones con un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8, se llevaron a cabo una serie de experimentos que consisten en adquirir mediciones GNSS del Xiaomi Mi 8 bajo diferentes condiciones. El primero (E1) consistió en adquirir mediciones con el Xiaomi Mi 8 en un horario del día donde la temperatura del entorno sea nula ( $< 25^\circ$ ) y el efecto térmico sobre el teléfono sea despreciado, y caso inverso, en un horario donde la temperatura del día sea alta y el efecto térmico sobre el teléfono sea considerado. Este experimento es de gran importancia debido a que las mediciones en los procesos de monitoreo sobre estructuras comúnmente son de día y en algunos sitios las temperaturas son extremas ( $> 40^\circ$ ) y es necesario conocer el efecto de esta en los instrumentos que registran las observaciones GNSS, siendo para este caso el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8.

Un factor importante y debatible en diferentes estudios es la orientación de la antena del teléfono inteligente al momento de adquirir mediciones GNSS. En [Angrisano y Gaglione \(2022\)](#); [Guo et al. \(2020\)](#); [Wu et al. \(2019\)](#) utilizan el teléfono de manera horizontal con la pantalla hacia arriba y mencionan que es la forma adecuada para el registro de los datos. Sin embargo, en [Robustelli et al. \(2021\)](#); [Zeng et al. \(2022\)](#) fijan el teléfono de manera vertical para una mejor adquisición de la señal GNSS. Considerando lo anterior, se propone un experimento (E2) que consistió en medir por 4 horas consecutivas considerando las mismas condiciones (horario del día, temperatura, constelaciones, frecuencia de

muestreo) con la orientación del teléfono de manera horizontal y vertical. Finalmente, el experimento 3 (E3) consistió en evaluar la calidad de la señal en un periodo de observación de 24 horas.

Los experimentos de recopilación de datos se realizaron sobre un monumento de concreto descrito en la Sección 3.3 (Capítulo 3), y se utilizó una placa de metal que sirve como plano de tierra, y sobre esta se colocó el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Para todos los experimentos se utilizó la aplicación Android Geo++RINEX (v2.1.2) (Logger, 2021) para almacenar los datos de observación GNSS. La frecuencia de muestreo fue de 1 Hz con seguimiento a todas las constelaciones GNSS disponibles (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Durante la recolección de datos GNSS, el Wi-Fi y *Bluetooth* del Xiaomi Mi 8 se apagaron para evitar perturbaciones de estos sensores, y solo se accedió al permiso de ubicación (Guo et al., 2020; Zhang et al., 2018).

Los fabricantes de teléfonos inteligentes no publican donde se ubica la antena GNSS del teléfono, esto hace que las coordenadas sean difíciles de referenciar sobre un punto físico en el teléfono. Sin embargo, en Netthonglang et al. (2019) estimaron la posición de la antena GNSS del Xiaomi Mi 8 utilizando la técnica de DD (diferencias dobles) con una precisión del nivel centimétrico (Zeng et al., 2022). El centro de fase de la antena se ubica en el lado izquierdo de la parte frontal del teléfono y esto se puede ver en la Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Centro de fase del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Fuente: Zeng et al. (2022).

Conocer la ubicación del centro de fase del Xiaomi Mi 8 con un grado alto de precisión representa un avance en las mediciones GNSS con la tecnología de los teléfonos inteligentes, ya que esto garantiza un centrado en el orden del centímetro. Para este estudio, se localizó el centro de fase del teléfono y se materializó por la parte trasera del mismo, de tal manera que este siempre coincidiera en la misma posición de la placa de metal fija en el monumento de concreto para las dos pruebas de medición en el experimento 1 con diferentes condiciones térmicas. El experimento 1 consistió en medir bajo dos condiciones térmicas diferentes, la primera se denominó Mediciones Libres de Condiciones Térmicas (MLCT) donde se colocó el Xiaomi Mi 8 de manera horizontal sobre el disco metálico y se hizo coincidir el centro de fase del celular con el marcado sobre el disco, esta configuración se puede visualizar claramente en la Figura 5.7a. La prueba inició a las 06:00 hrs del horario local (12:00 hr UTC) y finalizó a las 08:00 hrs (14:00 hrs UTC). Para las Mediciones Con Condiciones Térmicas (MCCT) fue necesario proteger el teléfono inteligente con una caja de poliestireno expandido tal como se ilustra en la Figura 5.7b, y el centro de fase del

Xiaomi Mi 8 se hizo coincidir cuidadosamente con el marcado sobre el disco. Esta segunda prueba inició a las 16:00 hrs del horario local (22:00 hrs UTC) y finalizó a las 17:59:59 hrs (25:59:59 hrs UTC).

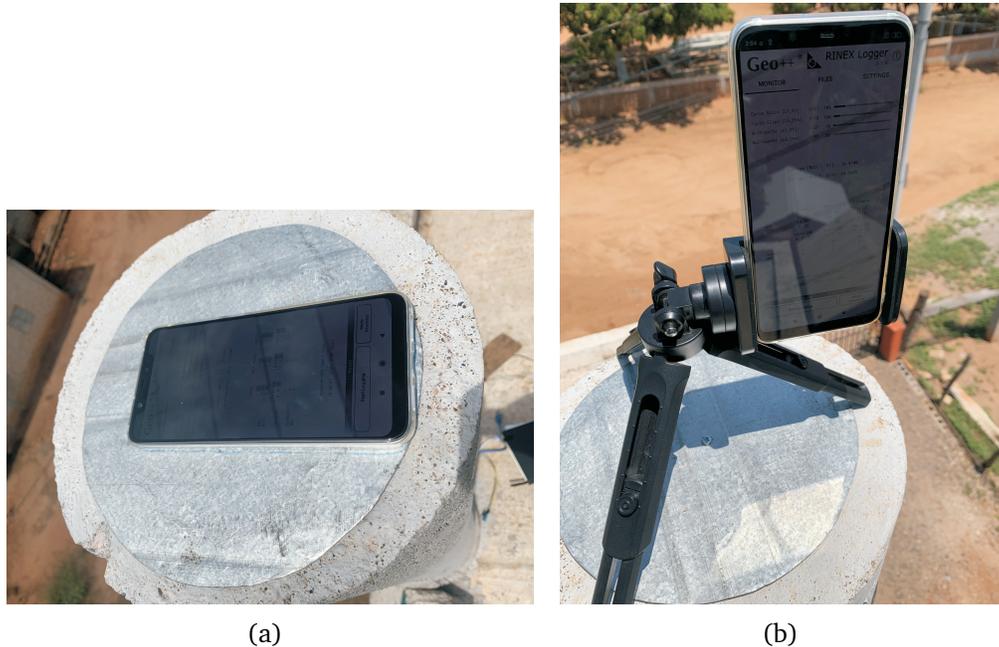


**Figura 5.7:** Teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 sobre el disco metálico (plano de tierra) en el experimento 1: (a) sin protección térmica y, (b) con protección térmica.

Ambas pruebas se llevaron a cabo el martes 9 de agosto de 2022. Debido a la dificultad de hacer coincidir el centro de fase del teléfono en orientación vertical, se decidió hacer este experimento con orientación horizontal.

El experimento 2 (E2) se llevó a cabo el día 3 y 4 de agosto de 2022. El cual consistió en medir durante 4 horas continuas en el horario local de 20:00 hrs (02:00 UTC) a 00:00 hrs (06:00 hrs UTC) con el Xiaomi Mi 8 en diferente orientación (3 de agosto: vertical, 4 de agosto: horizontal). En la Figura 5.8 se observa la configuración del E2.

El experimento 3 consistió en adquirir mediciones GNSS sobre el pilar de concreto por 24 horas (15 de enero de 2023) con el objetivo de evaluar principalmente la calidad de las señales GNSS, la visibilidad de los satélites y el efecto que tienen las observaciones a largo plazo en la precisión. Para este experimento el teléfono se colocó de manera vertical como se observa en la Figura 5.8b.



**Figura 5.8:** Orientación de la antena del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical.

### 5.4.1. Análisis de calidad de los datos GNSS

Se analizaron las observaciones GNSS de doble frecuencia recopiladas por el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en los experimentos descritos anteriormente, esto con el objetivo de tener una referencia para el procesamiento de los datos GNSS. Se utilizó el software Anubis (Vaclavovic y Dousa, 2016) para el análisis de calidad, ya que es capaz de corregir y evaluar las épocas de observación flotantes. Para el análisis de calidad se incluyeron todas las observaciones sin establecer una máscara de elevación.

Para evaluar el rendimiento del Xiaomi Mi 8, se llevaron a cabo los siguientes análisis:

- Análisis de la visibilidad y geometría de los satélites.
- Análisis de los valores  $C/N_0$  para las señales GNSS recibidas aplicando el método propuesto en la Sección 3.4.1.
- Integridad de las observaciones GNSS (únicamente para el experimento 3).
- Análisis del *multipath* en el código.

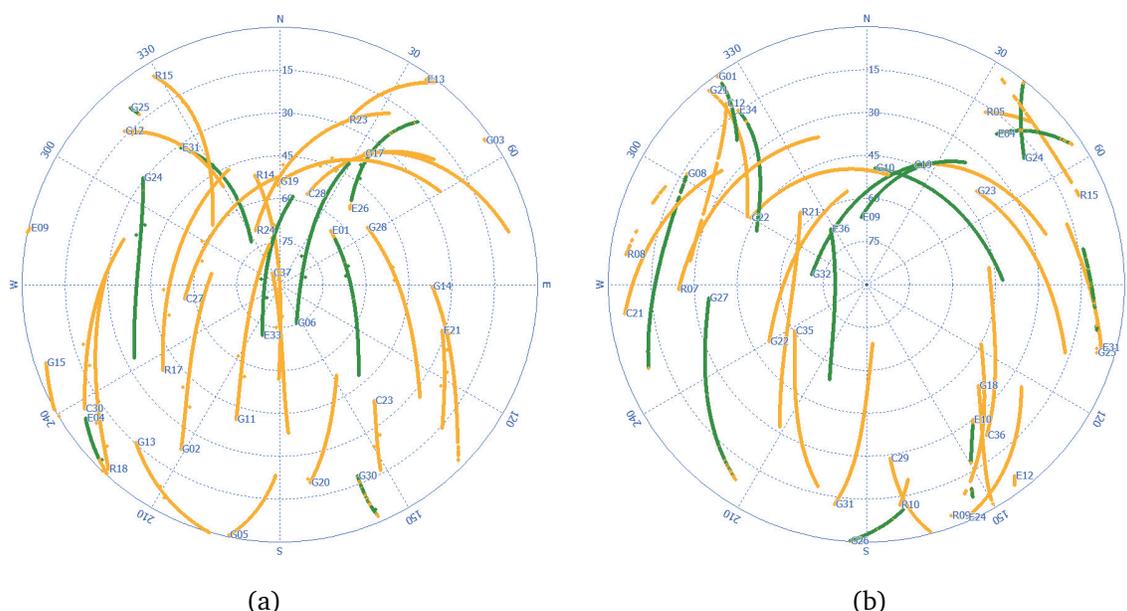
#### 5.4.1.1. Análisis de la visibilidad y geometría de los satélites

Considerando lo mencionado por Wen et al. (2020), donde la capacidad de capturar señales de doble frecuencia se degradará cuando el chip GNSS esté funcionando en modo

de doble frecuencia durante demasiado tiempo y cambiará al modo de captura de frecuencia única. Por lo cual, es importante seleccionar las mediciones que tienen más de 5 satélites de doble frecuencia para cada época a procesar. A continuación, se muestra para cada experimento la visibilidad de los satélites (gráfica del cielo), el número de satélites y las frecuencias medidas por cada uno de ellos.

### Experimento 1

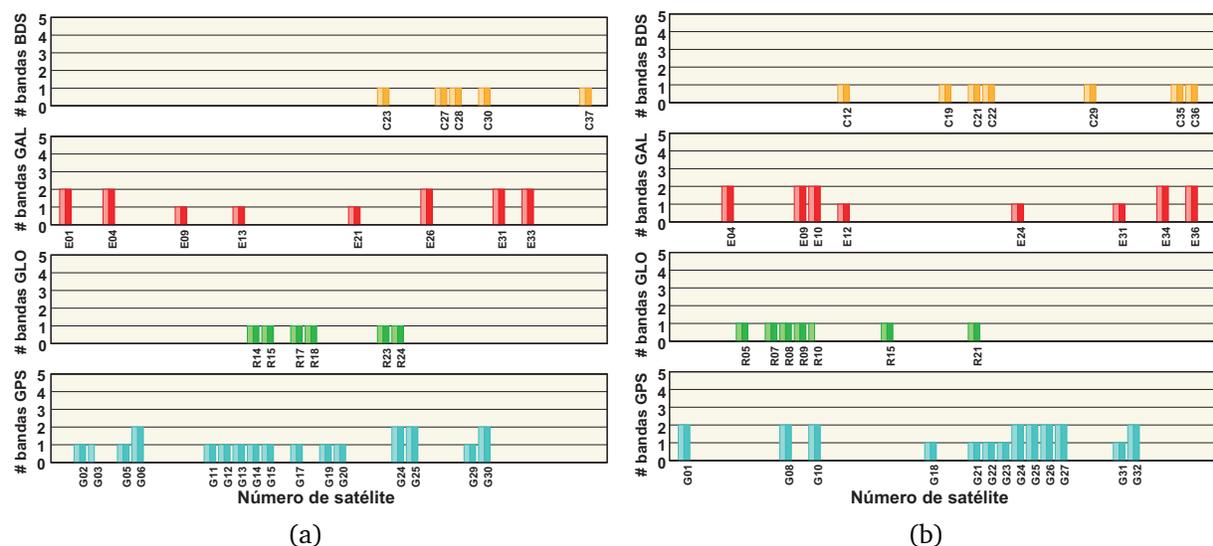
Con ayuda de la herramienta PLOT del software RTKLib (v.demo5 b34f.1) se generaron los mapas del cielo de cada prueba. En la Figura 5.9 se observan los satélites GNSS visibles para las pruebas MLCT (a) y MCCT (b).



**Figura 5.9:** Mapa del cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 1: (a) MLCT y, (b) MCCT.

En la Figura 5.9 se observa la trayectoria de los satélites GNSS durante el experimento 1. Las observaciones de doble y mono frecuencia se pueden ver de color verde y amarillo, respectivamente. En MLCT se siguió a 36 satélites GNSS, 17 GPS, 6 GLONASS, 8 Galileo y 5 BeiDou. Sin embargo, solamente 4 satélites GPS fueron registrados con doble frecuencia y 13 en mono-frecuencia. Para el caso de Galileo, solamente 5 satélites registraron doble frecuencia y 3 mono-frecuencia. Los satélites G3, E09 y E13 fueron ignorados en el procesamiento debido al poco seguimiento que se les hizo. Para MCCT estuvieron visibles 35 satélites GNSS, 13 GPS, de los cuales 7 fueron registrados con doble frecuencia y 6 en mono-frecuencia, 7 GLONASS, 8 Galileo, donde 5 fueron de doble frecuencia y 3 de mono-frecuencia, y 7 BeiDou. Para esta prueba solo se despreciaron los satélites R8 y E12. En general, para MLCT se consideraron 9 satélites de doble frecuencia y 24 de una frecuencia. Para MCCT 13 satélites de doble frecuencia fueron registrados y 20 de única frecuencia.

En la Figura 5.10 se resumen los satélites observados y la frecuencia disponible de cada uno de ellos para las dos pruebas.



**Figura 5.10:** Bandas disponibles de los satélites GNSS visibles durante el experimento 1: (a) prueba MLCT y, (b) prueba MCCT.

Los resultados demuestran que las condiciones térmicas analizadas en este estudio no tienen un impacto sobre el chip GNSS, ya que el seguimiento a los satélites no se interrumpió y las mediciones fueron similares a la prueba donde no se consideraron las condiciones térmicas. MCCT registró un mayor número de satélites GNSS de doble frecuencia, lo que hace que esta prueba se considere de mayor calidad. Sin embargo, el impacto del horario de medición juega un papel fundamental en las mediciones GNSS, debido a la configuración geométrica de los satélites.

La geometría satelital observada está relacionada con el número de satélites disponibles. Es bien sabido que la dilución de la precisión (*DOP*, por sus siglas en inglés) es un parámetro importante que considerar durante las observaciones GNSS. *DOP* es un término que sirve para especificar la propagación de errores como un efecto matemático de la geometría de los satélites GNSS sobre la precisión de la medición posicional (Angrisano y Gaglione, 2022). *DOP* se puede expresar en una serie de medidas independientes:

- GDOP (Dilución geométrica de precisión).
- PDOP (Dilución de precisión en Posición (3D)).
- HDOP (Dilución horizontal de la precisión).
- VDOP (Dilución vertical de la precisión).

Estos valores son derivados matemáticamente de las posiciones de los satélites utilizados. En la Tabla 5.2 se explica el significado del valor del *DOP*.

**Tabla 5.2:** Descripción de los valores DOP.

Valor DOP	Criterio	Descripción
< 1	Ideal	El nivel de confianza más alto posible para ser utilizado en aplicaciones que exigen la mayor precisión posible.
1-2	Excelente	En este nivel de confianza, las mediciones de posición se consideran lo suficientemente precisas para satisfacer todas las aplicaciones menos las más sensibles.
2-5	Bien	Representa un nivel que marca el mínimo adecuado para tomar decisiones acertadas
5-10	Moderado	Las mediciones posicionales se podrían utilizar para los cálculos, pero la calidad de la fijación aún podría mejorarse
10-20	Justo	Representa un nivel de confianza bajo
> 20	Pobre	En este nivel, las mediciones son inexactas hasta en 300 metros.

En la Tabla 5.3 se observa claramente que la constelación GPS es la que presenta la mejor geometría, así como también el número mayor de satélites. Considerando la Tabla 5.2, en general los valores del DOP para la prueba MLCT y MCCT están al margen de lo considerado bueno. Sin embargo, únicamente la constelación GPS está dentro de las mediciones que se pueden utilizar para obtener una alta precisión en el posicionamiento tridimensional. Con respecto a la condición térmica y su efecto en el DOP, es claro que no son variables dependientes.

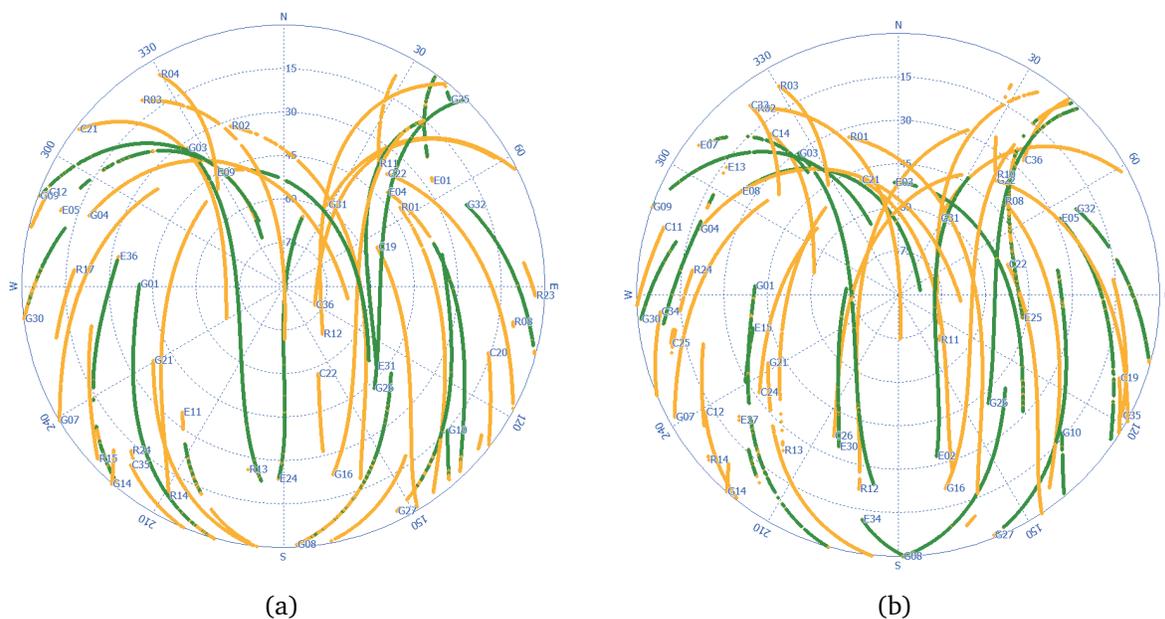
**Tabla 5.3:** Valores DOP para las pruebas del experimento 1.

Prueba	GNSS	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP
MLCT	<i>GPS</i>	1.8	1.6	0.8	1.3
	<i>GLONASS</i>	3.4	2.9	2.1	2.0
	<i>Galileo</i>	3.1	2.7	3.6	4.3
	<i>BeiDou</i>	3.7	3.2	1.7	2.6
MCCT	<i>GPS</i>	1.7	1.5	0.8	1.3
	<i>GLONASS</i>	4.6	4.3	3.0	3.1
	<i>Galileo</i>	3.4	3.0	1.6	2.5
	<i>BeiDou</i>	3.1	2.7	1.1	2.5

### Experimento 2

En la Figura 5.11 se ilustra la distribución en el cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 2: (a) caso del celular en posición horizontal y (b) en vertical. El total de satélites GNSS visibles para la orientación horizontal fueron 42, de los cuales 17 pertenecen a la constelación GPS y solamente de 10 se registró la doble frecuencia. Para el caso de Galileo, se observaron en total 7 satélites de doble frecuencia. Para GLONASS y BeiDou se registraron 13 y 5 satélites de frecuencia simple, respectivamente. Los satélites G14, R08, R23 y R24 fueron los que presentaron menor seguimiento al momento de la

observación, por lo cual, se desprecian para el análisis de este estudio. En la medición con orientación vertical se registraron 45 satélites GNSS, 17 GPS, 10 Galileo, 10 GLONASS y 9 de BeiDou. De los satélites GPS y Galileo solamente 9 son compatibles con doble frecuencia. Los satélites G14, y R24 se ignoran para el análisis de este estudio debido al poco seguimiento que muestran. En resumen, para las mediciones con la orientación horizontal del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 solamente 38 satélites se consideraron para el análisis, y 17 presentaron mediciones de doble frecuencia. Para las mediciones del Xiaomi Mi 8 en orientación vertical se registró un número mayor de satélites considerados para el análisis, en total fueron 43 y 18 con mediciones de doble frecuencia. Por lo tanto, la orientación vertical presentó la mejor opción para llevar a cabo las mediciones en futuros estudios. En la Figura 5.12 se pueden ver el número de satélites por constelación GNSS y la frecuencia a la que fue observado.



**Figura 5.11:** Mapa del cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical.

Debido al periodo de la órbita de cada constelación GNSS, el número de satélites será diferente para una misma época de medición en días consecutivos. La órbita de los satélites GPS se encuentra a una altitud nominal de 20,180 km y un periodo de 11 h 58 min, es decir, que los satélites GPS están en la misma posición dos veces al día. Esto se puede ver claramente en la Figura 5.12, donde los satélites GPS observados con la orientación horizontal y vertical son los mismos (a excepción del G25). Para GLONASS, presenta una altitud de órbita de 19,100 km con un periodo de 11 h 15 min 44 s  $\pm$  5s. Debido al periodo de los satélites GLONASS no es posible observar en el mismo lugar un satélite todos los días, ya que cada día tendrá un retraso de aproximadamente 88 min 32 s. La órbita de Galileo cuenta con un periodo de 14 h 4 min 42 s y una altitud de 29600.318 km. Al igual que la constelación GLONAS, Galileo tiene un periodo donde los satélites tienen un

retraso y no pueden estar en el mismo lugar cada día. Por eso la diferencia en el número de satélites Galileo visibles para cada diferente orientación. Finalmente, la constelación BeiDou está compuesta por satélites de órbita terrestre media (MEO, por sus siglas en inglés), satélites de órbita geostacionaria (GEO, por sus siglas en inglés) y satélites de órbita geosíncrona inclinada (IGSO, por sus siglas en inglés) y debido a la ubicación geográfica de México únicamente se recibieron observaciones de la órbita MEO (C11, C12 y C14 en doble frecuencia y el resto de los satélites frecuencia simple).

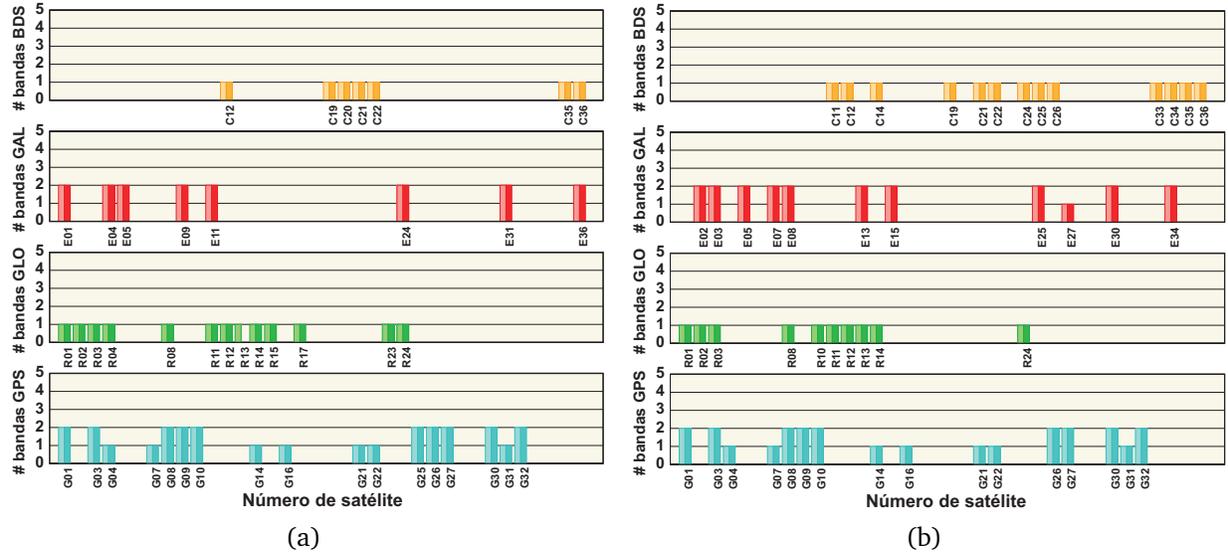


Figura 5.12: Bandas disponibles de los satélites GNSS visibles durante el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical.

Tabla 5.4: Valores DOP para las pruebas del experimento 2.

Prueba	GNSS	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP
Horizontal	GPS	1.8	1.6	0.8	1.4
	GLONASS	3.6	3.1	1.7	2.7
	Galileo	3.2	2.7	1.4	2.3
	BeiDou	2.7	2.4	1.5	1.8
Vertical	GPS	1.8	1.6	0.8	1.4
	GLONASS	3.4	3.1	1.8	2.5
	Galileo	3.4	3.0	1.6	2.4
	BeiDou	3.9	3.7	2.7	3.3

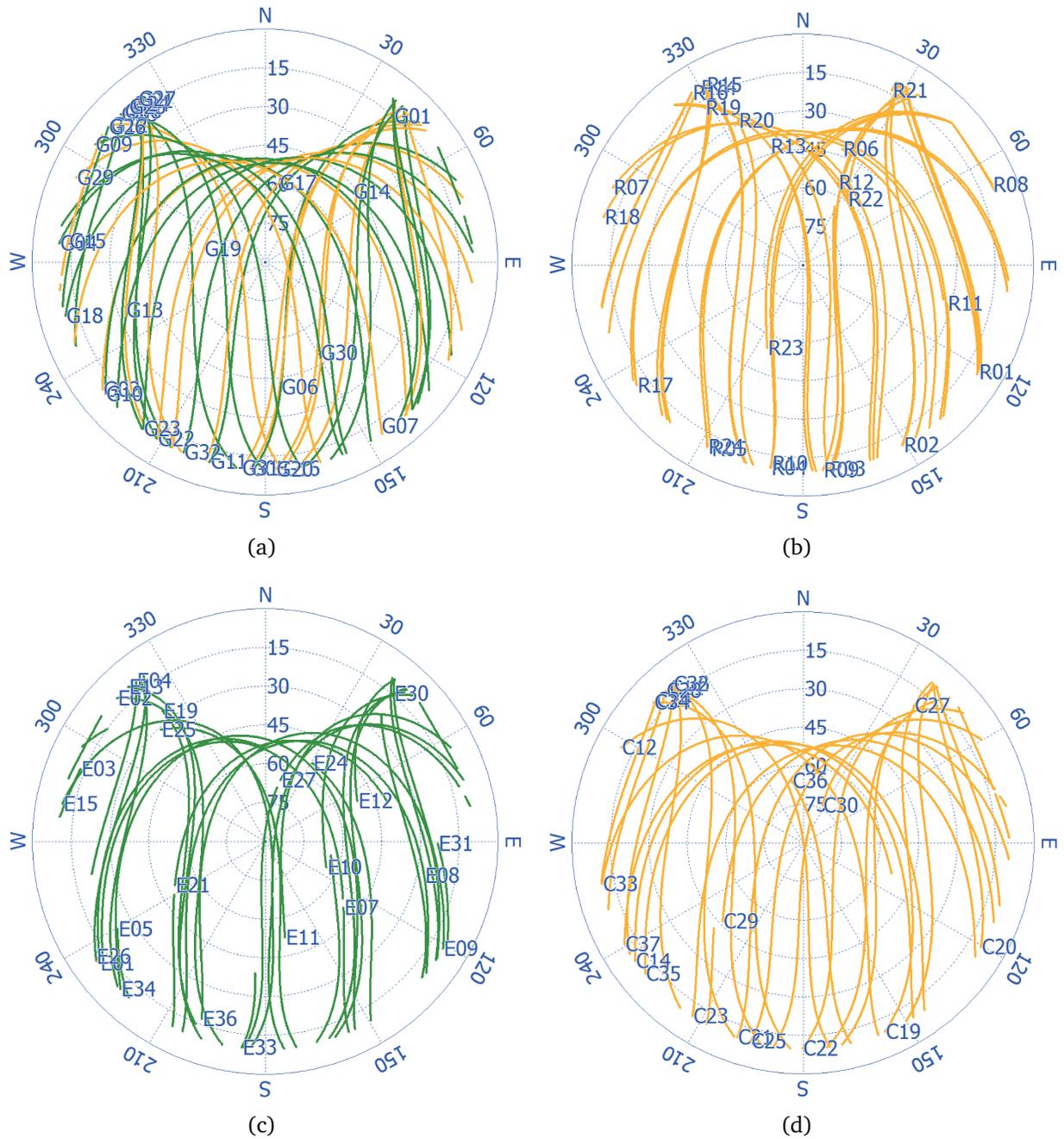
La orientación de la antena no presenta un impacto significativo en el DOP. Esta observación se puede demostrar con la constelación GPS, ya que en ambas orientaciones los

valores del DOP fueron similar, debido a que los satélites GPS visibles para las dos pruebas fueron los mismos. Nuevamente, únicamente GPS tiene valores menores de 2, lo que demuestra la fiabilidad de esta constelación para alcanzar precisiones altas en el posicionamiento. En la Tabla 5.4 se observan los valores del DOP para el experimento 2.

### *Experimento 3*

Este experimento tuvo como objetivo evaluar tanto la señal GNSS de todas las constelaciones disponibles y el desempeño del chip GNSS Broadcom BCM4775 en periodos largos de observación. Observaciones GNSS de 24 horas continuas y registradas por un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 fueron analizadas. La adquisición de las observaciones inició a las 18:00:00 hrs del horario local el día 14 de enero, el cual corresponde a las 00:00:00 hrs del horario UTC+0 del día 15 de enero. La adquisición de los datos GNSS finalizó a las 17:59:59 hrs del horario local del día 15 de enero (23:59:59 hrs UTC, 15 de enero). El seguimiento de los satélites GNSS correspondientes a las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou se observan en la Figura 5.13. Un total de 100 satélites GNSS fueron observados durante las 24 horas de medición continuas. La Figura 5.14 muestra el número de satélites GNSS observados durante el experimento. Entre las dificultades enfrentadas estaba la pérdida de seguimiento de los satélites Galileo y BeiDou durante largos períodos de medición en las pruebas iniciales. Este problema se resolvió restableciendo los parámetros del chip GNSS dual en el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8, que mejoró significativamente las mediciones de los satélites Galileo y BeiDou, dejando solo pérdidas de observables ocasionales y de corto período. Finalmente, se identificó una regulación de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) en los Estados Unidos de América (EE.UU, por sus siglas en inglés) como la causa del problema en el seguimiento de las constelaciones Galileo y BeiDou. Debido a la proximidad entre la ubicación del experimento 3 y los EE, UU. Es probable que las señales de Galileo y BeiDou se vean afectadas. En general, la regulación de la FCC menciona que cualquier receptor no federal en los Estados Unidos que utilice señales GNSS extranjeras debe tener licencia, y aunque la prohibición fue levantada por la FCC, muchos dispositivos nunca se actualizaron para rastrear estas constelaciones. Actualmente, algunas naciones tienen una cobertura limitada de Galileo y BeiDou en chips GNSS duales, y esto dependerá del fabricante del teléfono inteligente.

Al noroeste de México, es posible adquirir observaciones GNSS de 100 satélites utilizando un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8: 31 satélites GPS, 12 de doble frecuencia ( $L_1, L_5$ , bloque IIF) y 19 de frecuencia única ( $L_1$ ); 24 satélites GLONASS de frecuencia única ( $G_1$ ); 24 satélites Galileo de doble frecuencia ( $E_1, L_{5a}$ ) y 21 satélites BeiDou de frecuencia única ( $B_1$ ), 3 de los cuales son del bloque BDS-2 y 18 del bloque BDS-3. Solo los satélites BeiDou de órbita MEO (*Medium Earth Orbit*) fueron visibles. Por otro lado, el factor de la geometría de los satélites es importante y cada determinado tiempo está cambiando por la nueva posición que adquieren los satélites GNSS en sus órbitas. Aun así, es posible determinar en promedio el DOP de cada constelación en un determinado tiempo de seguimiento. En la Tabla 5.5 se menciona el estado del DOP para cada constelación.



**Figura 5.13:** Mapa del cielo de los satélites GNSS visibles durante el experimento 3: (a) satélites GPS, (b) satélites GLONASS, (c) satélites Galileo, y (d) satélites BeiDou.

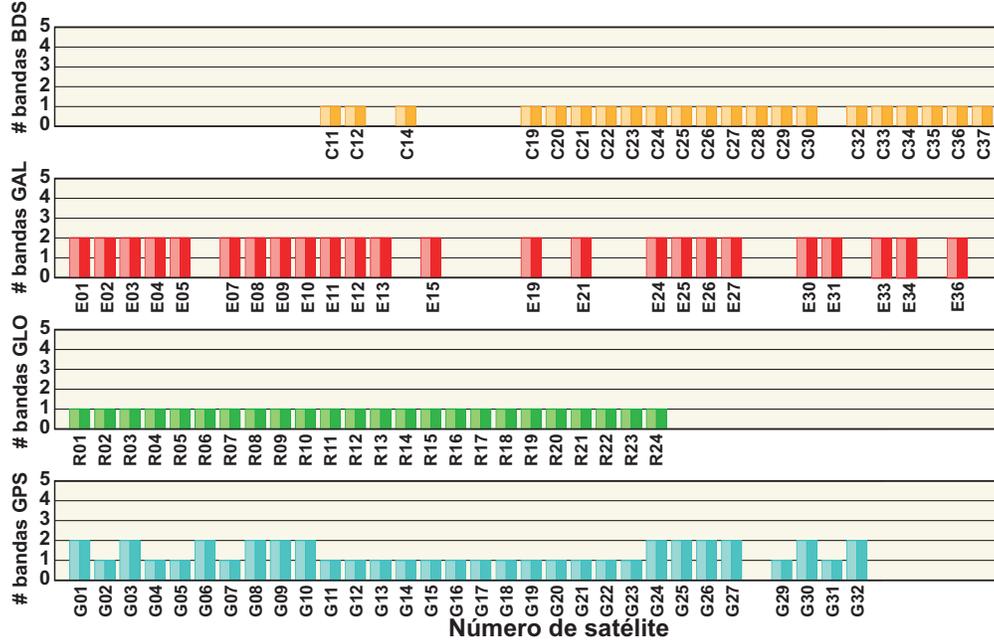


Figura 5.14: Bandas disponibles de los satélites GNSS visibles durante el experimento 3.

Tabla 5.5: Valores DOP para cada constelación GNSS del experimento 3.

Experimento	GNSS	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP
Experimento 3	GPS	1.6	1.4	0.8	1.2
	GLONASS	3.7	3.3	1.9	2.9
	Galileo	3.5	3.1	1.6	2.7
	BeiDou	3.0	2.7	1.6	2.1

En las mediciones GNSS siempre se buscan DOP bajos, ya que según la Tabla 5.5, esto ayuda en el aumento de la precisión al momento del procesamiento a través de algún software especializado. El DOP puede estar relacionado con el tipo de órbita de cada constelación, por eso, aunque se tenga un número mayor de satélites no garantiza una mejor precisión si estos no están en una posición estratégica en su órbita en el momento de la medición. Aunque esto no sea visible en la Tabla 5.5, en ocasiones se encuentra. GPS presenta los mejores valores de DOP, esto no es algo que resulte interesante, ya que las órbitas de la constelación GPS están diseñadas para cubrir latitudes altas y la zona geográfica de EE.UU, la cual se ubica al Norte de México lo que nos favorece. El DOP más alto lo presenta la constelación GLONASS, principalmente por el diseño de la órbita.

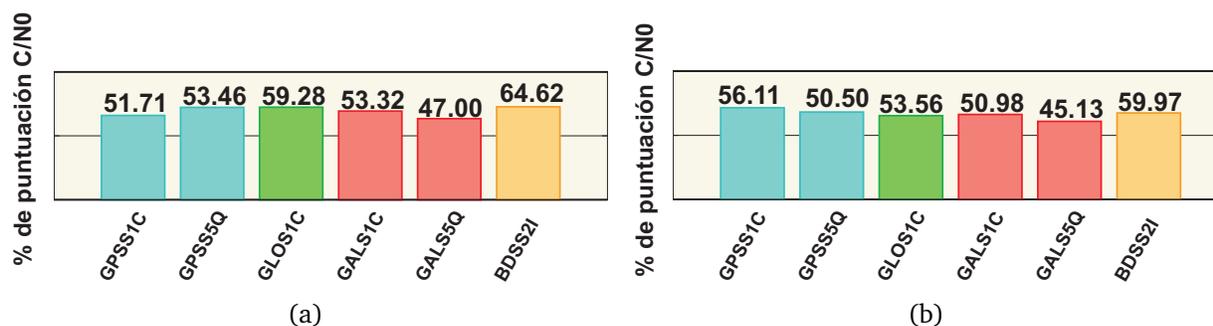
#### 5.4.1.2. Análisis de los valores $C/N_0$ para las señales GNSS recibidas

Se analiza el  $C/N_0$ , siendo un indicador de calidad de datos para los GNSS y está relacionado por el hardware del receptor (Zhang et al., 2018).  $C/N_0$  es la relación entre el

nivel de potencia de la señal portadora y la potencia de ruido dentro de un ancho de banda de 1 Hz (Teunissen y Montenbruck, 2017). Los valores máximos de  $C/N_0$  recomendados deben de estar por debajo de 50 dB-Hz según Zeng et al. (2022). Sin embargo, se hace el análisis de  $C/N_0$  aplicando el método propuesto por el autor para un mejor análisis (Ver Sección 3.4.1). La  $C/N_0$  es el resultado de las ganancias y pérdidas de la señal a lo largo de la cadena de transmisión y recepción, proporcionando información de rendimiento para caracterizar una variedad de señal (Zhang et al., 2018).

### Experimento 1

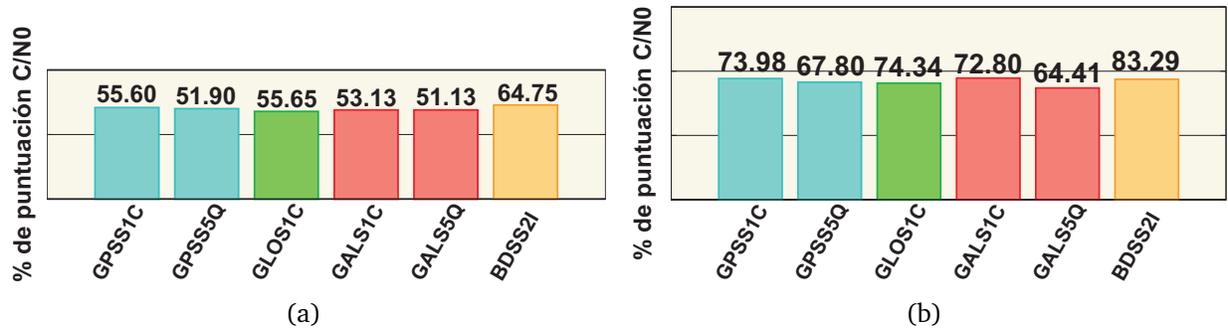
En la Figura 5.15 se ilustran los valores de porcentaje de la puntuación  $C/N_0$  para las mediciones GNSS con diferentes condiciones térmicas (Figura 5.15a: MLCT y b: MCCT). Se observa claramente que la condición térmica de una medición no altera significativamente el comportamiento de la señal, y esto es observable en la Figura 5.15. Los porcentajes de puntuación  $C/N_0$  para este experimento están 50% en promedio por de bajo de los teóricos propuestos en la Tabla 3.7. La diferencia de todas las señales para ambas pruebas fue menor al 5% y no se presentó una correlación alta entre estos valores, es decir, los valores máximos de porcentaje por señal se encontraron en ambas pruebas, y no solamente en una.



**Figura 5.15:** Porcentajes de puntuación medios de  $C/N_0$  para diferentes observaciones GNSS del experimento 1: (a) MLCT y, (b) MCCT.

### Experimento 2

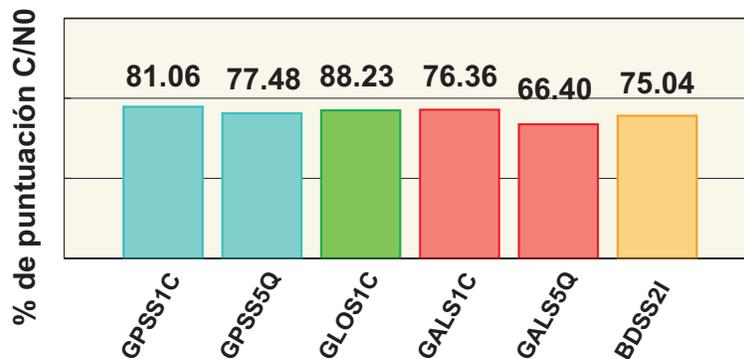
El efecto de la orientación de la antena GNSS del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 presenta una correlación con los valores  $C/N_0$ . En la Figura 5.16 se observan los valores del porcentaje de puntuación medios de  $C/N_0$  para las observaciones medidas en cada prueba de orientación. En la Figura 5.16a se ilustran los porcentajes de puntuación  $C/N_0$  para la orientación horizontal, siendo menores a los de la orientación vertical, aproximadamente un 18%. Por lo tanto, los porcentajes de puntuación de  $C/N_0$  para la orientación vertical del teléfono demuestran que el desempeño en la adquisición de la señal es mejor que cuando está horizontal. La magnitud de estos valores se encuentra en promedio 30% por debajo de los valores teóricos.



**Figura 5.16:** Porcentajes de puntuación medios de  $C/N_0$  para diferentes observaciones GNSS del experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical.

### Experimento 3

En el experimento 2 se demostró que la calidad de las señales GNSS mejora bastante cuando la orientación de la antena está vertical, por lo cual, para el E3 se colocó el teléfono de manera vertical durante las 24 horas de medición. El porcentaje de puntuación de  $C/N_0$  se beneficia con la orientación de la antena y esto se puede ver claramente en la Figura 5.16. Si bien, no son valores similares a los que se pueden obtener con una antena de orden geodésico, pero son lo bastante buenos al considerar que son generados por una antena de un teléfono inteligente. Estos valores son parecidos o muy cercanos a los obtenidos con los receptores y antenas GNSS de bajo costo (por ejemplo, el ZED-F9P de u-blox y el Mosaic-X5 de Septentrio). La señal  $B_1$  de GLONASS alcanzó el porcentaje más alto, solamente un 20% por debajo de los teóricos. Las señales GPS presentaron mejor rendimiento en la adquisición de la señal GNSS que Galileo. La señal  $2I$  de BeiDou presentó porcentajes de puntuación  $C/N_0$  similares a las de  $L_5$  y  $E_{5a}$  de GPS y Galileo, respectivamente. En resumen, los porcentajes de puntuación de  $C/N_0$  son de alta calidad al considerar que fueron obtenidos con una antena de mala calidad, y, sobre todo, con orientación vertical de la antena.



**Figura 5.17:** Porcentajes de puntuación medios de  $C/N_0$  para diferentes observaciones GNSS del experimento 3.

Para un análisis más detallado, se calculó el porcentaje de puntuación  $C/N_0$  para cada satélite observado de todas las constelaciones disponibles. En la Figura 5.18 se ilustra el porcentaje de puntuación  $C/N_0$  para todos los satélites y frecuencias GNSS registrados teniendo en cuenta los valores teóricos máximos de la Tabla 3.7. La puntuación de la señal  $L_1$  fue en su mayoría superior a  $L_5$  para GPS, en el caso de Galileo se presentó la misma condición ( $E_1 > E_{5a}$ ). Los satélites GLONASS presentan puntuaciones cercanas al 100% ( $R_{02}, R_{11}, R_{12}, R_{24}$ ), siendo la única constelación en alcanzar este porcentaje. BeiDou presentó los porcentajes más bajos en uno de sus satélites ( $C_{26}, C_{32}, C_{37}$ ).

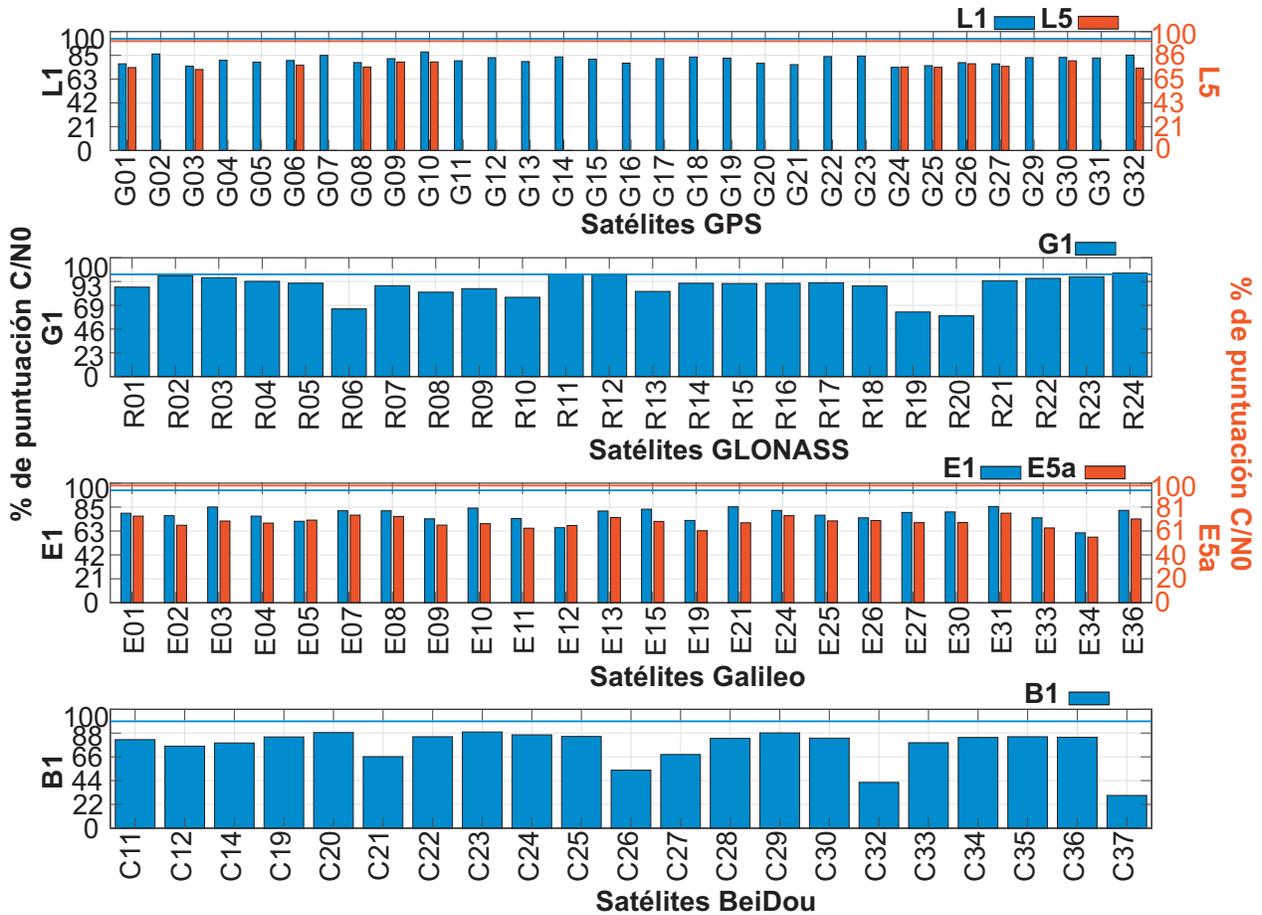


Figura 5.18: Porcentajes de puntuación de  $C/N_0$  para cada satélite GNSS observado en el experimento 3.

