

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



**EVALUACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS SEMI-ESTÁTICOS,
DINÁMICOS Y FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DEL
PUENTE JUÁREZ USANDO TECNOLOGÍA GPS**

TESIS

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

PRESENTA:

GERMÁN MICHEL GUZMÁN ACEVEDO

DIRECTOR(ES):

**DR. G. ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA
DR. JOSÉ RAMÓN GAXIOLA CAMACHO**

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO SEPTIEMBRE DEL 2017

Dedicatoria

Todo mi esfuerzo para culminar este trabajo, así como todo lo que he realizado, estoy realizando y realizaré, se los dedico a las dos cosas más importantes de mi vida, mi familia Guzmán Acevedo que es mi corazón y a mi novia Elisa Zúñiga Aguilar que lo hace latir. Mi familia me ha brindado herramientas, amor y apoyo incondicional para lograr cualquier cosa que me proponga. Por otro lado, Elisa Zúñiga ha sido mi mejor amiga, mi apoyo, consejera, novia y confidente, desde antes de la maestría, en los buenos y malos momentos, tú siempre has confiado en mí, me acompañaste cuando me desvelaba, te compartí mi estrés, me animaste y me dijiste que siguiera adelante. Por esto y muchas otras cosas, considero que este triunfo es tuyo también e incluso siento que tu nombre debe de estar en la portada junto al mío.

Agradecimientos

Principalmente, le agradezco a la Universidad Autónoma de Sinaloa por ser mi casa de estudios en mis procesos de licenciatura y maestría. Externo mi gratitud a mis directores de tesis: Dr. G. Esteban Vázquez Becerra, Dr. José Ramón Gaxiola Camacho, ya que sus consejos y disposición, allanaron el camino para desarrollar y culminar el presente trabajo de investigación. También, es importante resaltar el apoyo que me proporcionaron mis amigos compañeros de la Facultad de Informática y de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio en ciertas materias. Por último le agradezco al CONACyT por brindarme la beca que me permitió enfocarme por completo en mis estudios y hacer una visita de investigación en la Universidad de Arizona.

Tabla de Contenido

Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	xvii
Abstract	xviii
Resumen	xx
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Área de estudio	5
1.4 Objetivos	7
1.5 Hipótesis de investigación	8
1.6 Antecedentes	8
2 Marco Teórico	12
2.1 Introducción	12
2.2 GNSS	13
2.2.1 Definición de GPS	13
2.2.2 Componentes principales del GPS	15
2.2.3 Señal GPS	16
2.2.4 Observaciones GPS	18
2.2.5 Pseudo-distancia	18
2.2.6 Fase o portadora	19
2.2.7 Tipos de Posicionamiento	21

2.2.8	Estático vs Cinemático	21
2.2.9	Tiempo real vs post-proceso	21
2.2.10	Tipo de Posicionamiento con los receptores GPS	22
2.2.11	Posicionamiento relativo de diferencia simple . .	22
2.2.12	Posicionamiento relativo de diferencia doble . . .	24
2.2.13	Posicionamiento relativo cinemático	25
2.2.14	Diseño general de un receptor GNSS	26
2.2.15	Fuentes de error	26
2.2.16	Errores del reloj del receptor y del satélite	27
2.2.17	Efectos relativos	27
2.2.18	Errores de la órbita del satélite	27
2.2.19	Multi-trayectoria	28
2.2.20	Efectos atmosféricos	28
2.3	Series de tiempo	30
2.3.1	Filtros	30
2.4	Teoría de la probabilidad	31
2.4.1	Función de densidad de probabilidad	32
2.4.2	Función de distribución acumulativa	33
2.5	Monitoreo de estructuras de ingeniería con GPS	34
2.5.1	Tipos de cargas estructurales	34
2.5.2	Movimientos estructurales	35
2.5.3	Monitoreo de puentes	36
2.5.4	Límites de Diseño del Manual AASHTO	37
2.5.5	Teorema de Nyquist-Shannon	37
2.5.6	Resonancia estructural	39
2.5.7	Modos de vibrar	39
2.5.8	Transformada rápida de Fourier	39
3	Materiales y métodos	41
3.1	Introducción	41
3.1.1	Receptores geodésicos GPS	42
3.1.2	Software Topcon Tools	42
3.1.3	MATLAB	43
3.2	Medición sobre las estaciones 373H y 377C de la RGNP	43
3.2.1	Descripción de los monumentos de medición . .	45
3.3	Campaña de medición sobre el Puente Juárez	45

3.3.1	Planeación de las mediciones	46
3.4	Propuesta metodológica para el análisis de las series de tiempo recolectadas por el GPS	50
3.4.1	Series de tiempo de desplazamiento aparente	51
3.4.2	Filtrado sobre las series de tiempo	52
3.4.3	Filtro de Media móvil	53
3.4.4	Filtro Chebyshev	53
3.4.5	Desplazamientos resultantes del filtrado	55
3.4.6	Desplazamientos semi-estáticos	56
3.4.7	Probabilidad de falla	57
3.4.8	Desplazamientos dinámicos	60
3.4.9	Frecuencias características del Puente Juárez	62
4	Resultados	64
4.1	Introducción	64
4.2	Resultados de la primera campaña de medición	64
4.2.1	Desplazamiento semi-estático de la primera campaña	65
4.2.2	Desplazamiento dinámico de la primera campaña	73
4.2.3	Frecuencias características de la primera campaña de medición	76
4.3	Resultados de la segunda campaña de medición	78
4.3.1	Desplazamiento semi-estático de la segunda campaña	78
4.3.2	Desplazamiento dinámico de la segunda campaña	83
4.3.3	Frecuencias características de la segunda campaña	85
4.4	Comparación entre la primera y segunda campaña de medición	88
5	Conclusiones	93
5.1	Conclusiones y Recomendaciones	93
	Bibliografía	97
	Anexos A Código en MATLAB	101
	Anexos B movimiento Semi-estático de apEN2	114
	Anexos C histogramas semi-estáticos de ZEN2	125