### 5.4.1.3. Integridad de las observaciones GNSS

La integridad de las observaciones durante una medición representa la calidad que tiene un receptor GNSS en dar seguimiento a los múltiples satélites. La no continuidad de las observables representa un problema al momento del procesamiento, principalmente cuando se utilizan los métodos absolutos como el PPP estático o cinemático. Los métodos PPP estático y cinemático requieren de mediciones continuas y de buena calidad para poder alcanzar resolución de ambigüedades, y cuando se pierde el registro de la señal, el contador

de la ambigüedad se reinicia e inicia nuevamente. Actualmente, existen algoritmos para mejorar las soluciones de datos de mala calidad. En la Figura 5.19 se observa el porcentaje de integridad para las observables: código, fase portadora, mediciones Doppler y el ruido ( $C/N_0$ ) correspondiente a las mediciones de 24 hrs. La constelación GPS y GLONASS alcanzaron los porcentajes de integridad más altos para  $L_1$ , y en el caso de  $L_5$ , mostró una integridad del 50%. Este porcentaje bajo se debe a la complejidad del chip GNSS para rastrear la señal  $L_5$  de GPS. Por otro lado, BeiDou y Galileo presentaron una integridad inferior al 50%, lo que se relaciona con la posible regulación de la FCC que afecta únicamente a estas dos constelaciones. La integridad está relacionada principalmente con el entorno donde se localiza la antena GNSS, es decir, si existen obstáculos que bloqueen la señal, entonces, habrá pérdida de observables y por lo tanto una integridad baja.

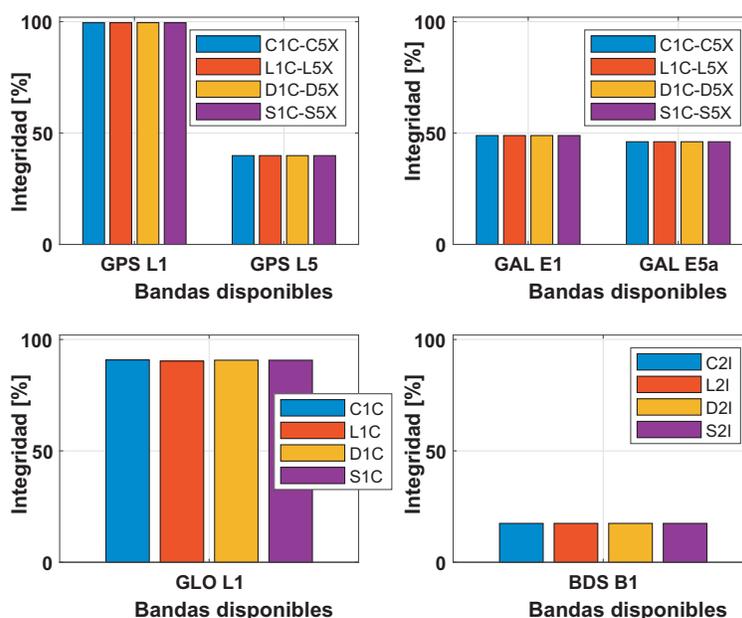


Figura 5.19: Integridad de las observaciones GNSS correspondientes al experimento 3.

#### 5.4.1.4. Análisis del *multipath* de doble frecuencia

Las señales GNSS transmitidas tienen polarización circular hacia la derecha. Como resultado, la elección óptima de la antena GNSS debe ser polarizada circularmente hacia la derecha (RHCP) debido al hecho de que puede discriminar entre la señal GNSS directa y la señal GNSS indirecta, que se transforma en polarizada circularmente hacia la izquierda (LHCP). Las antenas integradas en los teléfonos inteligentes son antenas polarizadas linealmente, que no pueden discriminar entre señales directas (RHCP) e indirectas (LHCP), lo que genera mediciones ruidosas y una relación portadora-ruido ( $C/N_0$ ) baja. La polarización lineal de la antena GNSS del teléfono inteligente hace susceptible a los efectos de *multipath* de las señales GNSS reflejadas por las superficies cercanas a la antena (Pathak et al., 2003). La calidad de las mediciones del teléfono inteligente es inferior a la de un receptor de orden geodésico, lo que se atribuye a la calidad de la combinación de receptor-

antena (Elmezayen y El-Rabbany, 2019). Para evaluar los efectos del *multipath*, se puede expresar como:

$$MP_1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) \varphi_1 + \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) \varphi_5 \quad (5.1)$$

$$MP_5 = P_5 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) \varphi_1 + \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) \varphi_5 \quad (5.2)$$

donde  $MP_1$  y  $MP_5$  son las ecuaciones lineales de observación de pseudodistancia y fase, respectivamente;  $P_1$  y  $P_5$  son las medidas de código en  $L_1$  y  $L_5$ , respectivamente;  $\varphi_1$  y  $\varphi_5$  son medidas de fase en  $L_1$  y  $L_5$ ,  $\alpha = \frac{f_1^2}{f_5^2}$  es una constante (Wu et al., 2019).

Debido a que es necesario la dualidad de la frecuencia para el cálculo del *multipath*, únicamente se evaluó el efecto *multipath* en las constelaciones GPS y Galileo, y GLONASS y BeiDou no fueron considerados.

### Experimento 1

La Figura 5.20 ilustra los valores del *multipath* para MLCT (a) y MCCT (b). Se analiza solamente GPS y Galileo. Se observa que los valores de *multipath* para MCCT son ligeramente menores que MLCT. En principio, es claro establecer que la frecuencia  $L_5$  tiene menor error de *multipath* que  $L_1$ . La constelación GPS presentó el peor desempeño en *multipath* con valores altos, mayores a 2 metros para  $L_1$  y 63-66 cm para  $L_5$ . Por otro lado, Galileo tuvo mejor rendimiento del *multipath*, al alcanzar valores menores 2 y 0.7 metros para  $E_1$  y  $E_{5a}$ , respectivamente. No se encontró una diferencia significativa entre los valores de *multipath* en las dos pruebas, lo que demuestra que las condiciones térmicas no tienen en absoluto un efecto sobre los errores de *multipath*.

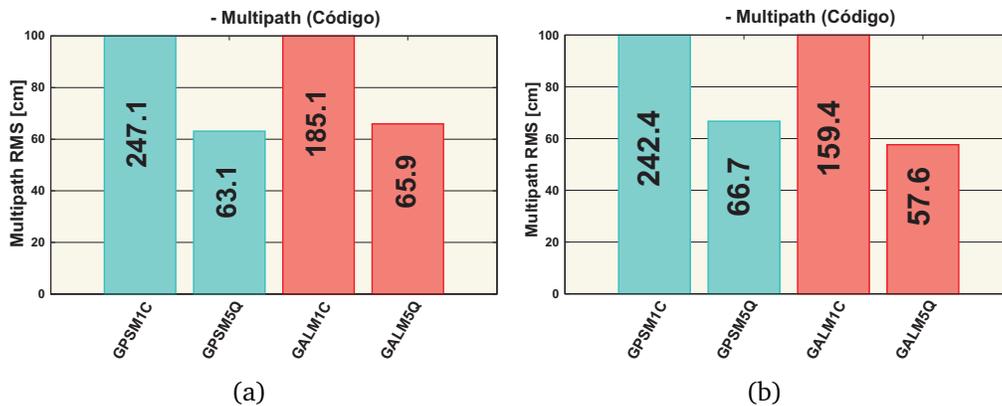
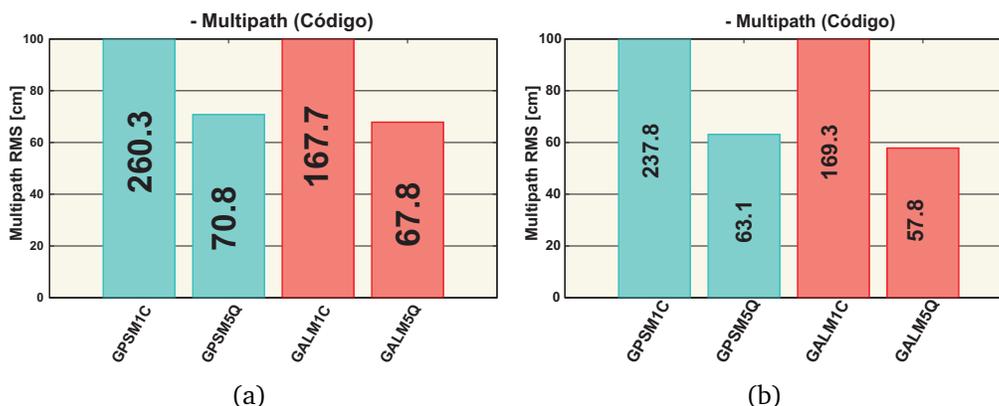


Figura 5.20: Valores medios del *multipath* para las mediciones de GPS y Galileo en el experimento 1: (a) MLCT y, (b) MCCT.

### Experimento 2

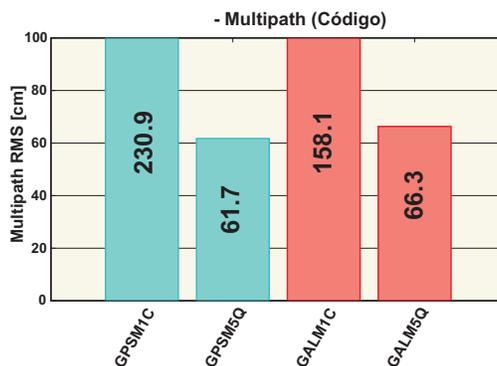
La orientación de la antena GNSS del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 presenta valores menores de *multipath* cuando está vertical. La diferencia de los valores de *multipath* en orientación horizontal y vertical, tal como se observa en la Figura 5.21, están en el orden de los 22.5, 7.7, -1.6 y 10 cm para GPS ( $L_1$ ), GPS ( $L_5$ ), Galileo ( $E_1$ ) y Galileo ( $E_{5a}$ ), respectivamente. En resumen, la orientación vertical de la antena es menos susceptible a errores de *multipath*, esto considerando un lugar libre de obstáculos para la antena GNSS.



**Figura 5.21:** Valores medios del *multipath* para las mediciones de GPS y Galileo en el experimento 2: (a) orientación horizontal y, (b) orientación vertical.

### Experimento 3

Los valores de *multipath* para el E3 son ligeramente más pequeños que los obtenidos en los experimentos anteriores, debido principalmente a la medición que se llevó a cabo en un entorno sin obstáculos. Las señales  $L_5$  y  $E_{5a}$  presentan diferencias de 4.6 cm, y en el caso de la  $L_1$  y  $E_1$  de 72.8 cm, tal como se observa en la Figura 5.22. Galileo presentó mejor desempeño en la  $E_5$  que el GPS, pero bajo en la  $E_1$  con respecto a la  $L_1$  de GPS.



**Figura 5.22:** Valores medios del *multipath* para las mediciones de GPS y Galileo en el experimento 3.

Se determinó el *multipath* para cada satélite GPS y Galileo observado en el E3. En

la Figura 5.23 se observan los valores de *multipath* en la frecuencia  $L_1$  y  $L_5$  para cada satélite GPS y se puede ver claramente que  $L_5$  tiene valores de *multipath* inferiores a  $L_1$ , en el orden de los 169 cm. Por otro lado, para Galileo,  $E_1$  presentó valores de *multipath* aproximadamente 3 veces mayores que  $E_{5a}$ . Los satélites Galileo presentaron una mayor variabilidad en errores de *multipath* durante las 24 hrs para las dos frecuencias ( $E_1/E_{5a}$ ) que los satélites GPS. El efecto del *multipath* en la señal  $L_1$  de GPS fue similar para todos los satélites, al igual que la señal  $E_{5a}$ . Los valores altos de *multipath* en todos los satélites GPS y Galileo son derivados principalmente por la polarización lineal de la antena GNSS embebida en el Xiaomi Mi 8. Sin embargo, estos valores fueron menores a los reportados en otros estudios (Realini et al., 2017).

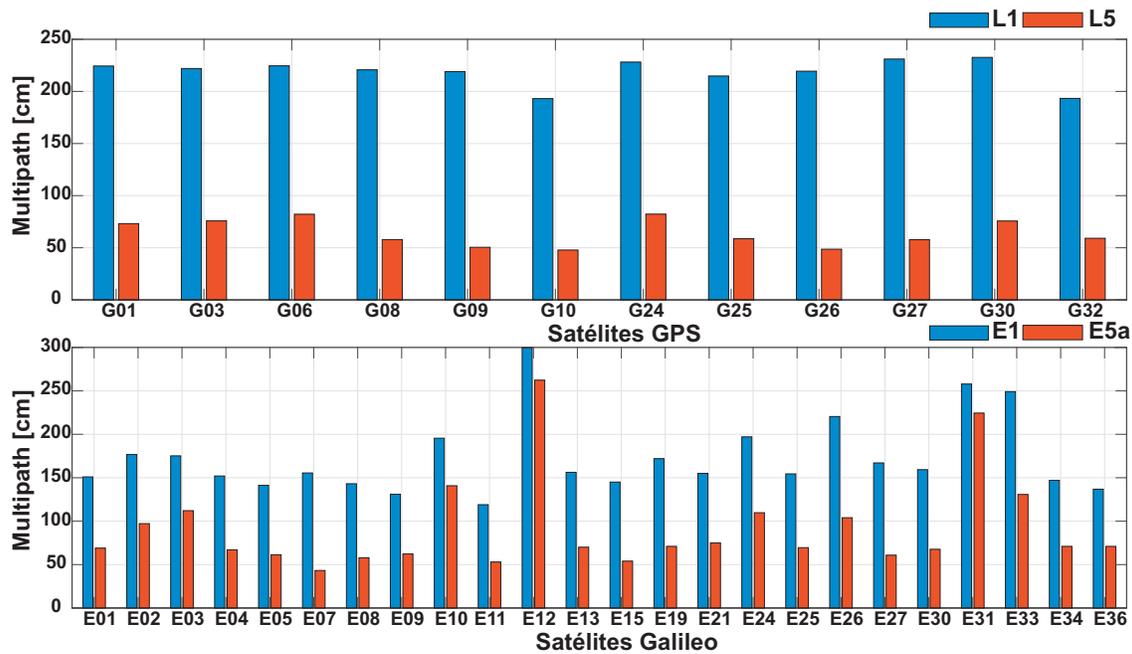


Figura 5.23: Valores del *multipath* para cada satélite GPS y Galileo observado en el experimento 3.

## 5.5. Rendimiento de posicionamiento GNSS del teléfono inteligente

El experimento se llevó a cabo en la azotea de la Facultad de Ciencias de la Tierra y del Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa en México. Para evaluar el rendimiento del posicionamiento tridimensional preciso del Xiaomi Mi 8, se estableció una línea de base a una distancia de aproximadamente 10 metros. La estación de referencia consistió en un receptor Mosaic-X5 de bajo costo y una antena geodésica LEIAS AS10. El Xiaomi Mi 8 se configuró como rover y se colocó en un monumento de centrado forzoso verticalmente con la ayuda de un soporte fijo en una base nivelante. Utilizando equipos de orden geodésico y el método estático relativo, se determinaron previamente coordenadas precisas para el monumento de centrado forzoso. Además, las coordenadas XYZ se trans-

formaron a coordenadas topocéntricas ENU con origen en el monumento establecido como rover. La antena Xiaomi Mi 8 se orientó hacia el norte, como se ilustra en la Figura 5.24.

Para un centrado preciso ( $\approx 1$  cm), se consideró el punto de referencia de la antena (PRA) ubicado en la parte superior del Xiaomi Mi 8 (ver Figura 5.24). Se midió la distancia del PRA y PR (punto de referencia), y con la ubicación del centro de fase de la antena reportada por [Netthonglang et al. \(2019\)](#) se estimaron los desplazamientos del centro de fase general encontrados en la Tabla 5.6. Por lo tanto, las coordenadas obtenidas por el Xiaomi Mi 8 fueron referenciadas al PR, es decir, al mismo punto de referencia de las coordenadas conocidas del monumento de centrado forzoso. Esto, con el objetivo de evaluar el rendimiento en posicionamiento del Xiaomi Mi 8 comparando las coordenadas de referencia con las estimadas por el teléfono inteligente.



**Figura 5.24:** Xiaomi Mi 8 centrado verticalmente y nivelado sobre un monumento de centrado forzoso. Configuración de coordenadas ENU y orientación de la antena.

**Tabla 5.6:** Sesgos del centro de fase de la antena en centímetros del Xiaomi Mi 8 con respecto al PR.

Norte	Este	Vertical
2.8	1	28

Durante el experimento, 11 satélites GPS, 10 satélites GLONASS, 5 satélites Galileo y 6 satélites BeiDou estuvieron visibles. Las observaciones se recogieron con una frecuencia de muestreo de 1 s a través de la aplicación Geo++ RINEX Logger durante una hora. Del mismo modo, Wi-Fi y Bluetooth se desactivaron. Las observaciones GNSS del receptor de bajo costo y el Xiaomi Mi 8 se almacenaron en formato RINEX 3.04 para luego ser procesados en modo estático relativo utilizando el software RTKLib ([Everett et al., 2022](#); [Takasu y Yasuda, 2009](#)).

### 5.5.1. Estrategias de procesamiento

Las observaciones GNSS adquiridas por el Xiaomi Mi 8 se procesaron utilizando el software de código abierto RTKLIB demo5 b34g (Everett et al., 2022; Takasu y Yasuda, 2009), las estrategias de procesamiento se pueden ver en la Tabla 5.7. Para evaluar el desempeño en posicionamiento multi-GNSS, se establecieron 8 combinaciones GNSS, es decir; G, E, G+R+E+C, G+E, G+R+E, R+E, R+E+C y E+C. Diferentes estudios han llevado a cabo evaluaciones de posicionamiento relativo considerando líneas de base compuestas por receptores GNSS de orden geodésico y teléfonos inteligentes (Geng y Li, 2019; Uradziński y Bakula, 2020), así como líneas de base compuestas por teléfonos inteligentes (Paziewski et al., 2021). Estos estudios han demostrado diferencias centimétricas al comparar las soluciones estimadas con las establecidas como referencia. En este estudio, se estableció una línea de base corta que consiste en un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 y un receptor GNSS de bajo costo con una antena de orden geodésico.

**Tabla 5.7:** Estrategias de procesamiento para el software RTKLib demo5 b34g.

Característica	Estrategia
Modo	Estático relativo
Frecuencias observadas	GPS L1/L5, GLO G1, GAL E1/E5a, BDS B1
Observable	Código y fase portadora
Tipo de filtro	Combinado
Frecuencia de muestreo	1 Hz
Máscara de elevación	12°
Máscara C/NO	20 dBHz
órbita y reloj GNSS	Efemérides transmitidas
Retraso troposférico	Modelo Saastamoinen
Retraso ionosférico	Efemérides transmitidas
Modelo estocástico	Ruido fase portadora (a0,b0):0.003 m Relación del error del código/fase portadora: 300:1
Resolución de ambigüedad	Fix and Hold
Archivo de antenas	ngs14.atx
Coordenadas de salida	ENU

### 5.5.2. Resultados del posicionamiento estático

Para evaluar el rendimiento de posicionamiento del Xiaomi Mi 8 considerando combinaciones GNSS, se establecieron como indicadores de precisión la media ( $\mu$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el error cuadrático medio (RMSE). En la Tabla 5.8 se enumeran los indicadores de precisión para cada combinación GNSS. G+R+E+C fue la combinación que presentó la mejor precisión, con RMSE de 0,7, 1,2 y 4,2 cm para los componentes Este, Norte y Vertical, respectivamente. Sin embargo, las combinaciones donde están involucrados GPS y Galileo alcanzaron precisiones similares, demostrando que para lograr altas precisiones y corregir ambigüedades en el posicionamiento tridimensional desde un teléfono inteligente, es necesario usar las constelaciones GPS y Galileo en común. Por otro lado, la

menor precisión fue alcanzada por la combinación R+E con RMSE de 27,6, 14,9 y 45,1 cm para los componentes Este, Norte y Vertical, respectivamente.

**Tabla 5.8:** Resumen estadístico de errores estáticos del posicionamiento relativo.

Combinación GNSS	# total de satélites	% de ambigüedades fijas	Error de posicionamiento en cm								
			Este			Norte			Vertical		
			$\mu$	$\sigma$	RMSE	$\mu$	$\sigma$	RMSE	$\mu$	$\sigma$	RMSE
G	11	-	4.9	5.3	7.3	7.3	1.8	7.5	13.2	2.4	13.4
E	5	21.8	1.5	14.2	14.3	5	16.5	17.2	5	39.3	38.8
G+R+E+C	32	100	-0.3	0.65	0.7	-1.1	0.45	1.2	-3.3	2.6	4.2
G+E	16	99.3	-0.2	0.7	0.7	-1.1	0.4	1.1	-4.1	2.5	4.8
G+R+E	26	99.7	-0.4	0.79	0.9	-1.1	0.54	1.2	-2.9	3.7	4.7
R+E	15	39.1	5.7	27	27.6	-6.5	13.4	14.9	40.2	20.4	45.1
R+E+C	21	15.6	7.9	22.3	23.7	-2.8	9.2	9.6	21.2	14.2	25.5
E+C	11	48.5	3.6	15.9	16.35	0.2	9.4	9.4	7.7	16.6	18.3

La disponibilidad de doble frecuencia de GPS y Galileo hace que estas constelaciones sean las más precisas en posicionamiento tridimensional desde un teléfono inteligente. GLONASS y BeiDou no se recomiendan para su uso debido a la baja ambigüedad que pueden lograr.

## 5.6. Discusiones

Se analizaron y evaluaron las observaciones de las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou desde un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en términos de visibilidad de los satélites, valores  $C/N_0$ , *multipath* e integridad. También, se investigó la precisión en posicionamiento tridimensional de las observaciones estáticas. Los resultados de las coordenadas fueron comparados con las obtenidas con equipo GNSS de grado geodésico. Este análisis y evaluación tiene como objetivo determinar si las observaciones GNSS de un teléfono inteligente son capaces de utilizarse en el monitoreo de la salud estructural. A continuación, se mencionan las principales observaciones basadas en los resultados de los diferentes experimentos evaluados. En primer lugar, se reportan los resultados relacionados con el análisis de la visibilidad y geometría de los satélites, luego, el análisis de la relación densidad/portadora del ruido observado ( $C/N_0$ ), después, lo relacionado con el análisis del *multipath*, enseguida la evaluación de la integridad de las observaciones para el experimento 3, y finalmente, el rendimiento en posicionamiento tridimensional.

Las condiciones térmicas durante los procesos de monitoreo sobre puentes en Sinaloa son extremas y en ocasiones superan los 40°. Por lo cual, los sensores de medición no deben estar expuestos al Sol durante largos tiempos. Debido a que la antena GNSS debe de estar libre de obstáculos durante la medición hace que esté expuesta directamente al Sol. Entonces, es necesario conocer el efecto de las altas temperaturas sobre las mediciones GNSS del Xiaomi Mi 8. No se han publicado estudios donde evalúen el efecto de las condiciones térmicas sobre la adquisición de mediciones GNSS desde un teléfono inteligente. Lo cual, justifica la importancia de entender este problema. Con base en los resultados alcanzados, las condiciones térmicas del entorno donde se localiza el teléfono inteligente Xiaomi Mi

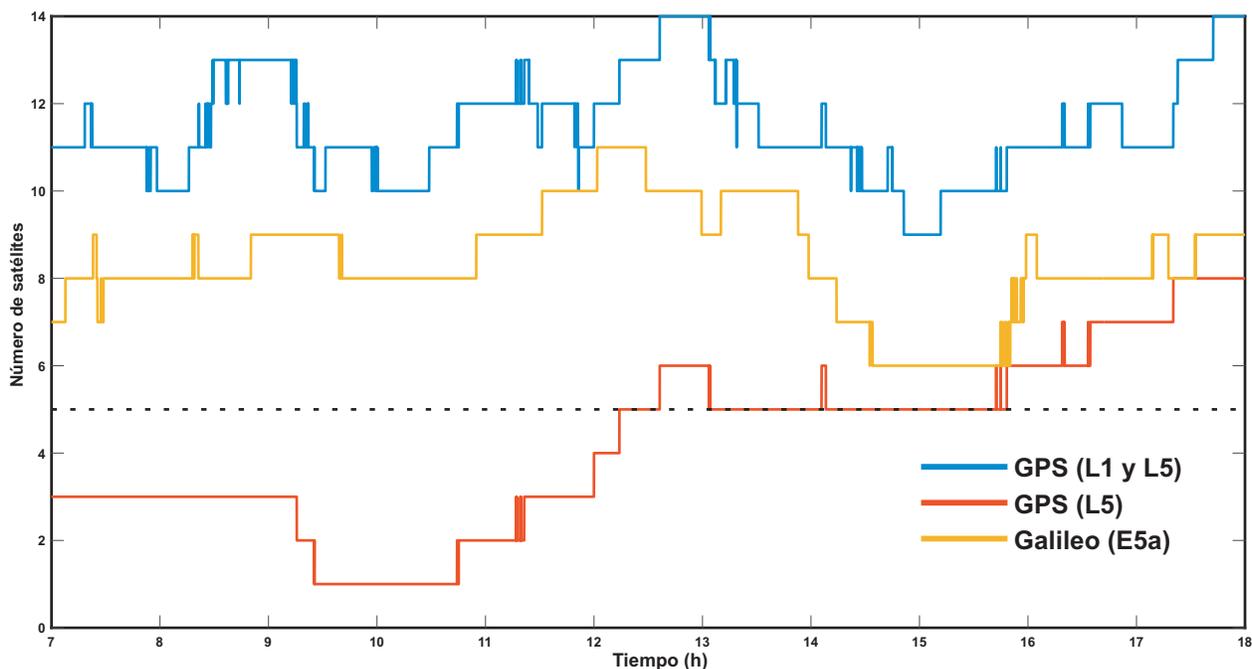
8 no presentan un efecto directo sobre la calidad de las observaciones. Sin embargo, es necesario proteger el teléfono cuando la temperatura supere los 30° o cuando el teléfono esté expuesto directamente al Sol, lo que ocasionará que se apague y posteriormente se dañe.

La orientación vertical de la antena presenta una mejor evaluación en la calidad de la señal. Por lo cual, se recomienda usar el teléfono de manera vertical en los experimentos y considerar fijar el centro de fase durante las observaciones para alcanzar una precisión del centímetro en el centrado. Para el caso de la orientación de la antena, si tiene una relación directa, cuando está horizontal no tiene visibilidad a todos los satélites disponibles durante la medición y por lo tanto la geometría es de baja calidad. Caso contrario, en vertical, la visibilidad de los satélites es mayor y esto beneficia a la geometría (DOP).

Para un periodo de medición de 24 hrs con la orientación de la antena en posición vertical se logran adquirir observaciones desde 100 satélites GNSS. Sin embargo, los objetivos de este capítulo 5 es evaluar las condiciones de uso del Xiaomi Mi 8 para mediciones sobre estructuras. Entonces, estableciendo un horario estricto donde es común que se lleven a cabo las pruebas de monitoreo sobre puentes en México, el autor definió una ventana de interés que inicia a las 07:00 hrs y finaliza a las 18:00 hrs. Un requisito necesario para lograr posicionamiento desde la tecnología GNSS; es tener observaciones en común mínimamente de 4 satélites (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Debido a que el chip GNSS embebido en el teléfono inteligente sigue las frecuencias  $L_1$  y  $L_5$  de GPS, se extrajeron los satélites GPS del bloque IIF (de la medición de 24 hrs) visibles durante la ventana de tiempo establecida, debido a que los satélites de este bloque tienen habilitada la señal  $L_5$ . También, se extrajeron los satélites Galileo disponibles en la ventana de tiempo (todos los satélites Galileo transmiten la señal  $E_{5a}$ ). Se consideraron únicamente los satélites duales de ambas constelaciones ya que la precisión debe de ser alta y las observaciones de GLO-NASS y BeiDou son de una sola frecuencia. En la Figura 5.25 se observa el seguimiento de los satélites GPS y Galileo. La línea color azul corresponde a los satélites GPS duales ( $L_1$  y  $L_{5a}$ ). La línea color rojo únicamente a los satélites GPS que transmiten la  $L_5$ , y la línea color amarillo corresponde a los satélites Galileo-duales ( $E_1$  y  $E_{5a}$ ). Considerando lo mencionado anteriormente, la constelación GPS no puede brindar posicionamiento de las 07:00 hrs hasta las 12:00 hrs aproximadamente, debido a que solo están visibles 3 o menos satélites GPS ( $L_5$ ), y el número aumenta a partir de las 12:30 hrs hasta alcanzar 8 satélites cerca de las 18:00 hrs. Por otro lado, Galileo siempre tiene disponible más de 5 satélites en el horario que se utiliza comúnmente para los trabajos de monitoreo sobre puentes. En resumen, si se combinan las constelaciones GPS y Galileo siempre estarán disponibles más de 6 satélites y si se decide utilizar únicamente GPS, entonces se recomienda hacer las mediciones después de las 12:30 hrs (horario local).

Cuando la antena del teléfono inteligente está orientada de manera horizontal, el porcentaje de puntuación de  $C/N_0$  es más bajo que el porcentaje alcanzado por la orientación vertical de la antena, aproximadamente con una diferencia del 18%. Para mediciones de periodos largos (24 hrs), el porcentaje de puntuación  $C/N_0$  fue similar al de periodos de mediciones cortas (4 hrs). Las frecuencias  $L_1/E_1$  alcanzaron mejores porcentajes de puntuación  $C/N_0$  que  $L_5/E_{5a}$ . GLONASS fue la única constelación en alcanzar porcentajes de

puntuación  $C/N_0$  cercanas al 100 %.



**Figura 5.25:** Disponibilidad de los satélites duales GPS y Galileo para el periodo de evaluación de 07:00-18:00 hrs (UTC-7).

La integridad de las observaciones GNSS para este estudio se enfocó únicamente al experimento 3. Tal como se observa en la Figura 5.19, para los receptores GNSS de bajo costo (chip GNSS) es muy costoso seguir las frecuencias  $L_5$  por sus características particulares y esto se puede ver en la constelación GPS donde se perdieron el 50% de las observables. Por otro lado, debido a la regulación de la FCC establecida por Estados Unidos la adquisición de la señal Galileo y BeiDou fue difícil de seguir durante el periodo de medición de 24 hrs. Este problema representa uno de los desafíos a resolver ya que Galileo es una de las constelaciones GNSS que más aporta precisión en las mediciones desde teléfonos inteligentes. Por lo cual, una posible solución es adquirir teléfonos inteligentes que tengan las actualizaciones necesarias en sus chips GNSS para rastrear las señales Galileo y BeiDou sin regulaciones.

La antena GNSS de parche embebida en el teléfono inteligente es la principal causa de *multipath* debido a su polarización lineal, donde no puede discriminar entre la señal GNSS directa y la señal indirecta. El *multipath* en las mediciones con teléfonos inteligentes es muy alto en comparación con las antenas de grado geodésico o incluso las de bajo costo. Para el cálculo del *multipath* se requieren de dos frecuencias (Ver Ecuación 5.1 y 5.2) para la combinación lineal, por lo tanto, solamente GPS y Galileo fueron evaluados. En el caso del experimento 1, las condiciones térmicas no tienen una relación consistente con el *multipath*. Por otro lado, la orientación vertical de la antena mostró los valores de *multipath*

más bajos, y la frecuencia  $L_5/E_{5a}$  tiene el mejor rendimiento en mitigar el *multipath*. Finalmente, el *multipath* de los 12 satélites GPS y 24 Galileo fue evaluado.  $L_1$  presentó valores de *multipath* aproximadamente 4 veces mayor que los alcanzados por  $L_5$  para todos los satélites GPS. Los satélites Galileo mostraron una relación 2.5:1 con respecto al *multipath* alcanzado por la frecuencia  $E_{5a}$  y  $E_1$ , respectivamente. Un estudio de evaluación del *multipath* para cada satélite observado por un teléfono inteligente no se ha reportado en la literatura científica, debido a que la mayoría de los estudios publicados solamente se enfocan en las constelaciones Galileo y BeiDou. Además, en Latinoamérica no se ha llevado a cabo un estudio tan completo orientado a los chips GNSS como el desarrollado en este capítulo 5.

Finalmente, las precisiones alcanzadas en posicionamiento tridimensional por el Xiaomi Mi 8 demuestran las capacidades que tiene esta tecnología en ser aplicada en estudios de la geodesia. Con valores aproximados de RMSE de 1 cm en la componente horizontal y 4.2 cm en la vertical, el Mi 8 se convierte en una opción para los levantamientos estáticos donde se busque precisiones en el orden de los decímetros. Además, se abre la opción de aplicación en el monitoreo de los desplazamientos horizontales y verticales de puentes flexibles, como es el caso de la sección atirantada del puente El Carrizo.

## 5.7. Conclusiones

En este Capítulo 5, se logró evaluar observaciones de fase portadora, código y ruido ( $C/N_0$ ) de múltiples constelaciones de doble frecuencia recopilados por un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en diferentes condiciones de medición. El porcentaje de puntuación  $C/N_0$ , el *multipath*, la integridad de las observaciones, la visibilidad de los satélites y el posicionamiento tridimensional fueron las variables a evaluar.

Con base en los resultados alcanzados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las condiciones térmicas del entorno donde se llevaron a cabo las mediciones GNSS no tienen un impacto directo en el chip GNSS y por lo tanto, tampoco las observaciones GNSS. Sin embargo, es necesario proteger el teléfono inteligente cuando las temperaturas sean altas ( $> 30^\circ$ ) para evitar daño.
- La orientación vertical de la antena GNSS del teléfono inteligente fue la que mejor rendimiento alcanzó con respecto a la horizontal. Se obtuvieron valores de *multipath* bajos y una mayor visibilidad de satélites GNSS. Además, el porcentaje de puntuación  $C/N_0$  fue 18% mayor.
- La antena GNSS y el chip GNSS embebidos en el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 tienen un desempeño alto en el seguimiento de señales GNSS simultáneas transmitidas por 100 satélites GNSS.
- Los porcentajes de puntuación  $C/N_0$  de las frecuencias  $L_5/E_{5a}$  fue similar a las frecuencias  $L_1/E_1$  en ambas condiciones térmicas. Demostrando que la variación térmica no afecta al chip GNSS en su rendimiento.

- Para la constelación GPS, los valores de *multipath* para la banda  $L_1$  son aproximadamente 4 veces más grande que los de la banda  $L_5$ . En el caso de Galileo,  $E_1$  es aproximadamente 3 veces más grande que los de la banda  $E_{5a}$ .
  - Los grandes valores de *multipath* son debido a la polarización lineal de la antena GNSS del Xiaomi Mi 8.
  - Cuando se realizan mediciones GNSS en periodos largos (24 hrs), el chip GNSS deja de seguir la constelación Galileo y BeiDou, por lo cual, es necesario reiniciar el chip GNSS.
  - El teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 considerando todas las constelaciones GNSS (GREC) alcanzó valores RMSE de 0.7, 1.2 y 4.2 cm para la componente Este, Norte y Vertical, respectivamente. Sin embargo, las combinaciones GNSS que contienen GPS y Galileo alcanzaron precisiones similares, demostrando que para poder obtener posicionamiento preciso es necesario usar estas constelaciones como base de cualquiera combinación GNSS.
  - La combinación R+E alcanzó la precisión más baja, con valores RMSE de 27.6, 14.9 y 45.1 cm para las componentes Este, Norte y Vertical, respectivamente. Por lo cual, la constelación GLONASS y BeiDou no se recomiendan utilizar cuando la combinación solamente involucra a dos constelaciones GNSS.
  - Las precisiones alcanzadas por el Xiaomi Mi 8 en este capítulo 5 son suficientes para monitorear desplazamientos que oscilan en el orden de los centímetros.
  - Para llevar a cabo mediciones GNSS sobre un puente con un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 en México es necesario medir en una ventana temporal de las 12:30 hrs a las 18:00 hrs, para garantizar la observación de un número considerable de satélites GNSS duales de GPS y Galileo.
-

# Referencias

- Aggrey, J., Bisnath, S., Naciri, N., Shinghal, G., y Yang, S. (2020). Multi-gnss precise point positioning with next-generation smartphone measurements. *Journal of Spatial Science*, 65(1):79–98.
- Altuntas, C. y Tunalioglu, N. (2021). Feasibility of retrieving effective reflector height using gnss-ir from a single-frequency android smartphone snr data. *Digital Signal Processing*, 112:103011.
- Angrisano, A. y Gaglione, S. (2022). Smartphone gnss performance in an urban scenario with raim application. *Sensors*, 22(3).
- Bahadur, B. (2022). A study on the real-time code-based gnss positioning with android smartphones. *Measurement*, 194:111078.
- Banville, S. y Van Diggelen, F. (2016). Precise positioning using raw gps measurements from android smartphones. *GPS world*, 27(11):43–48.
- Broadcom (2021). Broadcom bcm17755 gnss chip. <https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755>.
- Chen, B., Gao, C., Liu, Y., y Sun, P. (2019). Real-time precise point positioning with a xiaomi mi 8 android smartphone. *Sensors*, 19(12):2835.
- Dabove, P. y Di Pietra, V. (2019). Towards high accuracy gnss real-time positioning with smartphones. *Advances in Space Research*, 63(1):94–102.
- Dabove, P., Di Pietra, V., y Piras, M. (2020). Gnss positioning using mobile devices with the android operating system. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4):220.
- Elmezayen, A. y El-Rabbany, A. (2019). Precise point positioning using world's first dual-frequency gps/galileo smartphone. *Sensors*, 19(11).
- Ericsson (2018). Ericsson mobility report. *Ericsson: Stockholm, Sweden*.
- Everett, T., Taylor, T., Lee, D.-K., y Akos, D. M. (2022). Optimizing the use of rtklib for smartphone-based gnss measurements. *Sensors*, 22(10).
- Fortunato, M., Ravanelli, M., y Mazzoni, A. (2019). Real-time geophysical applications with android gnss raw measurements. *Remote Sensing*, 11(18).

- G-Nut (2021). G-nut software, g-nut/client. <https://gnutsoftware.com/software/client>. [Web; accedido el 23-07-2021].
- Geng, J. y Li, G. (2019). On the feasibility of resolving android gnss carrier-phase ambiguities. *Journal of Geodesy*, 93(12):2621–2635.
- Gim, J. y Park, K.-d. (2017). Comparison of positioning accuracy using the pseudorange from android gps raw measurements. *The Journal of Advanced Navigation Technology*, 21(5):514–519.
- GnssLogger (2021). Google gps measurement tools. <https://github.com/google/gps-measurement-tools/tree/master/GNSSLogger>. [Web; accedido el 26-01-2021].
- GSA (2017). White paper-using gnss raw measurements on android devices,”. [Web; accedido el 28-05-2023].
- Guo, L., Wang, F., Sang, J., Lin, X., Gong, X., y Zhang, W. (2020). Characteristics analysis of raw multi-gnss measurement from xiaomi mi 8 and positioning performance improvement with l5/e5 frequency in an urban environment. *Remote Sensing*, 12(4).
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Collins, J. (2012). *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Lachapelle, G. y Gratton, P. (2019). Gnss precise point positioning with android smartphones and comparison with high performance receivers. In *2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*, pages 1–9. IEEE.
- Logger, G. R. (2021). Logging of gnss raw data on android. <http://www.geopp.de/logging-of-gnss-raw-data-on-android/>. [Web; accedido el 26-01-2021].
- Mahato, S., Dutta, D., Roy, M., Santra, A., Dan, S., y Bose, A. (2023). Common android smartphones and apps for cost-efficient gnss data collection: An overview. *IETE Journal of Research*, pages 1–14.
- Netthonglang, C., Thongtan, T., y Satirapod, C. (2019). Gnss precise positioning determinations using smartphones. In *2019 IEEE Asia Pacific conference on circuits and systems (APCCAS)*, pages 401–404. IEEE.
- Pathak, V., Thornwall, S., Krier, M., Rowson, S., Poilasne, G., y Desclos, L. (2003). Mobile handset system performance comparison of a linearly polarized gps internal antenna with a circularly polarized antenna. In *IEEE antennas and propagation society international symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No. 03CH37450)*, volume 3, pages 666–669. IEEE.
- Paziewski, J., Fortunato, M., Mazzoni, A., y Odolinski, R. (2021). An analysis of multi-gnss observations tracked by recent android smartphones and smartphone-only relative positioning results. *Measurement*, 175:109162.

- Pepe, M., Costantino, D., Vozza, G., y Alfio, V. S. (2021). Comparison of two approaches to gnss positioning using code pseudoranges generated by smartphone device. *Applied Sciences*, 11(11).
- Realini, E., Caldera, S., Pertusini, L., y Sampietro, D. (2017). Precise gnss positioning using smart devices. *Sensors*, 17(10):2434.
- rinexON (2021). Nsl launches a new free android app as part of flamingo—discover rinexon. <https://www.flamingognss.com/rinexon>. [Web; accedido el 26-01-2021].
- Robustelli, U., Baiocchi, V., y Pugliano, G. (2019). Assessment of dual frequency gnss observations from a xiaomi mi 8 android smartphone and positioning performance analysis. *Electronics*, 8(1).
- Robustelli, U., Paziewski, J., y Pugliano, G. (2021). Observation quality assessment and performance of gnss standalone positioning with code pseudoranges of dual-frequency android smartphones. *Sensors*, 21(6).
- Sikirica, N., Malić, E., Rumora, I., y Filjar, R. (2017). Exploitation of google gnss measurement api for risk assessment of gnss applications. In *2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR)*, pages 1–3. IEEE.
- Specht, C., Dabrowski, P., Pawelski, J., Specht, M., y Szot, T. (2019). Comparative analysis of positioning accuracy of gnss receivers of samsung galaxy smartphones in marine dynamic measurements. *Advances in Space Research*, 63(9):3018–3028.
- Takasu, T. y Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost rtk-gps receiver with an open source program package rtklib. In *International symposium on GPS/GNSS*, volume 1. International Convention Center Jeju Korea.
- Teunissen, P. J. y Montenbruck, O. (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*, volume 10. Springer.
- Tomaščík, J. y Varga, M. (2021). Practical applicability of processing static, short-observation-time raw gnss measurements provided by a smartphone under tree vegetation. *Measurement*, 178:109397.
- Tunalioglu, N., Ocalan, T., y Dogan, A. H. (2022). Precise point positioning with gnss raw measurements from an android smartphone in marine environment monitoring. *Marine Geodesy*, 45(3):274–294.
- Uradziński, M. y Bakuła, M. (2020). Assessment of static positioning accuracy using low-cost smartphone gps devices for geodetic survey points' determination and monitoring. *Applied Sciences*, 10(15).
- Vaclavovic, P. y Dousa, J. (2016). G-nut/anubis: Open-source tool for multi-gnss data monitoring with a multipath detection for new signals, frequencies and constellations. In Rizos, C. y Willis, P., editors, *IAG 150 Years*, pages 775–782, Cham. Springer International Publishing.

- Wen, Q., Geng, J., Li, G., y Guo, J. (2020). Precise point positioning with ambiguity resolution using an external survey-grade antenna enhanced dual-frequency android gnss data. *Measurement*, 157:107634.
- Wu, Q., Sun, M., Zhou, C., y Zhang, P. (2019). Precise point positioning using dual-frequency gnss observations on smartphone. *Sensors*, 19(9):2189.
- Xiaomishop (2021). Descripción del producto: Xiaomi mi 10t. <https://www.xiaomishop.mx/xiaomi-mi-10t/p>. [Web; accedido el 04-05-2021].
- Yi, D., Bisnath, S., Naciri, N., y Vana, S. (2021). Effects of ionospheric constraints in precise point positioning processing of geodetic, low-cost and smartphone gnss measurements. *Measurement*, 183:109887.
- Yoon, D., Kee, C., Seo, J., y Park, B. (2016). Position accuracy improvement by implementing the dgnss-cp algorithm in smartphones. *Sensors*, 16(6):910.
- Zeng, S., Kuang, C., y Yu, W. (2022). Evaluation of real-time kinematic positioning and deformation monitoring using xiaomi mi 8 smartphone. *Applied Sciences*, 12(1).
- Zhang, X., Tao, X., Zhu, F., Shi, X., y Wang, F. (2018). Quality assessment of gnss observations from an android n smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *Gps Solutions*, 22(3):1–11.

# Capítulo 6

## Evaluación y análisis de PPP con resolución de ambigüedad entera utilizando diferentes software de código abierto y servicios en línea

### 6.1. Introducción

La técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) nace a partir de los trabajos desarrollados por [Anderle \(1976\)](#). Sin embargo, fue hasta finales de la década de los 90 cuando esta técnica se mejoró gracias a los estudios de [Zumberge et al. \(1997\)](#) y [Héroux y Kouba \(2001\)](#). La técnica PPP requiere de tres aspectos importantes: (1) observaciones de código y fase portadora desde un único receptor GNSS; (2) productos precisos de órbita y reloj del satélite; y (3) correcciones de modelos para lograr un posicionamiento tridimensional de alta precisión ([Liu et al., 2018](#); [Xi et al., 2021](#)). Además, el método PPP no requiere de una estación de referencia y determina las coordenadas de una estación sobre el Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF, por sus siglas en inglés) ([Yan et al., 2020](#)). En los últimos años, la técnica PPP ha sido utilizada en diferentes aplicaciones como en la determinación precisa de las órbitas de los satélites, la cartografía ([Liu et al., 2018](#)), monitoreo de la salud estructural ([Vazquez-Ontiveros et al., 2020](#)), determinación del retraso troposférico ([Bahadur, 2022](#)), determinación del vapor de agua ([Lu et al., 2020](#)), entre otros. Por lo cual, se demuestra el efecto positivo de utilizar la técnica PPP como una alternativa al posicionamiento relativo.

Por otro lado, para el postprocesamiento con la técnica PPP es necesario utilizar un software especializado que considere todos los modelos de error que afectan a esta técnica, ya que de esto dependerá la precisión buscada por el usuario. Diferentes institutos de investigación y universidades han creado paquetes de software PPP y han lanzado plataformas de procesamiento PPP en línea. Los servicios PPP en línea están disponibles las 24 horas del día y son gratuitos, el usuario solo debe enviar archivos de datos de observación GNSS en formato RINEX o comprimidos. Por otro lado, los paquetes de software PPP requieren

que el usuario tenga conocimientos sobre el procesamiento, ya que se necesita instalar el software y posteriormente descargar los productos precisos necesarios para poder realizar el procesamiento. Existen diversos software y servicios en línea para el procesamiento de datos GNSS con la técnica PPP en modo estático y cinemático, donde se mencionan: *RTKLib*, *PPPH*, *gLAB*, *PRIDE-PPPAR*, *Net\_Diff*, *goGPS*, *GAMP*, *GPS Tools*, *PPPLib*, *MG-APP* y *GipsyX* (paquetes de software GNSS). Para el caso de los servicios en línea se citan, *CSRS-PPP*, *APPS*, *GAPS*, *TRIMBLE Center-Point RTK* y *MagicGNSS*.

El posicionamiento puntual preciso (PPP) ha tenido popularidad en los últimos años en la comunidad científica. En [Ghoddousi-Fard y Dare \(2006\)](#) utilizaron 5 servicios en línea de procesamiento de datos GNSS en modo relativo (AUSPOS, SCOUT, OPUS) y absoluto (Auto-GIPSY, CSRS-PPP) para comparar y analizar las coordenadas en modo estático de diferentes estaciones GNSS distribuidas alrededor del mundo. En este mismo sentido, en [Guo \(2015\)](#) se evaluaron cuatro servicios PPP gratuitos en línea, a decir, APPS, GAPS, CSRS-PPP y Magic-PPP, para obtener posicionamiento estático y estimar el retardo troposférico. Concluyeron que los 4 servicios PPP en línea gratuitos pueden proporcionar precisión del nivel centimétrico hasta milimétrico en posicionamiento y 1-2 cm en la estimación de ZTD. Con este enfoque, se han llevado a cabo otros estudios donde se evalúa la precisión de los servicios PPP en línea con diferentes enfoques ([El-Mowafy, 2011](#); [El Shouny y Miky, 2019](#); [Leandro et al., 2011](#); [Wanas y Alhamadani, 2019](#)).

Por otro lado, el número de estudios llevados a cabo para la evaluación de software de código abierto utilizados en el procesamiento de datos GNSS con la técnica PPP, han sido limitados y esto motiva a la comunidad científica a realizar experimentos para evaluar los software de código abierto disponibles. En [Bahadur y Nohutcu \(2019\)](#) utilizaron el software PPPH de código abierto para procesar datos multi-GNSS con diferentes productos MGEX. También, en [Grinter et al. \(2020\)](#) utilizaron el software RTKLib modificado para determinar soluciones simuladas de ambigüedad en tiempo real en PPP. En [Chen et al. \(2021\)](#) investigaron el rendimiento de posicionamiento en términos de precisión, tiempo de convergencia y tasa de fijación, así como el tiempo hasta la primera fijación, de la combinación PPP-AR de solo GPS y múltiples GNSS con los productos precisos de CNES, SGG, CODE y PRIDE Lab utilizando el software PRIDE-PPPAR. Concluyeron que el rendimiento en posicionamiento con los productos CODE fue superior al de los demás. Además, las observaciones de múltiples GNSS presentaron mejoras significativas en el rendimiento del PPP con soluciones flotantes.

Aunque el método PPP ha sido bien visto como una técnica que se involucra más en aplicaciones GNSS, no existen suficientes investigaciones detalladas sobre los software y servicios en línea para el procesamiento PPP, ya que el software de procesamiento GNSS juega un papel importante en el desempeño del posicionamiento. En este contexto, el objetivo principal de este Capítulo 6 fue evaluar la precisión de la técnica PPP en modo estático y cinemático, considerando diferentes software PPP de código abierto y servicios gratuitos en línea.

Este Capítulo 6 está organizado de la siguiente manera: en la Sección 6.2 se descri-

ben los software de código abierto y servicios PPP en línea evaluados. La metodología y adquisición de datos se reportan en la Sección 6.3. En la Sección 6.4 se analizan los resultados, y finalmente, en las Secciones 6.5 y 6.6 se presentan la discusiones y conclusiones, respectivamente.

## 6.2. Resumen de los software PPP de código abierto y servicios PPP en línea

En esta Sección 6.2 se describen brevemente los software de código abierto y servicios PPP en línea evaluados. La selección de estos software y servicios en línea fue debido a su acceso gratuito y su popularidad.

### 6.2.1. Software PPP de código abierto

#### 6.2.1.1. PPPH

*PPPH* es un software de análisis GNSS de código abierto basado en MATLAB, soporta datos de las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y Beidou para el procesamiento (Bahadur y Nohutcu, 2018). PPPH ofrece a los usuarios la ventaja de determinar diferentes opciones y parámetros de procesamiento. Además, el archivo de salida contiene las coordenadas y parámetros para cada época, por otro lado, PPPH contiene opciones de análisis y graficado para la evaluación de los resultados. El software de código abierto, el manual y los datos de muestra de MATLAB para PPPH están disponibles en el sitio web Toolbox: <https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/PPPH.htm>.

#### 6.2.1.2. gLAB

*gLAB (GNSS-Lab)* es un software educativo de código abierto para el procesamiento y análisis de datos GNSS (Ibáñez et al., 2018). gLAB fue desarrollado en el año 2009 como un programa educativo de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés). Actualmente, gLAB solamente procesa GPS, sin embargo, se está actualizando para permitir el procesamiento de múltiples constelaciones, como Galileo. El instalador para Windows, el manual de usuario e información detallada sobre gLAB se pueden encontrar en el sitio web: <https://gage.upc.edu/en/learning-materials/software-tools/glab>.

#### 6.2.1.3. Net\_Diff

*Net\_Diff* es un software para descarga, posicionamiento y análisis de datos GNSS desarrollado por el Centro de análisis GNSS en el Observatorio Astronómico de Shanghai (SHAO, por sus siglas en inglés) (Zhang et al., 2020, 2019). Soporta las funciones *single point positioning (SPP)/PPP/positioning point positioninh ambiguity resolution (PPP-AR)/differential positioning/ Real Time Kinematic (RTK)*. Soporta todas las señales de las constelaciones GPS/GLONASS/BeiDou/Galileo/QZSS/IRNSS desde una frecuencia hasta frecuencia triple. Para obtener más información sobre Net\_Diff, se remite a los lectores al si-

tio web: [http://center.shao.ac.cn/shao\\_gnss\\_ac/Net\\_diff/Net\\_diff.html](http://center.shao.ac.cn/shao_gnss_ac/Net_diff/Net_diff.html). Además, es compatible con los archivos de observación generados a partir de un teléfono inteligente (Xiaomi mi 8). También, Net\_Diff dispone de un servicio en línea para el procesamiento de datos PPP y PPPAR (<http://129.211.69.159:8090/>).

#### 6.2.1.4. RTKLib

*RTKLib* es un paquete de herramientas de código abierto para el posicionamiento GNSS desarrollado por el Dr. T. Takasu (Takasu et al., 2007). Actualmente, RTKLib admite algoritmos de posicionamiento con las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y SBAS (Angrisano et al., 2020). Por otro lado, es compatible con diferentes modos de posicionamiento como posicionamiento de un solo punto (técnica absoluta), DGNSS (técnica relativa), cinemático, estático, línea base móvil, PPP-cinemático, PPP estático y PPP Fijo. Los resultados del procesamiento se pueden encontrar en archivos con diferentes opciones de salida como, coordenadas geodésicas (lat, lon, h), coordenadas geocéntricas (X,Y,Z), la línea de base (E,N,h) y el mensaje NMEA0183. RTKLib permite el procesamiento automatizado de una gran cantidad de estaciones IGS mediante un proceso por bash scripts en Linux. Para obtener más información sobre los archivos de entrada y salida de RTKLib, visite la página oficial en el sitio web: <https://www.rtklib.com/>.

#### 6.2.1.5. PRIDE-PPPAR

*PRIDE-PPPAR* es un software de código abierto que permite la resolución de ambigüedad de posicionamiento puntual preciso GNSS desarrollado por el laboratorio PRIDE en el centro de investigación GNSS de la Universidad de Wuhan (Geng et al., 2019). PRIDE-PPPAR fue diseñado siguiendo los principios de legibilidad, modularidad, extensibilidad y mantenibilidad, estos elementos permiten que el software se utilice de forma más flexible y cómoda. PRIDE-PPPAR está compuesto principalmente por dos módulos, procesamiento de datos GPS indiferenciados y resolución de ambigüedad de enteros. PRIDE-PPPAR genera archivos de salida que contiene las coordenadas de la solución en coordenadas ECEF (X,Y,Z). PRIDE-PPPAR es capaz de procesar archivos RINEX muestreados a 50 Hz. El software, los manuales de usuario e información más detallada, como la compatibilidad de las constelaciones y señales GNSS, se pueden descargar desde el sitio web oficial de PRIDE: <http://pride.whu.edu.cn/indexone.shtml>.

#### 6.2.1.6. MG-APP

*Multi-GNSS Automatic Precise Positioning (MG-APP)* es un software de código abierto que puede ser ejecutado sobre Windows/Linux/Unix. MG-APP soporta el procesamiento con observaciones de GPS, GLONASS, BDS, Galileo usando el filtro Kalman o el filtro de la raíz cuadrada de la información (SRIF, por sus siglas en inglés) (Xiao et al., 2020). Una de las herramientas innovadoras de MG-APP es que permite el modo de procesamiento de datos en tiempo real, donde utiliza dos épocas adyacentes para poder detectar la calidad de los datos y filtrar el cálculo. MG-APP se puede descargar desde el sitio web:

[https://github.com/XiaoGongWei/MG\\_APP](https://github.com/XiaoGongWei/MG_APP). Además, se pueden encontrar manuales y características detalladas del software.

#### 6.2.1.7. goGPS

**goGPS** es un software de código abierto que tiene como objetivo procesar datos crudos GNSS y tiene sus orígenes desde 2007 (Herrera et al., 2016). Inicialmente goGPS fue diseñado para funcionar con receptores GPS de bajo costo de frecuencia única, sin embargo, ahora puede funcionar con multi-constelaciones y multi-frecuencias. goGPS contiene múltiples algoritmos de análisis de datos con mínimos cuadrados que trabajan con combinaciones de observables y el uso de todas las frecuencias y seguimientos. goGPS utiliza el método LAMBDA para la resolución de las ambigüedades, puede encontrar más información sobre goGPS en <https://gogps-project.github.io/>.

#### 6.2.1.8. GAMP

**GAMP** es un software de código abierto y se deriva de la librería RTK de RTKLib, y está escrito en el lenguaje C ANSI (Zhou et al., 2018). Puede ser compilado y ejecutado en los sistemas operativos Windows, UNIX/Linux y Macintosh. El código fuente puede ser encontrado en el sitio web de GPS Toolbox (<https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/GAMP/>). Las mejoras de GAMP sobre RTKLib fueron la detección de deslizamiento de ciclos, manejo de sesgos entre frecuencias de pseudodistancias GLONASS y reparación de salto de reloj del receptor. El archivo de resultados de GAMP contiene el posicionamiento, número de satélites, residuales de pseudodistancia y fase portadora, ángulos de elevación de satélites y contenido total de electrones inclinado.

#### 6.2.1.9. PPPLib

*Precise Point Positioning Library (PPPLib)* es un software de código abierto escrito en el lenguaje de programación C/C++ para el procesamiento de datos multi-GNSS y es capaz de procesar datos multifrecuencia GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo y QZSS (Chen y Chang, 2021). PPPLib puede compilarse y ejecutarse en los sistemas operativos Windows y Linux. PPPLib resuelve diversos parámetros como el posicionamiento, el retraso ionosférico, el retraso troposférico y la información de la ambigüedad. PPPLib es un software poderoso para calcular soluciones PPP usando diferentes constelaciones GNSS o sus combinaciones entre sí, y para el procesamiento es capaz de descargar automáticamente los archivos necesarios como la órbita y el reloj precisos, EOP, DCB, y ATX. Para obtener más información, visite el sitio web oficial del software: <https://github.com/yxw027/PPPLib>.

#### 6.2.1.10. GipsyX

GipsyX/RTGx es un paquete de software desarrollado y mantenido por el Laboratorio de Propulsión a Reacción (JPL, por sus siglas en inglés) para posicionamiento, navegación, temporización y ciencias de la Tierra que utiliza diferentes mediciones de técnicas geodésicas: Sistemas satelitales de navegación global(GNSS), Medición de distancia por

láser satelital (SLR, por sus siglas en inglés) y Orbitografía Doppler y Radioposicionamiento Integrado por Satélite (DORIS, por sus siglas en inglés); con interferometría de línea de base muy larga (VLBI, por sus siglas en inglés) en desarrollo. El software ofrece estimaciones combinadas de parámetros geodésicos y geofísicos aplicando un enfoque de filtro de Kalman en datos reales o simulados (Bertiger et al., 2020). Los parámetros estimados incluyen las coordenadas y velocidades de las estaciones de interés, las órbitas y los relojes de los satélites, la orientación de la Tierra y los retrasos ionosféricos y troposféricos. Para obtener más información, visite el sitio web en <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>.

## 6.2.2. Servicios PPP en línea

En comparación con el software de código abierto que debe instalarse en una computadora, las plataformas en línea para procesar observaciones GNSS son más fáciles de usar. El usuario solamente carga el archivo de su interés, y en algunos servicios en línea es posible configurar el ángulo de elevación y el modo de solución PPP. En el caso del servicio CSRS-PPP, utiliza un ángulo de elevación de  $7.5^\circ$  y no es posible editarlo. Los archivos de salida de los resultados de estos servicios suelen contener el resumen del procesamiento, las coordenadas geodésicas o cartesianas, los retrasos troposféricos, los parámetros de reloj y los gráficos que representan los resultados.

### 6.2.2.1. CSRS-PPP

**CSRS-PPP** es un servicio desarrollado por el gobierno canadiense y es operado por la división de estudios geodésicos de Recursos Naturales de Canadá desde 2003 (Héroux et al., 2006; Tétreault et al., 2005). Este servicio es compatible con datos de frecuencia simple y doble de las constelaciones GPS y GLONASS. Utiliza los productos precisos del IGS y NRCAN y alcanza precisiones para la componente horizontal y vertical de 1 y 2 cm, respectivamente. Actualmente, CSRS-PPP versión 3 (jueves 20 de octubre del 2020) ha modificado sus algoritmos para integrar la resolución de ambigüedad (PPP-AR). El servicio CSRS-PPP incluye PPP con resolución de ambigüedad para los datos recopilados a partir del 1 de enero de 2018. Además, CSRS-PPP admite archivos RINEX con un tamaño máximo de 300 MB. Puede encontrar más información sobre este servicio en línea en la Tabla 6.2.

### 6.2.2.2. APPS

**APPS** (*Automatic Precise Positioning Service*) es un servicio operado por el laboratorio de Propulsión a Reacción de la NASA (JPL), Instituto de Tecnología de California y fue nombrado como servicio Auto-Gipsy (reemplazado por APPS) ([http://apps.gdgps.net/apps\\_howtouse.php](http://apps.gdgps.net/apps_howtouse.php)). El servicio APPS requiere de productos precisos de reloj y órbita GPS del JPL y utiliza el software GIPSY 6.4 del JPL para procesar los archivos de observación enviados. Este servicio puede procesar datos de frecuencia simple y doble de la constelación GPS. Para obtener más información, visite la Tabla 6.2.

#### 6.2.2.3. GAPS

El servicio **GAPS** (*GNSS Analysis and Positioning Software*) fue desarrollado y es mantenido por el Departamento de Geodesia e Ingeniería Geomática de la Universidad de New Brunswick (Leandro, 2009). Este servicio, en comparación con APPS, acepta diferentes tipos de datos GNSS, como se muestra en la Tabla 6.2. GAPS utiliza productos de reloj y órbita precisos proporcionados por el IGS y NRCan (Leandro et al., 2011). En la Tabla 6.2 se encuentra más información sobre el servicio en línea GAPS.

#### 6.2.2.4. Trimble Center Point RTX

**Trimble Center Point RTX** (*Real Time Extended*) es un servicio de procesamiento de mediciones GNSS de doble frecuencia de sesiones estáticas y tiene como límite mediciones mínimas de 1 hora y hasta 24 horas (Doucet et al., 2012), y es proporcionado por TRIMBLE (<https://www.trimblertx.com/UploadForm.aspx>). TCP-RTX utiliza la red global de estaciones de referencia de TRIMBLE para calcular las órbitas y relojes precisas de los satélites y puede alcanzar precisiones de 2 y 6 cm para posicionamiento horizontal y vertical, respectivamente, en observaciones de una hora de medición. El servicio en línea de Trimble no considera antenas que no se encuentren en su base de datos.

#### 6.2.2.5. MagicGNSS

**MagicGNSS** es un servicio de procesamiento de datos GNSS en línea operado por la empresa GMV Aerospace and Defense (García et al., 2010). MagicGNSS contiene dos formas disponibles para el procesado, una interfaz web interactiva y por correo electrónico. Los productos precisos de órbita y reloj utilizados por MagicGNSS son emitidos por el IGS y GMV (<https://magicgnss.gmv.com/user/ppp>).

Para resumir las características principales de los software de código abierto y servicios PPP en línea descritos anteriormente, se presentan las Tablas 6.3 y 6.2, respectivamente. Por otro lado, el modelo matemático de PPP-GNSS se puede consultar en Vazquez-Ontiveros et al. (2020).

### 6.3. Adquisición de datos y Metodología

Para evaluar el desempeño en posicionamiento y estabilidad de los software y servicios en línea a través de la técnica PPP en modo estático y cinemático, se diseñaron dos experimentos. El primero consistió en utilizar los resultados del posicionamiento estático (PPP-estático) de los datos de observación de estaciones IGS y compararlos con los valores de referencia emitidos por el IGS para analizar la precisión de PPP estático para períodos largos de medición (24 horas). En el segundo experimento, los resultados del procesamiento PPP cinemático para un archivo de observación de un período de tiempo corto fueron comparados con los valores de referencia estimados del método relativo de diferencias dobles (DD).

### 6.3.1. Descripción de los datos

Para el primer experimento, se seleccionaron 13 estaciones GNSS pertenecientes a la red geodésica de monitoreo continuo del IGS localizadas alrededor del mundo, como se puede observar en la Figura 6.1. Para cada estación, archivos de observación de 24 horas y muestreados a 30 segundos para el año 2020 (1 de enero) fueron descargados desde el sitio web del CDDIS de la NASA (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss>). Debido a que no todos los servicios en línea y software estudiados en este trabajo son compatibles con todas las constelaciones GNSS, se decidió estandarizar a solamente GPS ( $L_1$ ,  $L_2$ ). Para eliminar las constelaciones GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y IRSS se utilizó el software *gfzrxn\_lx* (Nischan, 2016) ejecutado desde la terminal de Linux. Por otro lado, se realizó un análisis de calidad aplicando el software *ANUBIS* (Vaclavovic y Dousa, 2016) a los archivos de observación de cada estación IGS para desestimar alguna posible relación entre la calidad de las mediciones de la estación con los resultados finales del proceso, ya que si la calidad de la estación es mala, podría alterar el desempeño de los servicios en línea y software utilizados.

El segundo experimento fue diseñado con un enfoque al monitoreo de la salud estructural, es decir, se llevó a cabo una medición con un receptor *Geomax Zenith 25* a una frecuencia de muestreo de 5 Hz sobre el puente ISLA MUSALÁ durante un período de 60 minutos. También, se colocó un receptor *Geomax Zenith 25* como estación de referencia en un monumento de centrado forzoso localizado en la azotea de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa (ver Figura 6.3 b). La configuración de medición de la estación de referencia fue igual a la del receptor localizado sobre el puente. En la Figura 6.2 se observa la configuración del experimento sobre el puente. El objetivo de utilizar la estación de referencia es para procesar los archivos de observación con la técnica de posicionamiento diferencial y tomar los resultados como los valores de referencia para el análisis del desempeño de los servicios en línea y software donde se procesaron los archivos de observación de la estación rover con la técnica PPP en modo cinemático. Los resultados del procesamiento DD y PPP se expresaron en series de tiempo, considerando la forma estándar de evaluar los desplazamientos sobre las estructuras.

### 6.3.2. Estrategias de procesamiento

Para el procesamiento de archivos de observación GNSS a través de la técnica PPP, ya sea en modo estático o cinemático, es necesario utilizar productos precisos (Héroux y Kouba, 2001). Para esto, los software de procesamiento PPP requieren de diferentes archivos de productos precisos como entrada para alcanzar soluciones precisas. Sin embargo, cada software requiere de un número de archivos de entrada diferente a otro, por lo cual, para esta investigación se consideraron los mismos archivos para todos los software, de esta manera se descarta que las diferencias en los resultados sea por el efecto de los archivos de entrada y no por el rendimiento en los diferentes algoritmos y estrategias propias de cada software para el procesamiento PPP.

Por otro lado, es importante resaltar que no todos los software analizados tienen la estrategia de resolución de ambigüedad entera. Para la resolución de la ambigüedad entera se necesitan productos precisos específicos, por lo cual, los software que no tienen esta opción AR no requieren de esos productos. goGPS, Net\_Diff, PRIDE-PPPAR y Gipsy X son los software que tienen la opción AR. En la Tabla 6.1 se enlistan los archivos de los productos precisos que se utilizaron para el procesamiento PPP en todos los software analizados, al igual que la configuración del procesamiento. Por otro lado, en el caso de los servicios en línea, estos son capaces de descargar los productos precisos que necesitan y así facilitando al usuario el procesamiento. Cada servicio en línea utiliza los productos precisos emitidos por diferente institución.

El archivo de observación de cada estación fue procesado por los 10 software descritos en la Tabla 6.3 y los 5 servicios en línea de la Tabla 6.2 por el método PPP en modo estático, y las coordenadas resultantes estuvieron en la época de la medición (doy 1<sup>1</sup>) y referenciadas al ITRF2014. Estas coordenadas fueron comparadas con las publicadas<sup>2</sup> por el JPL de la NASA en el sitio web <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/tables/table1.html> y se consideraron como referencia para el análisis del desempeño de cada software y servicio en línea estudiado. Las coordenadas ECEF XYZ fueron transformadas a ENU con la Ecuación 6.2 y se consideró la coordenada de referencia como el origen del sistema topocéntrico. Se analizó un método estadístico basado en el análisis de diferencias entre valores medidos (referencia) y simulados (obtenidos del procesamiento): El Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés). El error cuadrático medio  $RMSE(i = 1, 2, \dots, m)$  se calcula comparando las coordenadas de referencia con las resultantes de los software y servicios en línea. El RMSE se expresa de la siguiente forma (Wang et al., 2012):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (6.1)$$

donde  $\mu$  son las coordenadas correctas/referencia;  $n$  es el número de épocas; y  $x$  son las coordenadas obtenidas por los software y servicios en línea. Debido a que las coordenadas topocéntricas ENU representan la distancia entre la posición de referencia y la posición obtenida por cada software y servicio en línea, es decir, cada coordenada E, N y U representa la expresión  $(x_i - \mu)^2$  de la Ecuación 6.1.

Para el procesamiento del archivo de observación cinemático medido sobre el puente Isla Musalá, se utilizó el software científico TRACK para procesar con el método de diferencias dobles, utilizando las coordenadas resultantes como referencia para la evaluación del desempeño de los software de código abierto y servicios en línea estudiados. Debido al formato del archivo RINEX y su peso, y la opción no disponible de procesar en mo-

<sup>1</sup>01 de enero de 2020

<sup>2</sup>Las coordenadas publicadas por el JPL de la NASA están referenciadas al marco de referencia IGS2014 y a la época de referencia 01 de enero de 2020

do PPP cinemático de algunos software y servicios en línea, no fue posible el proceso en gLAB, PPPH, goGPS, GipsyX, PPPLib, APPS, TRIMBLE, magigGNSS y GAPS. Por otro lado, las coordenadas resultantes de salida del proceso de los software y servicios en línea, se encuentran en diferente sistema de referencia. Las coordenadas del receptor GNSS se calculan en el ITRF, es decir, el sistema de coordenadas cartesianas centradas en la tierra ( $X, Y, Z$ ). Sin embargo, en SHM, el uso directo de las coordenadas XYZ no es adecuado para evaluar la respuesta de los desplazamientos horizontales y verticales de la estructura estudiada debido a su naturaleza. Para resolver este problema, las coordenadas geocéntricas XYZ deben transformarse en un sistema de coordenadas topocéntricas ENU (este, norte, arriba), o también conocidas como sistema cartesiano 3D local.

Una vez se define el origen topocéntrico con las coordenadas geocéntricas ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), las coordenadas geocéntricas ( $X_t, Y_t, Z_t$ ) en un tiempo  $t$  se pueden convertir en coordenadas topocéntricas ( $E_t, N_t, U_t$ ) utilizando la siguiente Ecuación:

$$\begin{bmatrix} E_t \\ N_t \\ U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\sin(\phi_0)\cos(\lambda_0) & -\sin(\phi_0)\sin(\lambda_0) & \cos(\phi_0) \\ \cos(\phi_0)\cos(\lambda_0) & \cos(\phi_0)\sin(\lambda_0) & \sin(\phi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t - X_0 \\ Y_t - Y_0 \\ Z_t - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

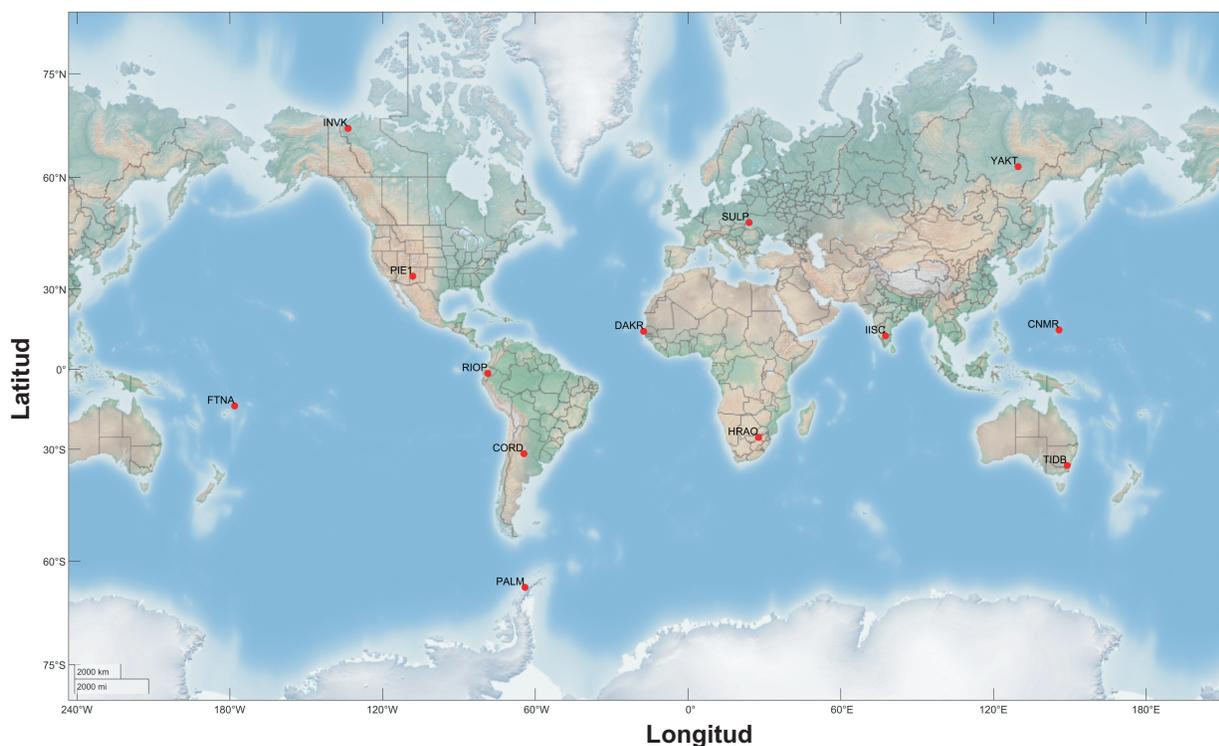
donde  $\phi_0$  y  $\lambda_0$  es la latitud y longitud geodésica del origen topocéntrico, respectivamente, que se deriva de sus coordenadas geocéntricas ( $X_0, Y_0, Z_0$ ). Para este estudio, el origen del sistema de coordenadas topocéntricas se definió sobre el punto donde se colocó el receptor GNSS (Ver Figura 6.2). Debido a que los ejes  $N$  y  $E$  del sistema topocéntrico apuntan a las direcciones norte y este, respectivamente, el desplazamiento del puente en el plano horizontal del GNSS se expresará en los ejes  $N$  y  $E$ , dependiendo de la orientación de la dirección de rotación con respecto a el sistema topocéntrico. Los sistemas de ejes de coordenadas GNSS y de coordenadas del puente son diferentes entre sí. Por lo cual, las coordenadas GNSS topocéntricas ( $N^{GNSS}, E^{GNSS}$ ) se proyectan en el sistema de coordenadas del puente ( $x^{puente}, y^{puente}$ ) utilizando la Ecuación:

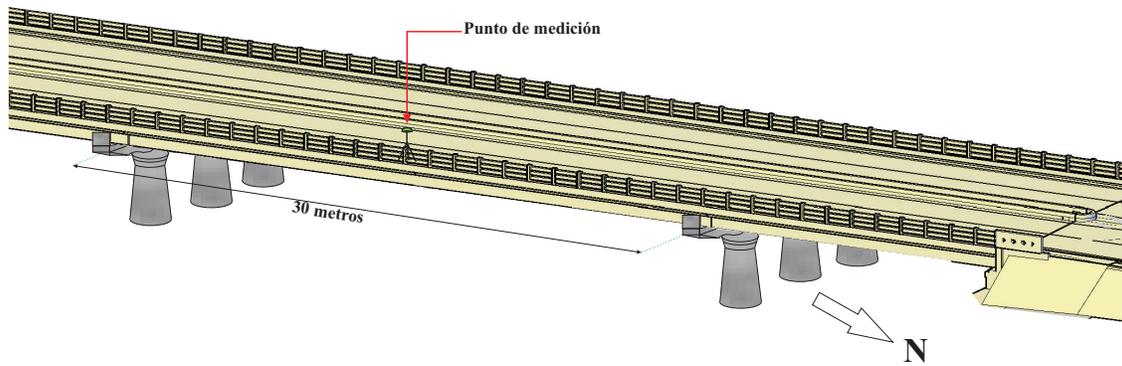
$$\begin{aligned} x^{puente} &= N^{GNSS} \cos(\alpha) + E^{GNSS} \sin(\alpha) \\ y^{puente} &= -N^{GNSS} \sin(\alpha) + E^{GNSS} \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (6.3)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo de rotación entre el GNSS topocéntrico y los sistemas de coordenadas del puente.

**Tabla 6.1:** Resumen de opciones de procesamiento PPP para los software estudiados.

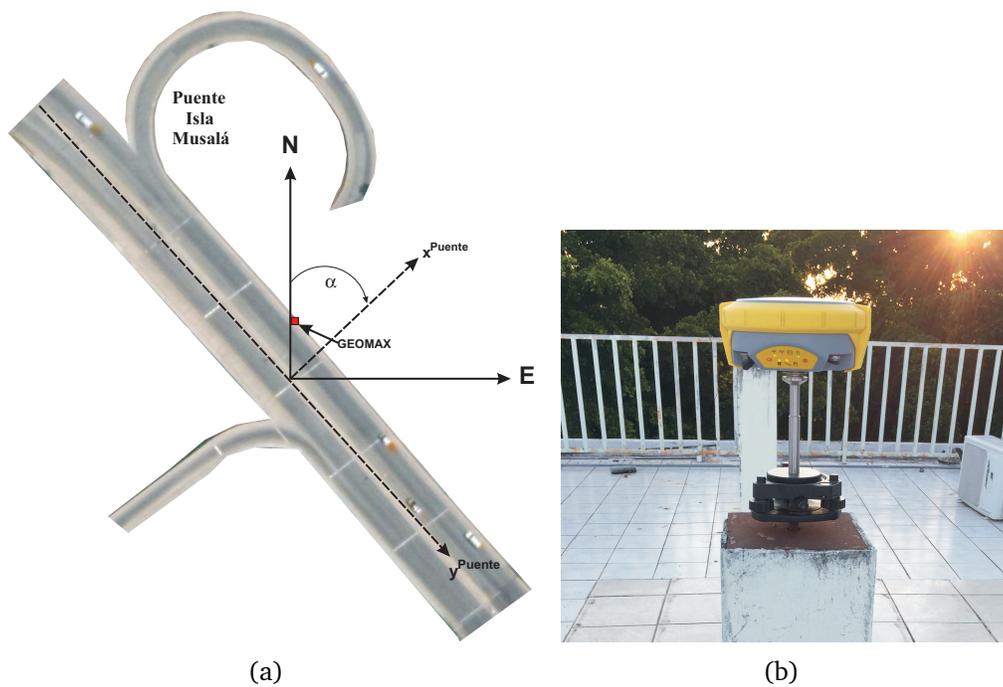
<b>Modo de procesamiento</b>	<b>Estatico</b>	<b>Cinematico</b>
Sistema GNSS		GPS
Observación		Fase y Código
Frecuencia		L1, L2
Órbitas de satélite precisas		IGS final (5 min)
Relojes satélite precisos		IGS final (30S)
Interpolación productos		SI
Correcciones de centro de fase		IGS (ATX)
Modelo troposférico		GPT+GMF
Modelo ionosférico		iono-free
Parámetros de Orientación		CODE (ERP)
Terrestres		
Frecuencia de muestreo	30 s	5 Hz
Carga oceánica		FES2014b (OTL)
Sesgos de Código		P1C12001(DCB)
Sesgos de fase		WHU5IGSFIN (bia)
Marco y época de referencia		ITRF14-época 2020

**Figura 6.1:** Distribución de las 13 estaciones GNSS del IGS utilizadas en el experimento 2.



**Figura 6.2:** Representación 3D del puente Isla Musalá.

El ángulo  $\alpha$  es el rumbo de la cuadrícula de la línea de referencia del puente, ya que el eje  $x^{puente}$  está orientado hacia el eje transversal del puente, por lo tanto,  $\alpha$  se calculó utilizando las coordenadas de campañas de mediciones anteriores. En la Figura 6.3a se ilustran los ejes  $x^{puente}$  y  $y^{puente}$  sobre el puente.



**Figura 6.3:** Estrategias del experimento cinemático: (a) rotación de las coordenadas topocéntricas y, (b) estación de referencia en la azotea de la FACITE.

**Tabla 6.2:** Principales características de los servicios en línea para el procesamiento PPP.

Características	GAPS	APPS	CSRS-PPP	MagicGNSS	Trimble Center Point RTX
Desarrollador	University of New Brunswick	Jet Propulsion Laboratory	Natural Resources Canada	Compañía GMV, España	Compañía TRIMBLE
Sitio web	<a href="http://gaps.gge.unb.ca/">http://gaps.gge.unb.ca/</a>	<a href="https://apps.gdgps.net/">https://apps.gdgps.net/</a>	<a href="https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php?locale=en">https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php?locale=en</a>	<a href="http://magicgnss.gmv.com/ppp">http://magicgnss.gmv.com/ppp</a>	<a href="https://www.trimblertx.com/">https://www.trimblertx.com/</a>
Modo de proceso admitido	Estático; Cinemático	Estático	Estático;Cinemático	Estático;Cinemático	Estático
Datos de observación	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia única y doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble
Limitaciones del archivo cargado	Sin registrar: ≤ 5 MB Registrado: ≤ 10 MB	≤ 10MB	≤ 300 MB	≤ 10 MB	≤ 10 MB
Constelación	GNSS	GNSS	GPS+GLONASS	GNSS	GNSS
Marco de referencia	ITRF2014/NAD83	ITRF2014	ITRF2014/NAD83	ITRF2014	ITRF2014
Productos de satélite preciso	IGS	JPL	IGS	IGS o GMV	TRIMBLE
Resolución de ambigüedad	-	-	decoupled clock model (Collins et al., 2010)	-	-

**Tabla 6.3:** Principales características de los software de código abierto para el procesamiento PPP

Características	gLAB	PPPH	RTKLIB	NET-DIFF	PRIDE-PPPAR	MG-APP	goGPS	GAMP	PPPLib	GIPSY X
Desarrollador	Agencia Espacial Europea	Bahadur y Nohutcu (2018)	Takasu et al. (2007)	Centro de Analisis GNSS Observatorio Astronómico de Shanghai	Laboratorio PRIDE Centro de Investigación GNSS Universidad de Wuhan	Laboratorio Estatal de Geodesia y Dinámica de la Tierra Instituto de Geodesia y Geofísica de la Academia de Ciencias de China, Wuhan	Herrera et al. (2016)	Zhou et al. (2018)	Chen y Chang (2021)	Jet Propulsion Laboratory NASA
Modo de proceso	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático	Estático, cinemático
Frecuencias de observación	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble	Frecuencia doble
Sistema Operativo	Windows	Windows	Windows, Linux	Windows	Linux	Windows, Linux	Windows	Windows, Linux	Windows, Linux	Linux
Constelación GNSS	G	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C	G,R,E,C
Solución	Por época	Por época	Por época y única	Por época	Por época	Por época	Única	Por época	Por época	Por época
Solución de ambigüedad	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI
Marco de referencia	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014	ITRF2014
Productos de satélite precisos	IGS	IGS	CODE, IGS, JPL, Wuhan, CNES	Todos los disponibles	Todos los disponibles	IGS	IGS	IGS	IGS	IGS
Fuente	<a href="#">Ibáñez et al. (2018)</a>	<a href="#">Bahadur y Nohutcu (2018)</a>	<a href="#">Takasu et al. (2007)</a>	<a href="#">Zhang et al. (2020, 2019)</a>	<a href="#">Geng et al. (2019)</a>	<a href="#">Xiao et al. (2020)</a>	<a href="#">Herrera et al. (2016)</a>	<a href="#">Zhou et al. (2018)</a>	<a href="#">Chen y Chang (2021)</a>	<a href="#">Bertiger et al. (2020)</a>

## 6.4. Resultados y análisis

### 6.4.1. Experimento estático

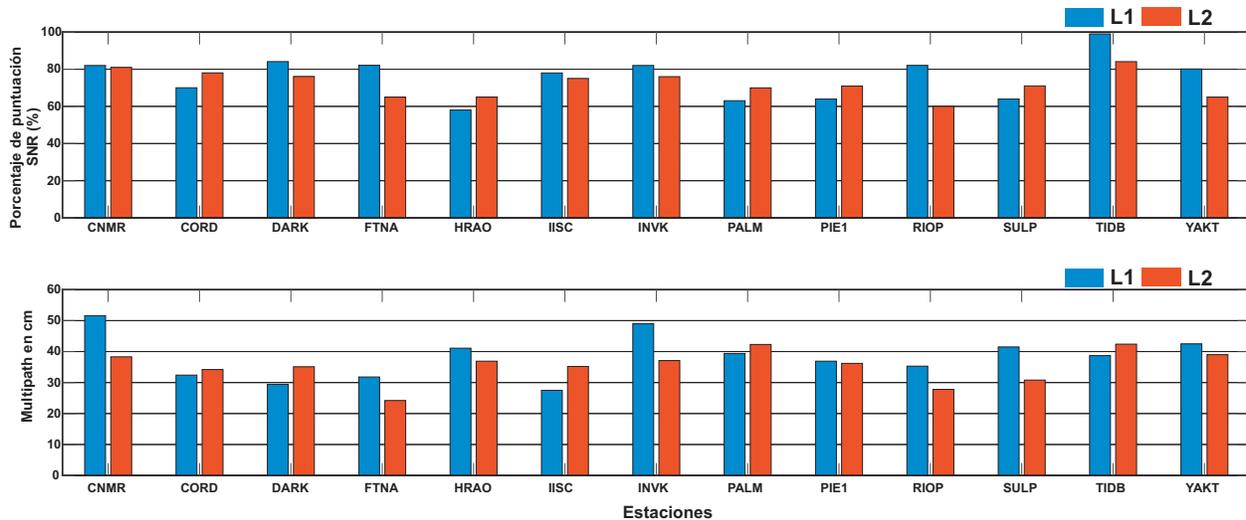
Una buena calidad de los datos de observación puede garantizar el análisis y la explicación correcta de diferentes fenómenos de interés, como la deformación de la corteza terrestre, desplazamientos en estructuras, entre otros. Por lo tanto, con ayuda del software Anubis (Vaclavovic y Dousa, 2016) se realizó un análisis de calidad a las 13 estaciones GPS pertenecientes al IGS para determinar la calidad de sus observaciones. Para nuestro caso de estudio, solamente se consideraron 3 parámetros de calidad: la integridad, *multipath* y relación señal-ruido. Como las estaciones pertenecen a la red internacional del IGS, se esperaba que la calidad de estas estaciones estén dentro de los lineamientos publicados por el IGS (IGS, 2021). En general, la integridad de las 13 estaciones estuvo cerca del 100 %. El IGS recomienda valores de *multipath* para las frecuencias  $L_1$  y  $L_2$  menores a 30 cm (IGS, 2021) y considerando la propuesta del autor en la Sección 3.4.1 del Capítulo 3, se establece un 80 % para el porcentaje de puntuación SNR.

Se encontró que el 53.8 % de las estaciones superan el 80 % del puntaje de SNR en  $L_1$  y  $L_2$ . La señal  $L_2$  presentó intensidad muy baja debido, posiblemente a la ubicación geográfica donde se encuentran algunas estaciones. En general, solamente 2 estaciones presentaron valores al 80 % en las dos señales  $L_1/L_2$ . Estos valores de puntaje de observación pueden deteriorar la precisión del posicionamiento. Por lo cual, es importante definir un umbral SNR al momento del procesamiento.

El *multipath* describe la situación donde la señal GNSS llega al receptor desde diferentes trayectorias, debido a que esta es reflejada en algún objeto cercano a la antena y se considera como ruido en las observaciones (Souto, 2014). Por lo tanto, el *multipath* afecta directamente en el posicionamiento, por eso se busca estratégicamente un lugar para colocar la antena GNSS y evitar esta fuente de error. El IGS recomienda valores menores a 30 cm de MP para  $L_1$  y  $L_2$ , considerando esto, solamente 4 estaciones estuvieron por debajo de lo recomendado; FTNA (MP2), IISC (MP1) y RIOP (MP2). Las magnitudes para MP1 y MP2 pueden ser iguales o diferentes dependiendo de la versión del programa interno (*firmware del receptor*) (Ray y Senior, 2005). En general, la mayoría de las estaciones estuvieron arriba de lo establecido por el IGS, por lo cual, se debe considerar una máscara de elevación mayor a  $10^\circ$  en el procesamiento para evitar señales contaminadas por *multipath*. Este tipo de análisis ayuda a entender los resultados del procesamiento, debido a que estos errores afectan el rendimiento del posicionamiento final.

Las coordenadas absolutas topocéntricas ENU se muestran en la Figura 6.5. Para gLAB, la estación que mostró los valores con mayor error en sus componentes ENU fue CNMR, en el orden de los 50 cm. Estos grandes valores se pueden derivar del alto *multipath* que presenta la estación, ya que fue la que obtuvo el mayor valor. Sin embargo, para el resto de las estaciones no se aprecia este comportamiento, ya que las estaciones que obtuvieron valores bajos de coordenadas ENU, no necesariamente presentaron valores de *multipath* bajos. Se puede ver en las estaciones DARK, SULP y TIDB, que presentaron las coordenadas ENU más bajas y valores de *multipath* altos. Para determinar la componente con mejor

desempeño, el autor calculó el error cuadrático medio (RMSE) y los resultados se ilustran en la Figura 6.6. Se determinó que la componente U alcanzó el mejor rendimiento con valores similares a los de la componente N.

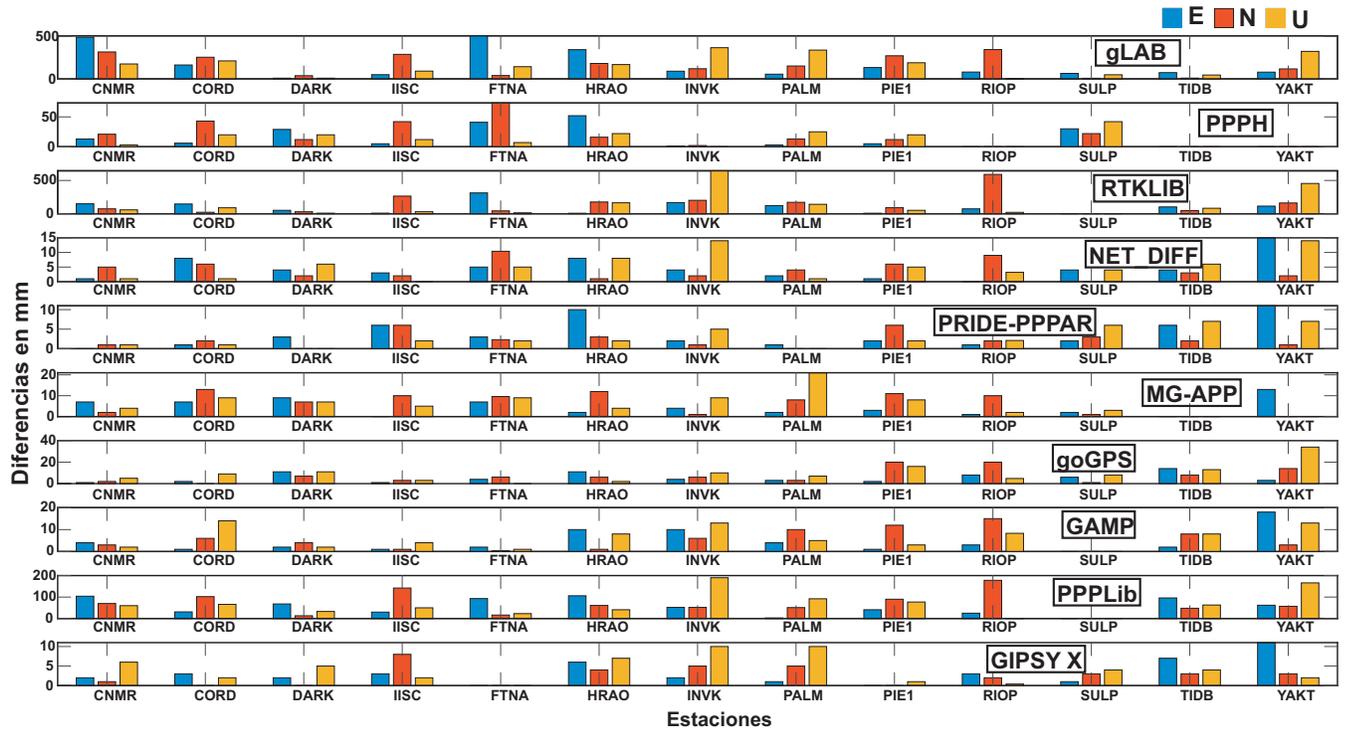


**Figura 6.4:** Análisis de calidad de las estaciones GNSS utilizadas en el experimento.

Por otro lado, la estación FTNA fue la que alcanzó los valores más altos en sus componentes ENU para el software PPPH. En este caso, el *multipath* no se puede correlacionar de manera directa en la precisión, ya que FTNA fue de las estaciones que presentó los valores más bajos. Para PPPH, la estación INVK fue la que alcanzó los valores más bajos, en el rango de 1-3 milímetros para las 3 componentes ENU. Las diferencias entre los valores de las componentes ENU para las estaciones RIOP, TIDB y YAKT fueron bastante grandes, cercanas a los 100 cm. Por lo cual, se decidió no agregarlas para mantener la escala de la Figura 6.6. RTKLib es uno de los software más utilizados, ya que su interfaz es amigable y permite que el usuario procese de manera rápida y sin complicaciones, sin embargo, la facilidad de uso de un software no garantiza que su resultado de proceso sea preciso. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente, es el software RTKLib. Las componentes ENU derivadas del software RTKLib fueron las de mayor magnitud en la mayoría de estaciones IGS, principalmente para INVK, RIOP y SULP. Estas estaciones alcanzaron magnitudes en sus componentes ENU mayores a los 25 cm. El software PPPLib presentó magnitudes máximas y mínimas en las componentes ENU de 106 y 3 mm, respectivamente. Las estaciones que alcanzaron las mayores magnitudes fueron INVK, RIOP y YAKT.

gLAB, PPPH, RTKLib y PPPLib fueron los software que presentaron el desempeño más bajo en el posicionamiento. Por otro lado, Net\_Diff, PRIDE-PPPAR, MG-APP, goGPS, GAMP y GipsyX fueron los software con el mejor desempeño, alcanzando magnitudes en las componentes ENU en el orden del centímetro. El software Net\_Diff presentó las magnitudes máximas y mínimas de las componentes ENU en las estaciones YAKT y SULP con valores de 15 y 0 mm, respectivamente. Net\_Diff obtuvo el mejor desempeño en posicionamiento en la componente N. Por otro lado, PRIDE-PPPAR fue el software que presentó el mejor

desempeño en todas las componentes, con valores máximos y mínimos de 11 y 0 mm, en las estaciones YAKT y CNMR/DARK/PALM, respectivamente.



**Figura 6.5:** Diagrama de barras de las componentes E, N y U obtenidas para las 13 estaciones IGS con los software de código abierto.

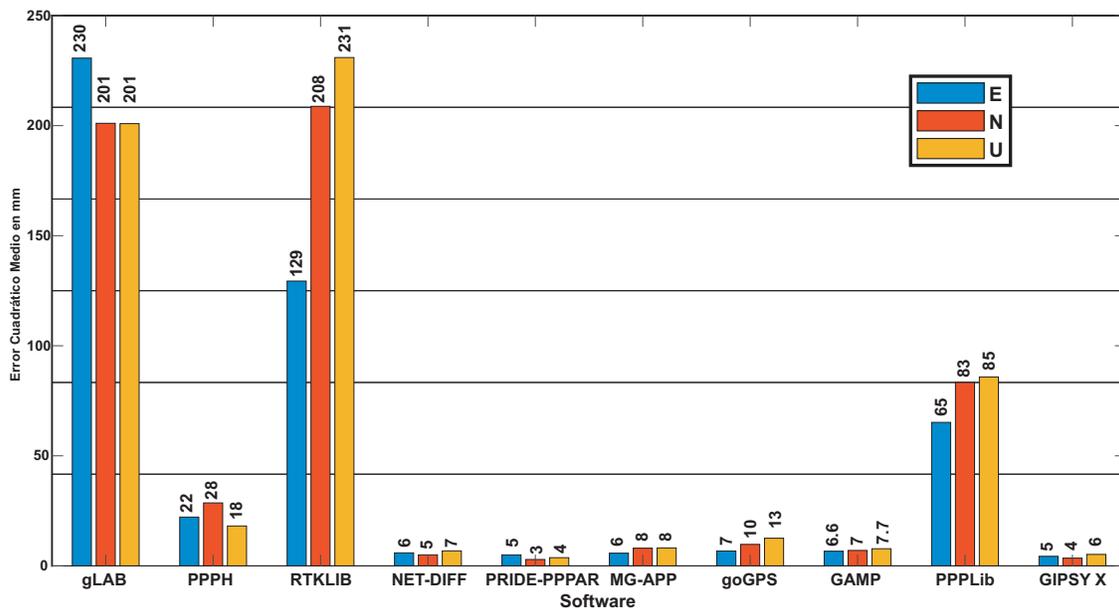
**Tabla 6.4:** Magnitudes de las componentes ENU máximas y mínimas obtenidas con los software de código abierto evaluados.