TABLA DE CONTENIDO

vi

Anexos D PDF y límites estación ZEN2	136
Anexos E Comportamiento dinámico de ZEN2	147
Anexos F Frecuencias características ZEN2	158

Lista de Figuras

1.1	Derrumbe del Puente Tacoma Narrows (cortesía de la página web: txstate.edu).	3
1.2	Condiciones actuales del Puente Juárez.	4
1.3	Puente Juárez.	6
1.4	Monitoreo del Puente Humber (cortesía de [2]).	8
1.5	Puente Wildford (cortesía de [25]).	9
1.6	Puente Forth Road (cortesía de [28]).	10
2.1	Constelación GPS (cortesía de [12]).	15
2.2	Segmento de control del sistema GPS (cortesía de [12]).	16
2.3	Señal GPS (cortesía de [14])	17
2.4	Posicionamiento relativo de diferencia simple.	23
2.5	Posicionamiento relativo de diferencia doble.	24
2.6	Diseño de receptor geodésico GNSS (cortesía de [14]). .	26
2.7	Efecto de la Multi-trayectoria.	28
2.8	Error producido por la atmósfera (cortesía de la página web: inta.es).	29
2.9	Ejemplo de los filtros ideales (cortesía de la página web: electronics-tutorials.ws).	31
2.10	Ejemplo PDF en la distribución normal (cortesía de [36]).	32
2.11	Ejemplo CDF en la distribución normal (cortesía de [36]).	33
2.12	Carga del viento y la respuesta de la estructura (cortesía de [26]).	35
2.13	Vibración producida por cargas dinámicas (cortesía de [26]).	36
2.14	Ejemplo del teorema de Nyquist-Shannon (cortesía de [26]).	38

3.1	Receptores GPS (cortesía de la página web: ebay.com).	42
3.2	Localización de la estación de control (cortesía de Google Earth, 2017).	44
3.3	Colocación del receptor GPS Geomax sobre el puente (ZEN2).	45
3.4	Posición de los receptores GPS sobre el Puente Juárez (cortesía de [32]).	46
3.5	Configuración del software Trimble Planning online. . .	47
3.6	Elevación de satélites.	48
3.7	Número de satélites.	48
3.8	DOPs.	49
3.9	Visibilidad de satélites.	49
3.10	Vista de cielo.	50
3.11	Vista Global.	50
3.12	Series del tiempo crudas de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).	51
3.13	Desplazamiento aparente de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).	52
3.14	Comparando Filtros Chebyshev con respecto a otros filtros (cortesía de la página web: en.wikipedia.org). . . .	54
3.15	Diseño del filtro (cortesía de página web: mathworks.com).	55
3.16	Desplazamiento aparente y semi-estático de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).	56
3.17	Histogramas y PDF de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).	58
3.18	PDF y límites de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).	59
3.19	Desplazamiento dinámico de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).	61
3.20	Comportamiento del Filtro Chebyshev.	62
3.21	Frecuencias características del Puente Forth Road (cortesía de [25]).	63
4.1	Desplazamiento aparente y desplazamiento semi-estático para la estación ZEN2 (sesión 1 de 15/02/2016).	65

4.2	Desplazamiento aparente y desplazamiento semi-estático para la estación ZEN2 (sesión 2 de 15/02/2016).	66
4.3	Desplazamiento aparente y desplazamiento semi-estático para la estación ZEN2 (sesión 3 de 15/02/2016).	66
4.4	Histograma y PDF de ZEN2 (sesión 1 15/02/2016). . .	67
4.5	Histograma y PDF de ZEN2 (sesión 2 de 15/02/2016). . .	67
4.6	Histograma y PDF de ZEN2 (sesión 3 de 15/02/2016). . .	68
4.7	PDF y Límites de ZEN2 (sesión 1 15/02/2016).	68
4.8	PDF y Límites de ZEN2 (sesión 2 15/02/2016)	69
4.9	PDF y Límites de ZEN2 (sesión 3 15/02/2016)	69
4.10	Promedio de la p_f por sesión considerando todos los receptores (15/02/2016 a 21/02/2016).	71
4.11	p_f por receptor (L/800) (15/02/2016 a 21/02/2016). . .	72
4.12	p_f por receptores (L/1000) (15/02/2016 a 21/02/2016). . .	72
4.13	Desplazamiento dinámico en ZEN2 (sesión 1 de 15/02/2016). . .	73
4.14	Desplazamiento dinámico en ZEN2 (sesión 2 de 15/02/2016). . .	74
4.15	Desplazamiento dinámico en ZEN2 (sesión 3 de 15/02/2016). . .	74
4.16	Máximos desplazamientos dinámicos por sesión y estación (15/02/2016 a 21/02/2016).	75
4.17	Frecuencias características en ZEN2 (sesión 1, 15/02/2016). . .	76
4.18	Frecuencias características en ZEN2 (sesión 2, 15/02/2016). . .	77
4.19	Frecuencias características en ZEN2 (sesión 3, 15/02/2016). . .	77
4.20	Semi-estático en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).	78
4.21	Semi-estático en ZEN1 (sesión 2, 16/02/2017).	79
4.22	Semi-estático en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).	79
4.23	Semi-estático en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).	80
4.24	PDF y límites en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).	80
4.25	PDF y límites en ZEN1 (sesión 2, 16/02/2017).	81
4.26	PDF y límites en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).	81
4.27	PDF y límites en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).	82
4.28	Movimiento dinámicos en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).	83
4.29	Movimiento dinámicos en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).	83
4.30	Movimiento dinámicos en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).	84
4.31	Movimiento dinámicos en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).	84
4.32	Máximo desplazamiento dinámico en la segunda campaña GPS (16/02/2017).	85

4.33	Frecuencias características en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).	86
4.34	Frecuencias características en ZEN1 (sesión 2, 16/02/2017).	86
4.35	Frecuencias características en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).	87
4.36	Frecuencias características en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).	87
4.37	Probabilidad de falla de la primera campaña en la sesión de 12-13 horas (15/02/2016 a 21/02/2016).	88
4.38	Probabilidad de falla de la primera campaña en la sesión de 17-18 horas (15/02/2016 a 21/02/2016).	89
B.1	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1	114
B.2	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2	115
B.3	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3	115
B.4	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1	116
B.5	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2	116
B.6	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3	117
B.7	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1	117
B.8	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2	118
B.9	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3	118
B.10	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1	119
B.11	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2	119
B.12	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3	120
B.13	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1	120

B.14	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2	121
B.15	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3	121
B.16	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1	122
B.17	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2	122
B.18	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3	123
B.19	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1	123
B.20	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2	124
B.21	Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3	124
C.1	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1	125
C.2	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2	126
C.3	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3	126
C.4	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1	127
C.5	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2	127
C.6	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3	128
C.7	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1	128
C.8	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2	129
C.9	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3	129

C.10	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1	130
C.11	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2	130
C.12	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3	131
C.13	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1	131
C.14	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2	132
C.15	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3	132
C.16	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1	133
C.17	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2	133
C.18	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3	134
C.19	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1	134
C.20	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2	135
C.21	histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3	135
D.1	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1	136
D.2	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2	137
D.3	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3	137
D.4	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1	138
D.5	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2	138

D.6	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3	139
D.7	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1	139
D.8	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2	140
D.9	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3	140
D.10	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1	141
D.11	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2	141
D.12	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3	142
D.13	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1	142
D.14	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2	143
D.15	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3	143
D.16	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1	144
D.17	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2	144
D.18	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3	145
D.19	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1	145
D.20	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2	146
D.21	PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3	146
E.1	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1	147

E.2	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2	148
E.3	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3	148
E.4	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1	149
E.5	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2	149
E.6	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3	150
E.7	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1	150
E.8	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2	151
E.9	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3	151
E.10	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1	152
E.11	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2	152
E.12	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3	153
E.13	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1	153
E.14	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2	154
E.15	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3	154
E.16	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1	155
E.17	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2	155
E.18	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3	156
E.19	desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1	156

E.20 desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2	157
E.21 desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3	157
F.1 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1	158
F.2 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2	159
F.3 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3	159
F.4 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1	160
F.5 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2	160
F.6 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3	161
F.7 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1	161
F.8 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2	162
F.9 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3	162
F.10 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1	163
F.11 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2	163
F.12 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3	164
F.13 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1	164
F.14 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2	165
F.15 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3	165

F.16 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1	166
F.17 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2	166
F.18 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3	167
F.19 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1	167
F.20 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2	168
F.21 Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3	168

Lista de Tablas

3.1	Coordenadas UTM (zona 13 Norte) de las estaciones 373H y 377C	44
4.1	Probabilidad de falla sobre la estación ZEN2 primera campaña de medición.	70
4.2	Probabilidad de falla de la segunda campaña de medición.	82
4.3	Media y desviación estándar de la probabilidad de falla (primera campaña de medición, 15/02/2016 a 21/02/2016).	90
4.4	Probabilidad de falla de la segunda campaña de medición y su correspondiente error probable basado en los datos de la primera campaña de medición.	91
4.5	Media y desviación estándar de los máximos movimientos dinámicos del Puente Juárez (primera campaña de medición, 15/02/2016 a 21/02/2016).	91
4.6	Máximos desplazamientos dinámicos de la segunda campaña de medición y su correspondiente error probable basado en los datos de la primera campaña de medición.	92