Software	Componentes					
	E (mm)		N (mm)		U (mm)	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
gLAB	505	8	344	7	366	1.8
PPPH	52	1	73	2	42	3
RTKLIB	433	8	591	30	645	21
NET_DIFF	15	0	10	0	14	0
PRIDE-PPPAR	11	0	6	0	7	0
MG-APP	13	2	13	2	21	2
goGPS	14	1	20	1	34	2
GAMP	18	1	15	1	14	2
PPPLib	106	3	178	13	190	23
GIPSY X	11	0	8	0	10	0

Para el caso del software *MG-APP*, este presentó un buen desempeño principalmente en la componente E y obtuvo valores en las componentes ENU máximas de 21 mm para PALM

y mínimas de 2 mm para Sulp, RIOP y INVK. El software goGPS obtuvo las magnitudes en las componentes ENU más altas en la estación YAKT de 34 mm y las mínimas en CNMR, CORD, IISC y Sulp de 2 mm. El software GAMP tuvo el mejor desempeño en la componente E. Las magnitudes en las componentes ENU mínimas y máximas fueron de 1 y 18 mm en las estaciones IISC/FTNA y YAKT, respectivamente. Finalmente, el software científico GipsyX fue uno de los software que alcanzó el mejor desempeño en posicionamiento, con magnitudes en las componentes ENU mínimas y máximas de 0 y 11 mm. Además, presentó el mejor rendimiento en la componente E, con un RMSE de 5 mm.

En la Tabla 6.4 se observan las magnitudes de las coordenadas ENU máximas y mínimas estimadas con los software de código abierto estudiados. Por otro lado, en la Figura 6.6 se ilustran los errores cuadráticos medios de las componentes ENU para cada software de código abierto evaluado. Con base en los resultados de la Figura 6.6 se seleccionó la componente con el mayor desempeño para cada software de código abierto.

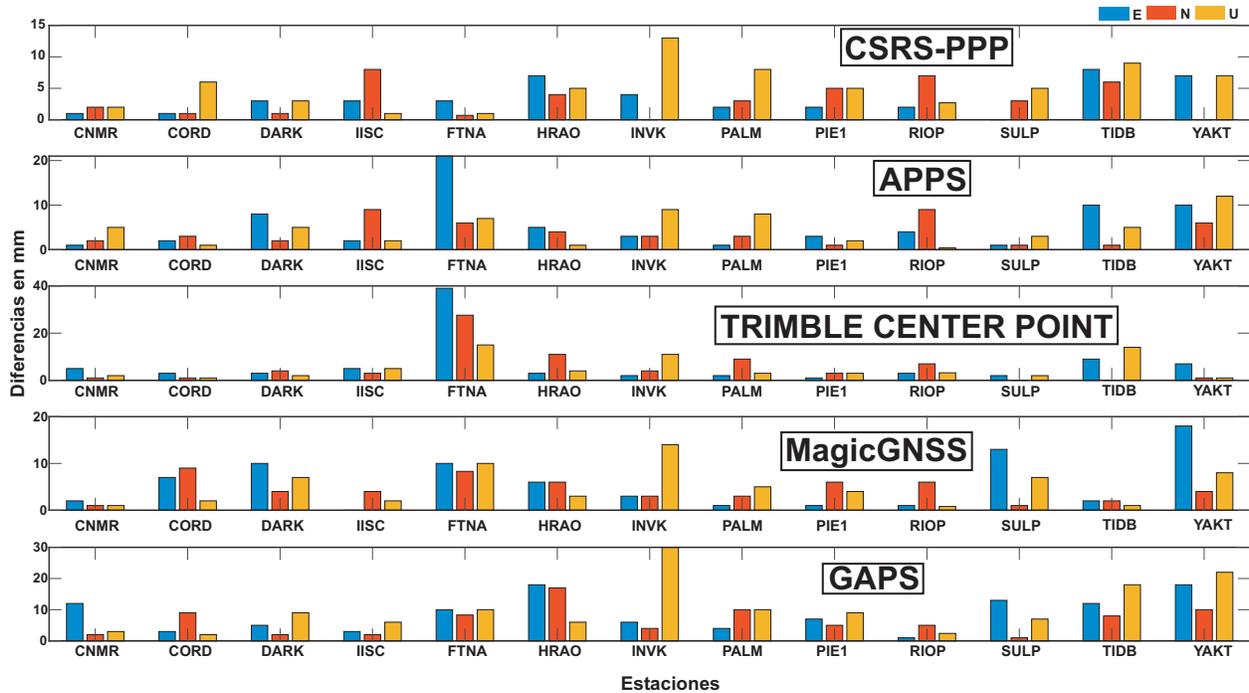


**Figura 6.6:** Error cuadrático medio para cada componente ENU de los software de código abierto evaluados en este Capítulo 6.

La precisión alcanzada por cada software está relacionada directamente con los algoritmos de análisis, edición, procesamiento, ajuste y filtrado que contiene cada uno de ellos. Por lo cual, el software que contiene estos algoritmos requiere de un mayor número de parámetros de entrada. Esto requiere un conocimiento amplio sobre los procesos GNSS en los usuarios.

En la Figura 6.7 se observan las magnitudes de las coordenadas ENU obtenidas por cada servicio PPP en línea para todas las estaciones IGS. En general, los resultados de los servicios PPP en línea presentaron mejor rendimiento que algunos software de código abierto. Los servicios PPP en línea CSRS-PPP y APPS fueron los que mejor desempeño alcanzaron

en el posicionamiento, principalmente por la capacidad de resolver ambigüedades. Sin embargo, el resto de servicios PPP presentaron precisiones muy similares a CSRS-PPP y APPS. Para determinar la componente con mejor desempeño, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) aplicando la Ecuación 6.1.



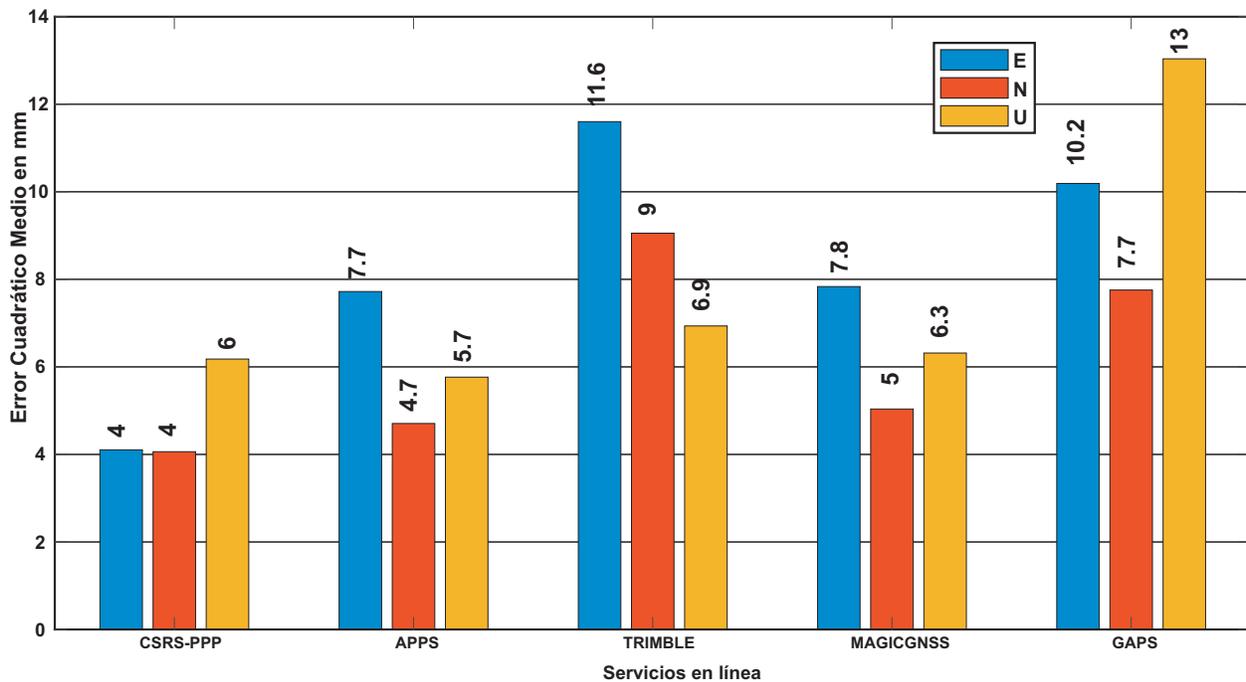
**Figura 6.7:** Diagrama de barras de las coordenadas E, N y U para las estaciones IGS obtenidas en los servicios PPP en línea evaluados en este Capítulo 6.

El servicio PPP en línea CSRS-PPP presentó el mejor desempeño en posicionamiento sobre la componente horizontal (E y N) con valores de RMSE igual a 4 mm. Para el caso del servicio PPP APPS, la componente N fue la que mostró mejor desempeño en posición. La componente U fue la de mejor desempeño para Trimble, y para MAGICGNSS fue la N. Finalmente, GAPS presentó el mejor desempeño en N. Los errores cuadráticos medios para las componentes ENU de cada servicio en línea se pueden ver en la Figura 6.8. Los servicios PPP en línea, CSRS-PPP, APPS y MAGICGNSS fueron los servicios con mejor desempeño en posicionamiento al obtener valores RMSE menores a 10 mm. En el caso de los servicios con menor desempeño, TRIMBLE y GAPS obtuvieron valores de RMSE mayores a 10 mm en por lo menos una componente. En la Tabla 6.5 se observan las magnitudes de las coordenadas E, N y U máximas y mínimas estimadas por los servicios PPP en línea.

Es importante mencionar, que algunos servicios PPP en línea tienen como motor de procesamiento un software científico, como es el caso de APPS que procesa con el software GIPSY 6.4. Debido a esto, las precisiones que llegan a tener los servicios PPP en línea son grandes y representan una alternativa potencial para el procesamiento de datos GNSS a través de la técnica PPP en modo estático

**Tabla 6.5:** Magnitudes de las componentes ENU máximas y mínimas obtenidas desde los servicios PPP en línea.

Servicio en Línea	Componentes					
	E (mm)		N (mm)		U (mm)	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
CSRS-PPP	8	0	8	0	13	1
APPS	21	1	9	1	12	1
TRIMBLE	39	1	27	1	15	1
MagicGNSS	18	1	9	1	14	1
GAPS	18	1	17	1	30	3

**Figura 6.8:** Errores cuadráticos medios de los servicios PPP en línea evaluados en este Capítulo 6.

### 6.4.2. Experimento cinemático

En la Figura 6.9 se observan los desplazamientos tridimensionales del puente Isla Musalá a través de diferentes series de tiempo, donde cada serie de tiempo corresponde a un software y servicios PPP en línea. De los software de código abierto y servicios en línea estudiados, algunos mostraron errores al momento del procesamiento debido al formato y tamaño del archivo RINEX, por lo cual, no fue posible realizar un procesamiento preciso en todos los software y servicios PPP en línea. Solamente 5 de los 10 software estudiados procesaron el archivo de observación, y 1 de los 5 servicios PPP en línea fue compatible con el procesamiento del archivo de observación. PRIDE-PPPAR, RTKLib, NET\_Diff, GAMP

y MG-APPP fueron los software compatibles, sin embargo, solamente se utilizaron los resultados de PRIDE-PPPAR y MG-APP para generar la Figura 6.9. En el caso de los servicios PPP en línea, solamente CSRS-PPP fue capaz de procesar el archivo de observación, ya que los otros servicios solo tienen disponible PPP en modo estático y un límite de 10 MB para subir a la nube<sup>3</sup>.

Las series de tiempo en la Figura 6.9 corresponden a los desplazamientos tridimensionales del puente Isla Musalá en un periodo (08:00-09:00 hrs) de 60 minutos del día martes 5 de octubre de 2021, provocados por el peso de los vehículos pesados y ligeros que lo tránsitan. La línea morada corresponde a los desplazamientos de referencia, al ser los resultados del procesamiento de la técnica de diferencias dobles por el software científico TRACK. Se puede ver una amplitud de oscilación de  $\pm 0.8$ ,  $\pm 2$  y  $\pm 1$  cm para la componente  $x^{puente}$ ,  $y^{puente}$  y  $u^{puente}$  del puente, respectivamente. Los desplazamientos teóricos permisibles del puente deben ser menores a 3.7 cm, según el reglamento de AASHTO (AASHTO, 2007), por lo cual, los desplazamientos medidos por el receptor GNSS Geomax Zenith 25 están dentro de los límites. Se puede ver que la serie de tiempo de color amarillo que corresponde a PRIDE-PPPAR fue la que presentó un comportamiento visual más similar a TRACK, caso contrario a CSRS-PPP. Para el caso de MG-APPP, las series de tiempo están muy cercanas a 0, esto representa un posible error en el procesamiento, ya que la dispersión es muy cerca a 0, y considerando la naturaleza del experimento, no es posible obtener desplazamientos en el rango de  $\pm 2$  mm.

Para encontrar el software o servicio PPP en línea que mejor desempeño presentó, el autor calculó el RMSE con los resultados de cada software utilizando la Ecuación 6.1. En la Figura 6.10 se ilustran los errores cuadráticos medios para cada componente ( $x^{puente}$ ,  $y^{puente}$ ,  $u^{puente}$ ). Se observa que PRIDE-PPPAR y CSRS-PPP presentaron el mejor desempeño, esto se contribuye a la disponibilidad de la resolución de la ambigüedad entera que presentan. PRIDE-PPPAR y CSRS-PPP obtuvieron resultados precisos en la componente vertical  $u^{puente}$ , favoreciendo a la técnica PPP cinemático en encontrar deflexiones menores a 2.5 cm. Por otro lado, la componente que mayor desplazamientos mostró fue la  $y^{puente}$ , que corresponde al eje longitudinal del puente. Estos desplazamientos son generados por la oscilación del bastón donde se sostiene el receptor, y cuando pasan los vehículos a una velocidad considerable (mayor a 60 km/h) el bastón oscila y por lo tanto la antena también. Una solución a este tipo de problema es sujetar la antena en un sitio más estable pero que sea directamente sobre la estructura del puente, ya que así los desplazamientos ocurridos sobre el puente se van a reflejar sobre la antena GNSS.

En la Tabla 6.6 se visualizan los valores máximos, mínimos, desviación estándar y el error cuadrático medio para las componentes ( $x^{puente}$ ,  $y^{puente}$ ,  $u^{puente}$ ) de cada serie de tiempo. En la componente  $x^{puente}$ , *Net\_Diff* obtuvo los mayores desplazamientos, y en el caso de PRIDE-PPPAR los menores, sin considerar los valores obtenidos con MG-APP. PRIDE-PPPAR obtuvo la menor dispersión con una desviación estándar de 0.64 cm para  $x^{puente}$  al igual que el mejor desempeño al obtener un RMSE de 0.7 mm.

<sup>3</sup>El archivo de observación procesado en el experimento cinemático presentó un tamaño de 40 MB.

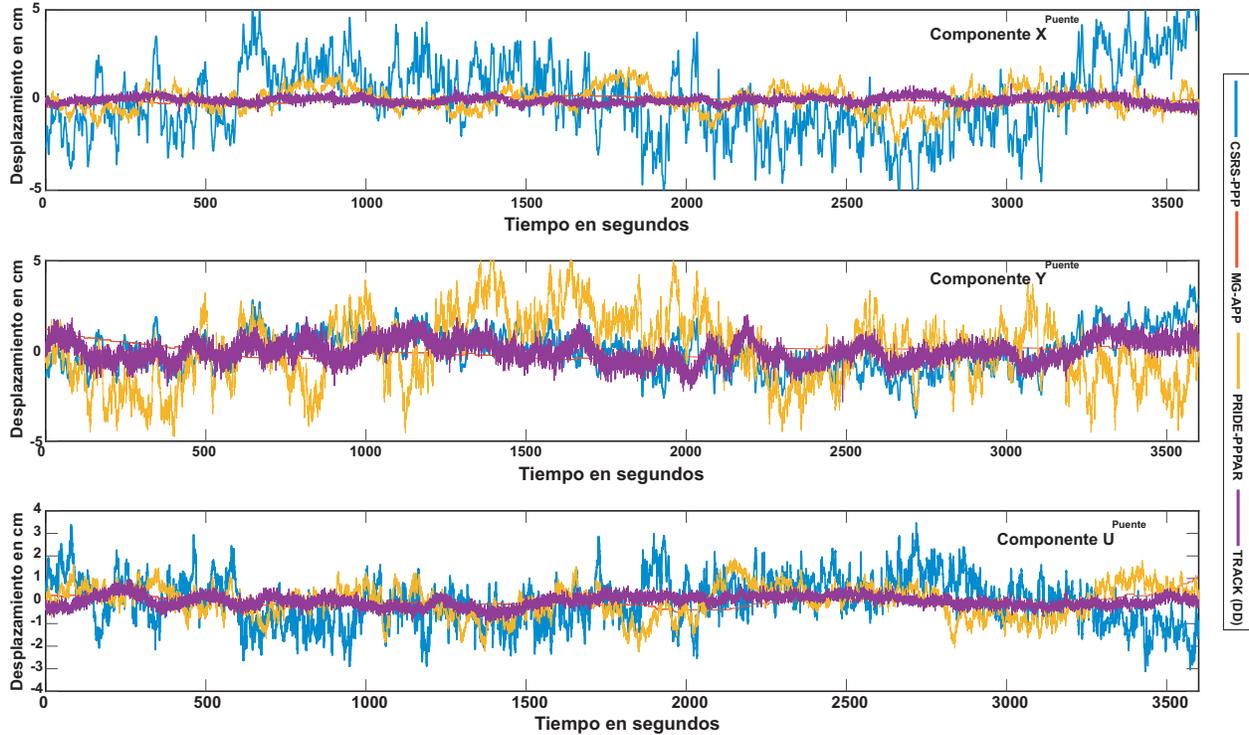
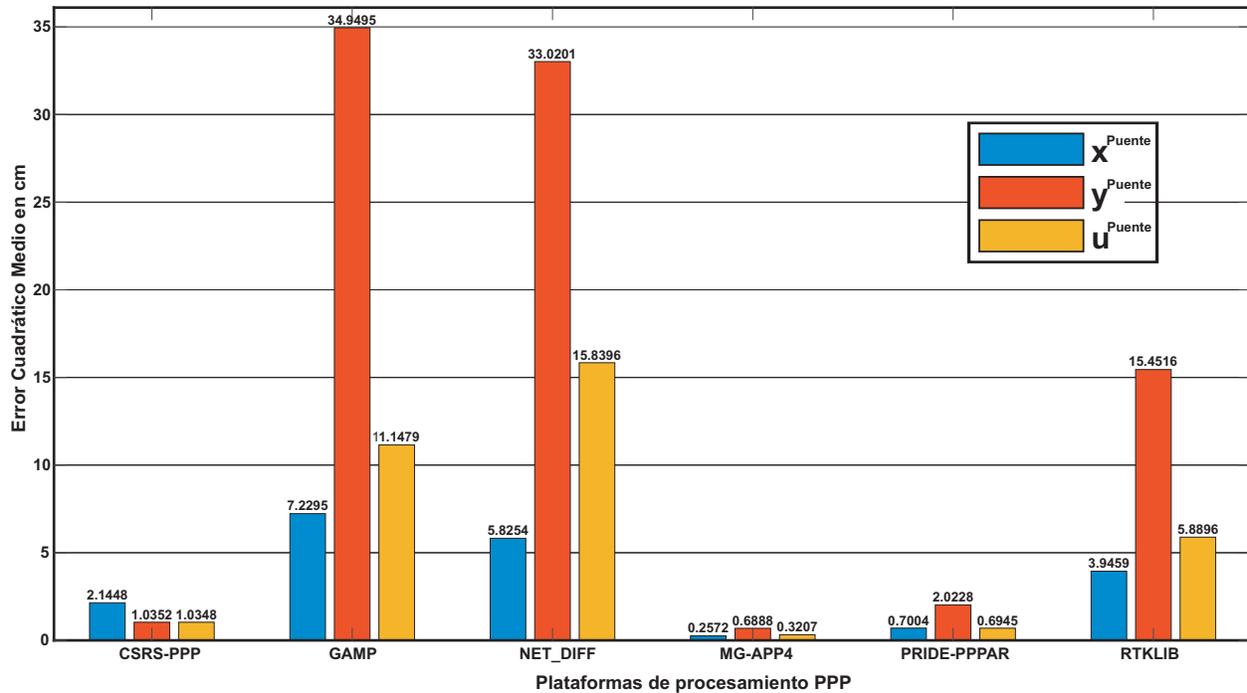


Figura 6.9: Series de tiempo de los desplazamientos 3D del puente Isla Musalá.

Tabla 6.6: Desplazamientos máximos y mínimos, desviación estándar y error cuadrático medio de las series de tiempo generadas con las diferentes plataformas de procesamiento de datos GNSS-PPP.

Software	$x^{Puenete}$				$y^{Puenete}$				$u^{Puenete}$			
	Max (cm)	Min (cm)	$\sigma$ (cm)	EMC (cm)	Max (cm)	Min (cm)	$\sigma$ (cm)	EMC (cm)	Max (cm)	Min (cm)	$\sigma$ (cm)	EMC (cm)
TRACK	0.9	-0.8	0.2	0	2.07	-2.82	0.63	0	0.97	-1	0.26	0
CSRS-PPP	6.9	-7	2.9	2.74	3.65	-3.71	1.9	1.03	3.47	-3.12	1.05	1
MG-APP	0.26	-0.21	0.11	0.25	1.20	-0.47	0.32	0.68	1.10	-0.48	0.22	0.32
GAMP	11.38	-37.84	7.22	7.23	51.03	-303.77	34.84	34.94	77.19	-12.7	11.14	11.14
NET-DIFF	22.37	-22.30	5.80	5.82	45.71	-166.89	32.9	33.02	66.31	-18.53	15.85	15.83
PRIDE-PPPAR	1.9	-2.56	0.64	0.7	6.11	-4.73	1.89	2.02	1.88	-2.26	0.69	0.69
RTKLIB	18	-9.4	3.89	3.9	68.3	-55.33	15.63	15.45	11.85	-21.74	5.9	5.88

Por otro lado, para  $y^{puente}$  GAMP muestra los desplazamientos máximos y CSRS-PPP los mínimos. La dispersión más baja fue obtenida por PRIDE-PPPAR, sin embargo, el mejor desempeño lo muestra CSRS-PPP. Para la componente más crítica en los puentes, la vertical, PRIDE-PPPAR fue el software que mejor desempeño tuvo, al igual que la dispersión más baja. El software que presentó los desplazamientos máximos fue GAMP y los mínimos, PRIDE-PPPAR. Con base en la Tabla 6.6 y Figura 6.10 el software mejor evaluado al ser comparado con los resultados de referencia, fue el PRIDE-PPPAR. Por otro lado, GAMP y *Net\_Diff* fueron los software con la evaluación más baja.



**Figura 6.10:** Error cuadrático medio de las series de tiempo de los desplazamientos 3D del puente Isla Musalá.

## 6.5. Discusión

En este Capítulo 6, se evaluó la precisión del posicionamiento PPP en modo estático y cinemático utilizando diferentes plataformas de procesamiento de datos GNSS. Se utilizaron 10 software de código abierto y 5 servicios PPP en línea, para procesar 13 estaciones GNSS pertenecientes al IGS, y las coordenadas obtenidas fueron comparadas con las coordenadas de referencia publicadas por el IGS. Los resultados muestran que los servicios PPP en línea tienen una alta precisión en el modo estático. Similarmente, los software de código abierto mostraron precisiones altas. Sin embargo, algunos de ellos alcanzaron precisiones bajas, incluso menores a las de los servicios PPP en línea. Cada software está diseñado con diferentes estructuras, algoritmos internos de procesamiento, y estrategias de ajuste y filtrado. Por lo tanto, cuando se realiza procesamiento de un archivo de observación con estos software, los resultados serán ligeramente diferentes en cada uno de ellos. Se debe de considerar ciertos criterios de evaluación de un software, para poder seleccionarlo para el procesamiento de datos. Si bien, las observaciones a frecuencias de muestreo altas y a todas las constelaciones disponibles se han vuelto populares, diferentes problemas se encuentran cuando se desea procesar este tipo de archivos. En primer lugar, los software o servicios PPP en línea deben ser compatibles con todas las constelaciones GNSS. En segundo lugar, estos deben de tener la capacidad de procesar archivos RINEX con un tamaño mayor a 500 MB. En tercer lugar, deben ser compatibles con frecuencias de muestreo altas ( $> 10$  Hz). En cuarto lugar, deben de resolver ambigüedades enteras para mejorar la pre-

cisión y reducir el tiempo de convergencia. Finalmente, debe generar archivos de resumen del procesamiento y la calidad del mismo. Actualmente, *PRIDE – PPPAR* es compatible con todas las constelaciones disponibles, procesa archivos con un peso mayor a 500 MB, es compatible con una frecuencia de muestreo máxima de 50 Hz, tiene opciones de resolver la ambigüedad entera y flotante, lo cual hace que *PRIDE – PPPAR* sea el software ideal para el procesamiento de observaciones GNSS. Por otro lado, el servicio *CSRS – PPP* ha tenido una gran popularidad al ser usado en diferentes áreas de investigación por ser compatible con GPS y GLONASS. Además, resuelve ambigüedades enteras y genera información valiosa para el análisis del proceso. Su limitante es la carga de 300 MB, sin embargo, existe una versión de escritorio que permite procesar archivos RINEX de hasta 600 MB. Por lo tanto, considerando las características descritas de *PRIDE – PPPAR* y *CSRS – PPP* se convierten en las opciones más fiables y precisas al momento de procesar observaciones en modo estático y cinemático.

A partir del error cuadrático medio de las componentes ENU ( $RMSE_E$ ,  $RMSE_N$ ,  $RMSE_U$ ) obtenidas para cada software y servicio PPP en línea, se calculó la incertidumbre total utilizando la Ecuación 6.4 (Ghilani, 2017). La incertidumbre total se consideró como el indicador de precisión, y en la Tabla 6.7 se ordenó de menor a mayor para clasificar el rendimiento en posicionamiento de las diferentes plataformas de procesamiento PPP.

$$RMSE_T = \sqrt{(RMSE_E)^2 + (RMSE_N)^2 + (RMSE_U)^2} \quad (6.4)$$

**Tabla 6.7:** Incertidumbre total de los software de código abierto y servicios PPP en línea.

Orden	Software/Servicio	Incertidumbre total (mm)
1	PRIDE-PPPAR	7.07
2	CSRS-PPP	8.24
3	GIPSY X	8.77
4	NETDIFF	10.48
5	APPS	10.67
6	MAGICGNSS	11.204
7	GAMP	12.322
8	MG-APP	12.8
9	TRIMBLE	16.22
10	goGPS	17.83
11	GAPS	18.22
12	PPPH	39.89
13	PPPLib	135.42
14	RTKLIB	336.55
15	GLAB	365.65

Diferentes investigaciones orientadas al análisis de observaciones GNSS han utilizado por lo menos un programa de la Tabla 6.7 para el procesamiento de los datos. Sin embargo, actualmente no existe un estudio con este enfoque, que ayude a los investigadores a

tomar una decisión con base en las precisiones que quieren alcanzar al momento de elegir un software de procesamiento. El software *RTKLib* es muy utilizado en los usuarios universitarios, esto debido a la facilidad de uso. Además, es compatible con todos los formatos de archivos RINEX o productos precisos. Sin embargo, *RTKLib* no es el adecuado para utilizarse cuando se desean alcanzar precisiones en el orden de los milímetros.

Por otro lado, para el experimento sobre el puente Isla Musalá, se encontraron las mejores soluciones en *PRIDE – PPPAR* y *CSRS – PPP* al ser comparadas con las de referencia obtenidas con la técnica DD. El modo cinemático es menos preciso que el estático, por lo cual, tiene un nivel de complejidad para la mayoría de software de la Tabla 6.7, lo que ocasiona una precisión baja. Cuando se procesan datos GNSS por la técnica PPP, siempre es recomendado utilizar productos precisos para mitigar las fuentes de error especiales. Estos archivos son generados por diferentes dependencias gubernamentales, dependencias privadas o universidades. Estos productos son generados utilizando en algunas ocasiones diferentes parámetros o métodos, entonces, algunos productos precisos son más *precisos* que otros, por lo cual, es necesario utilizarlos al momento del procesamiento. Uno de los problemas causados por estos productos precisos generados por diferentes instituciones, es que no son compatibles con todos los software y esto ocasiona que el software marque algún error o simplemente que las soluciones sean de mala calidad. Lo recomendable es utilizar los productos precisos en versiones anteriores, ya que la mayoría de software fueron creados hace más de 5 años y no han sido actualizados, por lo tanto, no son compatibles con los nuevos productos precisos.

Definir un sistema de referencia local 3D para las coordenadas que corresponden al comportamiento de una estructura de interés es uno de los pasos más importantes en el área del monitoreo de la salud estructural a partir de la tecnología GNSS. Erróneamente, se consideran las coordenadas geocéntricas XYZ para cuantificar los desplazamientos sobre una estructura, sin embargo, estas coordenadas están referidas a un sistema global de coordenadas cartesianas centradas en la tierra y no es adecuado su uso, por lo cual, las coordenadas XYZ deben transformarse en un sistema de coordenadas topocéntricas (ENU), o sistema cartesiano 3D local. Por otro lado, las coordenadas E y N apuntan a las direcciones Este y Norte, respectivamente, por lo cual, si la estructura no está orientada de Norte-Sur, estas coordenadas E y N no representan el comportamiento real de la estructura, y es necesario rotar el sistema topocéntrico local y hacer coincidir la dirección de las coordenadas E y N a las coordenadas  $x^{estructura}$  y  $y^{estructura}$  que definen el eje transversal y longitudinal de la estructura. De esta manera, los desplazamientos obtenidos con las coordenadas originales del procesamiento XYZ son diferentes a los desplazamientos de las coordenadas  $x^{estructura}$  y  $y^{estructura}$ , llevando así un error al momento de interpretar los desplazamientos sobre la estructura y generando un impacto directo en la toma de decisiones por parte de los especialistas en SHM.

## 6.6. Conclusiones

Se analizó y comparó la precisión de las soluciones PPP utilizando 10 software de código abierto y 5 servicios PPP en línea con 13 estaciones IGS y una estación GPS de mediciones a altas frecuencias. Los software de código abierto pueden alcanzar precisiones en el orden de los milímetros cuando las observaciones corresponden a periodos de medición largas en modo PPP-estático. Sin embargo, cada software tiene una configuración de procesamiento diferente a los otros, lo que hace que las soluciones sean ligeramente diferentes. Por lo cual, en la comparación con las coordenadas de referencia emitidas por el IGS, se alcanzaron precisiones en el orden de los milímetros, aunque para algunos software estuvo en los centímetros. La componente horizontal y vertical presentaron precisiones en el nivel de los milímetros. Solamente 4 software presentaron precisiones centimétricas, a decir, *gLAB*, *RTKLib*, *PPPH* y *PPPLib*. En el caso de *Net\_Diff*, *PRIDE – PPPAR*, *MG – APP*, *goGPS*, *GAMP* y *GipsyX* alcanzaron precisiones a nivel milimétrico, en el rango de 3-10 mm. El software de código abierto que presentó el mejor desempeño tanto para la componente horizontal como la vertical, fue *PRIDE – PPPAR*, con un error cuadrático medio de 5, 3 y 4 mm para E, N y U, respectivamente. Sin embargo, *GipsyX* estuvo por detrás con un error cuadrático medio de 5, 4 y 6 para E, N y U, respectivamente. En el caso del software de código abierto que presentó el peor rendimiento fue *gLAB* y enseguida *RTKLib*, con errores cuadráticos medios de hasta 230, 201 y 201 mm para E, N y U, respectivamente.

Por otro lado, los servicios PPP en línea CSRS-PPP, APPS, TRIMBLE, MAGICGNSS y GAPS pueden brindar precisiones en el orden de los centímetros o incluso milímetros para una estación GNSS con un periodo de medición largo en modo PPP-estático. En comparación con las coordenadas publicadas por el IGS, la precisión alcanzada para la componente horizontal y vertical por los servicios PPP en línea alcanzaron el nivel milimétrico. Los servicios PPP en línea mostraron mejores resultados en precisión y desempeño que algunos software de código abierto, esto es debido a que los servicios PPP en línea utilizan de base el motor de un software científico ocasionando precisiones altas, sin embargo, una de las deficiencias que presentan los servicios PPP es que no permiten procesar archivos de observación mayores a 10 MB, caso único CSRS-PPP que permite cargar hasta 300 MB. Esto ocasiona que diferentes áreas de investigación que hacen uso de la tecnología GNSS busquen procesar sus datos en software de código abierto, o en los mejores de los casos, en software científico con licencia.

El servicio PPP en línea con mejor desempeño fue el *CSRS – PPP*, quien alcanzó errores cuadráticos medios de 4, 4 y 6 mm para E, N y U, respectivamente. Aunque con valores similares de RMSE, los servicios con el desempeño más deficiente fueron *TRIMBLE* y *GAPS*. En general, los servicios PPP en línea presentan una alternativa para el procesamiento de datos en modo PPP-estático, ya que el proceso de configuración es más fácil que en los software de código abierto, donde se requiere un conocimiento más amplio acerca de los Sistemas Globales de Navegación Satelital. En los servicios PPP en línea solamente se carga el archivo de observación y se elige el modo de procesamiento, facilitando a los usuarios su uso. Para mediciones cinemáticas multi-GNSS a frecuencias de muestreo alta,

los servicios PPP en línea se vuelven obsoletos, ya que la mayoría no permite el modo cinemático. *CSRS – PPP* ha demostrado ser un servicio PPP en línea que puede alcanzar soluciones de ambigüedad para GPS y GLONASS, mejorando las soluciones y alcanzando un tiempo de convergencia más corto para las soluciones cinemáticas.

Los servicios PPP en línea y los software de código abierto tienen un menor rendimiento en precisión en el modo PPP-cinemático. Esto se observa en las soluciones obtenidas de las mediciones a 5 Hz sobre el puente Isla Musalá y considerando la serie de tiempo obtenida con el método de diferencias dobles y procesadas en el software científico *TRACK* (Lu et al., 2012), solamente 6 plataformas de procesamiento PPP cinemático fueron capaces de obtener soluciones precisas en el orden de los centímetros. *PRIDE – PPPAR*, *MG – APP* y *CSRS – PPP* fueron los que mostraron mejor desempeño en la componente horizontal y vertical. *PRIDE – PPPAR* mostró mejor desempeño en la componente vertical, con una desviación estándar y un error cuadrático medio de 6.9 mm. En la componente E fue *PRIDE – PPPAR* quien mostró la mejor precisión, con 6.4 mm de desviación estándar y un error cuadrático medio de 7 mm. Para el caso de la componente N, fue *CSRS – PPP* quien obtuvo el mejor desempeño con un error cuadrático medio de 1.03 cm y una desviación estándar de 1.9 cm.

*PRIDE – PPPAR* fue el software que presentó el mejor desempeño en modo PPP estático y cinemático. Sin embargo, el servicio PPP en línea *CSRS – PPP* alcanzó precisiones muy similares. Esto demuestra el potencial que presenta el servicio PPP en línea *CSRS – PPP*, principalmente cuando son observaciones de periodos de tiempo corto y frecuencias de muestreo bajas.

Los desplazamientos registrados sobre el puente Isla Musalá con un receptor de orden geodésico Geomax Zenith 25 se encuentran dentro de los límites de diseño permisibles durante la medición, esto demuestra la precisión alcanzada por la tecnología GNSS a través de la técnica de diferencias dobles. Los desplazamientos registrados con el receptor GNSS a través de la técnica DD y considerandose como referencia, estuvieron en el rango de  $\pm 1$  cm,  $\pm 2$  cm y  $\pm 0.9$  cm para la componente  $x^{puente}$ ,  $y^{puente}$  y  $u^{puente}$ , respectivamente. Los desplazamientos obtenidos sobre la componente  $y^{puente}$  presenta mayor dispersión, esto debido al efecto que ocasionan los vehículos cuando transitan el puente a velocidades altas sobre el eje longitudinal y genera que el bastón donde se montó la antena quede oscilando. Por otro lado, la técnica PPP con resolución de ambigüedad entera (*PRIDE – PPPAR* y *CSRS – PPP*) presentó un desempeño similar al de DD, mostrando la alternativa potencial en el uso para el monitoreo de la salud estructural como un posible reemplazo a la técnica de diferencias dobles. El puente Isla Musalá se encuentra en condiciones de diseño, es decir, que no representa daño a la integridad de las personas y vehículos que diario lo transitan.

# Referencias

- AASHTO (2007). Aashto lrfd bridge design specifications. *Washington, D.C.*
- Anderle, R. J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. *sdp*, 1:47–75.
- Angrisano, A., Dardanelli, G., Innac, A., Pisciotta, A., Pipitone, C., y Gaglione, S. (2020). Performance assessment of ppp surveys with open source software using the gnss gps–glonass–galileo constellations. *Applied Sciences*, 10(16):5420.
- Bahadur, B. (2022). An improved weighting strategy for tropospheric delay estimation with real-time single-frequency precise positioning. *Earth Science Informatics*, 15(2):1267–1284.
- Bahadur, B. y Nohutcu, M. (2018). Ppph: a matlab-based software for multi-gnss precise point positioning analysis. *GPS solutions*, 22(4):1–10.
- Bahadur, B. y Nohutcu, M. (2019). Comparative analysis of mgex products for post-processing multi-gnss ppp. *Measurement*, 145:361–369.
- Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., Heflin, M., Lu, W., Miller, M., Moore, A. W., Murphy, D., Ries, P., Romans, L., Sibois, A., Sibthorpe, A., Szilagyi, B., Vallisneri, M., y Willis, P. (2020). Gipsyx/rtgx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research*, 66(3):469–489.
- Chen, C. y Chang, G. (2021). Ppplib: an open-source software for precise point positioning using gps, beidou, galileo, glonass, and qzss with multi-frequency observations. *GPS Solutions*, 25(1):1–7.
- Chen, C., Xiao, G., Chang, G., Xu, T., y Yang, L. (2021). Assessment of gps/galileo/bds precise point positioning with ambiguity resolution using products from different analysis centers. *Remote Sensing*, 13(16).
- Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F., y Héroux, P. (2010). Undifferenced gps ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, 57(2):123–135.
- Doucet, K., Herwig, M., Kipka, A., Kreikenbohm, P., Landau, H., Leandro, R., Moessmer, M., y Pagels, C. (2012). Introducing ambiguity resolution in web-hosted global multi-gnss precise point positioning with trimble rtx-pp. In *Proceedings of the 25th International*

- Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, pages 1115–1125.
- El-Mowafy, A. (2011). Analysis of web-based gnss post-processing services for static and kinematic positioning using short data spans. *Survey review*, 43(323):535–549.
- El Shouny, A. y Miky, Y. (2019). Accuracy assessment of relative and precise point positioning online gps processing services. *Journal of Applied Geodesy*, 13(3):215–227.
- García, A., Píriz, R., Samper, M. D. L., y Merino, M. M. R. (2010). Multisystem real time precise-point-positioning, today with gps+ glonass in the near future also with qzss, galileo, compass, irnss. In *International Symposium on GPS/GNSS, Taiwan*.
- Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., y Zhang, K. (2019). Pride ppp-ar: an open-source software for gps ppp ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 23(4):1–10.
- Ghilani, C. D. (2017). *Adjustment computations: spatial data analysis*. John Wiley & Sons.
- Ghoddousi-Fard, R. y Dare, P. (2006). Online gps processing services: an initial study. *GPS solutions*, 10(1):12–20.
- Grinter, T., Roberts, C., y Janssen, V. (2020). Ambiguity-resolved real-time precise point positioning as a potential fill-in service for sparse cors networks. *Journal of Surveying Engineering*, 146(2):04020007.
- Guo, Q. (2015). Precision comparison and analysis of four online free ppp services in static positioning and tropospheric delay estimation. *GPS solutions*, 19(4):537–544.
- 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.
- Héroux, P., Kouba, J., Beck, N., Lahaye, F., Mireault, Y., Tétreault, P., Collins, P., MacLeod, K., y Caissy, M. (2006). Space geodetic techniques and the canadian spatial reference system evolution, status and possibilities. *Geomatica*, 60(2):137–150.
- Herrera, A. M., Suhandri, H. F., Realini, E., Reguzzoni, M., y de Lacy, M. C. (2016). gogps: open-source matlab software. *GPS solutions*, 20(3):595–603.
- Ibáñez, D., Rovira-García, A., Sanz, J., Juan, J., González-Casado, G., Jiménez-Baños, D., López-Echazarreta, C., y Lapin, I. (2018). The gnss laboratory tool suite (glab) updates: Sbas, dgns and global monitoring system. In *2018 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC)*, pages 1–11. IEEE.
- IGS (2021). Current igs site guidelines. <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>. [Web; accedido el 04-12-2021].
- Leandro, R. (2009). *Precise Point Positioning with GPS: A New Approach for Positioning, Atmospheric Studies, and Signal Analysis*. PhD thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.

- Leandro, R. F., Santos, M. C., y Langley, R. B. (2011). Analyzing gnss data in precise point positioning software. *GPS solutions*, 15(1):1–13.
- Liu, T., Wang, J., Yu, H., Cao, X., y Ge, Y. (2018). A new weighting approach with application to ionospheric delay constraint for gps/galileo real-time precise point positioning. *Applied Sciences*, 8(12):2537.
- Lu, B., Jin, J. P., Duan, W. Y., Chen, L. J., y Guan, H. Y. (2012). Research of gps signal multipath effects based on gamit track. In *Advanced Materials Research*, volume 588, pages 912–919. Trans Tech Publ.
- Lu, C., Feng, G., Zheng, Y., Zhang, K., Tan, H., Dick, G., y Wickert, J. (2020). Real-time retrieval of precipitable water vapor from galileo observations by using the mgex network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7):4743–4753.
- Nischan, T. (2016). Gfzrxn-rinex gnss data conversion and manipulation toolbox (version 1.05).
- Ray, J. y Senior, K. (2005). Geodetic techniques for time and frequency comparisons using gps phase and code measurements. *Metrologia*, 42(4):215.
- Souto, M. S. (2014). Análisis de calidad y preprocesamiento de datos gnss de la estación permanente ucor (córdoba, argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1):91.
- Takasu, T., Kubo, N., y Yasuda, A. (2007). Development, evaluation and application of rtklib: a program library for rtk-gps. In *GPS/GNSS symposium*, pages 213–218.
- Tétreault, P., Kouba, J., Héroux, P., y Legree, P. (2005). Csrp-ppp: An internet service for gps user access to the canadian spatial reference frame. *GEOMATICA*, 59(1):17–28.
- Vaclavovic, P. y Dousa, J. (2016). G-nut/anubis: Open-source tool for multi-gnss data monitoring with a multipath detection for new signals, frequencies and constellations. In Rizos, C. y Willis, P., editors, *IAG 150 Years*, pages 775–782, Cham. Springer International Publishing.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2020). Implementation of ppp-gnss measurement technology in the probabilistic shm of bridge structures. *Measurement*, page 108677.
- Wanas, S. K. y Alhamadani, O. Y. M. Z. (2019). Evaluation of the performance of online gps/gnss data processing services for monitoring the land deformations and movements. *Journal of Engineering*, 25(10):108–119.
- Wang, H., Wang, Y., Fang, J., Chai, H., y Zheng, H. (2012). Simulation research on a minimum root-mean-square error rotation-fitting algorithm for gravity matching navigation. *Science China Earth Sciences*, 55(1):90–97.

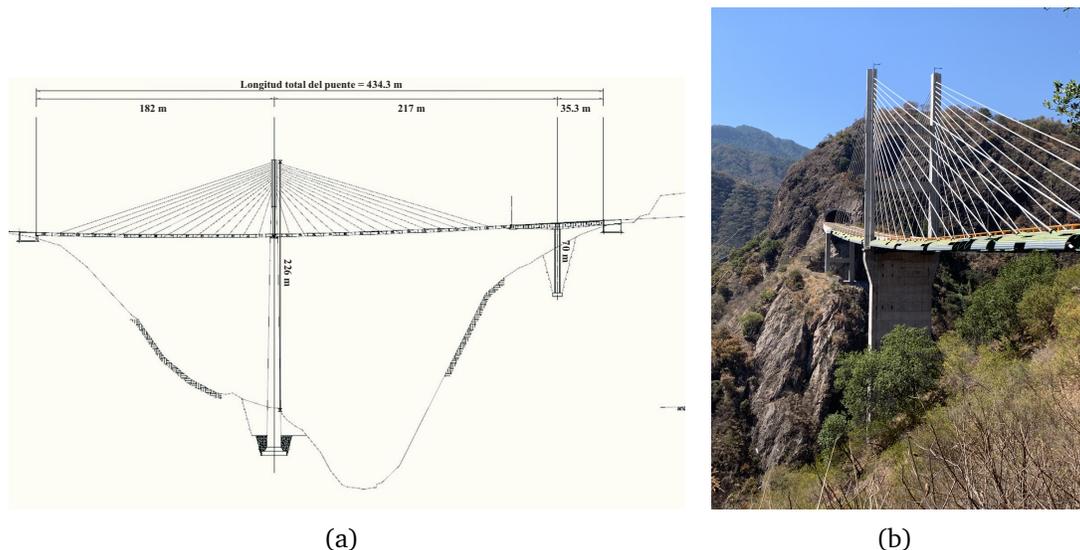
- 
- Xi, R., Chen, Q., Meng, X., Psimoulis, P., Jiang, W., y Xu, C. (2021). Pass-by-pass ambiguity resolution in single gps receiver ppp using observations for two sequential days: An exploratory study. *Remote Sensing*, 13(18):3728.
- Xiao, G., Liu, G., Ou, J., Liu, G., Wang, S., y Guo, A. (2020). Mg-app: an open-source software for multi-gnss precise point positioning and application analysis. *GPS Solutions*, 24(3):1–13.
- Yan, C., Wang, Q., Zhang, Y., Ke, F., Gao, W., y Yang, Y. (2020). Analysis of gnss clock prediction performance with different interrupt intervals and application to real-time kinematic precise point positioning. *Advances in space research*, 65(3):978–996.
- Zhang, Y., Chen, J., Gong, X., y Chen, Q. (2020). The update of bds-2 tgd and its impact on positioning. *Advances in Space Research*, 65(11):2645–2661.
- Zhang, Y., Kubo, N., Chen, J., Wang, J., y Wang, H. (2019). Initial positioning assessment of bds new satellites and new signals. *Remote Sensing*, 11(11):1320.
- Zhou, F., Dong, D., Li, W., Jiang, X., Wickert, J., y Schuh, H. (2018). Gamp: An open-source software of multi-gnss precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *Gps Solutions*, 22(2):1–10.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., y Webb, F. (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.

# Capítulo 7

## Caso de estudio: Puente Atirantado El Carrizo

### 7.1. Puente El Carrizo

El puente El Carrizo se localiza sobre la carretera Mazatlán-Durango, autopista que conecta el Golfo de México y la Costa del Pacífico.



**Figura 7.1:** Puente El Carrizo: (a) geometría y dimensiones del puente (editado de [Gómez-Martínez et al. \(2021\)](#)), y (b) vista actual del puente.