Abstract

The main objective of this research is to determine the structural behavior of the Juarez Bridge located in Culiacan, Mexico, using Global Positioning System (GPS). The Juarez Bridge connects two important zones of the city, it is a reinforced concrete structure built approximately 45 years ago, and it has a length closely to 200 meters. The monitoring methodology consisted in logically mounting GPS receivers at the mid-span of the bridge for recollecting geo-data. The positions were obtained in two different campaigns using a sample rate of 1 Hz and 5 Hz, respectively; when the bridge was affected by critical traffic loading. The acquired data were used for calculating the dynamic displacements applying Chebyshev filter and semi-static displacements employing moving average filter. Using dynamic and semi-static displacements the bridge performance was analyzed by calculating the characteristic frequencies and probability of failure, respectively. However, the characteristic frequencies were not found due that they are beyond the range of 0 to 2.5 Hz and/or the modal frequencies were not excited enough to bring information in the power spectrum graph. On the other hand, calculating the probability of failure comparing the semi-static displacements in the vertical component using the *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) deflection limits, demonstrated that the average of the probability of failure in 17 sessions out of 21 were more than 40% in the first campaign (both campaigns have a similar behavior). However, some sessions produced values higher than 80%. In the case of the deterministic dynamic displacements, it was obtained that first and second campaign have a maximum displacement at the ZEN2 benchmark of 0.26 meters. In conclusion, although the behavior

of the Juarez Bridge is considerably inappropriate, it does not mean that it will fall down. However, it is important to constantly evaluate the bridge structure to detect possible changes on its performance.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo de investigación se basó en evaluar el comportamiento del Puente Juárez, localizado en Culiacán, México, mediante la aplicación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés); el Puente Juárez conecta dos partes importantes de la ciudad, es una estructura de concreto reforzado, fue construido hace aproximadamente 45 años y tiene una longitud de 200 metros. El proceso de monitoreo consistió en recolectar datos a través de GPS sobre la loza central en dos diferentes campañas de medición con intervalos de 1 y 5 Hz, respectivamente, cuando el puente es afectado por cargas cotidianas. Los datos obtenidos son utilizados para calcular los desplazamientos dinámicos usando el filtro Chebyshev y semi-estáticos aplicando el filtro media móvil. Separando ambos comportamientos se analiza la condición del Puente Juárez a través de la probabilidad de falla y las frecuencias características. Las frecuencias características del Puente Juárez fueron obtenidas usando la transformada rápida de Fourier y los desplazamientos dinámicos. Sin embargo, el resultado de no haber determinado las frecuencias características del puente se debe a que éstas no se ubican en el rango de frecuencias del 0 al 2.5 Hz y/o las cargas no excitaron los modos de vibrar del puente lo suficiente para que se observen en el potencial espectral. Por otro lado, calculando la probabilidad de falla comparando los desplazamientos semi-estáticos con respecto a los límites de deflexión proporcionados en el manual de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), se obtuvo que el promedio de probabilidad de falla en 17 de 21 sesiones es mayor al 40% en la primera campaña de medición (resultados muy similares en la segunda campaña), sin embargo, en algunas sesiones la

probabilidad de falla es mayor al 80%. En el caso del desplazamiento dinámico se encontró en ambas campañas un máximo desplazamiento de hasta 0.26 metros en la estación ZEN2. Se concluye que aunque el Puente Juárez tenga un muy mal desempeño no significa que éste va colapsar, no obstante, es obligatorio mantener un monitoreo constante de la estructura, para corroborar si se sigue comportando igual o su situación empeora.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Saber si un tópico específico de investigación está dirigido al área de las ciencias de la información es un poco complicado, puesto que su definición no es muy conocida y se puede malinterpretar con un enunciado muy ambiguo; por esta razón, es obligatorio conocer su concepto correctamente. Según [4], ciencia de la información es: *“La disciplina que investiga las propiedades y el comportamiento de la información, las fuerzas que rigen su flujo y los métodos para procesarla, a fin de obtener accesibilidad y utilización óptima. Está interesada en un conjunto de conocimientos relacionados con el origen, colección, organización, almacenamiento, recuperación, interpretación, transmisión, transformación y utilización de la información. Incluye la investigación de las representaciones de información en los sistemas naturales y artificiales, el estudio de instrumentos y técnicas de procesamiento de la información, tales como computadoras y sistemas de programación.”* De acuerdo con la definición anterior de ciencias de la información, cualquier área donde se recolecten datos, procesen, almacenen y se analicen para tener información que solucione una problemática en particular, se encuentra dentro de ella. Las disciplinas se pueden diferenciar entre sí, simplemente en función de la finalidad que se le otorgue a la información; en nuestro caso, el área de interés es la geomática, porque los datos son recolectados mediante instrumentos y técnicas geodésicas, pero su procesamiento im-

plica el uso de software y programas de computación. Geomática es un término que se les da a las ciencias que generan información geográfica y que se auxilian de la informática para el tratamiento, manejo y análisis de datos. Por otro lado, la geodesia es la ciencia que se encarga de medir la forma y figura de la Tierra incluyendo su campo de gravedad externo. Dentro de las mediciones que se realizan para conocer las dimensiones de elementos geográficos, existen dos clasificaciones: directas e indirectas; la directa utiliza métodos clásicos de medición como nivelación, poligonación y triangulación; mientras un método indirecto puede ser la fotogrametría. Comúnmente, métodos geodésicos de medición con una alta precisión se aplican al monitoreo de obras civiles, por ejemplo: edificios, presas y puentes, para evaluar su comportamiento.

Actualmente alrededor del mundo una de las más importantes obras de ingeniería en el aspecto económico de un país son los puentes, ya que es una parte fundamental en la red de transporte; sin embargo, un conjunto de factores tales como físicos, humanos y naturales tienden a deteriorar la estructura de dicha edificación, lo cual es peligroso para las personas por el posible colapso de estas estructuras civiles ; por ejemplo, un desastre muy sonado en el área de ingeniería civil fue el derrumbe del Puente Tacoma Narrows en Estados Unidos el año 1940 (Figura 1.1), su derrumbe fue producido debido a que la oscilación del viento coincidió con la frecuencia fundamental del puente, ocasionando el fenómeno de resonancia.