El puente El Carrizo tiene una longitud total de 434.3 m distribuidos en dos principales estructuras: un tramo atirantado de 364 m compuesto por dos vanos, y un tramo de doble voladizo de 70.6 m. El proceso de montaje para los vanos atirantados se llevó a cabo mediante el método de voladizo ([Gómez-Martínez et al., 2021](#)). El tramo atirantado está compuesto por 56 cables instalados en dos planos verticales en semi-arpas. El tablero ati-

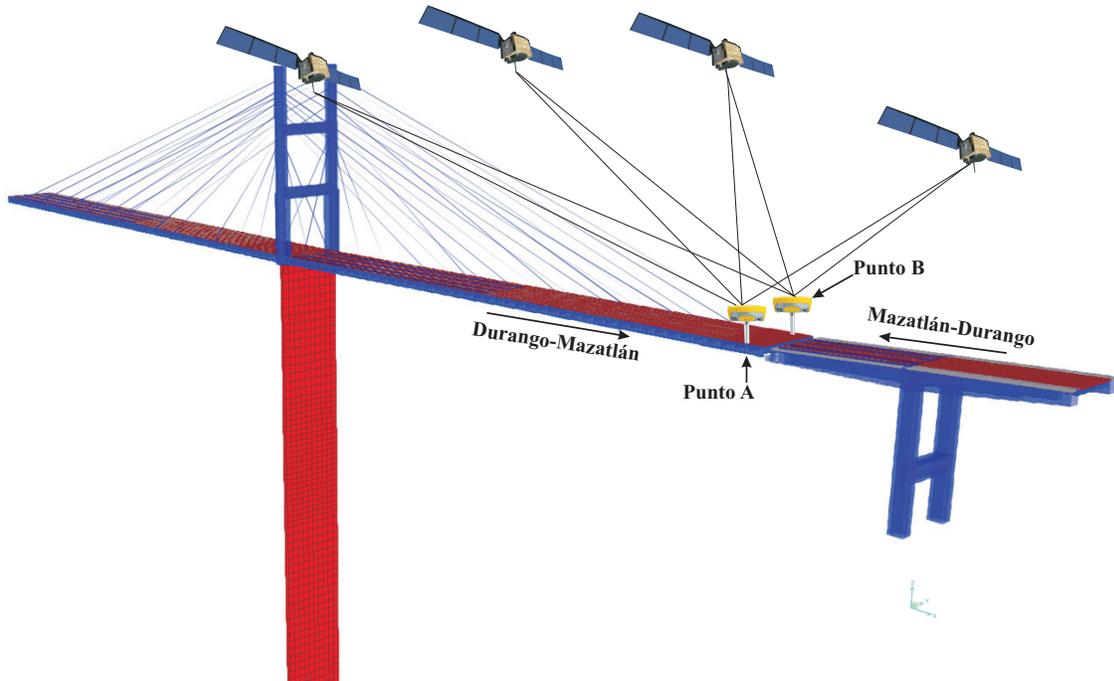
rantado se compone de 31 dovelas metálicas de 18.5 m de ancho con distintas longitudes: una dovela central de 12 m se localiza sobre la pila, y a ambos lados de esta se localiza una dovela de 8 m, y 14 dovelas de 12 m de largo a cada lado de la pila (Troatin et al., 2015). La construcción del doble voladizo se realizó utilizando dovelas tipo cajón postensadas, y este tramo del doble voladizo se une al tramo atirantado a través de una junta especial. El tablero tiene un ancho de 18.40 m y se divide en 4 carriles. La sección del tramo atirantado descansa sobre una pila en forma de H y tiene una altura desde el nivel de los cimientos hasta su nivel superior de 226 m. Por otro lado, el tramo del doble voladizo es soportado por una pila menor de 70 m. Además, se construyeron dos enormes estribos de hormigón en los extremos del puente. Un claro simple de 38 m con vigas tipo Nebraska apoyado conecta el puente El Carrizo con la estrada/salida de un túnel adyacente (Vazquez-Ontiveros et al., 2020). La geometría y una vista actual del puente El Carrizo se observan en la Figura 7.1.

## 7.2. Sistema SHM con receptores GNSS de orden geodésico

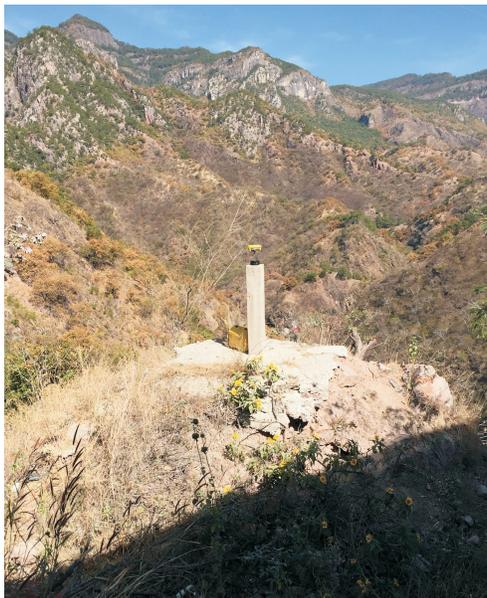
En esta Sección 7.2 se evalúa el desempeño de los receptores GNSS de orden geodésico para detectar desplazamientos estáticos y dinámicos, y frecuencias de los modos de vibrar sobre el puente atirantado El Carrizo en condiciones normales de uso diario. También, se aplicó la técnica de procesamiento GNSS relativo cinemático considerando diferentes combinaciones de constelaciones GNSS para determinar cuál es la más precisa al momento de detectar las variables de interés. Se evaluaron las tres componentes del puente El Carrizo: sección transversal, longitudinal y vertical.

### 7.2.1. Configuración experimental

Para evaluar el desempeño de los receptores GNSS de orden geodésico en el Monitoreo de la Salud Estructural sobre puentes atirantados, se realizó un monitoreo estructural el día 9 de marzo del 2022 sobre dos puntos estratégicos en el puente El Carrizo. La sección del tablero mixto atirantado está compuesto de 31 dovelas metálicas de 18.5 m de ancho y distintas longitudes. Una dovela de 12 m se localiza en el centro de la pila principal del puente, a cada lado de esta dovela central se encuentra una dovela de 8 m, y 14 dovelas de 8 m a cada lado de esta última dovela. Es decir, a partir de la dovela central, hay 15 dovelas a ambos lados. Nuestra zona de estudio se ubica en la dovela número 15 en la dirección hacia Mazatlán, tal como se observa en la Figura 7.2. Sobre esta dovela se colocaron dos receptores GNSS Geomax Zenith 25. Los receptores GNSS se fijaron en el parapeto de ambos carriles, uno en dirección Mazatlán-Durango y el otro en la dirección Durango-Mazatlán. La zona donde se colocaron los receptores GNSS fue elegida por 3 factores importantes: (1) por ser la zona de mayor deflexión en la componente vertical, debido a que la dovela 15 se encuentra más alejada de la pila central de la sección del puente atirantado, y, por lo tanto, se tiene menor resistencia al movimiento, (2) es la zona que se encuentra más alejada de los tirantes, por lo cual, el error de *multipath* ocasionado



**Figura 7.2:** Diseño experimental de la evaluación de los receptores GNSS de orden geodésico Geomax Zenith 25.



(a)



(b)

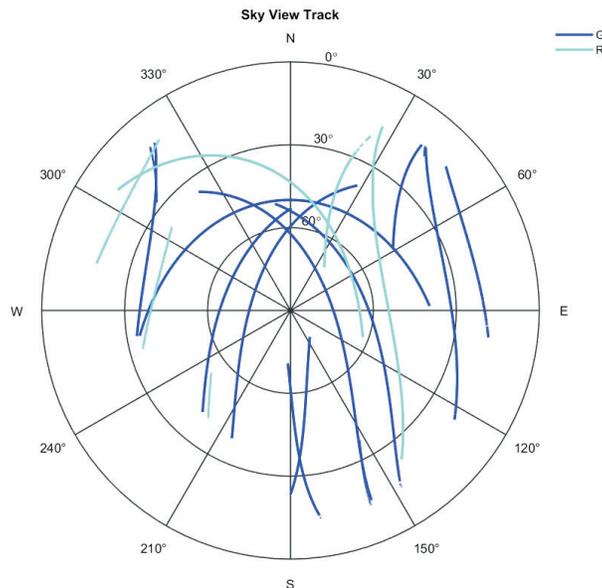
**Figura 7.3:** Instrumentación de los receptores GNSS: (a) estación de referencia y, (b) receptor rover fijo en el parapeto del puente El Carrizo.

por estos en las mediciones GNSS es menor o insignificante, (3) es una de las zonas donde se expresan las respuestas de interés de esta investigación: desplazamientos estáticos y dinámicos, y frecuencias naturales. Por otro lado, fuera del puente El Carrizo se instaló una estación GNSS en un monumento de centrado forzoso, aproximadamente a 80 metros de distancia de la dovela número 15, que fue fijada y utilizada como estación de referencia para el postprocesamiento por el método relativo cinemático. En la Figura 7.2 se ilustra el diseño experimental propuesto en la Sección 7.2 del capítulo 7.

Sobre el parapeto de cada carril se fijó un bastón a una altura de 1.5 metros, y con una base nivelante se buscó la verticalidad de los receptores GNSS, que fueron colocados a una distancia de 1 metro de la junta que une la Sección atirantada y el doble voladizo del puente. En la Figura 7.3a y 7.3b se observa la localización del monumento de centrado forzoso donde fue colocada la estación de referencia, y la instrumentación del receptor GNSS Geomax Zenith 25 sobre el tablero del puente, respectivamente.

### 7.2.2. Adquisición de datos GNSS

Los receptores GNSS instrumentados sobre el puente El Carrizo y la estación de referencia recolectaron información con una frecuencia de muestreo de 5 Hz. Las constelaciones GNSS disponibles en la ubicación geográfica del puente El Carrizo durante el periodo de monitoreo fueron GPS, GLONASS, Galileo y BEIDOU. Sin embargo, los receptores GNSS Geomax Zenith 25 solamente tienen la capacidad de registrar mediciones de la constelación GPS y GLONASS. Fue establecida una máscara de elevación de  $12^\circ$ , y durante el monitoreo estuvieron visibles 13 satélites GPS y 6 GLONASS.



**Figura 7.4:** Trayectoria de los satélites GPS y GLONASS durante el monitoreo sobre el puente El Carrizo.

En la Figura 7.4 se observa la trayectoria de los satélites GPS y GLONASS observados. Las condiciones de medición fueron favorables con cielo abierto durante el experimento. La estación de referencia inició su registro 30 minutos antes de los receptores localizados sobre el puente. El tiempo de duración del experimento fue poco más de 3 horas. Durante esta ventana de medición se registró el paso de vehículos pesados que ocasionaron deflexiones sobre el puente atirantado.

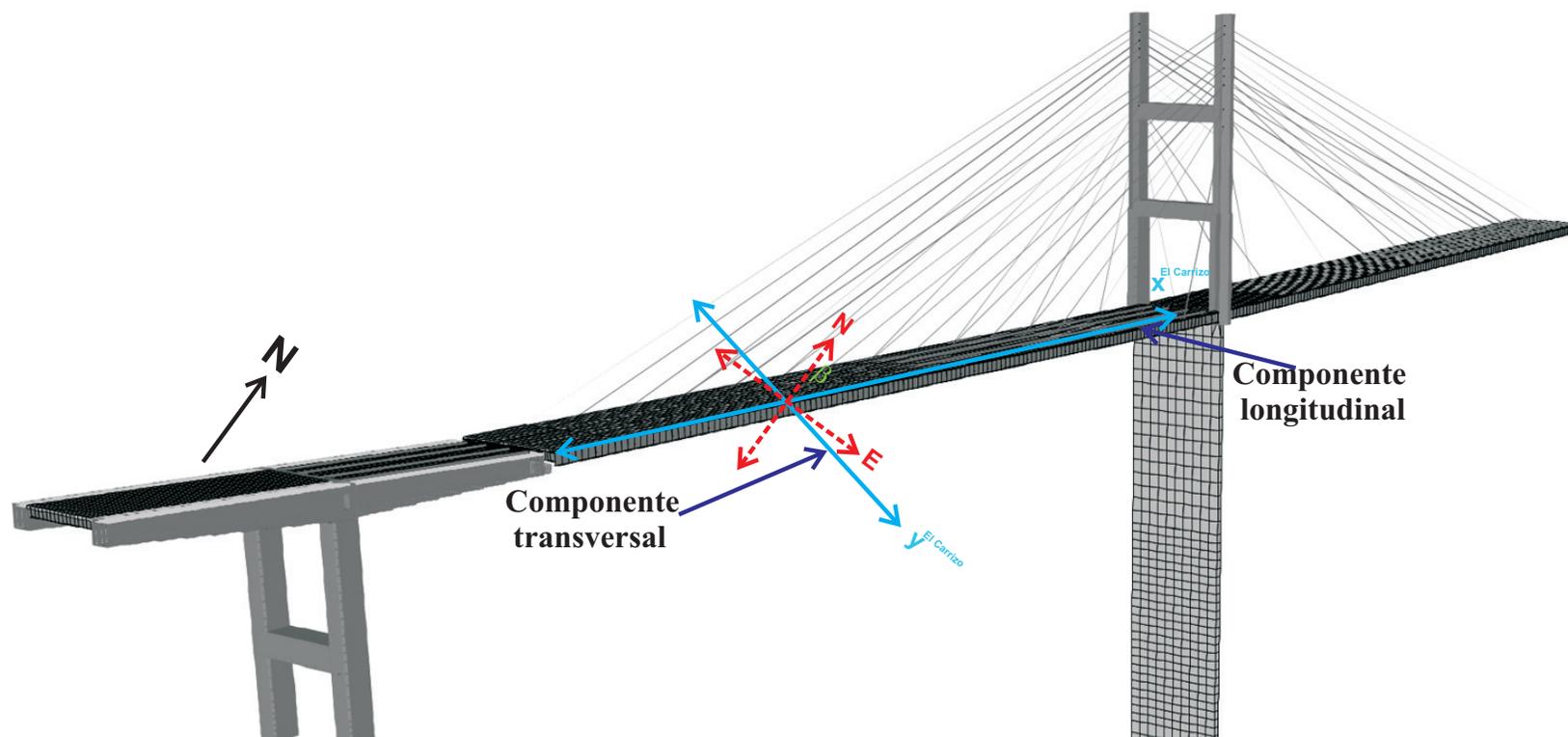
### 7.2.3. Estrategias de procesamiento GNSS

La estrategia de procesamiento por el método relativo es considerada como una técnica de referencia para la evaluación de otros métodos de procesamiento, debido a su alta precisión al eliminar fuentes de error en común entre la estación de referencia y el receptor GNSS denominado rover (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Por lo cual, derivado de lo anterior y atendiendo los objetivos de este Capítulo 7, las observaciones GNSS registradas sobre el puente El Carrizo fueron procesadas por el método relativo cinemático, considerando diferentes combinaciones de constelaciones GNSS (GPS, GPS+GLONASS).

**Tabla 7.1:** Estrategias de procesamiento utilizadas por el software RTKLib v2.4.2 y TRACK.

Software	RTKLib v2.4.2	TRACK
<i>Modo de procesamiento GNSS</i>	Relativo cinemático	
	GPS, GLONASS	GPS
<i>Observaciones procesadas</i>	Código y fase	
<i>Frecuencia de muestreo</i>	5 Hz	
<i>Máscara de elevación</i>	12°	
<i>Señales</i>	L1, L2	
<i>Órbita y reloj del satélite</i>	Transmitidas	CODE precisas
<i>Corrección de ambigüedad</i>	Fix and Hold	
<i>Filtrado</i>	Combinado	
<i>Archivo ANTEX</i>	ngs2014.atx	igs14_2091.atx
<i>Coordenadas de salida</i>	ENU	ENU+GEOD

Se procesaron observaciones de código y fase de frecuencias duales ( $L_1$  y  $L_2$ ) para una línea base de corta (aproximadamente 80 m de largo). El procesamiento se basó en efemérides transmitidas para diferentes constelaciones GNSS. Las posiciones cinemáticas en cada punto de monitoreo sobre el puente se calcularon en relación con el punto de la estación de referencia GNSS. Las mediciones GNSS se procesaron utilizando el software académico RTKLib v2.4.2 (Takasu y Yasuda, 2009) y el software científico TRACK (Floyd, 2018). RTKLib tiene tres estrategias para corregir las ambigüedades durante el post-procesamiento cinemático de las observaciones GNSS: (1) *Continuous*, (2) *Fix and hold* y (3) *instantaneous* (Msaewe et al., 2021). La estrategia *instantaneous* utiliza un método de mínimos cuadrados para corregir la ambigüedad época por época, mientras que las estrategias *continuous* y *fix and hold* utilizan el enfoque de filtrado de Kalman.



**Figura 7.5:** Rotación de las coordenadas ENU al sistema local 3D del puente El Carrizo.

En este estudio se aplicó la estrategia *fix and hold*. En la Tabla 7.1 se observan las principales estrategias de procesamiento utilizadas por RTKLib v2.4.2 y TRACK. Finalmente, las series de tiempo cinemáticas de coordenadas 3D en el sistema NEU fueron rotadas mediante una transformación lineal al sistema local de coordenadas del puente El Carrizo (transversal-x, longitudinal-y y vertical-z) utilizando la Ecuación 6.3 del Capítulo 6. La Figura 7.5 ilustra el proceso de rotación de las coordenadas NEU a locales.

Las series de tiempo cinemáticas de coordenadas locales del puente se transformaron en series de tiempo aparentes  $VA_i$  alrededor de un cero relativo que representa el nivel de referencia del punto de monitoreo sobre el puente atirantado, aplicando la siguiente Ecuación 7.1 (Moschas y Stiros, 2011):

$$VA_i = U_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (7.1)$$

Donde  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , siendo  $n$  el número total de puntos muestreados,  $U_i$  representa las coordenadas 3D locales del puente (longitudinal, transversal y vertical). También, se aplicó un filtro hampel a las series de tiempo locales para eliminar valores atípicos mayores a  $3\sigma$ . Las series de tiempo locales aparentes 3D obtenidas por el método relativo cinemático para las combinaciones de constelaciones GNSS (GPS y GPS+GLONASS) servirán como variables de entrada para las siguientes Secciones.

#### 7.2.4. Respuesta del puente El Carrizo- análisis espectral

Comprender la respuesta de las principales estructuras a los efectos dinámicos a los que son sometidas como los terremotos, carga de tráfico y el viento, son temas de gran relevancia para la ingeniería estructural, debido a la importancia de identificar si las características dinámicas reales y de diseño de una estructura son similares (Moschas y Stiros, 2011). Para extraer las principales frecuencias naturales de la respuesta del puente El Carrizo, se estudiaron las series de tiempo locales aparentes de solo GPS y GPS+GLONASS de cada componente (transversal, longitudinal y vertical) aplicando análisis espectral. Para una comparación confiable entre las frecuencias modales derivadas del análisis espectral de datos GPS y GPS+GLONASS, se consideraron solamente las frecuencias naturales del puente que han sido reportadas en estudios previos, como son las extraídas por mediciones a priori con acelerómetros y las simuladas por un modelo numérico del puente.

Se aplicó un filtro pasa-alta Butterworth de octavo orden para eliminar las componentes de baja frecuencia, y se estableció una frecuencia de corte de 0.2 Hz. Se eligió esta frecuencia de corte porque la frecuencia fundamental (Frecuencia del primer modo de vibrar) del tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo es de alrededor de 0.2692 Hz extraída de mediciones de aceleración. Los resultados derivados de la salida del filtro Butterworth consisten en desplazamientos dinámicos que se consideran reales después de la eliminación de los componentes de baja frecuencia. La transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) se utiliza para examinar señales en el dominio de la frecuencia. Desde que surgió en 1965, la FFT ha sido utilizada en las operaciones como el análisis de espectro y la determinación de los valores de amplitud y frecuencia de las señales. Además, la FFT se aplica comunmente en el procesamiento digital de señales (Oku Topal y Akpinar, 2022). Por lo cual, las frecuencias modales de la respuesta estructural del puente El Carrizo fueron extraídas de las series temporales de desplazamientos dinámicos aplicando la FFT (Yu et al., 2014). Al aplicar la FFT se obtuvieron valores de amplitud y frecuencia de los desplazamientos dinámicos locales aparentes 3D.

#### 7.2.5. Resultados

En esta Sección 7.2.5, se muestran los resultados del monitoreo de la salud estructural del puente El Carrizo a través de mediciones registradas con receptores GNSS de orden

geodésico. Las coordenadas obtenidas por el método relativo cinemático fueron transformadas a coordenadas locales aparentes 3D del puente. Posteriormente, a estas coordenadas se les aplicó un filtro digital pasa-alta Butterworth y la FFT.

### 7.2.5.1. Calidad de las observaciones GNSS

Para evaluar la calidad de las señales GNSS, existen diferentes indicadores como: integridad de las observaciones, *multipath* y la relación señal-ruido (SNR). La SNR indica la relación existente entre la señal de la portadora y el ruido de la portadora, que es igual a la potencia de la portadora-potencia de ruido (Estey y Meertens, 1999). Dentro de los sistemas de comunicaciones satelitales, la mejor antena puede obtener el mejor SNR. Un valor de SNR alto proporciona una mejor tasa de recepción, una mejor calidad de comunicación y una mejor confiabilidad de la señal (Comnavtech, 2023). El SNR es uno de los indicadores para evaluar las observaciones de la fase portadora. Sin embargo, una de las incógnitas cuando se evalúa la calidad de la señal GNSS, es el valor ideal-correcto del SNR. Cada constelación y cada frecuencia GNSS presenta un valor estándar de SNR diferente. Por lo tanto, se debe evaluar la calidad de la señal para cada uno de los satélites en referencia al valor teórico. Se aplicó la propuesta de análisis SNR discutida en la Sección 3.4.1 del Capítulo 3. Además, se propone una relación entre el puntaje de porcentaje SNR y la calidad de la señal GNSS. Por lo cual, entre mayor sea la puntuación del porcentaje SNR, mayor es la similitud entre el valor SNR real y el teórico. En la Tabla 7.2 se muestra la calidad de los diferentes niveles de puntuación de porcentaje SNR. Tal como se mencionó en el Capítulo 3, el autor recomienda porcentajes de puntuación SNR mayores a 80 % para que sea una señal aceptada.

**Tabla 7.2:** Puntuación de los valores SNR y su relación con la calidad de la señal GNSS.

Puntaje SNR en %	Calidad de la señal GNSS
95-100	Excelente
90-94	Muy buena
85-89	Bien
80-84	Aceptada
<80	Insatisfactorio

Otro de los indicadores de calidad, es el *multipath*. El *multipath* es causado por la propagación de la señal sin visibilidad directa. Las señales recibidas son la superposición de las señales directas y reflejadas (Huang et al., 2022). Existen cuatro categorías de técnicas para la mitigación del *multipath*: (1) la localización de la antena, (2) tipo de antena, (3) tipo de receptor y (4) post-procesamiento. El *multipath* de las mediciones de la fase portadora es aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda o menos, lo que significa que es mucho más pequeño que el *multipath* de las mediciones de código. Por otro lado, según Huang et al. (2022) además de la antena y su entorno, el *multipath* es afectado por las señales y los tipos de receptores. La SNR y el *multipath* son los indicadores más importantes

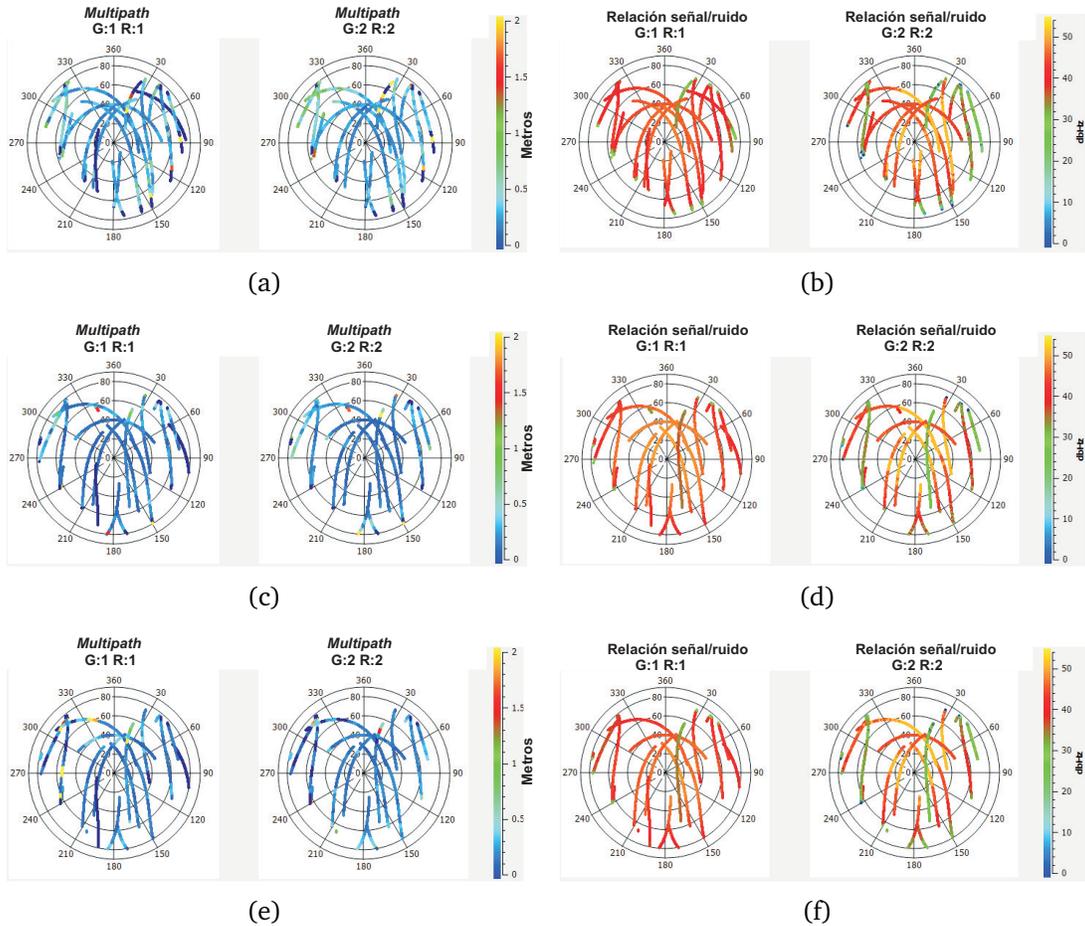
de calidad en una señal. Por lo cual, fueron las variables de interés para esta Sección 7.2.5.1.

El entorno de las antenas GNSS que registraron los desplazamientos en el tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo estuvo libre de obstáculos, y la distancia a los cientos de vehículos que circularon el puente durante el experimento fue mayor a 2 m. Por otro lado, la estación GNSS establecida como referencia se mantuvo fuera de la vegetación y obstáculos que pudieran debilitar la señal. El análisis de calidad se hizo con el software Anubis (Vaclavovic y Dousa, 2016), y se estableció un ángulo de elevación de  $12^\circ$ , es decir, las señales provenientes de satélites que comienzan a asomarse en el horizonte no son consideradas. Las señales provenientes de ángulos de elevación baja son de mala calidad debido al bajo ruido atmosférico y *multipath* (Xue et al., 2022). Los resultados de *SNR* y *multipath* fueron ilustradas en la trayectoria de los satélites observados, con el objetivo de identificar los satélites con señales de mala calidad. En la Figura 7.6 se puede ver la *SNR* y *multipath* de la estación GNSS de referencia y los receptores GNSS colocados en el tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo. En la Tabla 7.3 se resumen los valores de *SNR* y *multipath* para cada constelación y cada señal. El porcentaje de indicador *SNR* se agregó en la Tabla 7.3, se puede encontrar entre paréntesis a un lado de los valores *SNR*.

**Tabla 7.3:** Resumen del análisis de calidad de las mediciones GNSS.

Estación	GNSS	Integridad	SNR1 [dB-Hz]	SNR2 [dB-Hz]	MP1 [cm]	MP2 [cm]
Base	GPS	85 %	42.01 (84 %)	39.34 (93.6 %)	1.4	2.7
	GLONASS	85 %	39.42 (78 %)	41.56 (86 %)	1.7	1.5
Rover A	GPS	88 %	44.36 (88 %)	39.80 (94.7 %)	0.9	1.4
	GLONASS	88 %	40.59(81 %)	41.19 (85.8 %)	1.4	1.0
Rover B	GPS	88 %	42.52 (85 %)	38.96 (92 %)	1.0	1.7
	GLONASS	88 %	39.65 (79 %)	41.28 (86 %)	2.0	1.2

Con base en los valores encontrados en la Tabla 7.3, solamente la señal  $L_1$  de GLONASS para la estación GNSS de referencia y el receptor GNSS del lado B presentaron un *SNR* insatisfactorio, y muy bueno en la  $L_2$  de GPS en la estación GNSS de referencia y el receptor GNSS del lado B. Ninguna de las señales analizadas presentó el desempeño total de calidad excelente en el indicador *SNR*. Aunque los receptores/antenas GNSS se hayan colocado estratégicamente para mitigar el *multipath* y tener una visibilidad adecuada para un mayor seguimiento a la trayectoria de los satélites, las condiciones de la topografía de la zona donde se localiza el puente afectan de manera importante la adquisición de las señales, y esto se puede ver claramente en los porcentajes del indicador *SNR*. Sin embargo, las mediciones estuvieron aceptables y muy buenas, lo que significa un post-procesamiento adecuado. Con respecto a los valores del *multipath*, estos fueron muy bajos para todos los receptores GNSS. Los bajos valores de *multipath* se puede asociar al ángulo de elevación definido en el software Anubis, evitando señales reflejadas en los vehículos y tablero del puente. En general, las condiciones de los parámetros de calidad estuvieron aceptables.



**Figura 7.6:** Valores de *SNR* y *multipath*: (a) *multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para GPS y GLONASS de la estación de referencia GNSS, (b) *SNR* en  $L_1$  y  $L_2$  para GPS y GLONASS de la estación de referencia, (c) *multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado A del tablero del puente, (d) *SNR* en  $L_1$  y  $L_2$  para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado A del tablero del puente, (e) *multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado B del tablero del puente, y (f) *SNR* en  $L_1$  y  $L_2$  para GPS y GLONASS del receptor GNSS sobre el lado A del tablero del puente.

### 7.2.5.2. Desplazamientos semi-estáticos del puente El Carrizo

Los desplazamientos estáticos son desplazamientos lentos en periodos de observación largos. Estos desplazamientos son ocasionados por el peso de los vehículos que circulan sobre el puente atirantado El Carrizo. Debido al tráfico de vehículos pesados, es posible observar desplazamientos máximos en el periodo del experimento.

Con el objetivo de evaluar el rendimiento de la combinación GPS y GPS+GLONASS para la técnica relativo cinemático, en la Figura 7.7 se observan los desplazamientos locales 3D del puente (transversal, longitudinal y vertical) (TRACK) y en la Tabla 7.4 el resumen estadístico de estos desplazamientos, obtenidos desde TRACK y RTKLib. Debido a que TRACK únicamente es compatible con GPS, se compararon los desplazamientos 3D

de TRACK con las combinaciones GPS y GPS+GLONASS procesadas en RTKLib. También, se generaron histogramas de las diferencias de los desplazamientos para ver el desempeño que presenta la combinación GPS+GLONASS, al considerar los resultados de TRACK como referencia por ser un software científico (Floyd, 2018; Lu et al., 2012) (Ver Figura 7.8). La tendencia de las series de tiempo en la componente transversal y longitudinal para ambos lados presenta un comportamiento similar para GPS y GPS+GLONASS, con respecto a TRACK. Las diferencias son menores a 5 mm, tal como se observa en los histogramas. Por otro lado, en la componente vertical se observa una tendencia con una diferencia pequeña, siendo la combinación GPS+GLONASS del lado B quien presentó menor dispersión, con una desviación estándar de 0.75 cm. Para el lado A, la combinación GPS+GLONASS nuevamente fue la de menor dispersión, con un valor de 0.99 de desviación estándar. La componente vertical del lado A y B tuvo mejor desempeño con la combinación GPS+GLONASS procesadas en RTKLib. Para la componente transversal y longitudinal los resultados de la combinación GPS y GPS+GLONASS fueron iguales a las de TRACK. Con respecto a las diferencias encontradas en la Tabla 7.5, la combinación GPS+GLONASS y GPS para el lado A fueron similares. Esto se deriva a que la ubicación del punto A estuvo con las condiciones más favorables para la adquisición de la señal GNSS que el punto B. La componente que presentó las mayores diferencias fue la vertical. Con base en los resultados estadísticos de las series de tiempo y los histogramas se puede declarar que RTKLib v2.4.2 tiene un desempeño similar a TRACK para el procesamiento del método relativo cinemático.

**Tabla 7.4:** Resumen estadístico de los desplazamientos estáticos obtenidos desde el software RTKLib considerando diferentes combinaciones GNSS.

Comb	Lado	Componentes 3D locales del puente El Carrizo								
		Transversal (cm)			Longitudinal (cm)			Vertical (cm)		
		$\sigma$	Max	Min	$\sigma$	Max	Min	$\sigma$	Max	Min
G	Lado A	0.38	1.02	-1.07	0.26	0.79	-0.79	0.77	1.93	-2.84
G+R	Lado A	0.37	1.1	-1.8	0.26	0.95	-0.38	0.75	2.2	-1.63
G	Lado B	0.36	0.96	-1.2	0.31	0.88	-0.96	1.01	2.8	-3.2
G+R	Lado B	0.36	1.2	-1.2	0.3	1.08	-1	0.99	2.2	-3.2
G	Lado A	0.38	1.07	-1.2	0.26	0.8	-0.9	0.76	2.1	-2.3
G	Lado B	0.37	1.1	-1.16	0.3	0.9	-0.9	1.01	2.4	-3

**Tabla 7.5:** Resumen estadístico de las diferencias entre los desplazamientos estáticos obtenidos por el software RTKLib y TRACK.

Diferencias	GNSS	Transversal (cm)		Longitudinal (cm)		Vertical (cm)	
		$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$
		TRACK-RTKLib (A)	G	0.09	0.009	0.05	0.0001
TRACK-RTKLib (B)	G	0.10	0	0.066	0	0.26	0
TRACK-RTKLib (A)	G+R	0.09	0.009	0.07	0.003	0.25	-0.002
TRACK-RTKLib (B)	G+R	0.1152	0.0008	0.08	-0.001	0.30	-0.003

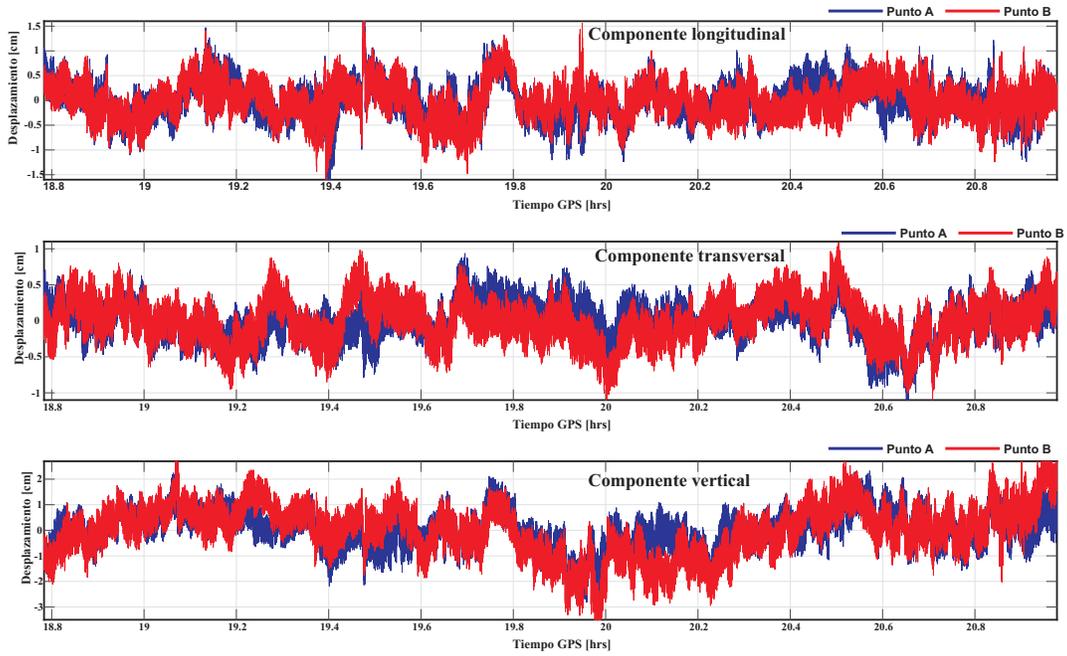


Figura 7.7: Desplazamientos locales estáticos 3D del puente El Carrizo obtenidas en el software científico TRACK.

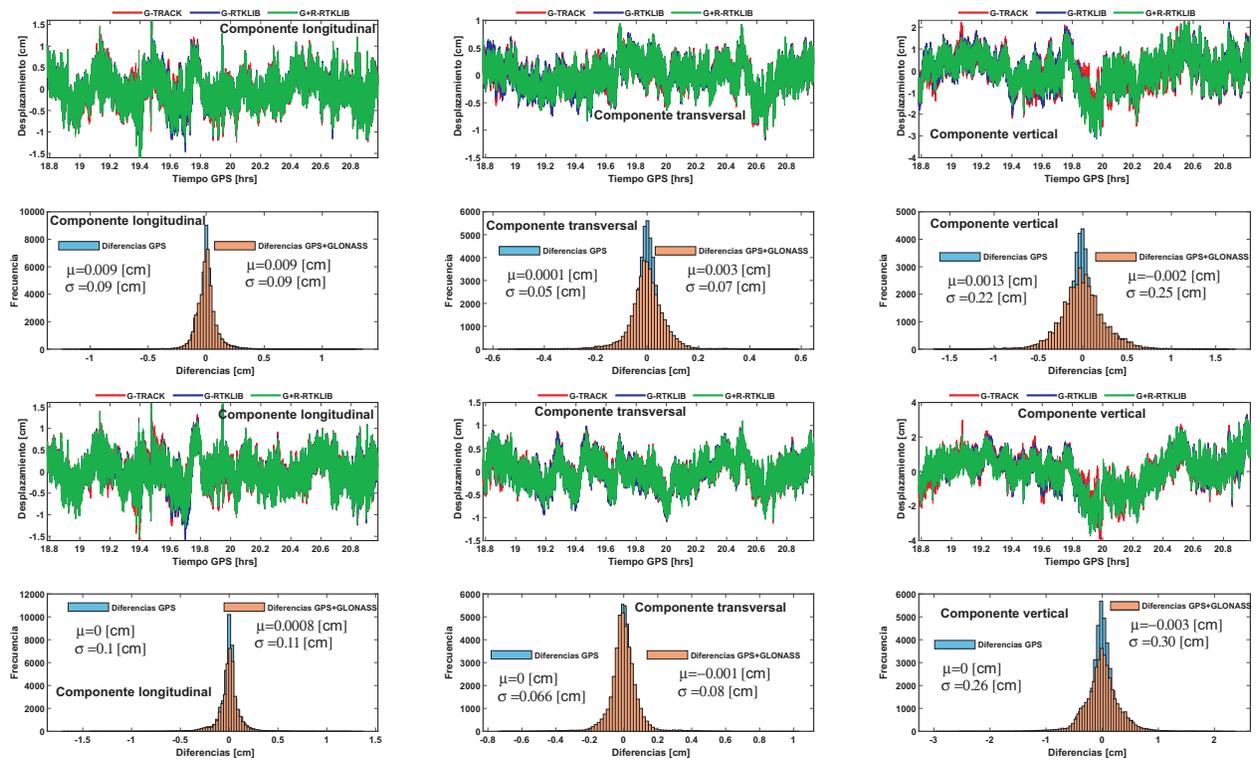


Figura 7.8: Histogramas de las diferencias de coordenadas obtenidas en el software TRACK y RTKLib v2.4.2.

La Figura 7.7 ilustra las series de tiempo correspondiente a las coordenadas 3D locales del puente para los lados A y B, considerando únicamente la constelación GPS y procesadas en TRACK. Claramente se observa que el comportamiento del receptor GNSS ubicado en el punto A es igual al del punto B. Es debido a que los receptores GNSS están ubicados sobre una dovela metálica, siendo una estructura rígida, por lo cual, los desplazamientos en los extremos de la dovela deben de ser similares. Los desplazamientos medidos con los receptores GNSS fueron tan precisos, en el orden de los 2 mm.

### 7.2.5.3. Desplazamientos dinámicos y análisis espectral del puente El Carrizo

Para evaluar las principales frecuencias naturales de la respuesta del puente El Carrizo, se analizaron las series temporales de los desplazamientos de dos puntos (A y B) sobre el tablero, considerando las combinaciones GNSS, GPS y GPS+GLONASS de cada componente (transversal, longitudinal y vertical) aplicando una técnica espectral. Las frecuencias naturales de referencia fueron emitidas por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Las frecuencias naturales fueron extraídas a través de mediciones de aceleración y simuladas por el método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés) del puente El Carrizo. Para este estudio se consideraron como referencia las frecuencias extraídas por el acelerómetro. Estas frecuencias modales se encuentran en la Tabla 7.6.

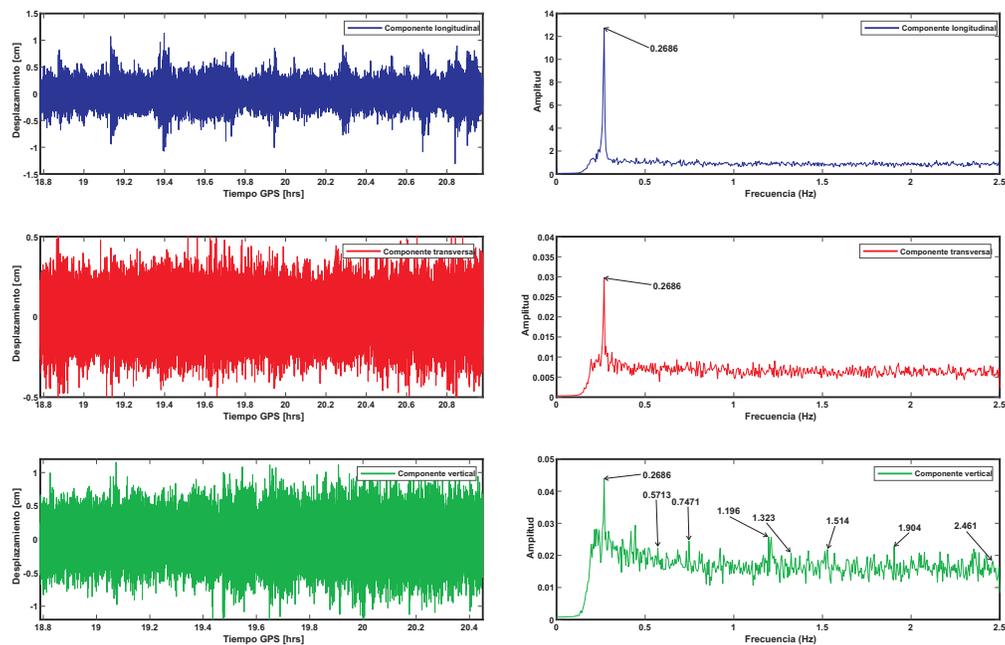
En primer lugar, se analizan los desplazamientos locales 3D del puente obtenidos por la técnica de posicionamiento relativo cinemático. Se eliminaron las frecuencias bajas aplicando un filtro digital pasa-alta *Butterworth*. La técnica de análisis espectral consistió en identificar un periodo de las series de tiempo que estuvieran libres de ruido y posteriormente seleccionar pequeñas muestras correspondiente a 1064 datos (equivalentes a 3.546 minutos) y aplicar la FFT, promediando los resultados en cada ciclo hasta llegar al total de la población (total de épocas). Las Figuras 7.9 y 7.10 muestran los espectros de las series temporales de coordenadas derivadas de las soluciones GPS con el software TRACK para el lado A y B, respectivamente, también se ilustran los desplazamientos dinámicos extraídos por el filtro digital *Butterworth*.

**Tabla 7.6:** Frecuencias modales del puente El Carrizo en Hz, emitidas por el Instituto Mexicano del Transporte.

Modo	$f_{acele}$	$f_{mef}$	Diferencias (%)
1	0.2692	0.2800	4.02
2	0.5643	0.6132	8.68
3	0.7754	0.7898	1.86
4	1.1850	1.0849	-8.45
5	1.3060	1.1942	-8.56
6	1.5118	1.3674	-9.55
7	1.8850	1.9676	4.38
8	2.4623	2.5342	2.92
9	3.4500	3.0801	-10.72

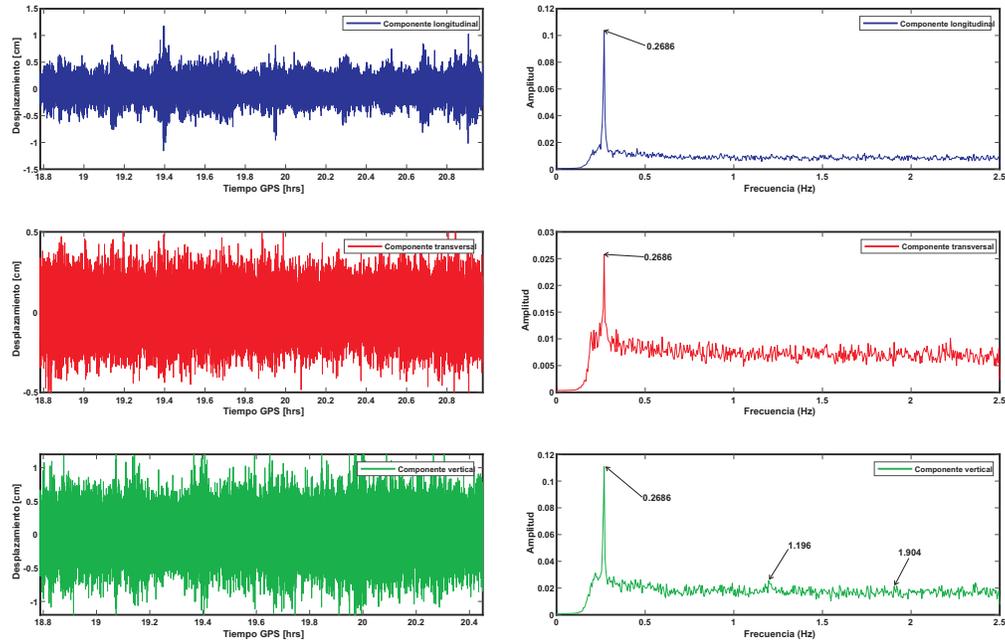
Las Figuras 7.9 y 7.10 presentan los espectros de los puntos A y B. Los picos en esos

espectros, que superan el ruido de las series temporales, corresponden a la frecuencia fundamental de 0.2692 Hz en las 3 componentes, principalmente en la transversal y longitudinal. Por otro lado, en la componente vertical del punto A se observan picos que corresponden a las primeras 8 frecuencias modales, es decir, (1) 0.2686 Hz a 0.2692 Hz, (2) 0.5713 Hz a 0.5643 Hz, (3) 0.7471 Hz a 0.7754 Hz, (4) 1.196 Hz a 1.1850 Hz, (5) 1.323 Hz a 1.3060 Hz, (6) 1.514 Hz a 1.5118 Hz, (7) 1.904 Hz a 1.8850 Hz y (8) 2.461 Hz a 2.4623 Hz. Donde la frecuencia del primer modo de vibrar corresponde a la frecuencia fundamental del puente El Carrizo. La componente vertical es la componente que mejor resultados espectrales obtuvo y esto es debido a que la carga viva de los vehículos que transitaron el puente durante el experimento excitó a esta componente más que a la horizontal. Esto se puede ver claramente en la Figura 7.9. Por otro lado, en el punto B solamente se pudo observar la frecuencia del primer, cuarto y séptimo modo de vibrar en la componente vertical, en la horizontal únicamente la frecuencia fundamental fue observada. La diferencia en la información espectral obtenida en el punto A y B, se puede derivar a la velocidad y el tiempo que tardan en transitar los vehículos pesados por el puente, es decir, el punto A está localizado en la dirección Mazatlán-Durango y la pendiente al llegar a ese punto es negativa, por lo cual, los vehículos acumulan velocidad, aumentando la carga dinámica y ocasionando mayor efecto dinámico en esa zona (Lado B), sin embargo, el tiempo de interacción en la zona de A es menor. El punto B está localizado en la dirección Durango-Mazatlán, y cuando los vehículos pasan por esta zona están ascendiendo una pendiente, lo que significa que los vehículos pasan a una velocidad menor y el tiempo de interacción con el puente en esa zona es mayor.



**Figura 7.9:** (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto A-TRACK. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

Los resultados del análisis espectral considerando las combinaciones GPS y GPS + GLO-NASS de los puntos A y B, procesados en RTKLib v2.4.2 con el método relativo cinemático se aprecian en las Figuras 7.11, 7.12, 7.13 y 7.14. Las Figura 7.11 y 7.12 contienen los espectros del punto A con únicamente GPS y GPS+GLONASS, respectivamente. Se observa un pico libre de ruido correspondiente a la frecuencia del primer modo de vibrar en las componentes transversal y longitudinal. En el caso de la componente vertical para ambas combinaciones GNSS, se puede apreciar mayor ruido, sin embargo, es posible identificar las frecuencias de algunos modos de vibrar, como el primero, tercero, sexto y séptimo para GPS; el primero, tercero, cuarto y sexto para GPS+GLONASS.