Las infraestructuras civiles son diseñadas para tener un periodo de vida en el cual su comportamiento en teoría va ser el adecuado, también existe la posibilidad de que fuera de este tiempo, la estructura se siga comportando correctamente, así como el peligro de que surja un comportamiento anormal en cualquier momento, de manera que es necesario aplicar una metodología que sea eficaz en tiempo y costo para el monitoreo de obras ingenieriles vulnerables a comportamientos estructurales no adecuados. En la literatura puede ser encontrado que la evaluación estructural se efectúa a través de acelerómetros, no obstante, su precisión en tiempo real es cuestionable, se necesita realizar una doble integración para calcular desplazamientos [5] y no pueden determinar los desplazamientos semi-estáticos [15]. Como una opción alternativa, muchas investigaciones han demostrado la capacidad del Sistema de



(b) Derrumbe.

(c) Movimiento.

Figura 1.1: Derrumbe del Puente Tacoma Narrows (cortesía de la página web: txstate.edu).

Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) [2, 34, 35, 10] para el monitoreo de estructuras. Por lo tanto, este trabajo de investigación propone utilizar la tecnología GPS para analizar el desempeño del Puente Benito Juárez localizado en Culiacán, Sinaloa, México, bajo condiciones de cargas cotidianas de uso. Por lo tanto, el objetivo principal del presente trabajo consistió en evaluar el comportamiento semi-estático, dinámico y las frecuencias características del Puente Juárez por medio del análisis de series de tiempo proporcionadas por los receptores GPS. La recolección de datos geo-espaciales sobre el Puente Juárez se realizó en dos diferentes campañas; la primera empleando 8 receptores geodésicos GPS de doble frecuencia: 6 sobre el claro central del puente y los dos restantes funcionando como estaciones de control fuera del puente, los cuales midieron sobre vértices (373H y 377C) de la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP). La segunda campaña se efectuó con 3 receptores: 2 sobre la parte central del puente y el tercero como base (373H).

1.2 Planteamiento del problema

En la ciudad de Culiacán, Sinaloa, existen un conjunto de infraestructuras civiles que están en el límite de su vida útil e incluso algunas lo sobrepasan, esto representa una gran problemática que pone en riesgo la integridad de los usuarios de dichas estructuras civiles, porque en cualquier momento alguna de ellas podría colapsar. El caso de estudio de este trabajo de investigación es el Puente Benito Juárez, el cual es una estructura de concreto reforzado, construido hace aproximadamente 45 años con una longitud de 200 metros, dicho puente une la parte norte con la sur de la ciudad y su importancia radica en que miles de vehículos, bicicletas y peatones lo cruzan cada día. El puente Juárez fue diseñado inicialmente para soportar la carga vehicular sobre dos carriles con un periodo de vida útil de aproximadamente 50 años, sin embargo, en los últimos años se amplió el puente para que los automóviles transitaran usando 5 carriles, e incluso, un carril más fue agregado para una ciclo-vía. Sobre el Puente Juárez se desarrollan movimientos verticales muy grandes que son inclusive notorios cuando se transita manejando un automóvil. En la Figura 1.2 se puede observar las condiciones ac-



(a) Parte superior del puente.

(b) Parte inferior del puente.

Figura 1.2: Condiciones actuales del Puente Juárez.

tuales del Puente Benito Juárez. La Figura 1.2(a) muestra los carriles sobre los cuales circulan los carros y una grieta formada por el relleno de chapopote sobre la separación entre las losas. La Figura 1.2(b) presenta la principal causa de que el puente tenga grandes vibraciones, como se observa la unión entre la loza central y el soporte de columna es un simple asentamiento en forma de L .

Es importante mencionar que a través del tiempo los puentes sufren un deterioro producido por diversos factores, por ejemplo: cargas muertas y vivas, efecto del viento, temperatura y la fuerza hidráulica; estos factores producen cambios en el comportamiento estructural a una forma atípica. Por ello, surge la necesidad de realizar un monitoreo que determine la condición en que se encuentra la construcción, para esto se propuso monitorear el puente con GPS, el cual proporciona al usuario datos de posicionamiento, es decir, coordenadas tridimensionales (X, Y, y Z) con una precisión centimétrica e incluso al nivel de unos cuantos milímetros [14]. A pesar de lo anterior la información que proporciona el GPS es afectada por ruido causado principalmente por efectos atmosféricos, desincronización entre los relojes del satélite-receptor y multi-trayectoria que sufre la señal GPS por elementos externos alrededor de la antena; consecuentemente, adecuados filtros deben ser aplicados sobre los datos para obtener un mejor resultado.

Desde su creación, el sistema GPS ha sido utilizado en diferentes áreas de la ciencia, por ejemplo: biología, geografía, geodesia, etcétera; debido a que los diferentes tipos de posicionamientos GPS permiten estudiar fenómenos estáticos, semi-estáticos y dinámicos.

1.3 Área de estudio

La ubicación aproximada de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, está dada por las coordenadas en latitud $24^{\circ}50.526'N$ - $24^{\circ}44.525'N$ y longitud de $107^{\circ}28.696'O$ - $107^{\circ}20.071'O$ con un área aproximada de 65 km^2 , una población total de 905265 personas y 454168 vehículos de motor registrados en circulación [16]. El municipio es atravesado por cuatro ríos: Humaya, Tamazula, Culiacán (formado por la unión de los ríos Humaya y Tamazula) y San Lorenzo; por lo que, los puentes son fundamentales para el desplazamiento de una ubicación a otra dentro de la ciudad.