**Figura 7.10:** (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto B-TRACK. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

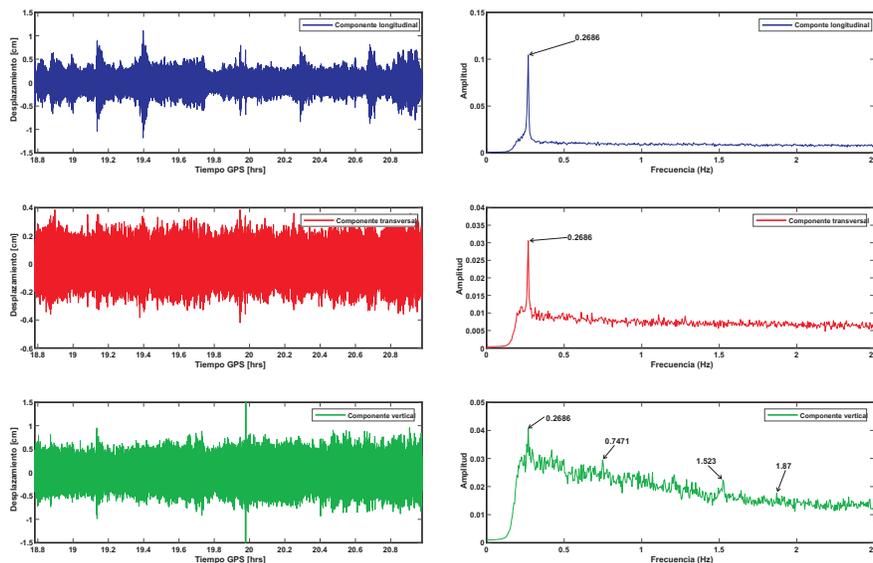
**Tabla 7.7:** Porcentaje del error en % entre la diferencia de los valores de referencia y los medidos.

Software	Lado	Combina	Modos de vibrar								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
RTKLib	A	G	0.22	-	3.79	-	-	-0.74	0.8	-	-
		G+R	0.22	-	3.79	-2.15	-	-0.47	-	-	-
	B	G	0.22	5.06	-	-2.15	-	-	-	-	-
		G+R	0.22	5.06	-	-2.15	-	-2.97	-	-	-
TRACK	A	G	0.22	-1.23	3.79	-0.92	-1.28	-0.15	-1	0.05	-
	B	G	0.22	-	-	-0.92	-	-	-1	-	-

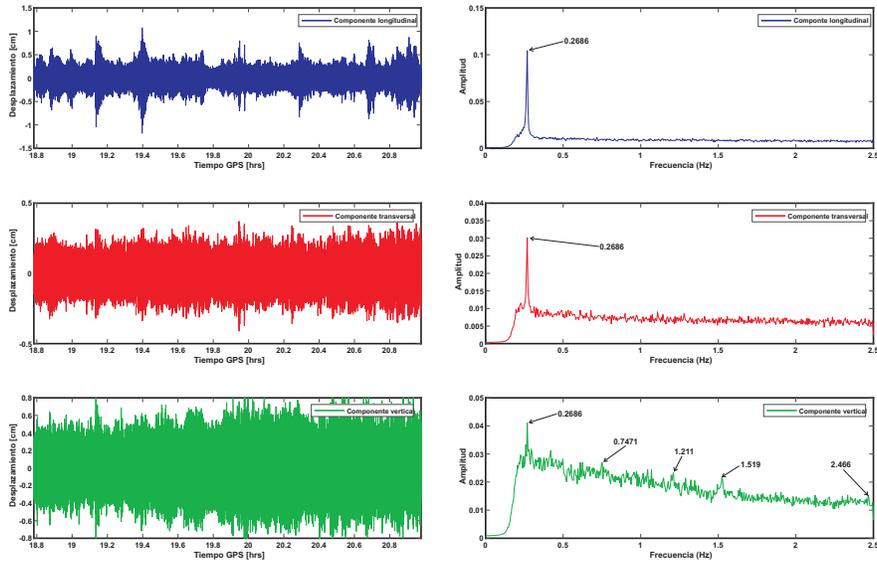
Con respecto al punto B, la combinación GPS logró observar en la componente verti-

cal la frecuencia del primer, segundo y cuarto modo de vibrar. Para GPS+GLONASS, las frecuencias de los modos de vibrar que se identificaron fue el primero, segundo, cuarto y sexto. En la componente horizontal únicamente se pudo observar la frecuencia fundamental del puente para ambas combinaciones. Las figuras 7.13 y 7.14 ilustran los resultados espectrales del punto B, GPS y GPS+GLONASS, respectivamente.

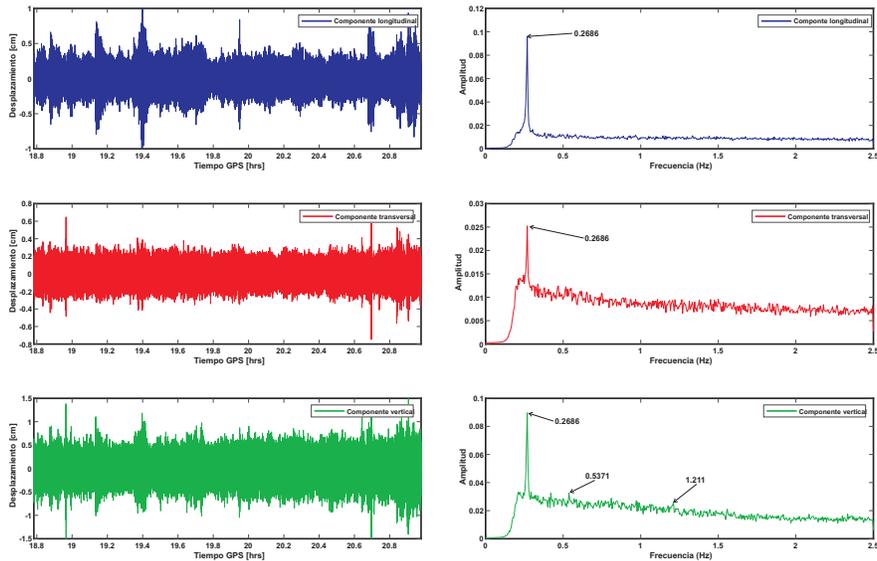
Finalmente, en la Tabla 7.7 se presentan los errores en porcentaje de las diferencias entre los valores de las frecuencias de los modos de vibrar de referencia y los medidos sobre los puntos A y B, procesados con el software RTKLib y TRACK, para las combinaciones GNSS: GPS y GPS+GLONASS. En primer lugar, se destaca la importancia de utilizar un software científico que tenga un alto desempeño en el procesamiento de datos GNSS a través de la técnica relativo cinemático. En las series de tiempo de los desplazamientos locales aparentes 3D en la componente vertical para el punto A y procesados con TRACK, fue posible extraer todas las frecuencias de los modos de vibrar del puente El Carrizo considerando el teorema de Nyquist-Shannon (NS). El teorema NS, es un principio utilizado en la adquisición de señales, que establece que una señal real cuyo espectro está limitado en banda B (Hz), puede reconstruirse a partir de muestras tomadas uniformemente, a una tasa mínima de 2B muestras por segundo (Lathi y Green, 2014). Por lo cual, la frecuencia máxima que se puede extraer con las mediciones GNSS muestreadas a 5 Hz, es 2.5 Hz. La frecuencia del primer modo de vibrar o frecuencia fundamental fue observada por todas las combinaciones GNSS procesadas en RTKLib, y se puede apreciar que las frecuencias de los modos de vibrar impares fueron visibles significativamente en el punto A y los pares en el punto B.



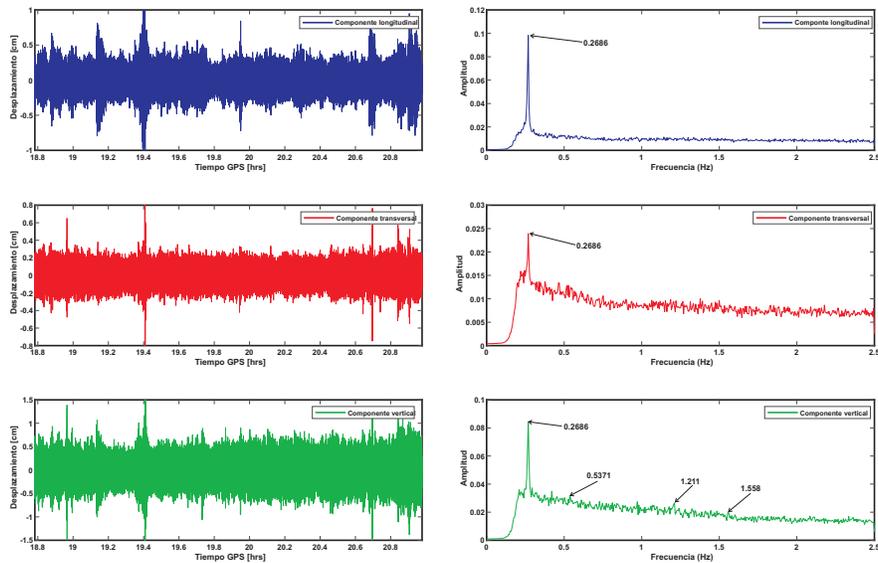
**Figura 7.11:** (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto A-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.



**Figura 7.12:** (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS+GLONASS para el punto A-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.



**Figura 7.13:** (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto B-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.



**Figura 7.14:** (Izquierda) Las series temporales de desplazamientos dinámicos de las tres componentes transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS+GLONASS para el punto B-RTKLIB. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

## 7.2.6. Discusión

Llevar a cabo mediciones GNSS sobre puentes atirantados representa un reto para los ingenieros, debido a la gran cantidad de fuentes de errores a los que se somete. El *multipath*, valores bajos de *SNR*, pérdidas en el seguimiento de la fase portadora debido al tráfico de los vehículos que obstruyen la señal, los cables que soportan la subestructura del puente, la visibilidad de los satélites GNSS, y la topografía del lugar donde se localiza el puente, son algunas de las fuentes de errores más comunes mencionadas en la literatura. El puente El Carrizo es un puente ideal para diferentes fuentes de error, desde la topografía accidentada que limita la visibilidad de una gran cantidad de satélites en ángulos de hasta  $20^\circ$  en algún azimut específico, y la gran cantidad de vehículos pesados que transitan el puente. Sin embargo, todos estos obstáculos han servido para que nuevas técnicas y estrategias se desarrollen alrededor del mundo. Derivado de los nuevos enfoques hacia el procesamiento de datos multi-GNSS, el sistema SHM con receptores y antenas de orden geodésico presentado en este capítulo 7 fue diseñado para atender todas las posibles fuentes de error.

Alrededor del mundo se han aplicado una gran cantidad de estudios sobre puentes a través de mediciones GNSS. Principalmente, en puentes localizados en ciudades chinas. Estos estudios evalúan la precisión de los sistemas GNSS y sus combinaciones para medir desplazamientos estáticos, dinámicos y en pocos casos, frecuencias modales sobre puentes. También, el efecto del ángulo de elevación y la geometría de los satélites observados. Los puentes evaluados en estos estudios comúnmente atraviesan un río de algunos metros de ancho, las cargas por vientos, sismos y tráfico son pequeños en comparación de otros

puentes, como El Baluarte y El Carrizo ubicados en México. Estos últimos, son puentes que están sometidos a cargas de viento, sismos y un alto tráfico vehicular que derivan en accidentes, como el ocurrido sobre el puente El Carrizo a inicios del año 2018 ([Vazquez-Ontiveros et al., 2020](#)).

El uso de los sistemas GNSS en la evaluación de puentes tiene poco más de 2.5 décadas. En estos últimos 25 años se han desarrollado nuevas estrategias de procesamiento de datos GNSS, así como también, nuevos receptores GNSS con capacidades de muestreo hasta 100 Hz han salido al mercado. Unas de las variables más importantes a monitorear sobre puentes son los desplazamientos estáticos, dinámicos en la componente vertical, y las frecuencias naturales. Los desplazamientos en la componente vertical son complejos de medir con instrumentos comúnmente utilizados, como los sensores LVDT. La tecnología GNSS es tan precisa para medir la componente vertical que en algunos países, los puentes más emblemáticos cuentan con un sistema SHM compuesto por receptores GNSS midiendo en tiempo real. Estos sistemas SHM en tiempo real representan uno de los avances más importantes dentro del Monitoreo de la Salud Estructural con mediciones GNSS. Derivado de lo anterior, en este capítulo 7, sección 7.2 se presenta una estrategia ideal para medir desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias modales sobre puentes flexibles.

En este estudio, a diferencia de otros, se evalúan las tres componentes de coordenadas locales del puente El Carrizo con mediciones GNSS a altas frecuencias de muestreo, también, se utiliza una técnica ideal para extraer frecuencias modales de las series de tiempo derivadas de mediciones GNSS con una alta precisión al ser comparadas con resultados de referencia. Con esta técnica es posible extraer las frecuencias de los primeros 8 modos de vibrar del puente El Carrizo. Otro factor importante anterior al análisis de las series de tiempo es el procesamiento de las observaciones GNSS. Utilizar un software científico ayuda a mitigar y modelar la mayoría de los errores en los GNSS, lo cual aumenta el grado de confianza al representar la realidad del puente. Sin embargo, el uso de software de código abierto representa una alternativa confiable a los software científico. La combinación de sistemas GNSS en muchos casos ayuda a mejorar la precisión de los resultados, sin embargo, en ocasiones no es siempre así. Por ejemplo, en mediciones donde las fuentes de error son grandes, el aumento de satélites en el proceso aumenta los errores y esto es bien demostrado cuando se observan las series de tiempo.

Finalmente, los desplazamientos estáticos registrados en el lado A y B del puente tienen un comportamiento similar, esto se debe a que la dovela donde estaban instrumentados es una estructura rígida. Esta similitud de resultados deriva a la precisión que tiene la tecnología GNSS para medir desplazamientos estáticos en las 3 componentes. Con base en el diseño de la sección atirantada del puente El Carrizo, la componente horizontal es menos susceptible a los movimientos a como lo es la componente vertical, esto se observa claramente en las magnitudes de las series de tiempo en la figura 7.7. La componente horizontal alcanzó desplazamientos alrededor de 1 cm, mientras que la vertical mayores a 2 cm. Por otro lado, el uso de los receptores GNSS para medir frecuencias modales sobre puentes es una aplicación novedosa y precisa, siempre que se consideré las propiedades del puente. Los puentes rígidos son más difíciles de medir con la tecnología GNSS porque sus desplazamientos están en el orden de la precisión y ruido de las mediciones GNSS. Por esta razón, el puente El Carrizo es una estructura ideal para aplicar estrategias de procesamiento y análisis de series temporales para extraer propiedades dinámicas.

### 7.2.7. Conclusiones

El uso de tecnología satelital GNSS para el monitoreo de la salud estructural en puentes está bien probada. Sin embargo, aun existen incógnitas que deben ser atendidas por la comunidad científica. Una correcta evaluación de la señal GNSS adquirida por receptores y antenas de orden geodésico sobre un puente es presentada por primera vez en este estudio. En este trabajo, se aplicó un nuevo enfoque de evaluación de la señal GNSS considerando los valores teóricos de la relación señal-ruido. Encontrando porcentajes de la calidad de la señal altos para mediciones sobre puentes que representa información previa a los esperado en el postprocesamiento. La constelación GLONASS mostró valores SNR menores a los de GPS, lo que indica que GPS tiene mejor geometría en la zona de estudio. También, la combinación GPS+GLONASS no mejoró la solución, principalmente debido a las señales ruidosas de GLONASS. Lo que demuestra que las combinaciones de constelaciones GNSS no siempre mejoran la precisión, ya que existen otros factores que debilitan la solución final.

RTKLib es un software de código abierto que puede ser utilizado para el procesamiento de datos GNSS en modo relativo cinemático al alcanzar precisiones cercanas a las de un software científico como TRACK. Las diferencias entre las series de tiempo obtenidas con RTKLib y TRACK fueron menores a 1 cm en las tres componentes. Los desplazamientos estáticos fueron mayores en el lado B, con valores acumulados de 5.4 cm, mientras en el lado A, de 4.4 cm. Esta diferencia entre los desplazamientos estáticos puede derivarse de la pendiente y la carga dinámica a la cual está sometida la dovela metálica en la que se instrumentaron los receptores GNSS. Los desplazamientos registrados sobre el puente no representan un riesgo para la estructura del puente ya que están muy por debajo de lo permitido según el manual de AASHTO (hasta 22 cm).

El análisis espectral demostró la alta precisión que es capaz de alcanzar la tecnología GNSS para medir propiedades dinámicas en puentes flexibles. Se encontraron errores de 0.22 % con respecto a las frecuencias naturales de referencia. La tecnología GNSS fue capaz de extraer todas las frecuencias de los modos de vibrar disponibles a la frecuencia de muestreo utilizado, según el teorema de Nyquist. El lado A del puente fue la zona que logró mostrar un número mayor de frecuencias de los modos de vibrar que el lado B. Lo anterior es debido a que el lado A de la sección atirantada interactúa con el cajón menos rígido del doble voladizo. Cuando la rigidez aumenta disminuye la amplitud y aumenta la frecuencia natural, por lo cual, el lado B de la sección atirantada es más rígido que el lado A, y esto hace más difícil extraer la frecuencia natural con la tecnología GNSS debido a la baja tasa de muestreo disponible. En resumen, la tecnología GNSS es capaz de obtener la respuesta espectral con un error menor al 1 % al ser comparado con un sensor profesional como el acelerómetro.

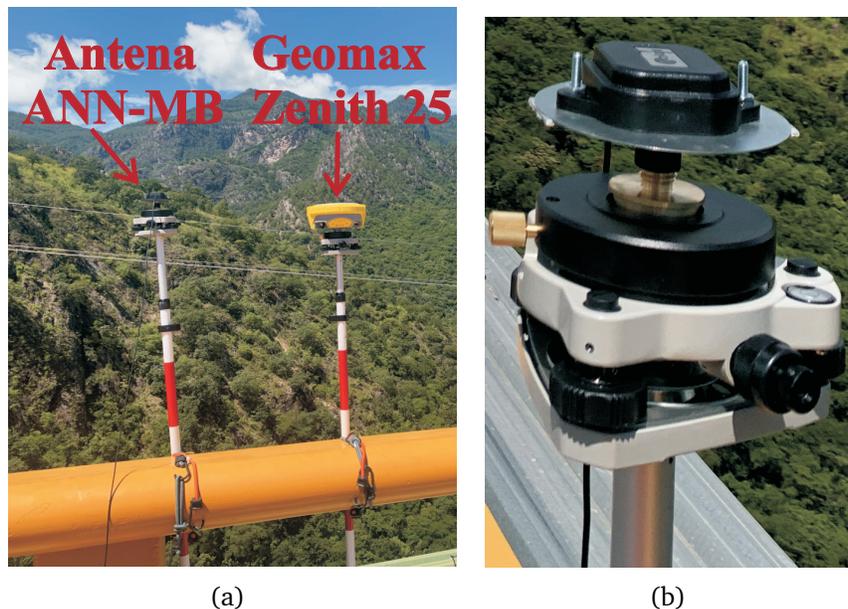
Como trabajo futuro, se utilizará la técnica de procesamiento GNSS, Posicionamiento Puntual Preciso con resolución de ambigüedad entera (PPP-AR) al ser una técnica bien estudiada como una alternativa al posicionamiento relativo. También, se pretende encontrar los efectos de la estación de referencia en las series de tiempo en relativo cinemático al ser comparados con las de PPP-AR.

## 7.3. Sistema SHM de bajo costo

En esta sección 7.3 se evalúa el desempeño de los receptores GNSS de bajo costo para la extracción de desplazamientos estáticos, dinámicos y parámetros espectrales como las frecuencias modales del puente y modos de vibrar. Se describe la estrategia de procesamiento de alta calidad para los datos GNSS.

### 7.3.1. Descripción del experimento y adquisición de datos

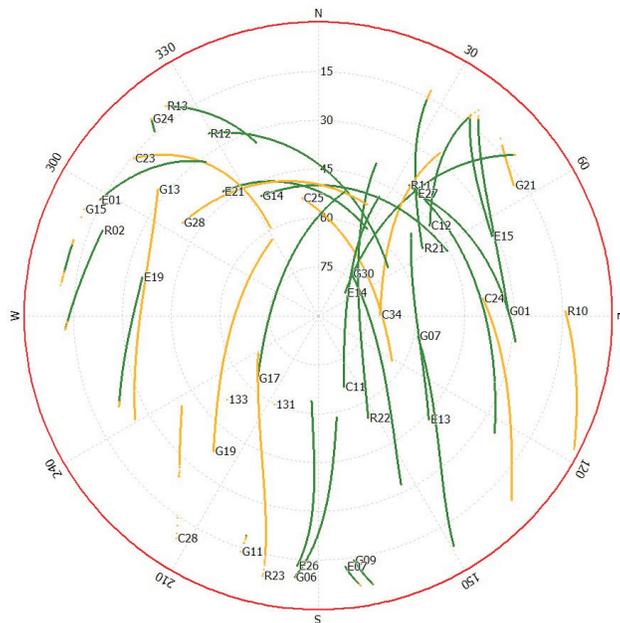
Dos antenas GNSS de bajo costo ANN-MB-00 conectadas a receptores GNSS ZED-F9P de U-blox fueron colocadas sobre el parapeto del lado A y B del puente El Carrizo, tal como se ilustra en la Figura 7.15a. Se utilizó un bastón y una base nivelante para instrumentar de manera correcta la antena GNSS. Para fijar la antena ANN-MB-00 sobre la base se construyó y adaptó un tornillo con un plano de tierra, de tal manera que el punto de referencia de la antena (ARP) coincidiera con el centro del bastón (ver Figura 7.15b). Como instrumento de referencia se colocó un receptor GNSS de orden geodésico Geomax Zenith 25 (GMZ25) al lado de las antenas ANN-MB-00 de bajo costo.



**Figura 7.15:** Instrumentación de las antenas GNSS de orden geodésico y de bajo costo: (a) antena ANN-MB-00 y receptor Geomax Zenith 25 colocados sobre el parapeto del puente El Carrizo, (b) tornillo de centrado preciso y plano de tierra para la antena de bajo costo ANN-MB-00.

Las antenas estuvieron separadas a una distancia de 50 cm para evitar interferencia entre ellas (Xue et al., 2022). La antena ANN-MB-00 se colocó encima de un plano de tierra de 10 cm de diámetro con dos propósitos, (1) para reducir el *multipath* y (2) utilizar el archivo ANTEX con los parámetros de calibración para la antena de bajo costo, esto debido a que los parámetros PCV fueron obtenidos mediante una calibración relativa

y se utilizó un plano de tierra (Krietemeyer et al., 2022). Los parámetros de calibración de la antena ANN-MB ayudan a fijar un porcentaje mayor de ambigüedades utilizando la técnica relativo cinemático (Kersten et al., 2022; Kersten y Schön, 2017). Fuera del puente, aproximadamente a 80 metros, se encuentra un monumento de centrado forzoso con coordenadas conocidas. Sobre este monumento se colocó un receptor GNSS GMZ25 y se definió como estación de referencia para la técnica relativa cinemático. Los receptores GNSS de orden geodésico GMZ25 adquirieron datos de las constelaciones GPS y GLONASS a una frecuencia de muestreo de 5 Hz. Los receptores GNSS de bajo costo ZED-F9P registraron mediciones de las constelaciones GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou considerando la misma frecuencia de muestreo que los receptores GMZ25. El GMZ25 es compatible con las señales  $L_1$  y  $L_2$ , sin embargo, el receptor ZED-F9P tiene una mayor compatibilidad con señales como la  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $E_1$ ,  $E_{5b}$  y  $B_1-B_2$ . Durante las mediciones el cielo estaba despejado y las condiciones fueron favorables para la medición. La zona donde se ubicaron las antenas ANN-MB-00 y GMZ25 fue la misma que la descrita en la Sección 7.2.1, por lo cual, no se explicara el motivo de la instrumentación para esta Sección 7.3.1. Los registros de los receptores GNSS GMZ25 se almacenaron en una tarjeta SD interna, y los archivos binarios UBX de las mediciones con los receptores ZED-F9P se almacenaron en una laptop, para posteriormente ser convertidos a formato RINEX. El experimento se llevó a cabo en condiciones de uso normal sobre el puente El Carrizo, es decir, con el tránsito de vehículos de diferente carga. Durante la adquisición de los datos GNSS transitaron vehículos doblemente articulados con materiales pesados, considerando esta carga como la que ocasiona las mayores deflexiones sobre la sección del atirantado.



**Figura 7.16:** Seguimiento de los satélites GNSS observados por los receptores de bajo costo ZED-F9P durante el experimento.

El experimento duró más de 2 horas, sin embargo, se hicieron coincidir las ventanas de

medición en común de los 4 receptores móviles sobre el puente y la estación de referencia, reduciéndose a 50 minutos de medición. El experimento se llevó a cabo el día 10 de marzo de 2022. Durante el experimento estuvieron visibles 13 satélites GPS, 8 GLONASS, 9 Galileo y 8 BeiDou. En la Figura 7.16 se ilustra el mapa del cielo de los satélites GNSS rastreados durante el experimento.

Las líneas de color verde representan las mediciones de frecuencia dual y las de amarillo las simples. Únicamente los satélites de la constelación BeiDou fueron observados en una frecuencia.

### 7.3.2. Procesamiento de datos GNSS

Los datos GNSS adquiridos fueron procesados en modo relativo-cinemático al ser una técnica GNSS frecuentemente adoptada en aplicaciones de monitoreo dinámico (Breuer et al., 2002; Nickitopoulou et al., 2006; Xue et al., 2022). Para obtener soluciones de línea base en un sistema de coordenadas topocéntricas locales ENU, las observaciones de los receptores GNSS GMZ25 rover y base se convirtieron a formato RINEX usando el software TEQC (Estey y Meertens, 1999). Para los archivos binarios de observación UBX de los receptores GNSS de bajo costo ZED-F9P se utilizó la paquetería RTKCONV del RTKLib versión demo5 b34g. Los archivos RINEX de ambos receptores fueron convertidos a formato 3.03.

La estrategia de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA, por sus siglas en inglés) que utiliza GLONASS, provoca un sesgo de fase entre frecuencias (IFPB, por sus siglas en inglés) y un sesgo de código entre frecuencias (IFCB, por sus siglas en inglés), entre receptores de diferentes fabricantes, lo que aumenta las dificultades para corregir las ambigüedades de GLONASS y limita la precisión y confiabilidad del posicionamiento (Yang et al., 2020). Por otro lado, los parámetros de calibración de la antena ANN-MB-00 de bajo costo fueron generados a partir de la metodología propuesta por Krietemeyer et al. (2022), donde solamente se utilizan las señales  $L_1$  y  $L_2$  de GPS. Debido a estos dos factores, únicamente se utilizaron las observaciones GPS del receptor GMZ25 y ZED-F9P.

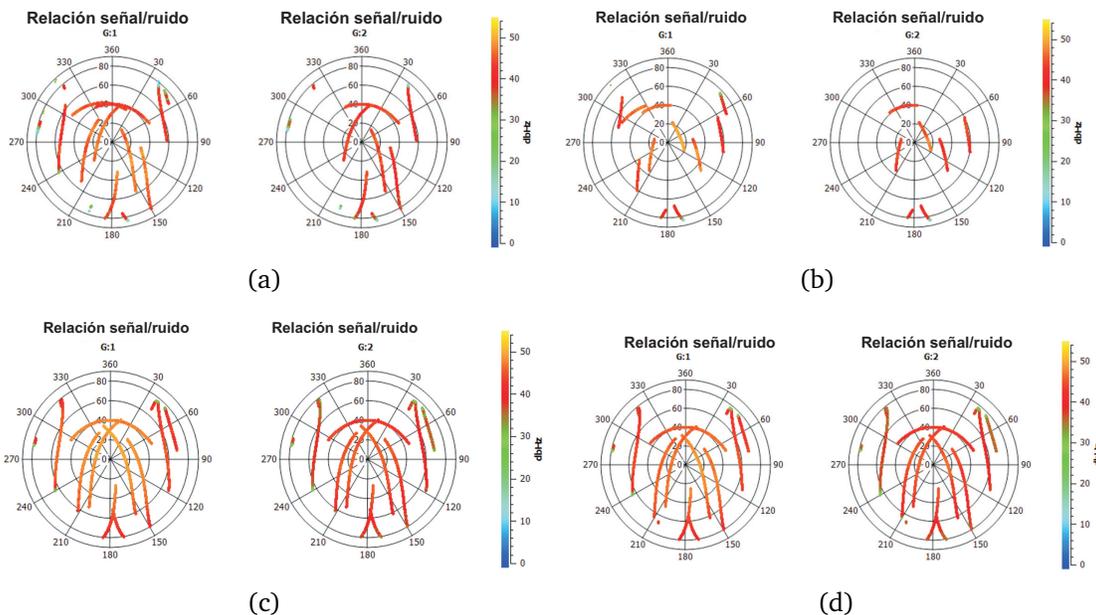
Los archivos de observación de doble frecuencia registrados por el receptor GNSS GMZ25 fueron procesados con el software científico TRACK utilizando las mismas estrategias de procesamiento encontradas en la Tabla 7.1 de la sección 7.2.3. Para el caso de las observaciones del receptor GNSS de bajo costo, se utilizó el software de código abierto RTKLib v2.4.3. Las estrategias de procesamiento utilizadas en RTKLib, a diferencia de que solo se utilizó la constelación GPS, se encuentran en la Tabla 7.1 de la Sección 7.2.3. Las coordenadas de salida fueron rotadas mediante una transformación lineal al sistema local de coordenadas del puente El Carrizo, tal como se describe en la Sección 7.2.3. También, se aplicó la Ecuación 7.1 y un filtro hampel para extraer las series de tiempo 3D locales aparentes del puente El Carrizo, las cuales fueron utilizadas como parámetros de entrada para encontrar la respuesta espectral del puente. Se utilizó la metodología descrita en la Sección 7.2.4 para extraer las propiedades dinámicas y espectrales del puente El Carrizo en la sección del atirantado utilizando mediciones GNSS registradas con receptores GNSS de bajo costo. Además, se realizó un análisis de calidad a las señales GPS con el software Anubis, se utilizaron las métricas propuestas en la Sección 7.2.5.1.

### 7.3.3. Resultados

#### 7.3.3.1. Calidad de las observaciones GNSS

La integridad de las observaciones, el *multipath* y la relación señal-ruido (*SNR*) fueron los indicadores establecidos para la evaluación de la señal  $L_1$  y  $L_2$  de GPS. La Figura 7.17 ilustra los valores del *SNR* para los receptores GNSS GMZ25 y ZED-F9P en la frecuencia  $L_1$  y  $L_2$ .

Las magnitudes de los valores *SNR* para los receptores GNSS de bajo costo son ligeramente menores a los de orden geodésico, con diferencias menores a 4 dB-Hz. En la Figura 7.17a y 7.17b se observa que cuando los satélites GPS se localizan en elevaciones altas, el color se degrada de rojo a naranja, lo que significa que los valores *SNR* aumentan, es decir, cuando mayor sea la elevación de un satélite, mejores señales serán adquiridas por la antena GNSS. En el caso de los receptores GNSS GMX25, los valores *SNR* son mayores, principalmente por las características de la antena y receptor. Los resultados de *SNR* siempre son mayores en la banda  $L_1$ , debido a las propiedades de la señal GNSS. En general, las relaciones señal-ruido de las observaciones GNSS con el receptor ZED-F9P y GMZ25 mostraron tener un nivel de calidad bueno. En la Tabla 7.8 se resumen los *SNR* de los receptores GNSS localizados sobre el puente El Carrizo y la estación de referencia.



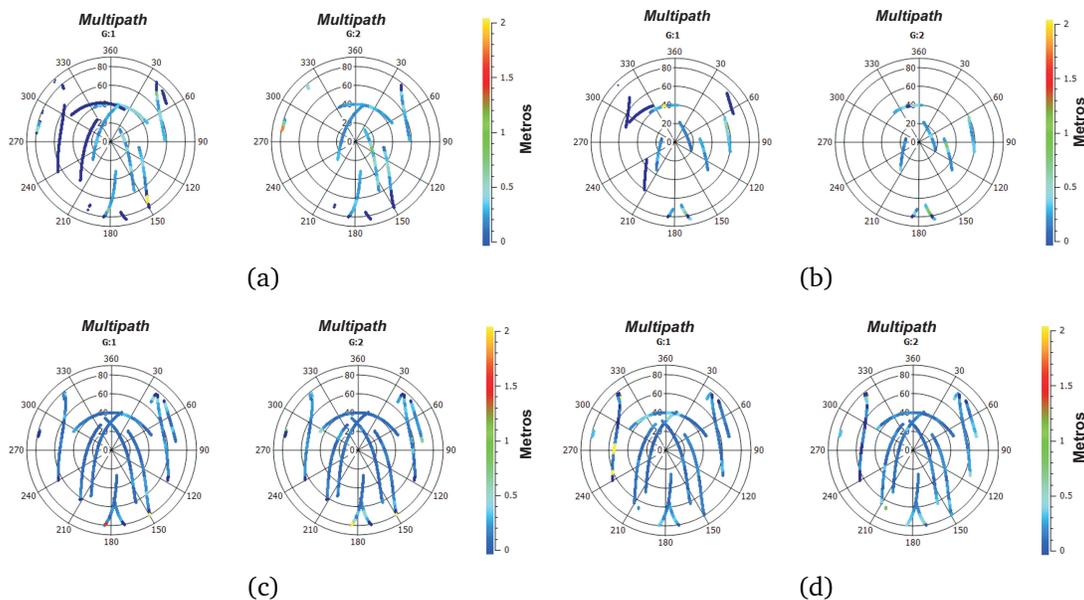
**Figura 7.17:** Valores de la relación señal/ruido (*SNR*) para las señales GPS  $L_1$  y  $L_2$  registradas con el receptor GMZ25 y F9P: (a) *SNR* para las señales GPS del receptor F9P sobre el punto A, (b) *SNR* para las señales GPS del receptor F9P sobre el punto B, (c) *SNR* para las señales GPS del receptor GMZ25 sobre el punto A, y (d) *SNR* para las señales GPS del receptor GMZ25 sobre el punto B.

También, las magnitudes del *multipath* para las señales  $L_1$  y  $L_2$  de la constelación GPS fue evaluada, los resultados se ilustran en la Figura 7.18. El *multipath* es una de las fuentes de error que mayor impacto tiene en las soluciones finales, por lo tanto, es importante

que la magnitud del *multipath* sea baja. Un valor estándar de *multipath* debe de estar por debajo de los 10 cm para que no tenga un impacto considerable en las coordenadas finales.

El *multipath* obtenido en las antenas ANN-MB-000 de bajo costo fue favorable, y se debe principalmente al plano de tierra colocado debajo de la antena. El *multipath* en las mediciones, tanto de los receptores y antenas de orden geodésico como los de bajo costo, estuvieron por debajo de 10 cm, lo cual se considera un valor ideal para las mediciones GNSS en entornos similares a los del puente, donde el tráfico y los tirantes son generadores de *multipath*.

La integridad de las observaciones se resume en la Tabla 7.8. Es interesante observar dos factores en las mediciones de código y fase con un receptor de orden geodésico y uno de bajo costo. En primero lugar, el receptor GMZ25 es compatible con el código W y el receptor de bajo costo ZED-F9P es compatible con el código X, estas diferencias ocasionan un error denominado sesgos de código diferencial (DCB, por sus siglas en inglés) (Wang et al., 2021) que en el método relativo se elimina. También, debido al entorno de la antena de bajo costo, el seguimiento a la fase portadora no fue constante y esto es visible en el porcentaje de integridad que alcanzan las mediciones con el receptor ZED-F9P. Finalmente, el porcentaje de la relación señal-ruido para la señal  $L_1$  y  $L_2$  fue buena hasta excelente, según los parámetros de la Tabla 7.2.



**Figura 7.18:** *Multipath* de las mediciones GPS para la frecuencia  $L_1$  y  $L_2$  adquiridas con el receptor de orden geodésico GMZ25 y de bajo costo F9P. (a) *Multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para el receptor F9P ubicado en el punto A, (b) *Multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para el receptor F9P ubicado en el punto B, (c) *Multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para el receptor GMZ25 ubicado en el punto A, y (d) *Multipath* en  $L_1$  y  $L_2$  para el receptor GMZ25 ubicado en el punto B.

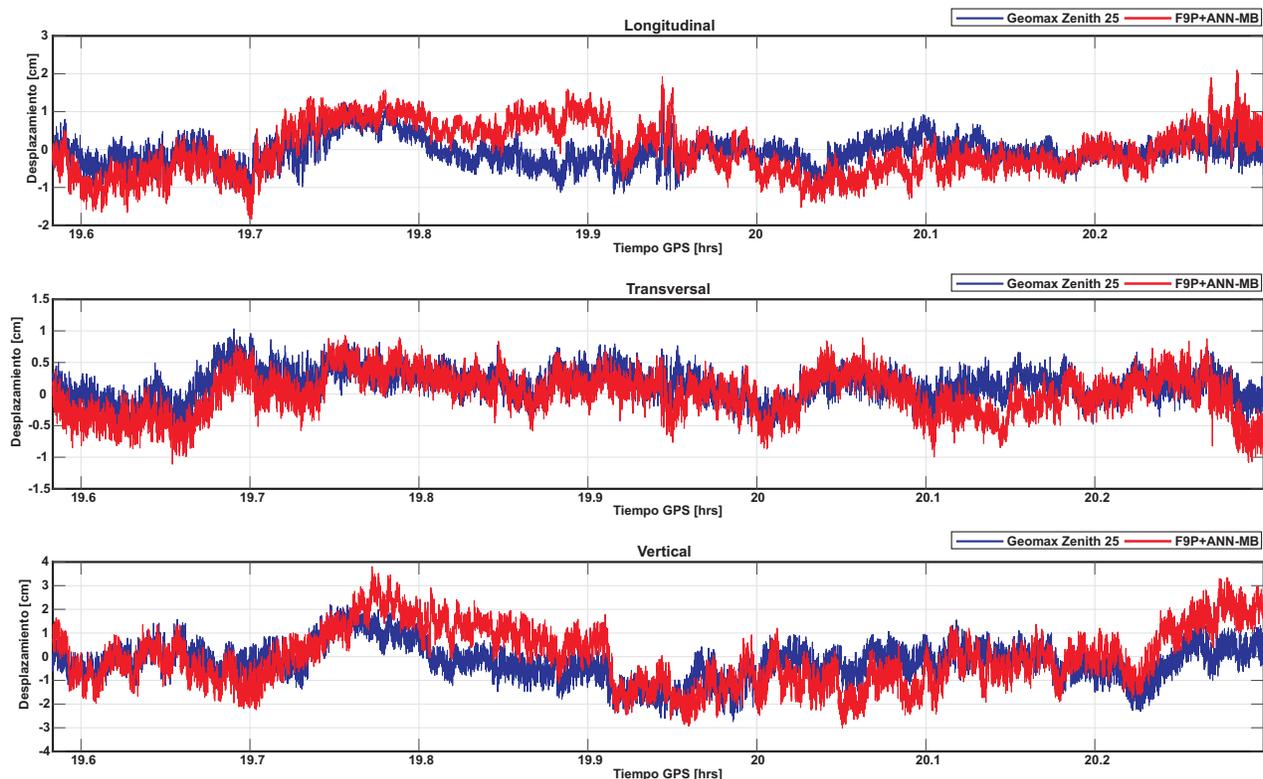
**Tabla 7.8:** Resumen de los parámetros de calidad de las observaciones GNSS del receptor GMZ25 y ZED-F9P.

Estación	GNSS	Observable	Integridad	SN1 [dB-Hz]	SN2 [dB-Hz]	MP1 [cm]	MP2 [cm]
BASE	GPS	C1C	82.94 %	43(89.5)	40.5(96.42)	1.4	2.2
		L1C	82.76 %				
		C2W	82.74 %				
		L2W	82.64 %				
GMZ25 A	GPS	C1C	95 %	45.7(95.2)	41.2(98.1)	1	1.3
		L1C	94.97 %				
		C2W	94.95 %				
		L2W	94.92 %				
GMZ25 B	GPS	C1C	95.67 %	44.3(92.3)	40.8(97.14)	1	1.6
		L1C	95.56 %				
		C2W	95.55 %				
		L2W	95.49 %				
ZED-F9P-A	GPS	C1C	98.96 %	43.8(91.25)	41.4(98.57)	4.4	4.8
		L1C	98.63 %				
		C2X	71.54 %				
		L2X	71.17 %				
ZED-F9P-B	GPS	C1C	98.98 %	43.8(91.25)	42(100)	4.1	4.4
		L1C	67.04 %				
		C2X	98.90 %				
		L2X	67.04 %				

### 7.3.3.2. Desplazamientos semi-estáticos

Los desplazamientos estáticos obtenidos con los receptores GNSS de orden geodésico se establecieron como referencia para la evaluación del desempeño de los receptores GNSS de bajo costo. En la Figura 7.19 y 7.20 se ilustran los desplazamientos estáticos del puente El Carrizo en la sección del atirantado medidos con los receptores GNSS Geomax Zenith 25 y ZED-F9P para el lado A y B, respectivamente. Las series de tiempo representan las componentes locales del puente, es decir, la longitudinal, transversal y vertical. La similitud en el comportamiento de las series de tiempo es claramente observable en las Figuras 7.19 y 7.20. En el lado A del puente los desplazamientos horizontales presentaron magnitudes menores a la vertical, debido a que los desplazamientos en la componente vertical de un puente atirantado siempre deben de ser mayores por el diseño del mismo. La magnitud en la vertical es poco más del doble que la horizontal. La componente transversal del puente en el lado A fue la de menor magnitud, con desplazamientos menores a 1 cm. También, los desplazamientos obtenidos con el receptor GNSS de bajo costo ZED-F9P para esta componente, mostró el mejor desempeño que en las componentes longitudinal y vertical, ya que la correlación entre la serie de tiempo de color azul y rojo para la componente transversal es alta, con un ligero desplazamiento derivado de los principios de adquisición de la señal en una de orden geodésico y una de bajo costo. Al observar la componente longitudinal y vertical del lado A, se puede concluir que el receptor de bajo costo es susceptible a los cambios rápidos de posicionamiento, es decir, cuando se registra un cambio grande de coordenadas en un periodo de tiempo corto, las observaciones GNSS tardan más en converger. Para el caso de la componente transversal, los desplazamientos (*offset*) no son frecuentes porque esa componente es más estática que las otras. Este fenómeno es muy común en las mediciones GNSS, y tiene un mayor impacto en las mediciones con re-

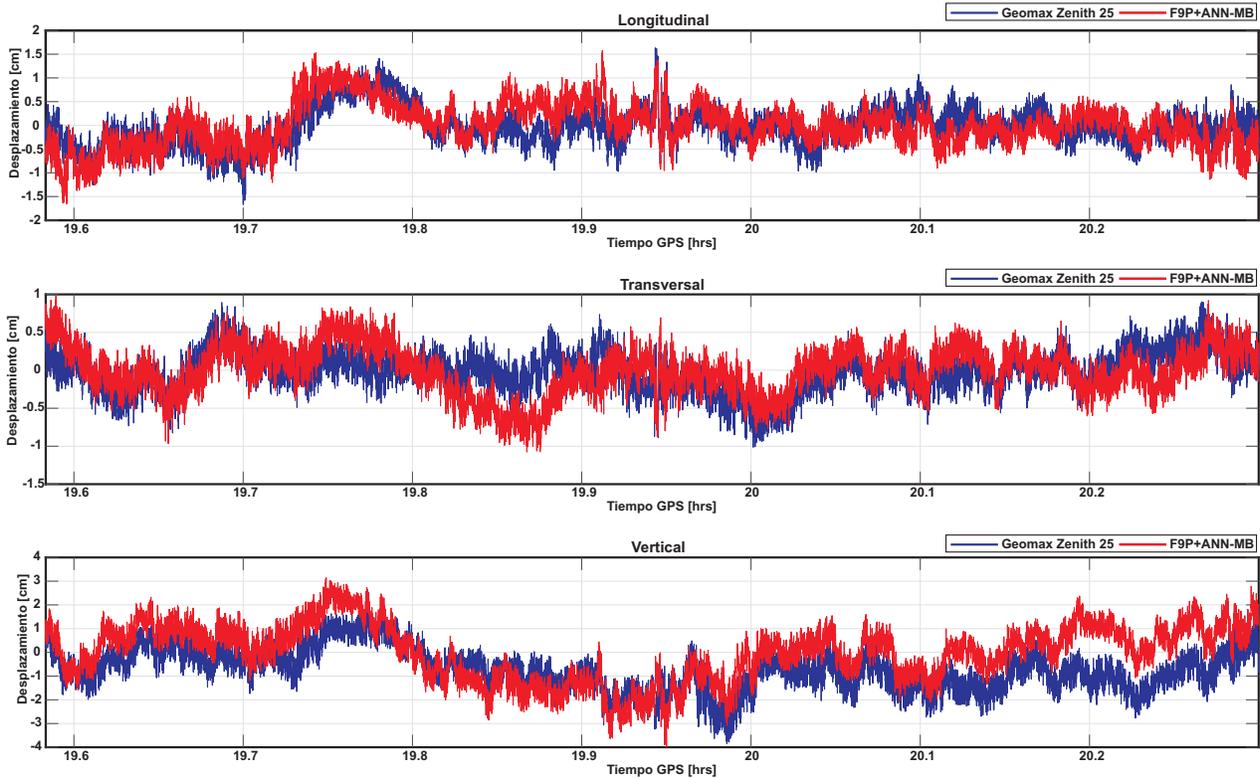
ceptores GNSS de bajo costo. Los desplazamientos máximos registrados en la componente longitudinal en el lado A para el receptor GMZ25 y el ZED-F9P fueron de  $\pm 1.4$  cm y  $\pm 1.9$  cm, respectivamente. La componente transversal presentó desplazamientos máximos de  $\pm 0.88$  cm y  $\pm 1$  cm para el receptor GNSS GMZ25 y ZED-F9P, respectivamente. La componente de mayor magnitud fue la vertical, con desplazamientos máximos de hasta 3.8 cm y 2.31 cm medidos con el receptor ZED-F9P y el GMZ25, respectivamente. Las diferencias entre los desplazamientos máximos del lado A medidos con el receptor GMZ25 y el ZED-F9P fue de aproximadamente 5 mm para la componente horizontal y 1.5 cm para la vertical.



**Figura 7.19:** Desplazamientos estáticos del puente El Carrizo para las tres componentes del lado A. La línea de color azul representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor Geomax Zenith 25. La línea de color rojo representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor de bajo costo ZED-F9P.

Por otro lado, el lado B presentó desplazamientos ligeramente mayores que el lado A, con una diferencia menor a 5 mm. La componente longitudinal presentó mayores desplazamientos que la transversal, con diferencias de 5 mm. La componente vertical alcanzó desplazamientos de aproximadamente  $\pm 3$  cm y  $\pm 2.3$  con el receptor ZED-F9P y el GMZ25, respectivamente. Debido a que los desplazamientos en el lado B del puente fueron mayores, el comportamiento de las series de tiempo correspondientes a los receptores GNSS de bajo costo oscilaron poco más de 5 mm con respecto a los de referencia. Esto demuestra que los receptores GNSS de bajo costo pueden alcanzar precisiones en la detección de

desplazamientos estáticos sobre puentes atirantados en el orden de los 5 mm. El comportamiento de las series de tiempo de ambos lados (A y B) es similar, debido a la rigidez de la dovola metálica donde estaban los receptores GNSS de orden geodésico y de bajo costo. En la Tabla 7.9 se resume la estadística de los desplazamientos estáticos de los lados A y B estudiados del puente.



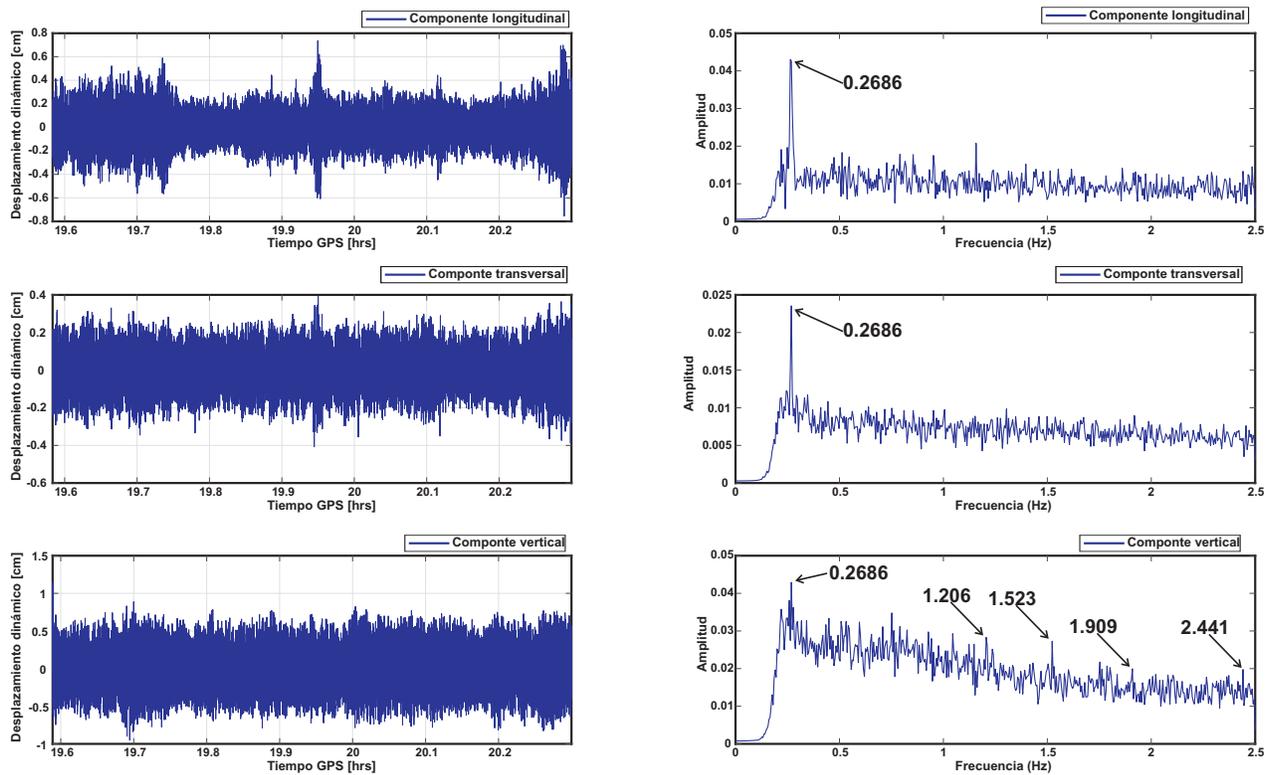
**Figura 7.20:** Desplazamientos estáticos del puente El Carrizo para las tres componentes del lado B. La línea de color azul representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor Geomax Zenith 25. La línea de color rojo representa la serie de tiempo de los desplazamientos medidos con el receptor de bajo costo ZED-F9P.

**Tabla 7.9:** Resumen estadístico de los desplazamientos estáticos de los lados A y B del puente El Carrizo.

Receptor	Lado	Transversal (cm)			Longitudinal (cm)			Vertical (cm)		
		<i>std</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>std</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>std</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>
GMZ25	A	0.24	0.87	-0.88	0.38	1.34	-1.43	0.78	2.31	-2.5
	B	0.27	0.93	-1.0	0.40	1.67	-1.56	0.83	2.6	-3.0
ZED-F9P	A	0.33	0.92	-1.11	0.65	2.09	-1.84	1.23	3.8	-3.0
	B	0.32	0.98	-1.07	0.45	1.57	-1.65	1.19	3.14	-3.9

### 7.3.3.3. Análisis de frecuencias naturales

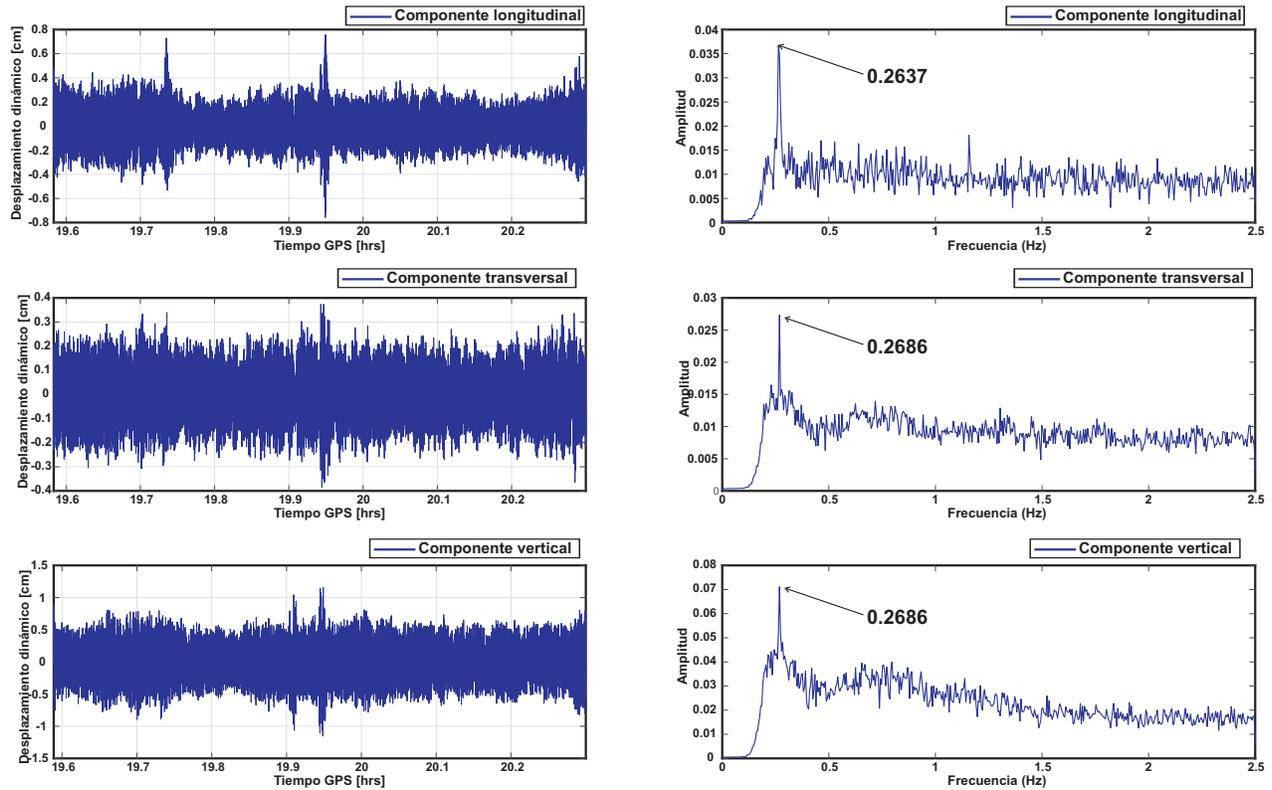
Un análisis en el dominio de la frecuencia sobre el puente atirantado El Carrizo se llevó a cabo a partir de estrategias de filtrado sobre mediciones GNSS de receptores de bajo costo. En primer lugar, las coordenadas ENU de salida fueron rotadas a un sistema local de coordenadas del puente. Después, a las coordenadas locales 3D del puente se convirtieron a coordenadas aparentes y se les aplicó un filtro digital pasa alta Butterworth, para finalmente aplicarle la transformada rápida de Fourier para extraer las frecuencias dominantes (Para mayores detalles sobre la estrategia de filtrado y extracción de frecuencias, consultar la sección 7.2.4).



**Figura 7.21:** (Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto A obtenidas desde mediciones GNSS con receptores de bajo costo. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

Los desplazamientos dinámicos en el dominio del tiempo y de la frecuencia para las componentes: longitudinal, transversal y vertical, para el lado A se ilustran en la Figura 7.21. En el lado derecho de la Figura 7.21 se observa la frecuencia fundamental encontrada en las 3 componentes y en el caso de la componente vertical, se observaron las frecuencias de 4 modos de vibrar. La componente vertical de un puente es la que se somete a mayor carga de tráfico, por lo cual, los modos de vibrar son excitados y medibles más fácilmente por la tecnología GNSS. En el lado B del puente se extrajo un número menor de frecuencias modales en la componente vertical, para las tres componentes únicamente fue posible

observar la frecuencia del primer modo de vibrar que corresponde a la frecuencia fundamental del tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo, esto se observa en la Figura 7.22. La componente vertical del lado A mostró una mayor cantidad de frecuencias modales que el lado B, esto puede ser debido a que los desplazamientos estáticos del lado A fueron ocasionados por vehículo con carga dinámica menor a los del lado B, donde los desplazamientos estáticos fueron menores, tal como se explica en la sección 7.2.5.3.



**Figura 7.22:** (Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el punto B obtenidas desde mediciones GNSS con receptores de bajo costo. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

**Tabla 7.10:** Resumen estadístico de las frecuencias de los modos de vibrar de los lados A y B de la sección atirantada del puente El Carrizo.

Receptor	Lado	Modos de vibrar								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ZED-F9P	A	0.22 %	-	-	1.77 %	-	0.5 %	0.8 %	-0.9 %	-
	B	0.22 %	-	-	-	-	-	-	-	-

La Tabla 7.10 ilustra el porcentaje de error de las frecuencias de los modos de vibrar obtenidas a través de mediciones GNSS con receptores de bajo costo al ser comparadas

con magnitudes de referencia obtenidas con un acelerómetro profesional. Con un error de 0.22 % se encontró la frecuencia fundamental del puente El Carrizo y con errores menores al 2 % el resto de algunas frecuencias de los modos de vibrar. Estos resultados demuestran ser uno de los alcances de la tecnología GNSS de bajo costo.

#### 7.3.4. Discusiones y conclusiones

Implementar un sistema de monitoreo de la salud estructural en puentes atirantados es complejo y costoso cuando se aplican las técnicas tradicionales por los departamentos o institutos encargados de monitorear este tipo de estructuras. Evaluar la componente vertical de un puente en ocasiones es difícil o imposible de hacerlo cuando este se ubica sobre un río o un acantilado. El instrumento comúnmente utilizado para medir esta componente es el LVDT, el cual debe tener un punto de referencia sobre el terreno, algo imposible de materializar sobre un río. Entonces, la tecnología GNSS ha sido una de las opciones más prácticas de utilizar para medir los desplazamientos verticales en un puente en el nivel de los centímetros y en algunos casos hasta los milímetros. También, en los últimos 10 años los receptores GNSS han ido elevando su capacidad de muestreo, donde hasta el momento pueden alcanzar tasas de muestreo de 100 Hz. Esto ha ocasionado que los GNSS sean utilizados para evaluar propiedades dinámicas en estructuras como desplazamientos dinámicos y frecuencias naturales, trabajo que el sensor de aceleración hace muy bien, sin embargo, el acelerómetro no es adecuado para medir los desplazamientos estáticos. En general, existe un número grande de estudios donde evalúan la tecnología GNSS de orden geodésico para extraer frecuencias de los modos de vibrar en estructuras tomando como referencias las medidas con un acelerómetro. Es decir, en conjunto, un receptor y antena GNSS de orden geodésico son capaces de medir desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias fundamentales en puentes.

Una de las desventajas de los sistemas GNSS de orden geodésico es el factor costo, es decir, actualmente un receptor y antena geodésica tienen un precio en el mercado de aproximadamente 180,000.00 pesos mexicanos. Este costo representa una limitante para los encargados de monitorear estructuras, principalmente por el bajo presupuesto que se les asigna por parte de los gobiernos. Sin embargo, en esta sección 7.3 se propone una alternativa de bajo costo y con un grado de precisión cercana o incluso similar a los sistemas GNSS de orden geodésico, es decir, utilizar receptores y antenas GNSS de bajo costo para monitorear desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias modales en puentes. Son pocos los estudios que se han llevado a cabo alrededor del mundo sobre el monitoreo estructural en puentes con esta tecnología de bajo costo, debido a la falta de conocimiento de la misma. Uno de los estudios más actuales, es el publicado por [Xue et al. \(2022\)](#) (22 de diciembre de 2022). En este estudio evalúan dos receptores u-blox M8T EVK GNSS y antenas de parche de bajo costo de una frecuencia al ser comparado con un receptor y antena GNSS de orden geodésico GS10 y Leica AS10, respectivamente. Llevaron a cabo pruebas controladas para evaluar la precisión de los receptores GNSS de bajo costo y después se desplazaron a un caso de estudio, el puente Wilford. Donde a partir de observaciones procesadas por el método relativo cinemático lograron extraer la frecuencia fundamental del puente. Sin embargo, la frecuencia fundamental solamente se

identificó en la componente vertical y con un grado de ruido alto, es decir, no se visualizó claramente.

A diferencia del trabajo reportado por [Xue et al. \(2022\)](#), el estudio en esta sección tiene mejoras significativas, las cuales se citan a continuación:

- El receptor ZED-F9P utilizó mediciones de doble frecuencia, a diferencia del M8T que únicamente es compatible con la frecuencia  $L_1$ . Las mediciones GNSS de doble frecuencia tienen un mejor desempeño que las mediciones de una sola frecuencia.
- El análisis espectral realizado en este estudio utiliza el enfoque de la transformada rápida de Fourier, en el caso del trabajo reportado, utilizan la transformada discreta de Fourier.
- El nivel de ruido en la identificación de la frecuencia fundamental es mayor que en el estudio analizado en esta sección.
- El espectro de las componente longitudinal y transversal no mostraron la frecuencia fundamental. En el caso del estudio descrito en esta sección 7.3, fue posible identificar la frecuencia fundamental en las tres componentes, y en la vertical se observaron otras frecuencias de modos de vibrar que coinciden con los reportados como referencia.

Los puntos descritos anteriormente, son solo algunas de las mejoras de este estudio. Los desplazamientos estáticos obtenidos con los receptores GNSS ZED-F9P y comparados con los medidos con el receptor GNSS Geomax Zenith 25 que se establecieron como referencia, presentaron diferencias menores a los 8 mm. Y en el caso de la identificación de las frecuencias modales de la sección atirantada del puente El Carrizo, se observaron con un error menor al 2 %.

En general, se presentó un estudio sobre un puente atirantado para probar el desempeño del uso de receptores y antenas GNSS de bajo costo en el monitoreo de la salud estructural en puente al identificar desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias modales, y compararlas con valores de referencia. Derivado de los resultados de esta investigación, se pudieron llegar a las siguientes conclusiones:

- 1 Las mediciones GNSS duales obtenidas desde un receptor GNSS de bajo costo y procesadas con un software de código abierto, se pueden utilizar para evaluar la salud estructural de un puente atirantado.
- 2 Por primera vez, se aplica la tecnología GNSS de bajo costo en un caso de estudio con características especiales como las del puente atirantado El Carrizo.
- 3 La calidad de las señales adquiridas por un receptor GNSS de bajo costo utilizando un plano de tierra es similar a la de un receptor GNSS de orden geodésico.
- 4 Los receptores GNSS de bajo costo son capaces de identificar desplazamientos estáticos que oscilan entre los 4 mm.

- 5 Por primera vez se logró identificar de manera precisa la frecuencia fundamental de un puente en las tres componentes con un error inferior al 2 %, utilizando observaciones GNSS de receptores de bajo costo.
- 6 Se logró identificar las primeras 4 frecuencias de los modos de vibrar en la componente vertical con las mediciones de los receptores GNSS de bajo costo.
- 7 El puente El Carrizo, en la sección del atirantado se presentan mayores desplazamientos en la zona B que corresponde a la dirección Durango-Mazatlán en la dovela 15.
- 8 Se pudieron extraer una cantidad mayor de frecuencias de los modos de vibrar en la zona A del puente.

Los sistemas GNSS de bajo costo presentan una fuerte opción para ser utilizados en los sistemas SHM sobre puentes flexibles como los atirantados, ya que logran identificar desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias de los modos de vibrar en una única medición continua por un periodo largo de medición. La relación costo/calidad de estos receptores es alta, debido a la posibilidad de identificar ciertas características importantes en los puentes que son comúnmente medidas con otros instrumentos, como el LVDT y acelerómetro, con precios altos en el mercado.

La técnica de Posicionamiento Puntual Preciso con resolución de ambigüedad en modo cinemático a través del software PRIDE-PPPAR se pretende estudiar en trabajos futuros. Principalmente, para analizar el efecto que tiene combinar diferentes constelaciones GNSS en la identificación de las frecuencias de los modos de vibrar, también, lograr mitigar los errores sumados de la estación de referencia en la técnica relativo cinemático.

## 7.4. Sistema SHM desde mediciones GNSS de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8

En esta Sección 7.4 se evalúa el desempeño del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 por primera vez para detectar desplazamientos estáticos y dinámicos, y frecuencias modales sobre el puente atirantado El Carrizo en condiciones normales de uso diario. Se utilizó la técnica relativo cinemático para el procesamiento de las observaciones crudas registradas por el Xiaomi Mi 8. La combinación de constelaciones GPS+Galileo fue la única en considerarse en este estudio, al ser las constelaciones con señales duales disponibles en México para el chip GNSS integrado en el teléfono inteligente. También, se realizó una evaluación de la calidad de las señales GNSS considerando como métricas la  $C/N_0$ , *multipath* y saltos de ciclo de las observaciones. Se evaluaron las tres componentes del puente El Carrizo: sección transversal, longitudinal y vertical.

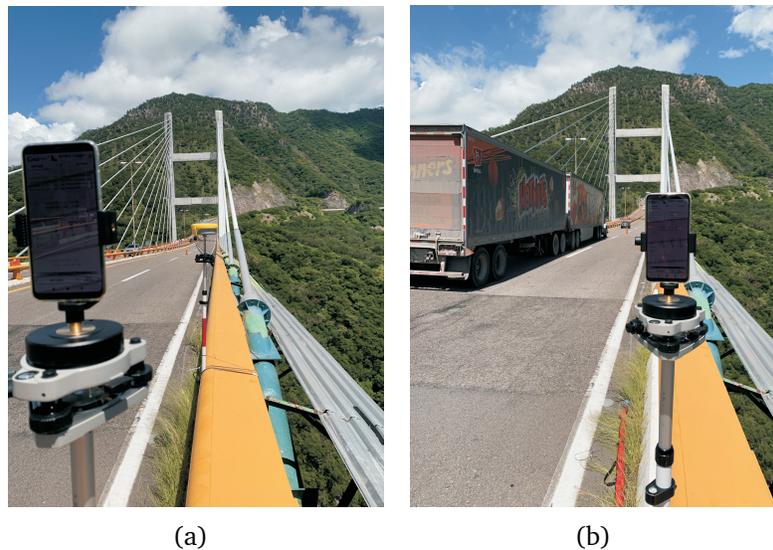
### 7.4.1. Recopilación de datos y diseño del experimento

Se evaluó el rendimiento del posicionamiento y se analizó la calidad de las observaciones registradas por el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. El teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 rastrea señales de múltiples constelaciones de doble frecuencia (GPS, GLONASS, Galileo y BDS). Xiaomi Mi 8 permite adquirir mediciones de fase y código, mientras que un gran número de modelos Xiaomi únicamente miden el código. La fase es casi 100 veces más precisa que el código, por lo cual, la importancia de medir la fase portadora.

Las observaciones GNSS se recopilaron el 22 de septiembre de 2022 durante un periodo de 1.762 hrs (1h 43' 32") utilizando la aplicación android Geo++ RINEX Logger v.2.1.6. Durante la recopilación de datos GNSS, el Bluetooth y Wifi del Xiaomi Mi 8 se apagaron para evitar interferencias de estos sensores, y solo se mantuvo activo el permiso de ubicación dual. También, no se insertó tarjeta SIM debido a que las señales 3G y 4G pueden usar la banda L, y, por lo tanto, es posible que interfieran con las señales GNSS (Robustelli et al., 2021). La versión del sistema operativo del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 era Android 8.0, lo que significa que el mecanismo de ahorro de la batería para el chip GNSS Broadcom, 'duty cycle', estaba desactivado por defecto y esto garantiza que no haya pérdida en el seguimiento de los satélites durante el periodo que tardó el experimento.

La recopilación de datos crudos GNSS del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 se realizó sobre el tablero del puente El Carrizo en la sección del atirantado, como se ilustra en la Figura 7.23. También, se colocó un receptor GNSS de orden geodésico Geomax Zenith 25 a una distancia de aproximadamente 2 metros del Xiaomi Mi 8 como referencia. Debido a que la dovela metálica donde están montados los sensores es muy rígida, los movimientos en la zona del receptor GNSS y el Xiaomi Mi 8 se consideraron los mismos. La instrumentación sobre el tablero del puente se llevó a cabo utilizando un bastón sujeto a la barra metálica del parapeto y se colocó una base nivelante para nivelar tanto el receptor GNSS como el Xiaomi Mi 8 (Ver Figura 7.23a y 7.23b). El teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 se montó sobre un adaptador verticalmente para una mejor adquisición de las señales GNSS. Considerando la configuración de instrumentación, se garantizó que el Xiaomi Mi 8 quedará totalmente fijo en el parapeto (Ver Figura 7.23b).

Para el procesamiento GNSS por el método relativo cinemático fue necesario establecer dos estaciones de referencia, es decir, una estación para procesar las mediciones del receptor GNSS Geomax Zenith 25 y otra para las observaciones GNSS del Xiaomi Mi 8. El receptor GNSS Geomax Zenith 25 es compatible únicamente con las constelaciones GPS y GLONASS en la frecuencia  $L_1$  y  $L_2$  y el Xiaomi Mi 8 sigue a las constelaciones GPS ( $L_1$  y  $L_5$ ), GLONASS ( $G_1$ ), Galileo ( $E_1$  y  $E_{5a}$ ) y BDS ( $B2$ ). Por lo cual, para el receptor GNSS Geomax Zenith 25 se utilizó el mismo modelo de receptor como referencia, y para el Xiaomi Mi 8, fue necesario unir una antena de bajo costo con parámetros de calibración “AS-ANT2BCAL” y el receptor GNSS de bajo costo MosaicX5, el cual es capaz de seguir todas las constelaciones GNSS y en particular la frecuencia  $L_5$  y  $E_{5a}$  de GPS y Galileo, respectivamente. La distancia entre el Xiaomi Mi 8 y el receptor GNSS y sus respectivas estaciones de referencia fue de aproximadamente 70 metros. Para este trabajo de investigación, se consideraron únicamente la constelación GPS y Galileo para la línea base del Xiaomi Mi 8 y el mosaic-X5 de la marca Septentrio, debido a la dualidad de las frecuencias. Para la línea base de los receptores GNSS Geomax Zenith 25 se consideró únicamente la constelación GPS, ya que el software TRACK no permite procesar GLONASS y en la Sección 7.2 de este capítulo 7 no se encontró una mejora en combinar GPS y GLONASS. Las estaciones de referencia fueron colocadas sobre un monumento de centrado forzoso (Geomax Zenith 25) y un trípode con base nivelante (MosaicX5), ambos en un sitio fuera del puente como se observa en la Figura 7.3 de la Sección 7.2.1. La configuración del experimento se ilustra en la Figura 7.24.



**Figura 7.23:** Instrumentación del receptor GNSS Geomax Zenith 25 y el Xiaomi Mi 8: (a) separación de más de dos metros entre el receptor GNSS y el teléfono inteligente, (b) montura del Xiaomi Mi 8 sobre la base nivelante.

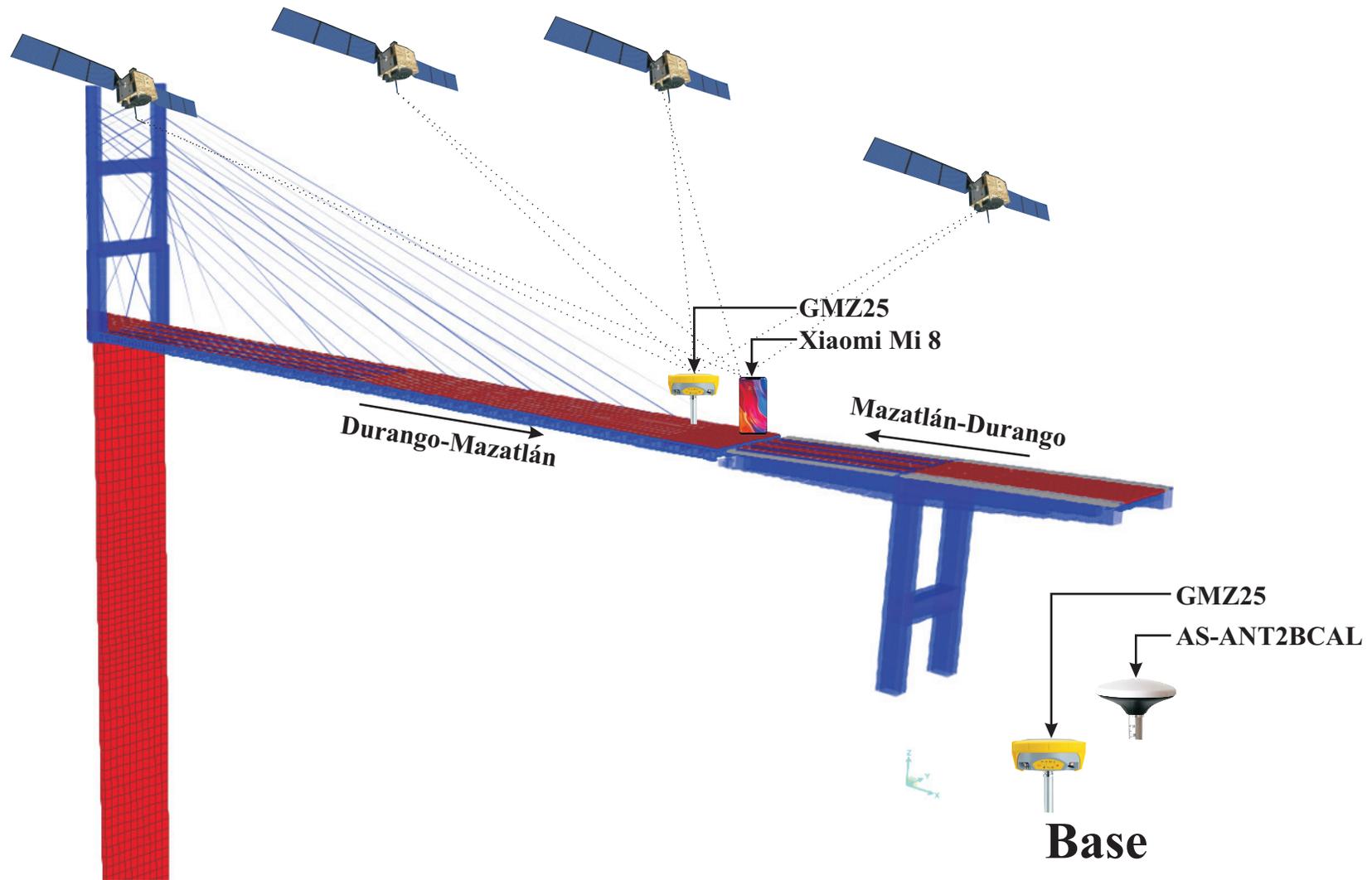
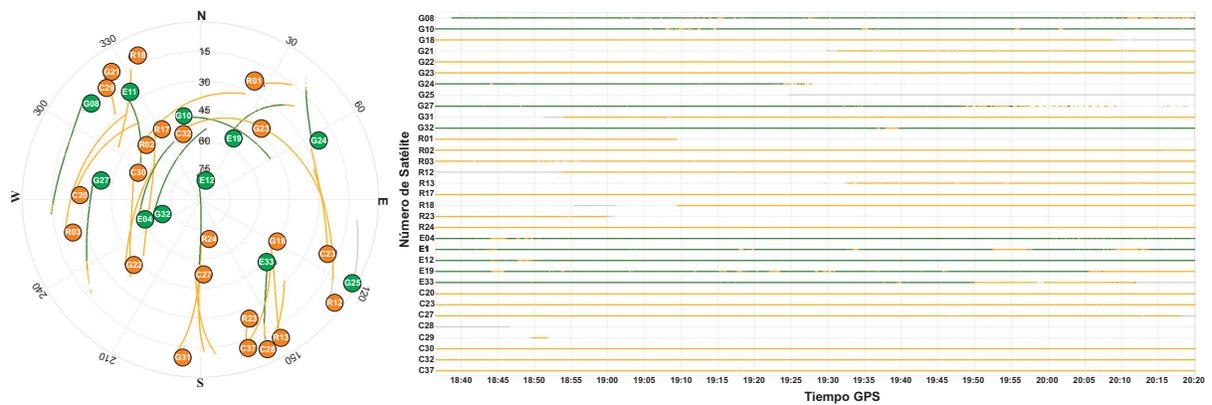
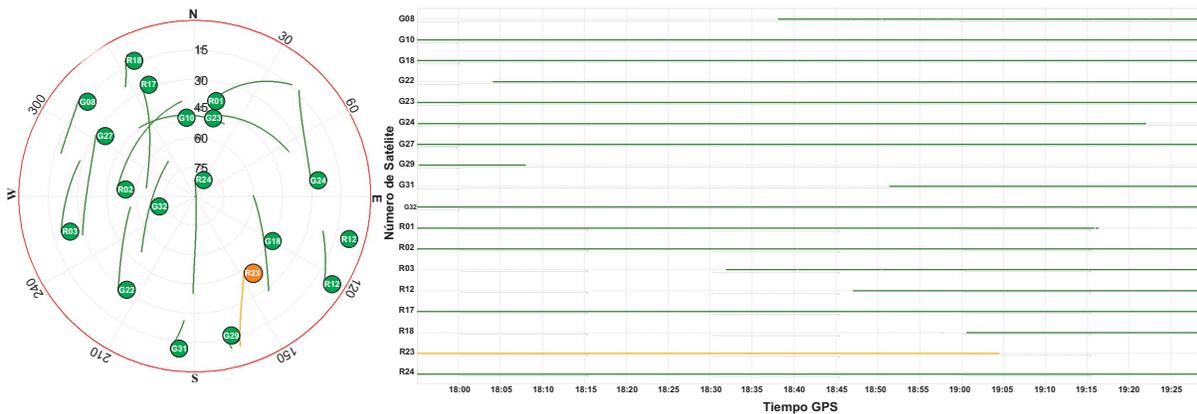


Figura 7.24: Configuración del experimento para la evaluación del Xiaomi Mi 8.

Durante el experimento, el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 registró datos GNSS a una frecuencia de muestreo de 1 segundo, con una máscara de elevación de  $12^\circ$ . Por otro lado, el receptor GNSS Geomax Zenith 25 adquirió observaciones GNSS a una frecuencia de muestreo de 5 Hz. Las estaciones de referencia midieron a una frecuencia de 5 Hz y 1 Hz, para el receptor GNSS Geomax Zenith 25 y el receptor MosaicX5, respectivamente. Durante el experimento, el cielo estuvo relativamente despejado y sin ningún obstáculo cerca de las antenas. En la Figura 7.25a y 7.25b se ilustra el mapa del cielo de los satélites GNSS y las bandas seguidas por satélite para el Xiaomi Mi 8 y el receptor Geomax Zenith 25, respectivamente. En la Tabla 7.11 se muestran el número de satélites que fueron rastreadas en bandas de frecuencia consecutivas para las estaciones de referencia y el Xiaomi/Geomax.



(a)



(b)

**Figura 7.25:** Gráficos del cielo y seguimiento de los satélites GNSS observados por el Xiaomi Mi 8 y el receptor GNSS Geomax Zenith 25. (a) para mediciones  $L_1/E_1/L_5/E_{5a}$  del Xiaomi Mi 8. (b) para mediciones  $L_1/L_2$  del receptor GNSS Geomax Zenith 25.

**Tabla 7.11:** Número de satélites rastreados por bandas de frecuencia durante el experimento de recopilación de datos.

Receptor y teléfono inteligente	GPS			Galileo	
	$L_1$	$L_2$	$L_5$	$E_1$	$E_{5a}$
<i>Xiaomi Mi 8</i>	11	-	6	5	5
<i>Geomax Zenith 25</i>	10	10	-	-	-
<i>Mosaic-X5</i>	12	12	7	9	9
<i>Geomax Zenith 25</i>	14	14	-	-	-
<i>Base</i>					

Una revisión detallada de la Tabla 7.11 nos permite concluir que los escenarios más considerables que se pueden utilizar para la comparación del desempeño de posicionamiento entre el teléfono inteligente y un receptor GNSS de orden geodésico, son los satélites GPS y Galileo. Ya que es posible llevar a cabo un procesamiento GNSS con el método relativo cinemático utilizando las mismas observaciones ( $L_1/E_1$  y  $L_5/E_{5a}$ ), para el caso del Xiaomi Mi 8.

## 7.4.2. Características de las observaciones GNSS del Xiaomi Mi 8

El desempeño del posicionamiento con pseudodistancia de código está precedido por la calidad de las señales GNSS registrada por el Xiaomi Mi 8 (Robustelli et al., 2021). Se han llevado a cabo estudios donde demuestran que las observaciones GNSS medidas por teléfonos inteligentes están sujetas a diversos efectos no deseados y como consecuencia sufren un ruido de observación y una baja supresión del *multipath* (Paziewski et al., 2019; Wanninger y Heßelbarth, 2020). Estos resultados están relacionados por la antena integrada en el Xiaomi Mi 8, donde se obtiene una ganancia más baja y por lo tanto un valor  $C/N_0$  más bajo, causando una mayor sensibilidad a la interferencia de *multipath* (Guo et al., 2020). Por lo cual, evaluar la calidad de la señal GNSS es un factor primordial en las mediciones crudas GNSS de un teléfono inteligente. En las siguientes secciones, se analiza la intensidad de la señal y el porcentaje de error de las observaciones crudas GNSS del Xiaomi Mi 8. También, se analiza la calidad de las observaciones de código a través de los valores del *multipath*, ya que este ruido se propaga directamente a las estimaciones de las coordenadas en el posicionamiento.

### 7.4.2.1. Relación portadora/densidad de ruido (C/N0)

La  $C/N_0$  registrada por el receptor del Xiaomi Mi 8 es un diagnóstico de la potencia de la señal de cada satélite y la densidad de ruido, es decir, un  $C/N_0$  alto indica que la señal es más fuerte y una mejor calidad de las observaciones para el posicionamiento, y para un valor más bajo, generalmente implica un alto número de valores atípicos y deslizamiento de ciclo.

La Figura 7.26 ilustra los valores  $C/N_0$  de las observaciones GNSS correspondiente a todos los satélites GPS y Galileo seguidos durante el experimento, para la señal  $L_1/E_1$  y  $L_5/E_{5a}$ . Los valores  $C/N_0$  correspondientes a la señal  $L_1$  son cercanos a 50 dB-Hz para algunos satélites con ángulos de elevación altos y los satélites con elevación baja fueron los que presentaron valores por debajo de 20 dB-Hz. En el caso de la señal  $L_5$ , la mayoría de satélites presentaron magnitudes de  $C/N_0$  mayores a 30 dB-Hz, pero menores a 40 dB-Hz, lo que deriva de la baja calidad de la antena. Estos valores son similares a los encontrados en las señales  $E_1$  y  $E_{5a}$ .  $E_1$  y  $E_{5a}$  deben de alcanzar magnitudes de hasta 50 dB-Hz, sin embargo, los resultados encontrados estuvieron 20 dB-Hz por debajo. Estos valores  $C/N_0$  bajos fueron ignorados durante el procesamiento, es decir, las señales menores a 30 dB-Hz no se consideraron en el procesamiento.

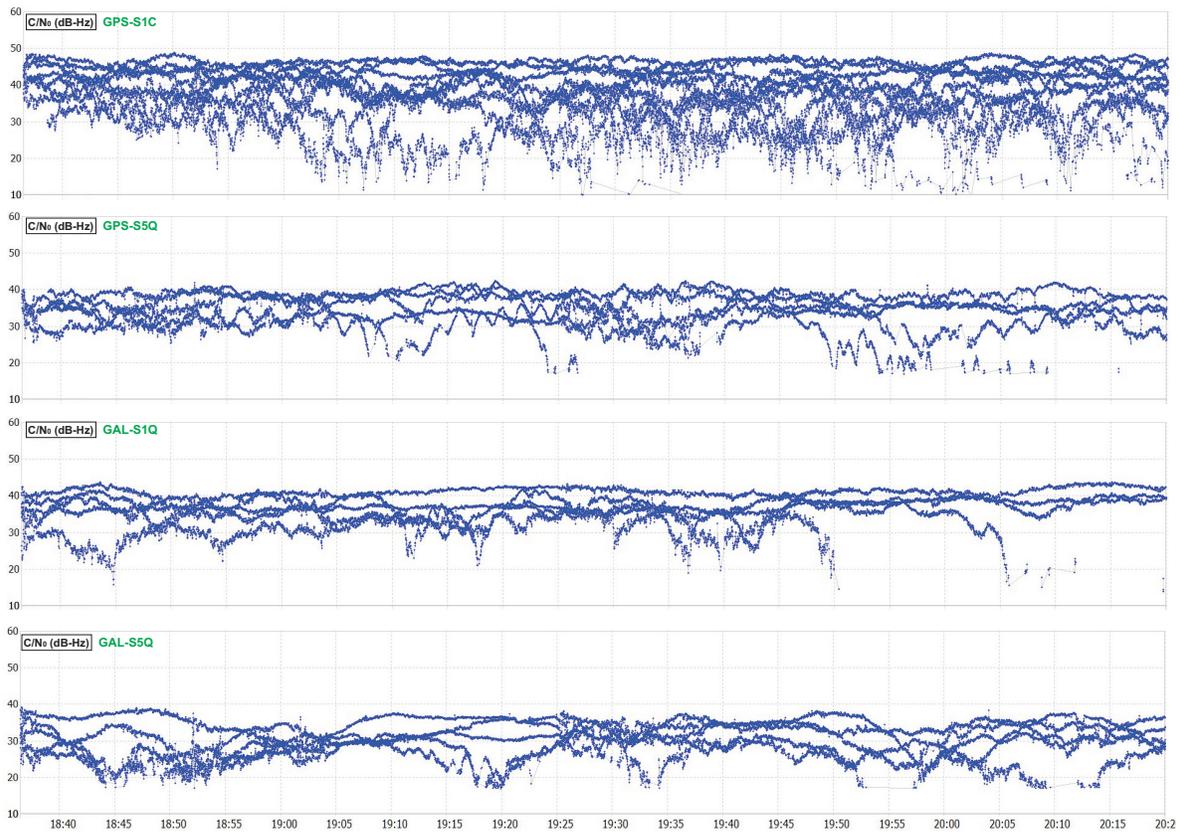


Figura 7.26: Valos de  $C/N_0$  para las señales  $L_1/E_1$  y  $L_5/E_{5a}$  de la constelación GPS y Galileo.

#### 7.4.2.2. Observaciones de pseudodistancia

Como se mencionó en la Sección 4.5.3.4 del capítulo 4, la antena integrada en el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 es una antena polarizada linealmente y no puede discriminar entre las señales directas (RHCP) e indirectas (LHCP), por lo cual, genera mediciones ruidosas. En las mediciones GNSS tradicionales de doble frecuencia, se utiliza una combinación lineal para caracterizar el error del *multipath*. Para las señales GNSS del Xiaomi Mi 8, la segunda frecuencia  $L_5/E_5$  solo está disponible en algunos satélites GPS y en Galileo

y QZSS (no aplica para nuestra zona de estudio). Para calcular los valores de *multipath* se utilizaron las ecuaciones lineales 4.1 y 4.2 del capítulo 4 a través del software Anubis (Vaclavovic y Dousa, 2016). En la Figura 7.27 se ilustran los errores del *multipath* para el seguimiento de los satélites GNSS del Xiaomi Mi 8 y el Geomax Zenith 25.

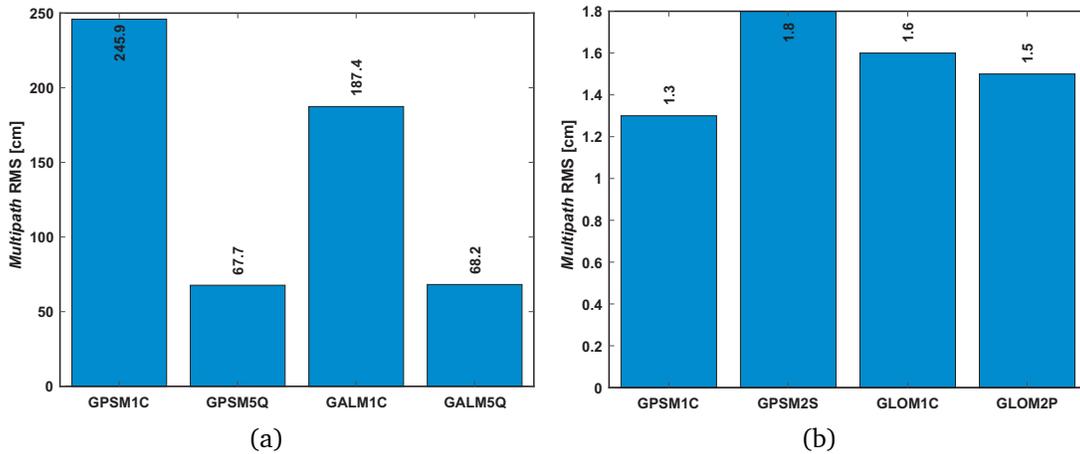


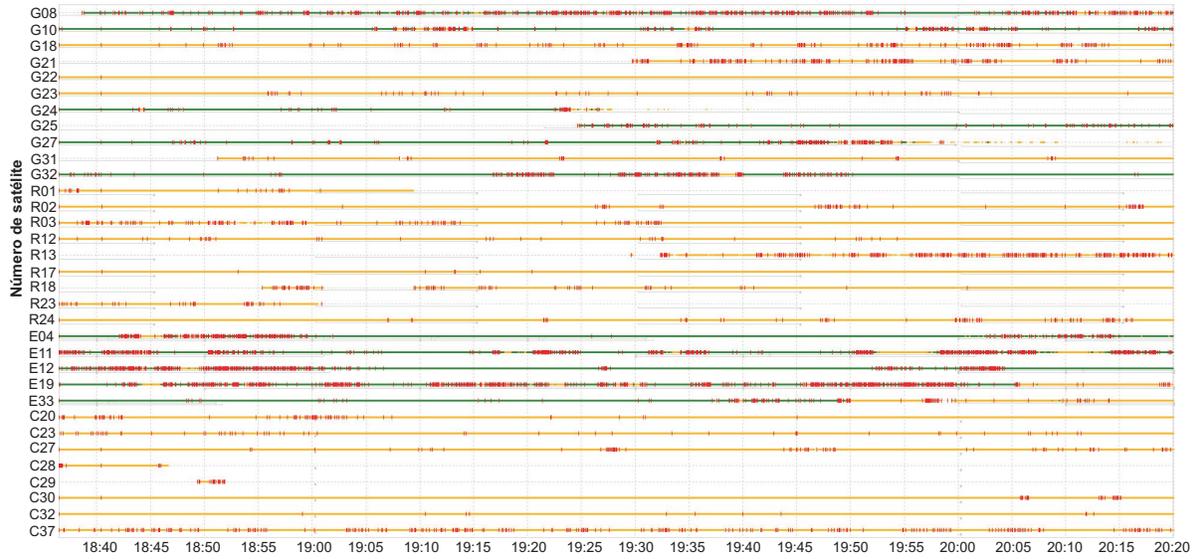
Figura 7.27: Valores de *multipath* en cm: (a) geomax zenith 25, y (b) Xiaomi Mi 8.

#### 7.4.2.3. Análisis de deslizamiento de ciclo

El deslizamiento de ciclo es una métrica importante de la calidad de la fase portadora. Debido al ahorro del consumo de energía de los teléfonos inteligentes durante la operación continua del chip GNSS, la cual agota la batería, se implementó una técnica de ciclo de trabajo por parte de los proveedores. Esta técnica limita la adquisición continua de mediciones GNSS, afectando de manera significativa a las mediciones de la fase portadora (Geng y Li, 2019). El ciclo de trabajo no degrada la calidad de la medición del código. Cuando se pierde el seguimiento continuo, pueden ocurrir desfases de ciclo entre dos mediciones consecutivas, lo que limita el uso de estas mediciones en RTK o PPP. Sin embargo, la técnica de ciclo de trabajo está apagada en el Xiaomi Mi 8 gracias a la función llamada “Forzar mediciones GNSS completas”. Con el ciclo de trabajo apagado, no quita completamente los desfases o saltos de ciclo, esto se puede observar claramente en la Figura 7.28. La Figura 7.28 ilustra los satélites GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou rastreados por la antena del Xiaomi Mi 8. Se puede ver una gran cantidad de desfases de ciclo en la fase portadora. Cada deslizamiento de ciclo está marcado con una línea color rojo (interrupción de la fase de la portadora).

En la Tabla 7.12 se encuentra el número total de saltos de ciclo o interrupciones de la fase portadora para cada constelación GNSS. La constelación que presentó el mayor número de saltos de ciclo fue GPS, sin embargo, esto no significa que las mediciones de la fase portadora sean de mala calidad. En primer lugar, el número de satélites GPS fue de 11, siendo 6 de frecuencia dual ( $L_1/L_5$ ) y cada señal contiene 4 tipos de observaciones (Código, Fase, Doppler y densidad de señal-ruido). Para GLONASS solamente se observaron 9 satélites de frecuencia simple con 4 tipos de observaciones. Cinco satélites Galileo

con frecuencia dual fueron observables, al igual que las constelaciones anteriores, con 4 tipos de observaciones. Finalmente, ocho satélites BeiDou de frecuencia simple con cuatro observaciones fueron observados. Por lo cual, la constelación GPS y Galileo fueron las que registraron el número mayor de observaciones (8 cada uno, debido a la dualidad de las observaciones). Debido al número mayor de satélites y observaciones de fase portadora que registró GPS, es más susceptible a los saltos de ciclo, tal como se muestra en la Tabla 7.12.



**Figura 7.28:** Deslizamiento de ciclo (líneas rojas) en satélites GNSS de cuatro constelaciones: GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.

**Tabla 7.12:** Número de saltos de ciclo por constelación GNSS.

Constelación GNSS	Número total de saltos de ciclo
GPS	17854
Galileo	9810
GLONASS	690
BeiDou	513

### 7.4.3. Posicionamiento relativo cinemático con un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8

En esta Sección 7.4.3 se presenta la evaluación en el desempeño del posicionamiento 3D relativo cinemático basado en líneas base formadas por un teléfono inteligente y observaciones de receptores GNSS de bajo costo. Para determinar el posicionamiento relativo cinemático 3D, el software de código abierto RTKLib v2.4.3, desarrollado por Takasu y Yasuda (2009) fue utilizado. RTKLib utiliza el modelo de medición de diferencias de fase

dual, quien elimina algunos errores relacionados con sesgos del satélite y receptor, y los efectos ionosféricos y troposféricos (Takasu y Yasuda, 2009). Las estrategias de procesamiento usadas para el procesamiento de observaciones GNSS registradas por el Xiaomi Mi 8 y el receptor Mosaic-X5 en RTKLib se encuentran en la Tabla 7.13.

**Tabla 7.13:** Estrategias de procesamiento utilizados en el software RTKLib.

Parámetros	Modelo
Modo de procesamiento	Relativo cinemático
Constelaciones GNSS	GPS+Galileo
Órbitas de satélite	Transmitidas
Ángulo de elevación	12°
Observaciones	Código y fase
Troposfera	Saastamoinen
Ionosfera	Efemérides transmitidas
Modo de resolución de ambigüedad	Fix and Hold
Umbral C/No para corregir la ambigüedad	30 dB-Hz
Umbral de relación para corregir la ambigüedad	3.0
Modelo estocástico	Ruido de fase portadora ( $a_0, b_0$ ):0.003m
Parámetros PCO y PCV de la antena	Proporción de error de portador de código: 300:1
Coordenadas de salida	ngs2014.atx ENU

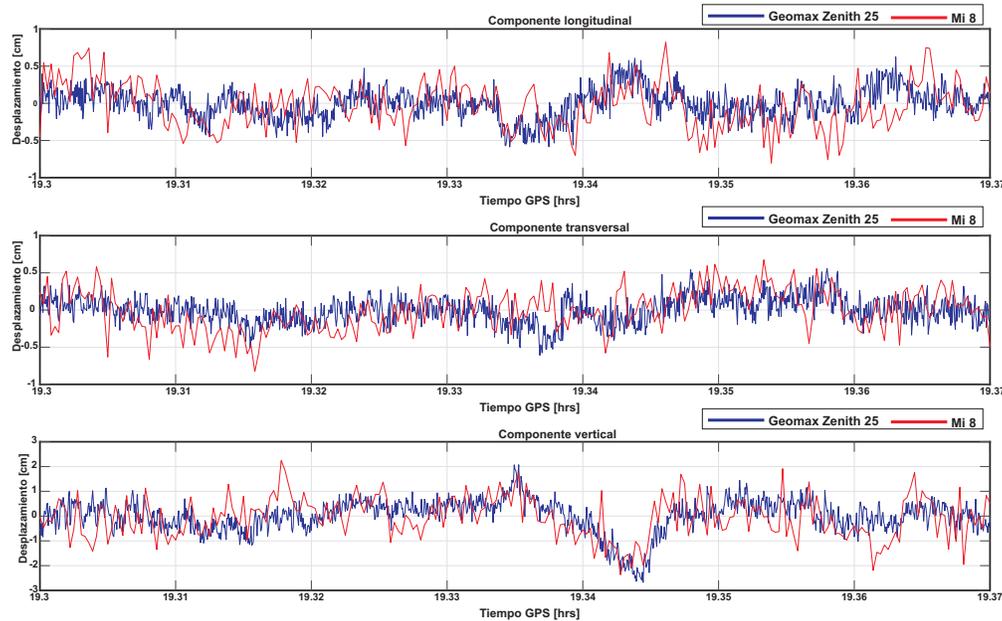
Las coordenadas ENU de salida del RTKLib fueron rotadas al sistema local de coordenadas del puente El Carrizo, y las series de tiempo fueron editadas con las estrategias mencionadas en la sección 7.2.3. Los resultado finales fueron coordenadas locales aparentes 3D del puente El Carrizo, estas coordenadas fueron utilizadas como parámetros de entrada para el análisis espectral.