(a) Vista general.

(b) Vista de la parte inferior.



(c) Vista de su ubicación y proyección de la Red geodésica GPS de apoyo (cortesía de Google Earth, 2017)

Figura 1.3: Puente Juárez.

Como se mencionó, el caso de estudio de la presente investigación es el Puente Benito Juárez (Figura 1.3) localizado en la calzada de las Américas, uniendo la colonia Las Quintas con Fovissste Chapultepec, cruzando el Río Tamazula. Se considera uno de los puentes más im-

portantes de la ciudad, ya que por él transitan miles de personas con dirección al campus principal de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

1.4 Objetivos

Determinar el comportamiento dinámico, semi-estático y las frecuencias características del Puente Juárez mediante series de tiempo proporcionadas por el GPS aplicando diversos filtros; calcular la probabilidad de falla (p_f) comparando los desplazamientos semi-estáticos en la componente vertical con respecto a los límites de deflexión que señala el manual de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [1].

Por otro lado, los objetivos específicos que se plantearon fueron los siguientes:

- Recolectar información con receptores GPS sobre dos estaciones de la RGNP y la parte crítica del puente.
- Procesar los datos geospaciales proporcionados por el GPS con el software Topcon Tools v.8.2.3.
- Transformar las series de tiempo provenientes del WGS84 (World Geodetic System 1984) en desplazamiento aparente.
- Calcular los desplazamientos semi-estáticos usando el filtro media móvil.
- Determinar los desplazamientos dinámicos empleando el filtro Chebyshev.
- Determinar la distribución que siguen los desplazamientos semi-estáticos mediante histogramas.
- Obtener las frecuencias características del puente Juárez basado en los desplazamientos dinámicos y transformada rápida de Fourier.
- Comparar los desplazamientos semi-estáticos en la componente vertical con respecto a los límites de deflexión proporcionados por AASHTO para calcular la probabilidad de falla.

1.5 Hipótesis de investigación

La hipótesis con base en la cual parte este trabajo de investigación tiene sus principios en establecer que el comportamiento del Puente Juárez está fuera de lo que indica las normativas mexicanas para el uso de puentes, basadas en las recomendaciones de la AASHTO. El comportamiento del Puente Juárez se estudia utilizando la información recolectada en la parte más vulnerable de dicha estructura, considerando condiciones de mayor carga vehicular, y empleando receptores geodésicos de doble frecuencias; los cuales han sido probados con éxito en diferentes investigaciones.

1.6 Antecedentes

En la literatura se puede encontrar que la evaluación de estructuras se lleva a cabo mediante acelerómetros debido a la alta frecuencia con la que estos colectan datos; no obstante, su precisión es cuestionable en condiciones de tiempo real, se necesita aplicar una doble integral sobre aceleración para llegar al desplazamiento y no se puede determinar los desplazamientos semi-estáticos. Por el contrario la tecnología GPS ha



(a) Antena GPS montada sobre el puente. (b) Colocación del receptor GPS.

Figura 1.4: Monitoreo del Puente Humber (cortesía de [2]).

sido utilizada por muchas investigaciones de forma exitosa, debido a que proporciona desplazamientos directamente sin integración, información de los desplazamientos semi-estáticos, dinámicos y las frecuencias características de la estructura [2, 28, 9, 25]. Una de las primeras investigaciones donde se utilizó el GPS fue para analizar el comportamiento del Puente Humber localizado en Inglaterra [2], siendo un puente suspendido con una longitud de 2220 metros, soportado por dos columnas de 155.5 metros de altura. La metodología empleada fue cinemático relativo en tiempo real: 1 receptor fue colocado sobre la plataforma del puente, 1 en la columna de soporte, de igual forma se colocaron antenas para la comunicación entre las unidades GPS y su estación de referencia, recolectando datos con una frecuencia de 1 Hz. La Figura 1.4 muestra la colocación de los receptores GPS sobre el puente.

En la actualidad los puentes son construidos con diversos fines, por ejemplo: para vehículos motorizados, trenes de carga y peatones; de acuerdo al tipo de carga que soporta el puente, el diseño y los materiales de construcción serán diferentes. Así que, las investigaciones que se encuentran en la literatura científica tratan problemas de diversos tipos de puentes. Los trabajos más sobresalientes sobre monitoreo de obras de ingeniería y relacionados al área de interés de esta investigación se realizaron en los puentes que se discuten a continuación.

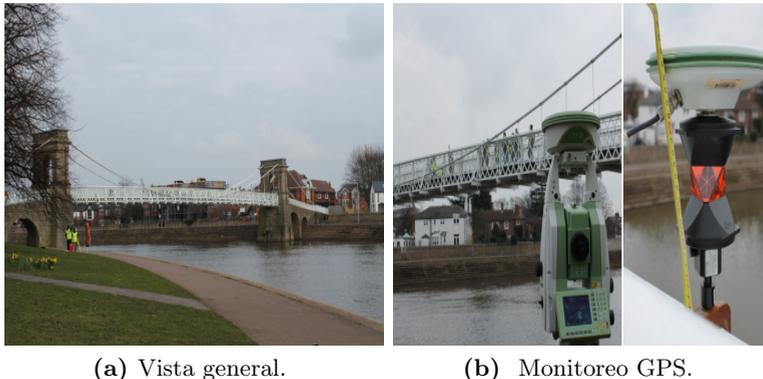


Figura 1.5: Puente Wildford (cortesía de [25]).