Las mediciones GNSS del receptor de orden geodésico que se utilizó como referencia para evaluar el rendimiento del Xiaomi Mi 8, fueron procesadas en el software científico TRACK. La estrategia de procesamiento fue la misma que se utilizó en la sección 7.2.3 de este capítulo, se pueden encontrar en la Tabla 7.1. Las coordenadas ENU resultantes de TRACK para el Geomax Zenith 25 fueron rotadas y al igual que las coordenadas obtenidas por el Xiaomi Mi 8.

#### 7.4.4. Desplazamientos estáticos del puente El Carrizo desde el Xiaomi Mi 8

Los desplazamientos estáticos registrados por el Xiaomi Mi 8 se presentan en esta sección 7.4.4. Debido a la rigidez de la dovela metálica donde se colocaron el teléfono inteligente y el Geomax Zenith 25 los desplazamientos deberían de ser similares, con diferencias menores a los 5 milímetros. Por otro lado, los desplazamientos estáticos registrados por el receptor GNSS de orden geodésico fueron utilizados como referencia en la evaluación del Xiaomi Mi 8. En la Figura 7.29 se ilustran los desplazamientos estáticos del puente El Carrizo en condiciones de uso diario para las tres componentes locales del mismo, a partir de mediciones GNSS de un receptor GNSS de orden geodésico y un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 con un chip dual GNSS. La componente transversal y longitudinal presentaron desplazamientos en el orden de  $\pm 5$  mm para GMZ25 y  $\pm 8$  mm para el Xiaomi Mi 8.

La componente vertical fue la que presentó los mayores desplazamientos, con magnitudes menores a -3 cm, y mayores a 2 cm. Debido a la diferencia de frecuencias de muestreo, la serie temporal de color azul medida con el GMZ25 tiene mayor información que la de color rojo del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Sin embargo, la tendencia en las series de tiempo de ambos colores es similar, con diferencias menores a los 3 mm para la componente horizontal y 9 mm para la vertical. En la componente vertical, se observa un pico negativo de aproximadamente 4 cm después de las 19.34 hrs, el cual corresponde al paso de un vehículo pesado T3S2R2. Este desplazamiento fue registrado de manera precisa por el Xiaomi Mi 8.



**Figura 7.29:** Desplazamientos estáticos medidos sobre el puente El Carrizo en las tres componentes con el receptor GNSS de orden geodésico y el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8.

**Tabla 7.14:** Resumen estadístico de los desplazamientos estáticos obtenidos con el receptor GNSS Geomax Zenith 25 y el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8.

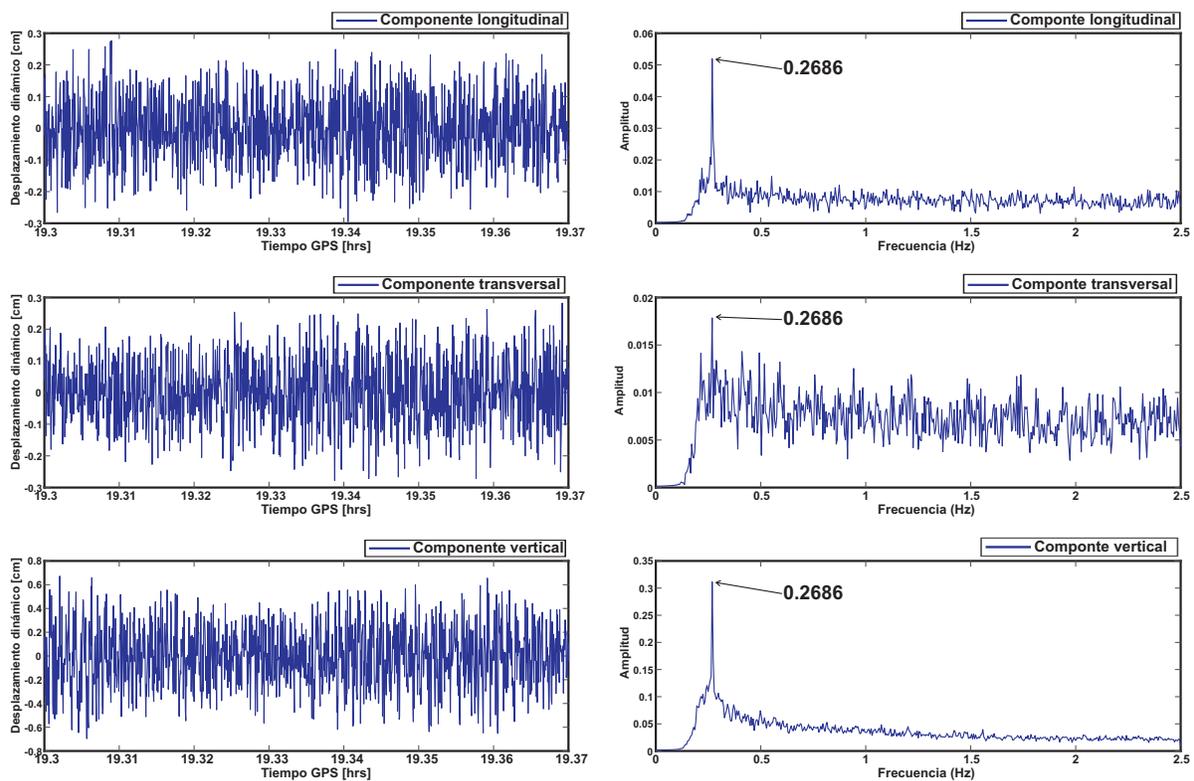
Instrumento	Componentes 3D locales del puente El Carrizo								
	Transversal (cm)			Longitudinal (cm)			Vertical (cm)		
	$\sigma$	Max	Min	$\sigma$	Max	Min	$\sigma$	Max	Min
Xiaomi Mi 8	0.29	0.77	-0.82	0.31	0.99	-0.80	0.85	2.24	-2.36
Geomax Zenith 25	0.17	0.55	-0.61	0.19	0.62	-0.58	0.63	2.07	-2.67

En la Tabla 7.14 se encuentra la información estadística de los desplazamientos estáticos ilustrados en la Figura 7.29. Los desplazamientos registrados con el GMZ25 presentaron una dispersión menor en comparación con los del Xiaomi Mi 8. Por otro lado, el Xiaomi Mi 8 registró desplazamientos máximos mayores que los alcanzados por el GMZ25. Estas

diferencias se deben a la precisión con la que se obtuvieron las series de tiempo, es decir, la serie de tiempo de color rojo tiene mayor ruido que la de color azul.

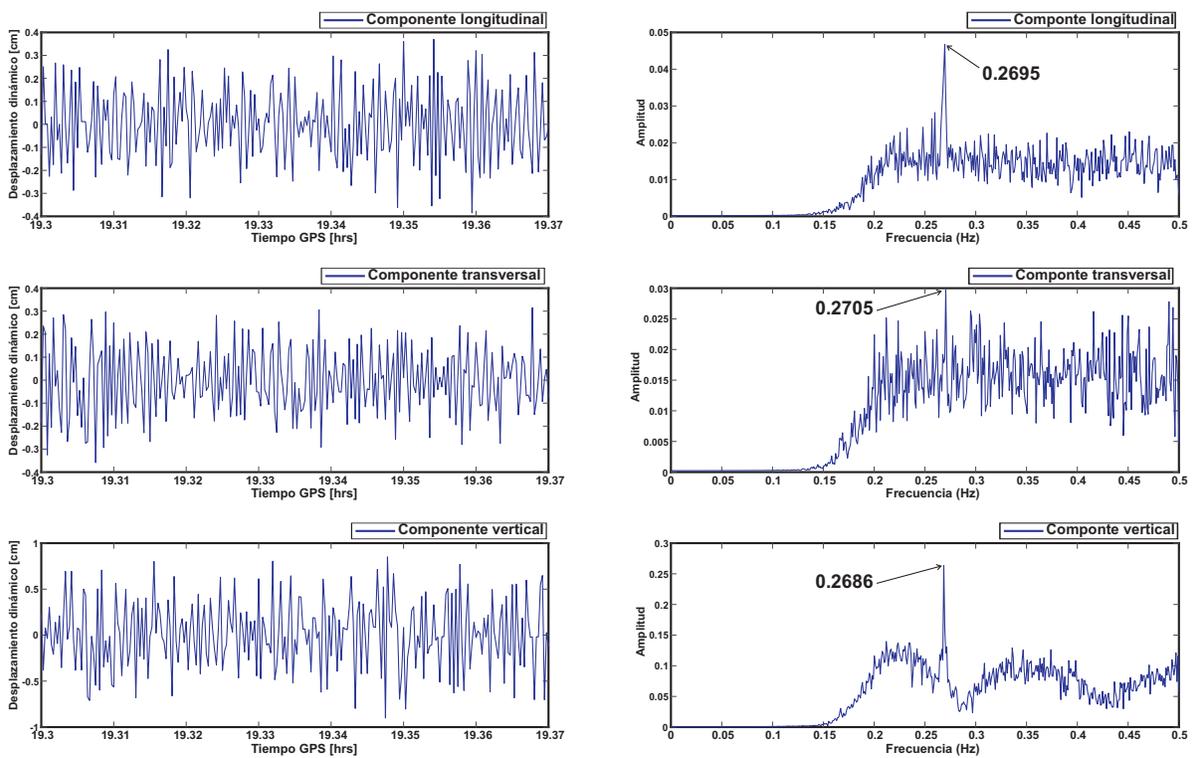
### 7.4.5. Análisis espectral del puente El Carrizo desde un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8

Medir, identificar, modelar y analizar las frecuencias naturales en puentes tiene diferentes enfoques, donde uno de ellos es para evaluar daños sufridos en este tipo de estructuras, como estimar el nivel y posición del daño estructural. Por otro lado, se sabe que factores derivados de los vehículos afectan de manera importante la respuesta estructural del puente. Para evaluar la respuesta dinámica de los puentes se requieren diferentes aspectos, donde estos atienden el tipo de excitación empleada hasta la forma de evaluar los resultados. Existen diferentes métodos de excitación en puentes como las condiciones ambientales y uso de la infraestructura, mediciones controladas de desplazamientos, liberación de cargas, vibradores e impacto (Carrión Viramontes et al., 1999). En este estudio, se utilizó el método excitación por efectos ambientales debido al bajo costo en su aplicación, ya que no es necesario suspender el servicio del puente.



**Figura 7.30:** (Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS para el lado B obtenidas desde mediciones GNSS del receptor GNSS Geomax Zenit 25. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

Con base en las mediciones del Xiaomi Mi 8 y el tratamiento y análisis de la señal se logró extraer la frecuencia fundamental del puente El Carrizo. En un primer paso, se extrajeron los desplazamientos dinámicos y después las frecuencias modales en las coordenadas locales generadas por el receptor GMZ25 para validar los resultados, debido a que los receptores GNSS de orden geodésico han sido validados para extraer frecuencias fundamentales en estructuras. Una vez que se identifican las frecuencias con el GMZ25, se verifica que la carga vehicular que transitó por el puente durante el periodo del experimento lograron excitar el puente. Por lo cual, las frecuencias extraídas por el Xiaomi Mi 8 corresponden a las reales. Los desplazamientos dinámicos y frecuencias modales extraídos por el receptor GNSS de orden geodésico y el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 se ilustran en las Figuras 7.30 y 7.31, respectivamente.



**Figura 7.31:** (Izquierda) Series temporales de los desplazamientos dinámicos para las tres componentes: transversal, longitudinal y vertical de las soluciones GPS+Galileo para el lado B obtenidas desde mediciones GNSS del teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. (Derecha) Los espectros de las series temporales de desplazamientos dinámicos, donde todos expresan la frecuencia dominante.

En la Tabla 7.15 se observa el error en porcentaje para la frecuencia fundamental extraída por el receptor GNSS GMZ25 y el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Para ambos casos, la diferencia de las frecuencias con respecto a la de referencia fue menor al 1%. La alta precisión del Xiaomi Mi 8 para identificar la frecuencia fundamental en un puente flexible como la sección atirantada del puente El Carrizo es demostrado en la Figura 7.31 y Tabla 7.15.

**Tabla 7.15:** Porcentaje del error en la extracción de la frecuencia de los modos de vibrar del puente El Carrizo con mediciones GNSS del GMZ25 y Xiaomi Mi 8.

Receptor	GNSS	Modos de vibrar								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Xiaomi Mi 8	G+E	0.22 %	-	-	-	-	-	-	-	-
GMZ25	G	0.22 %	-	-	-	-	-	-	-	-

#### 7.4.6. Discusión

En esta sección 7.4, se evaluó por primera vez la precisión del posicionamiento cinemático en el monitoreo de desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias modales utilizando observaciones GNSS desde el receptor y antena embebida en el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 sobre el puente atirantado El Carrizo. Los resultados demuestran que es posible medir desplazamientos estáticos, dinámicos y frecuencias modales con una alta precisión a partir de las mediciones GNSS de un teléfono inteligente con un chip GNSS Dual.

El teléfono inteligente es capaz de alcanzar precisiones en los desplazamientos en el orden de los milímetros al ser comparado con desplazamientos de referencia medidos con receptores GNSS de orden geodésico. Por otro lado, alcanzó errores menores al 1 % en la extracción de frecuencias naturales sobre el tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo. También, el ruido de observación y la variación en el centro de fase de la antena del teléfono inteligente pueden ser una de las principales limitantes de las mediciones GNSS con los teléfonos inteligentes.

Por otro lado, aunque la antena del Xiaomi Mi 8 tenga baja ganancia y resistencia al *multipath*, los resultados encontrados en este experimento fueron lo bastante precisos para ser comparado con un receptor de orden geodésico, siempre y cuando se consideren ciertos aspectos importantes durante la medición GNSS. La empresa Broadcom lanzó un chip GNSS de doble y el 31 de mayo del 2018 la empresa Xiaomi anunció el primero teléfono inteligente del mundo con una función GNSS de doble frecuencia (Xiaomi Mi 8). Actualmente, muchos teléfonos inteligentes están dotados de capacidades de multiconstelación y multifrecuencia. Una gran cantidad de estudios se han realizado, donde evalúan la calidad de la señal, el desempeño del posicionamiento, la precisión al momento de monitorear deformaciones, entre otros estudios. Sin embargo, actualmente no existe un estudio donde evalúen el desempeño de un teléfono inteligente con chip dual GNSS en el monitoreo estructural de un puente atirantado a partir de desplazamientos estáticos, dinámicos y el análisis de frecuencias modales, lo que convierte a este estudio en el primero en el mundo en utilizar esta tecnología GNSS de bajo costo en el Monitoreo de la Salud Estructural sobre un puente atirantado.

### 7.4.7. Conclusiones

En esta investigación, se analizó el desempeño que tiene un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 con un chip dual GNSS en monitorear desplazamientos estáticos y dinámicos, así como también la frecuencia fundamental de un puente atirantado, a decir, el puente El Carrizo. También, la calidad de las observaciones GNSS multifrecuencia medidas durante el experimento fueron analizadas a partir de las métricas,  $C/N_0$ , *multipath*, saltos de ciclo.

Los valores  $C/N_0$  fueron relativamente bajos en comparación con los reportadores por el GMZ25, con diferencias de hasta 10 dB-Hz. Por otro lado, la magnitud del *multipath* fue alta, sin embargo, considerando las características de la antena con polarización lineal, es difícil tener magnitudes pequeñas. Con valores de 246 cm, la señal  $L_1$  de GPS presentó mayores valores de *multipath* que la señal,  $L_5$ , quien presentó 67.7 cm. En el caso de Galileo, también la señal  $E_1$  presentó el peor valor de *multipath*, con magnitudes de 187 cm, y 68 cm para la  $E_{5a}$ . En resumen, las señales de la constelación Galileo fueron menos afectadas por el *multipath*. Finalmente, el número de saltos de ciclo fue mayor en la constelación GPS, debido al número alto de satélites seguidos. Aunque el Xiaomi Mi 8 tenga apagado la función de ciclo de trabajo, la continuidad en el seguimiento de la fase portadora es afectada y deriva a los altos valores de saltos de ciclo.

El teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 es capaz de identificar tendencias de desplazamientos menores a 2 cm en la componente vertical y de aproximadamente 5 mm en la componente horizontal. Debido a la alta precisión que se logró obtener con el teléfono inteligente en el posicionamiento 3D, el análisis de las series temporales en el dominio de la frecuencia presentó errores menores al 1 % al identificar frecuencias fundamentales de referencia. Estos resultados demuestran que el Xiaomi Mi 8 es una opción factible cuando se desean hacer monitores sobre estructuras flexibles, donde los desplazamientos máximos oscilen los 5 cm. Por otro lado, el método de procesamiento relativo cinemático es el recomendado de utilizar cuando se deseen alcanzar precisiones como las reportadas en este estudio, debido a que PPP está por ahora lejos de alcanzar precisiones en el nivel del decímetro o incluso metros desde observaciones GNSS registradas por un teléfono inteligente.



# Referencias

- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., y Konopka, E. (2002). Application of gps technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(3):223–230.
- Carrión Viramontes, F., Lozano Guzmán, A., Fabela Gallegos, M., VAZQUES VEGA, D., y Romero Navarrete, J. (1999). Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones. *Publicación Técnica*, (132).
- Comnavtech (2023). How to analyze gnss signal quality. <https://www.comnavtech.com/news/268.html>. [Web; accedido el 23-02-2023].
- Estey, L. H. y Meertens, C. M. (1999). Teqc: the multi-purpose toolkit for gps/glonass data. *GPS solutions*, 3(1):42–49.
- Floyd, M. (2018). Gamit/globk for gnss.
- Geng, J. y Li, G. (2019). On the feasibility of resolving android gnss carrier-phase ambiguities. *Journal of Geodesy*, 93(12):2621–2635.
- Guo, L., Wang, F., Sang, J., Lin, X., Gong, X., y Zhang, W. (2020). Characteristics analysis of raw multi-gnss measurement from xiaomi mi 8 and positioning performance improvement with l5/e5 frequency in an urban environment. *Remote Sensing*, 12(4).
- Gómez-Martínez, R., Sánchez-García, R., Escobar-Sánchez, J. A., Arenas-García, L. M., Mendoza-Salas, M. A., y Rosales-González, O. N. (2021). Monitoring two cable-stayed bridges during load tests with fiber optics. *Structures*, 33:4344–4358.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Collins, J. (2012). *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Huang, C., Song, S., Cheng, N., y Wang, Z. (2022). Data quality analysis of multi-gnss signals and its application in improving stochastic model for precise orbit determination. *Atmosphere*, 13(8):1253.
- Kersten, T., Kröger, J., y Schön, S. (2022). Comparison concept and quality metrics for gnss antenna calibrations: Cause and effect on regional gnss networks. *Journal of Geodesy*, 96(7):48.

- Kersten, T. y Schön, S. (2017). Gps code phase variations (cpv) for gnss receiver antennas and their effect on geodetic parameters and ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 91(6):579–596.
- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., y ten Veldhuis, M.-C. (2022). A field calibration solution to achieve high-grade-level performance for low-cost dual-frequency gnss receiver and antennas. *Sensors*, 22(6).
- Lathi, B. P. y Green, R. A. (2014). *Essentials of digital signal processing*. Cambridge University Press.
- Lu, B., Jin, J. P., Duan, W. Y., Chen, L. J., y Guan, H. Y. (2012). Research of gps signal multipath effects based on gamit track. In *Advanced Materials Research*, volume 588, pages 912–919. Trans Tech Publ.
- 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.
- Msaewe, H. A., Psimoulis, P. A., Hancock, C. M., Roberts, G. W., y Bonenberg, L. (2021). Monitoring the response of severn suspension bridge in the united kingdom using multi-gnss measurements. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(11):e2830.
- Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., y Stiros, S. (2006). Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with gps: Accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures*, 28(10):1471–1482.
- Oku Topal, G. y Akpınar, B. (2022). High rate gnss kinematic ppp method performance for monitoring the engineering structures: Shake table tests under different satellite configurations. *Measurement*, 189:110451.
- Paziewski, J., Sieradzki, R., y Baryła, R. (2019). Signal characterization and assessment of code gnss positioning with low-power consumption smartphones. *GPS solutions*, 23:1–12.
- Robustelli, U., Paziewski, J., y Pugliano, G. (2021). Observation quality assessment and performance of gnss standalone positioning with code pseudoranges of dual-frequency android smartphones. *Sensors*, 21(6).
- Takasu, T. y Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost rtk-gps receiver with an open source program package rtklib. In *International symposium on GPS/GNSS*, volume 1. International Convention Center Jeju Korea.
- Trotin, N., Ladret, P., y Sergio del Olmo, keywords = Lanzadora, Dovelas metálicas, Tirantes, Avance en voladizo, Launching girders, Steel segmental construction, Cable-stays, Cantilever, a. . E. (2015). «el carrizo»: construcción con lanzadoras de un tablero atirantado por avance en voladizo. *Hormigón y Acero*, 66(275):69–83.

- Vaclavovic, P. y Dousa, J. (2016). G-nut/anubis: Open-source tool for multi-gnss data monitoring with a multipath detection for new signals, frequencies and constellations. In Rizos, C. y Willis, P., editors, *IAG 150 Years*, pages 775–782, Cham. Springer International Publishing.
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., y Gaxiola-Camacho, J. R. (2020). Implementation of ppp-gnss measurement technology in the probabilistic shm of bridge structures. *Measurement*, page 108677.
- Wang, Y., Zhao, L., y Gao, Y. (2021). Estimation and analysis of gnss differential code biases (dcbs) using a multi-spacing software receiver. *Sensors*, 21(2):443.
- Wanninger, L. y Heßelbarth, A. (2020). Gnss code and carrier phase observations of a huawei p30 smartphone: Quality assessment and centimeter-accurate positioning. *GPS Solutions*, 24(2):64.
- Xue, C., Psimoulis, P. A., y Meng, X. (2022). Feasibility analysis of the performance of low-cost gnss receivers in monitoring dynamic motion. *Measurement*, 202:111819.
- Yang, Z., Liu, H., Lou, Y., Shu, B., Xu, L., Wang, Y., y Xie, B. (2020). Real-time estimation and calibration of glonass inter-frequency phase and code bias. *The Journal of Navigation*, 73(3):746–762.
- 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.



# Capítulo 8

## Conclusiones y trabajos futuros

### 8.1. Resumen

Desde la década de los 90's, los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) han sido utilizados para monitorear desplazamientos estáticos y dinámicos en puentes. Posteriormente, con el surgimiento de nuevas constelaciones y señales GNSS, fue posible tener una gran cantidad de satélites disponibles en cualquier punto sobre la superficie terrestre. Adquirir observaciones GNSS de diferentes constelaciones a una frecuencia de muestreo alta (Hasta 100 Hz) permite extraer características dinámicas de los puentes. También, nuevas estrategias de procesamiento de datos GNSS en diferentes software de código abierto y servicios en línea han ayudado a alcanzar soluciones milimétricas tanto en estudios estáticos como dinámicos. Los algoritmos, modelos estocásticos y software de procesamiento de datos GNSS han sido desarrollados considerando que las observaciones fueron adquiridas con receptores y antenas de grado geodésico. Sin embargo, los instrumentos de grado geodésico son muy costosos, y esto limita la adquisición de estos dispositivos a universidades/institutos de bajo presupuesto. Por lo tanto, esta tesis tiene como objetivo analizar las posibilidades que tienen los instrumentos GNSS de bajo costo en el monitoreo de la salud estructural en puentes.

En este documento de tesis, se analizan los modelos de receptores GNSS de bajo costo ZED-F9P de la empresa U-blox, y el Mosaic-X5 de la compañía Septentrio. Además, el chip GNSS Broadcom BCM17755 embebido en el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 de la empresa Xiaomi fue analizado. También, un conjunto de software de código abierto y servicios en línea para procesar datos GNSS a través de la técnica PPP/PPPAR en modo estático y dinámico fueron evaluados. Por otro lado, el análisis de los receptores GNSS de bajo costo y el teléfono inteligente consistió en evaluar los siguientes pasos: (1) la calidad de la señal, (2) la precisión de la exactitud posicional 3D, (3) y la precisión en monitorear desplazamientos estáticos y dinámicos, así como también la extracción de frecuencias modales. En el paso 1, para el análisis de calidad de las observaciones GNSS es presentada una nueva estrategia de análisis para el indicador de la relación señal-ruido (SNR) que considera los valores de ganancia de las antenas GNSS y los valores teóricos de todas las señales GNSS disponibles en México. La integridad de los observables GNSS y las épocas de medición, el *multipath* y los saltos de ciclo, además del SNR, son los indicadores propuestos para eva-

luar la calidad de la señal GNSS de cada constelación. Evaluar la calidad de la señal en los receptores GNSS de bajo costo es importante para tener un pronóstico de precisión cuando se compara con los indicadores de calidad de los receptores GNSS de grado geodésico. En el paso 2, para el posicionamiento estático 3D, las coordenadas obtenidas sobre un monumento de centrado forzoso con los receptores GNSS de bajo costo y el Xiaomi Mi 8 fueron comparadas con las de referencia, obtenidas con equipo de grado geodésico. En el paso 3, se monitorearon los desplazamientos dinámicos simulados por un servo-motor y los generados manualmente en la componente vertical. Tanto la componente horizontal como la vertical fueron evaluadas en estos experimentos. Los métodos de Posicionamiento Puntual Preciso con resolución de ambigüedad entera (PPPAR), posicionamiento cinemático relativo (DD) y posicionamiento en tiempo real (RTK) fueron los métodos de procesamiento GNSS analizados. Los pasos de evaluación 1, 2 y 3 fueron establecidos con la finalidad de diseñar metodologías que sirvan para aplicarse en el monitoreo estructural de puentes.

Por otro lado, por primera vez, en esta tesis se desarrolla originalmente y se aplica un método para extraer desplazamientos y propiedades dinámicas de un puente atirantado a partir de mediciones GNSS desde un teléfono inteligente. También, en esta tesis, se evalúa por primera vez la técnica RTK con receptores GNSS de bajo costo, definiendo diferentes combinaciones GNSS y frecuencias de muestreo. Además, las estrategias diseñadas a partir de los experimentos correspondientes a los 3 pasos de evaluación fueron exitosamente aplicados sobre una estructura civil de gran importancia, a decir, el puente atirantado El Carrizo localizado sobre la autopista Mazatlán-Durango.

## 8.2. Receptores GNSS de bajo costo

Las señales observadas por los receptores GNSS de bajo costo ZED-F9P y Mosaic-X5 equipados con las antenas ANN-MB-00 y TW7972 fueron evaluadas a partir de cuatro indicadores de calidad, a decir: *multipath*, relación señal-ruido, integridad y saltos de ciclo. Además, el desempeño en posicionamiento del receptor ZED-F9P y la antena ANN-MB-00 fue evaluado considerando parámetros de calibración relativos de la antena considerando dos métodos de procesamiento: relativo estático y PPP-AR en modo estático. Los receptores ZED-F9P y Mosaic-X5 son capaces de seguir a más de 95 satélites GNSS en el noroeste de México. La calidad de la relación señal-ruido para las observables de los dos receptores estuvo ligeramente por debajo de las teóricas. Los valores de *multipath* para las antenas fue bajo, menores a 5 cm para  $L_1$  y  $L_2$ , esto debido a la ubicación estratégica donde se colocaron. En general, la calidad de la señal observada por los dos receptores y antenas estudiadas en este trabajo de tesis estuvo ligeramente por debajo de lo recomendado e incluso para el caso del *multipath*, los valores fueron hasta 90 % mejores. Las antenas GNSS de bajo costo pueden alcanzar un desempeño alto en la recepción de las señales GNSS siempre y cuando sean colocadas estratégicamente, es decir, libres de obstáculos que interfieran, un plano de tierra y un ángulo de elevación alto. Por otro lado, con lo que respecta a los parámetros de calibración de la antena ANN-MB-000, los resultados alcanzados demuestran que el impacto en el posicionamiento no refleja la corrección del centro de fase, es decir, los RMSE para las tres componentes ENU son similares cuando se utilizan los parámetros de calibración y cuando no son aplicados. Esto deja un campo de estudio

para futuras investigaciones. Finalmente, es posible alcanzar una precisión posicional con receptores GNSS de bajo costo menor a 1 cm para las tres componentes (ENU).

### 8.3. RTK con receptores GNSS de bajo costo

Dentro del campo del monitoreo de la salud estructural en puentes, monitorear desplazamientos dinámicos en tiempo real es uno de los retos que actualmente se tienen. Debido a lo anterior, y como posible solución; se realiza un análisis del rendimiento de los receptores GNSS de bajo costo en detectar desplazamientos horizontales y verticales en tiempo real utilizando la técnica RTK. Se establece por primera vez en México un sistema RTK de base única completamente de bajo costo, es decir, la estación de referencia que transmite las correcciones a un *caster* y el *rover* que las recibe son de bajo costo. Considerando 3 factores importantes que afectan el rendimiento de la técnica RTK: frecuencia de muestreo, ángulo de elevación y combinaciones GNSS; se establecieron experimentos que simulaban desplazamientos horizontales y verticales de hasta 5 mm para ser detectados por el sistema RTK de bajo costo. Los resultados alcanzados por los receptores GNSS de bajo costo demuestran que esta tecnología puede detectar desplazamientos horizontales y verticales de 4 y 5 mm, respectivamente. Se encontró que la frecuencia de muestreo de 5 Hz alcanzó el mejor rendimiento en detectar desplazamientos dinámicos horizontales y verticales con un ángulo de elevación de 12°. Además, las combinaciones G+R+E+C y G+E alcanzaron los tiempos de convergencia y porcentaje de ambigüedad con el mejor desempeño. Los alcances de los receptores GNSS de bajo costo en la detección de desplazamientos dinámicos los convierte en una herramienta potencial en el monitoreo estructural de puentes al ser precisos y de fácil adquisición para las dependencias encargadas de monitorear puentes en México y el mundo.

### 8.4. Teléfono inteligente Xiaomi Mi 8

La ubicación geográfica determina el número de satélites GNSS disponibles en alguna época de interés. Es bien sabido que el número de satélites ayuda significativamente en el aumento de la precisión y en el tiempo de convergencia. Por primera vez, en México se evalúa la calidad de la señal GNSS adquirida desde un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8. Estableciendo 5 indicadores de calidad: integridad de observables, integridad de épocas, relación de densidad de portadora a ruido ( $C/N_0$ ), *multipath* y saltos de ciclo. La calidad de la antena GNSS polarizada linealmente del Xiaomi Mi 8 deriva a indicadores de mala calidad. La integridad tanto de las observables como las épocas es afectada por el ciclo de trabajo (*duty cycle*), aunque el Xiaomi Mi 8 tenga esta función desactivada, los efectos son bastante grandes. Con valores de integridad de observables de hasta 20% para la constelación BeiDou. Ninguna constelación GNSS obtuvo valores de integridad por encima de los 90%. Los valores de  $C/N_0$  para algunos satélites GNSS fue similar a la alcanzada por las antenas GNSS de bajo costo utilizadas en los receptores GNSS de bajo costo. Los satélites BeiDou fueron los que obtuvieron las magnitudes más pequeñas y los satélites GLONASS fueron los que alcanzaron los mejores valores de  $C/N_0$  de hasta 100%

al compararse con los valores de referencia teóricos. Con magnitudes de *multipath* mayores a 2 metros para la señal  $L_1/E_1$ , y 80 cm para la  $L_5/E_{5a}$ , es uno de los indicadores con mayor afectación, ya que la antena es incapaz de identificar una señal directa e indirecta.

El Xiaomi Mi 8 alcanzó una precisión en posicionamiento 3D de 0.7 cm, 1.1 cm y 4.4 cm para la componente Este, Norte y Vertical, respectivamente. La combinación GPS+Galileo fue la que presentó el mejor rendimiento en posicionamiento tridimensional. Por lo tanto, es posible utilizar un teléfono inteligente en trabajos de topografía cuando se buscan precisiones centimétricas en la componente horizontal. Por otro lado, el teléfono inteligente es capaz seguir trayectorias circulares dinámicas con una precisión de 1.4 cm cuando se utiliza la combinación GPS+Galileo<sup>1</sup>. Debido a que el chip GNSS BCM47755 incorporado en el teléfono inteligente es únicamente compatible con frecuencias duales para GPS y Galileo en México, esto genera que la combinación de estas dos constelaciones sea en la mayoría de veces la del mejor desempeño.

## 8.5. Software de código abierto y servicios en línea para PPP-AR

Uno de los retos a los cuales se han enfrentado los investigadores dentro del área de los GNSS en los últimos 5 años son los software de procesamiento. La adquisición de datos GNSS multi-frecuencia y multi-constelación a frecuencias de muestreo altas dentro del monitoreo estructural ha permitido extraer desplazamientos en el orden de los milímetros y propiedades dinámicas como las frecuencias fundamentales que oscilan hasta los 10 Hz. Sin embargo, el archivo de observación correspondiente a mediciones de 100 Hz en un periodo mayor a la hora, puede tener un tamaño mínimo de almacenamiento de hasta 500 MB. Encontrar el software especializado que tenga la compatibilidad de procesar archivos grandes a través de la técnica de PPP-AR, RTK y cinemático/estático relativo fue uno de los objetivos alcanzados en este trabajo de tesis. PRIDE-PPPAR es el software de código abierto que alcanza el mejor desempeño en precisión y exactitud. PRIDE-PPPAR es capaz de procesar archivos RINEX de hasta 2 GB muestreados a 50 Hz. Por otro lado, RTKLib es el software ideal para el procesamiento de datos en modo cinemático/estático relativo y puede alcanzar precisiones similares a las obtenidas con el software científico TRACK. También, es posible utilizar RTKLib para RTK con tasas de frecuencias de hasta 20 Hz.

## 8.6. Caso de estudio: puente atirantado El Carrizo

El desempeño de los receptores GNSS de bajo costo en el monitoreo de desplazamientos y frecuencias modales sobre un puente atirantado fue evaluado por primera vez en México y en el mundo. Los resultados alcanzados por los receptores de bajo costo fueron comparados con los derivados de receptores GNSS de grado geodésico y un modelo numérico del puente, los cuales fueron establecidos como referencias. La diferencia entre los desplazamientos estáticos medidos por los receptores de bajo costo y los de grado geodésico

---

<sup>1</sup>Vazquez-Ontiveros et al. (2023)

no superó los 10 mm. Además, fue posible extraer la frecuencia fundamental de la sección atirantada del puente El Carrizo con un error menor al 1 % al ser comparada con la frecuencia extraída por acelerómetros profesionales. También, fue posible extraer las frecuencias de hasta 5 modos de vibrar. Estos resultados demuestran la posibilidad de uso de esta tecnología de bajo costo en la detección de desplazamientos y frecuencias naturales de alta precisión sobre puentes flexibles. La capacidad de una alta frecuencia de muestreo de los receptores GNSS de bajo costo (hasta 25 Hz) los convierte en una herramienta precisa para medir propiedades dinámicas sobre puentes, ya sea rígidos o flexibles.

El uso de las mediciones GNSS registradas por un teléfono inteligente para monitorear desplazamientos estáticos y frecuencias modales sobre un puente atirantado se evalúa por primera vez en este trabajo de tesis, representando una nueva aplicación novedosa de los teléfonos inteligentes. El teléfono inteligente estudiado fue el Xiaomi Mi 8, al ser el primer teléfono inteligente en el mundo en poder registrar mediciones GNSS de doble frecuencia. Los desplazamientos estáticos medidos por el Xiaomi Mi 8 fueron comparados con los registrados por un receptor GNSS de grado geodésico, y la frecuencia fundamental con la extraída por acelerómetros profesionales. En primer lugar, el receptor geodésico registró desplazamientos en la componente horizontal de  $\pm 5$  mm, mientras el Xiaomi Mi 8,  $\pm 8$  mm, es decir, una diferencia menor a 5 mm. Por otro lado, en la componente vertical, el receptor geodésico registró desplazamientos max/min de  $+2/-2.6$  cm, mientras el Xiaomi Mi 8, max/min de  $+2.2/-2.3$  cm. La diferencia entre los desplazamientos verticales fue menor a 1 cm, lo que representa la capacidad del Xiaomi Mi 8 para detectar estos desplazamientos sobre puentes atirantados. Por otro lado, de las series temporales tridimensionales medidas por el Xiaomi Mi 8 fue posible extraer la frecuencia fundamental de la sección atirantada del puente El Carrizo con un error del 0.22 %, con respecto al acelerómetro profesional. En resumen, el teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 es capaz de identificar desplazamientos en el orden de  $\pm 3$  cm en la componente vertical y de aproximadamente  $\pm 5$  mm en la horizontal. Por lo tanto, el Xiaomi Mi 8 representa una opción factible cuando se desean hacer monitoreos sobre estructuras flexibles, donde los desplazamientos máximos se encuentren en el orden de los  $\pm 5$  cm.

## 8.7. Principales contribuciones al conocimiento

Las principales contribuciones de esta tesis al nuevo conocimiento se resumen a continuación:

- 1 Evaluación de la calidad de señales GNSS de diferentes constelaciones a partir de un método teórico para receptores/antenas GNSS de bajo costo y teléfonos inteligentes.
- 2 Análisis de los indicadores de calidad SNR y multipath por época para 100 satélites GNSS disponibles en el Noroeste de México.
- 3 Rendimiento del posicionamiento 3D de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8 al Noroeste de México utilizando diferentes combinaciones de constelaciones GNSS.
- 4 Establecimiento de un sistema RTK de base única con receptores GNSS de bajo costo para la detección de desplazamientos dinámicos horizontales y verticales.

- 5 Evaluación del rendimiento en posicionamiento de los parámetros de calibración de la antena ANN-MB-00.
- 6 Evaluación y análisis de 10 software de código abierto y 5 servicios en línea para el procesamiento de datos GNSS a través de la técnica PPP en modo estático.
- 7 Rendimiento de receptores GNSS de bajo costo de doble frecuencia en el monitoreo de desplazamientos y propiedades dinámicas de un puente atirantado. Extracción de las frecuencias de los modos de vibrar, de las series temporales medidas por receptores GNSS de bajo costo a través de procesamiento digital de señales.
- 8 Monitoreo de desplazamientos estáticos y extracción de frecuencias naturales de un puente atirantado a partir de las mediciones GNSS de un teléfono inteligente Xiaomi Mi 8, aplicando el método de procesamiento de datos GNSS relativo cinemático.

## 8.8. Trabajos futuros

En esta tesis doctoral se proponen las primeras metodologías de evaluación de desplazamientos sobre puentes a través de observaciones GNSS de receptores de bajo costo y teléfonos inteligentes. Además, por primera vez se reporta la aplicación de un teléfono inteligente para monitorear un puente atirantado a través de observaciones duales GNSS, logrando identificar la frecuencia fundamental de la estructura con un error del 0.22 % al ser comparado con un acelerómetro profesional. Por lo tanto, se crea una nueva línea de investigación dentro del Monitoreo de la Salud Estructural denominada: SHM mediante observaciones GNSS de doble frecuencia desde un teléfono inteligente. Por otro lado, se logró proponer una metodología novedosa para registrar desplazamientos horizontales, y verticales en tiempo real de hasta 5 mm implementando únicamente receptores GNSS de bajo costo. Sin embargo, hay cuestiones que no se han tomado en cuenta en esta tesis doctoral y que necesitan más investigación. Por ejemplo, en la evaluación de la señal GNSS y el rendimiento en posicionamiento del teléfono inteligente solamente se evaluó el modelo Xiaomi Mi 8. Actualmente, las nuevas series 23 y 24 de Samsung tienen incorporado el chip dual GNSS BCM47765 que admite las bandas de frecuencias B1 y B2a de la constelación BeiDou, logrando observaciones duales de tres constelaciones. Lo que podría garantizar una mayor precisión y un seguimiento a un número más grande de satélites. Además, evaluar el rendimiento de la técnica PPP en el modelo Xiaomi Mi 8 y las series 23 y 24 de Samsung abre la posibilidad de aumentar la precisión y alcanzar monitoreo en tiempo real cuando reciben correcciones de una estación de referencia. También, probar diferentes modelos de teléfonos inteligentes compatibles con mediciones duales GNSS aportaría nuevo conocimiento al monitoreo de la salud estructural en puentes, identificando el modelo con mejor rendimiento.

En esta tesis doctoral se demostró que los receptores GNSS de bajo costo son capaces de detectar desplazamientos sobre un puente atirantado similares a los alcanzados por equipo de grado geodésico. Además, los receptores de bajo costo lograron identificar las

primeras cinco frecuencias de los modos de vibrar con un error del 0.22 % al ser comparados con los de referencia extraídos por acelerómetros y el modelo matemático del puente. Estos alcances significativos de la tecnología GNSS de bajo costo se lograron debido al postprocesamiento a través del método relativo cinemático o también llamado diferencias dobles (DD). Por otro lado, nuevas técnicas absolutas de posicionamiento GNSS han ganado popularidad en los últimos 5 años, como el caso de PPP-RTK que consiste en obtener posicionamiento en tiempo real con un único receptor debido a las correcciones de órbita y reloj que recibe a través de servidores del IGS. Esta técnica aun no se ha evaluado en casos de estudio con la tecnología GNSS de bajo costo, lo que representa una oportunidad novedosa para futuros proyectos de monitoreo. En este estudio, se utilizó el receptor modelo ZED-F9P de la empresa u-blox para realizar el monitoreo sobre el puente El Carrizo, sin embargo, actualmente existen nuevos modelos de receptores GNSS de bajo costo con mejores características, como: mayor compatibilidad de satélites, una frecuencia de muestreo más alta, seguimiento a todas las señales GNSS disponibles. Además, un sistema RTK de monitoreo sobre un puente es uno de los trabajos futuros que se van a implementar debido a la potencialidad que presentaron para identificar desplazamientos cuando se utilizan frecuencias de muestreo mayores a 1 Hz.

Las metodologías novedosas propuestas en esta tesis doctoral para el monitoreo de desplazamientos en tiempo real a partir de receptores GNSS de bajo costo no solo aplica para puentes, sino para cualquier estructura civil que tenga cobertura para recibir señales GNSS. Por ejemplo, las presas y los edificios. Las presas deberían ser monitoreadas en tiempo real utilizando una frecuencia de muestreo baja por los receptores de bajo costo al ser estructuras que presentan desplazamientos lentos en periodos de tiempo largo. Por otro lado, los edificios antiguos construidos sobre zonas sísmicas deberían ser monitoreados en tiempo real por tecnología GNSS de bajo costo para detectar daños relacionados con desplazamientos horizontales o hundimientos derivados por el efecto de los sismos. Consecuentemente, diferentes disciplinas de las geociencias han tomado la tecnología GNSS como una herramienta complementaria para realizar estudios de monitoreo y entender con mayor precisión los fenómenos estudiados. En la Vulcanología utilizan esta tecnología GNSS para monitorear la expansión del cuerpo del Volcán y relacionar estas deformaciones con posibles erupciones o actividades volcánicas. Sin embargo, los equipos instalados sobre el cuerpo del Volcán son susceptibles a dañarse y deben ser reemplazados, lo que ocasiona un gasto enorme en la adquisición de equipos de grado geodésico. Por lo cual, los receptores de bajo costo representan una opción potencial para esta rama de la geología. Actualmente, en México algunos investigadores han mostrado interés de utilizar esta tecnología para instrumentar algunos Volcanes activos dentro de nuestro país, lo cual representa una oportunidad de aplicación para los receptores GNSS de bajo costo. También, el Servicio Sismológico Nacional ha mostrado interés en utilizar esta tecnología de bajo costo como parte de su red de monitoreo sísmico temporal, debido a las capacidades de esta tecnología en detectar los movimientos del terreno con una precisión milimétrica. Por otro lado, evaluar en tiempo real los desplazamientos ocasionados por fallas geológicas es uno de los objetivos que tienen algunos gobiernos estatales en México. Esto derivado a la necesidad de informar a la sociedad sobre los peligros que corren cuando construyen sus casas cerca de la ubicación de una falla geológica.

Existen otras aplicaciones donde se pueden implementar las observaciones GNSS de receptores de bajo costo y teléfonos inteligentes como casos de estudio. A continuación, se resumen los posibles trabajos futuros donde se implementa la tecnología GNSS de bajo costo:

- 1 Implementar un sistema RTK con receptores GNSS de bajo costo sobre un puente.
- 2 Implementar la técnica PPP-AR en mediciones GNSS sobre puentes con receptores de bajo costo. Además, evaluar el rendimiento de combinaciones GNSS.
- 3 Evaluar la calidad de las señales y el rendimiento en posicionamiento de diferentes modelos de teléfonos inteligentes: Las series S23 y S24 de Samsung.
- 4 Aplicar las metodologías propuestas en esta tesis doctoral en otras estructuras como edificios y presas.
- 5 Automatización de un sistema de monitoreo en tiempo real:
  - Desplazamientos semi-estáticos y dinámicos.
  - Frecuencias modales.
  - Torsión.
- 6 Extrapolar la propuesta metodológica a otras áreas de las geociencias:
  - Monitoreo de Volcanes.
  - Monitoreo de fallas geológicas.
  - Monitoreo de deslizamientos.
  - Monitoreo de ondas sísmicas.
  - Monitoreo de vehículos de transporte de carga.
  - Seguros de vehículos.

# Anexo A

## Publicaciones durante este estudio de doctorado

### Publicaciones en revistas revisadas por pares

- 1 **Vazquez-Ontiveros, J. Rene.**, Martinez-Felix, Carlos A., Melgarejo-Morales, Angela., Retegui-Schiettekatte, Leire., Vazquez-Becerra, G. Esteban., Gaxiola-Camacho, J. Ramon (2023). Assessing the Quality of Raw GNSS Observations and 3D Positioning Performance Using the Xiaomi Mi 8 Dual-Frequency Smartphone in Northwest Mexico. *Earth Science Informatic*. doi: [10.1007/s12145-023-01148-8](https://doi.org/10.1007/s12145-023-01148-8)
- 2 **Vazquez-Ontiveros, J. Rene.**, Padilla-Velazco, Jorge., Gaxiola-Camacho, J. Ramon y Vazquez-Becerra G. Esteban. (2023). Evaluation and analysis of the accuracy of open-source software and online services for PPP processing in static mode. *Remote Sensing*, 15(8). doi: <https://doi.org/10.3390/rs15082034>
- 3 **Vazquez-Ontiveros, J. Rene.**, Ruiz-Armenteros, A. Miguel., de Lacy, M. Clara., Gaxiola-Camacho, J. Ramon., Anaya-Diaz, Miguel y Vazquez-Becerra G. Esteban. (2023). Risk Evaluation of the Sanalona Earthfill Dam Located in Mexico Using Satellite Geodesy Monitoring and Numerical Modeling. *Remote Sensing*, 15 (3), 819. doi: <https://doi.org/10.3390/rs15030819>
- 4 **Vazquez-Ontiveros, J. Rene.**, Martinez-Felix, Carlos. A., Vazquez-Becerra, G. Esteban., Gaxiola-Camacho, J. Ramon., Melgarejo-Morales, Angela., y Padilla-Velazco, Jorge. (2022). Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. *Advances in Space Research*, 69(1), 319-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.018>
- 5 Gaxiola-Camacho, J. Ramon., **Vazquez-Ontiveros, J. Rene.**, Guzman-Acevedo, G. M., Bennett, R. A., Reyes-Blanco, J. M., and Vazquez-Becerra, G. E. (2021). Real-Time Probabilistic Structural Evaluation of Bridges Using Dynamic Displacements Extracted via GPS Technology. *Journal of Surveying Engineering*, 147(2), 04021002. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000350)

- 
- 6 **Vazquez-Ontiveros, J. Rene.**, Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., and Gaxiola-Camacho, J. R. (2021). Implementation of PPP-GNSS measurement technology in the probabilistic SHM of bridge structures. *Measurement*, 173, 108677. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108677>

# Anexo B

## Premios y experiencia profesional durante este estudio de doctorado

### Premios

- 1 Premio al artículo destacado para jóvenes científicos 2022-*Advances in Space Research*, Comité de Investigación Espacial, 2024

### Experiencia profesional

1 *Journal reviewer*:

- *Advances in Space Research (ASR)*.
- *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.
- *Measurement*