El Puente Talkha es uno de los dos puentes de acero en la ciudad de Mansoura (Egipto), consiste en 5 claros, una longitud total de 230 metros y una anchura de 20.75 metros; radica en un carril central por donde circula un tren de carga y dos carriles laterales para vehículos motorizados. El objetivo del estudio fue analizar los desplazamientos dinámicos que sufre el puente, para esto se usaron 3 receptores GPS y 1 estación de referencia, midiendo a 1 Hz en modo cinemático [9].

El puente peatonal suspendido Wilford (Figura 1.5) fue monitoreado mediante GPS y taquímetro electrónico. El puente fue excitado por un grupo de personas de diferentes formas (marchando, caminando, corriendo, etcétera) para analizar los desplazamientos de periodo largo, corto y calcular las frecuencias características del puente [25].

El Puente Forth Road situado en Escocia tiene una longitud de 2.5 kilómetros y su claro principal mide 1005 metros. 5 unidades GPS fueron colocadas sobre la plataforma del puente, 2 sobre las columnas de soporte y 2 estaciones de referencia, midiendo con un rango de 10 Hz. Al final, las frecuencias características del puente fueron calculadas en base a la serie de tiempo y comparadas con el valor arrojado por el modelo de elemento finito, obteniendo valores muy similares [28]. La Figura 1.6 presenta las características del Puente Forth Road.



(a) Receptor GPS sobre pasamanos. (b) Vista general del puente.

Figura 1.6: Puente Forth Road (cortesía de [28]).

En algunas investigaciones se aplican filtros matemáticos para el análisis de las series de tiempo usándolos sobre los datos de interés para extraer un conjunto de desplazamientos que producen potencial de la señal en las frecuencias altas, bajas o en un cierto rango; de esta forma se divide la problemática y se puede evaluar el comportamiento del puente de una mejor manera. Adicionalmente, es común el empleo de la transformada rápida de Fourier para consultar los datos en el dominio de la frecuencia, ya que en ocasiones es más complicado realizar un análisis sobre el dominio del tiempo [22, 33].

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Introducción

Uno de los principales problemas de las obras de ingeniería es que suelen deteriorarse con el paso del tiempo, lo que provoca que su comportamiento cambie a uno atípico. Las estructuras modifican su conducta porque son afectadas por diferentes tipos de cargas, por ejemplo cargas verticales y laterales; ambos tipos de cargas producen respuesta en la estructura que puede ser estática, dinámica o una combinación de ambas. La infraestructura civil que se analizó en este trabajo es un puente, en los cuales se suelen analizar movimientos de término largo y de término corto [20]. Para determinar los diferentes tipos de desplazamiento del puente y su frecuencia fundamental se empleó el GPS. El GPS es un instrumento geodésico de alta precisión que proporciona datos de posicionamiento al usuario. Sin embargo, como la señal viaja por aproximadamente 20,200 km esta tiende a ser afectada por diferentes elementos como la ionósfera, tropósfera, multi-trayectoria, entre otros, los cuales se tienen que tomar en consideración para aplicar metodologías como el posicionamiento relativo con diferencias simples y dobles para eliminar o reducir errores. Por otro lado, a pesar de medir con el posicionamiento relativo, las series de tiempo brindadas por el GPS contienen error. Por lo tanto, adecuados filtros matemáticos deben ser aplicados para obtener la condición del Puente Juárez. Para calcular la probabilidad de falla del Puente Juárez se compara la función de

densidad de probabilidad en la componente vertical de los desplazamientos semi-estáticos y los límites que proporciona AASHTO utilizando la función de densidad acumulativa. Al igual que se analizaron los desplazamientos semi-estáticos y dinámicos, también se intentó estudiar el Puente Juárez en el dominio de la frecuencia, esta información se obtiene al aplicar la transformada rápida de Fourier a los desplazamientos dinámicos.

2.2 GNSS

El Sistema Global de Navegación Satelital, por sus siglas en inglés GNSS, se refiere al conjunto de sistemas satelitales que proporcionan posicionamiento 3D preciso. Cada sistema es desarrollado y dirigido por un país específico o grupo en el caso de la unión europea. Algunos de los sistemas satelitales de navegación son: QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) propiedad de Japón, GPS de Estados Unidos, GALILEO (Europe's Global Satellite Navigation System) de la Unión Europea, la Federación Rusa cuenta con GLONASS (Global Navigation Satellite System), China con COMPASS (BeiDou Navigation Satellite System) y la India tiene IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System).

A pesar de que México no es poseedor de un sistema satelital de precisión, los receptores GNSS actuales tienen la capacidad de recibir información de varios sistemas a la vez produciendo datos de mayor calidad. Comúnmente, por la situación geográfica de México, GPS es el sistema más utilizado.

2.2.1 Definición de GPS

El GPS es un sistema de radio posicionamiento y tiempo. En 1973 el departamento de defensa de los Estados Unidos desarrolló GPS con fines militares y como sustituto del sistema NAVSAT (Navy Navigation Satellite System).

El sistema GPS cuenta con una constelación de satélites orbitando la Tierra a una altura aproximada de 20,200 km, otorgando posicionamiento en tiempo real, permitiendo su uso a un número ilimitado de usuarios porque cuenta con una constelación mínima de 4 satélites en cualquier

parte del mundo. La información que brinda el GPS son coordenadas espaciales con respecto al elipsoide de referencia WGS84. Las mediciones pueden ser, estáticas o en movimiento a cualquier hora del día.

De forma general, para que el usuario obtenga coordenadas, el sistema GPS determina la distancia a 4 satélites como mínimo (el cuarto satélite permite un posicionamiento único al obtener una diferencia en tiempo), conociendo las coordenadas de los satélites provistas al receptor por medio de las efemérides, las cuales son parámetros orbitales que indican la posición del satélite. La distancia satélite-receptor se calcula midiendo el tiempo de viaje de la señal desde que es enviada por el satélite hasta que es recibida, tomando en consideración que la señal viaja a la velocidad de la luz. Si cada satélite genera una esfera con un radio igual a la distancia satélite-receptor, el receptor se ubica en el cruce de las cuatro esferas, de esta forma el receptor puede calcular su posición tridimensional, velocidad y dirección del viaje.

Actualmente el GPS siendo un sistema de posicionamiento satelital es empleado en varias áreas como: agricultura, topografía, geodesia, navegación, estudio del ambiente, monitoreo de construcciones, etcétera; lo que demuestra su eficacia y flexibilidad, ya que a través de un receptor GPS se puede determinar fácilmente el posicionamiento con cierto grado de precisión.

Las características del sistema actual GPS según la página de internet oficial [12] son:

- 31 satélites operativos sin contar los residuales dejados en órbita en caso de ser reocupados, 27 como la constelación central y los restantes son de reserva.
- Altitud de aproximadamente 20,200 km.
- Periodo de 12 horas, es decir, da dos vueltas a su órbita en un día.
- Cuenta con 6 planos orbitales.
- Inclinación de 55° .
- Frecuencia fundamental de 10.23 MHz.
- Transmisión continua de la señal.

- Orbitas casi circulares con una excentricidad de 0.02 m.

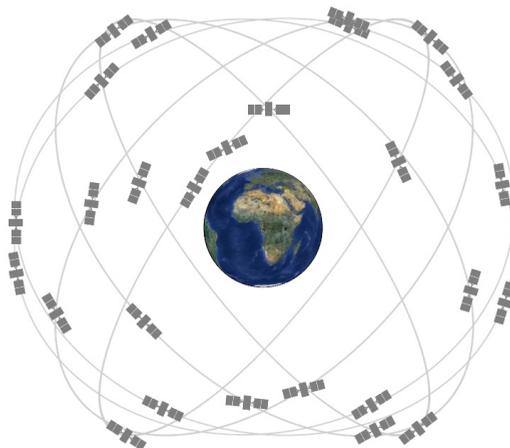


Figura 2.1: Constelación GPS (cortesía de [12]).

2.2.2 Componentes principales del GPS

El sistema está formado por los tres siguientes segmentos:

Segmento espacial: se encarga del desarrollo, fabricación y lanzamiento de los satélites. Está compuesto por la constelación de 27 satélites del sistema que transmiten señal a los receptores.

Segmento de control: consta de una red global de estaciones instaladas en la superficie de la Tierra que hacen un seguimiento de los satélites GPS, también actualizan los datos de los elementos y mensajes de navegación, así como las correcciones del reloj del satélite. El segmento actual de control incluye una estación de control principal, una estación de control suplente, 12 mandos de control de antenas, y 16 sitios de monitoreo (Figura 2.2).

Segmento usuario: incluye a cualquiera que recibe la señal GPS con un receptor para el cálculo de sus coordenadas X, Y, Z y el tiempo.

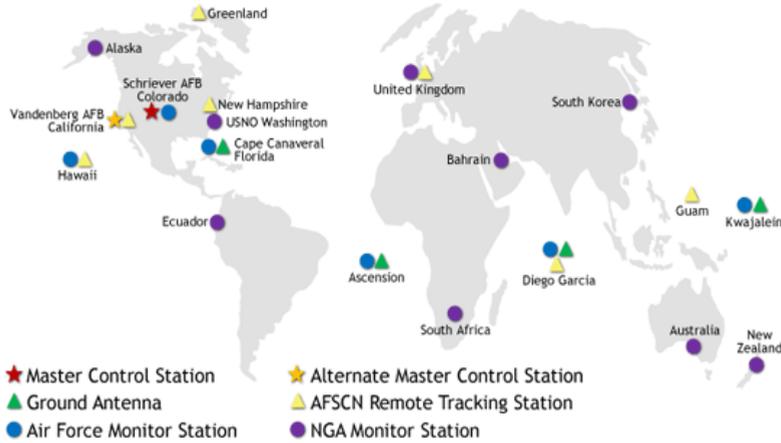


Figura 2.2: Segmento de control del sistema GPS (cortesía de [12]).

2.2.3 Señal GPS

Cuando se desarrolló el sistema GPS, las señales que utilizaba para la emisión de datos fueron las señales L1 y L2; también, contaron con L3 y L4, pero estas se han utilizado en el sistema de detección nuclear. Con el paso del tiempo el sistema GPS se ha modernizado ingresando nuevas señales para tener una mejor correlación, mayor precisión, una señal más poderosa y protección ante la interferencia. La modernización presenta la inclusión de las señales L2C, L5, L1C y el código M poco a poco al ir sustituyendo los satélites.

La frecuencia fundamental del sistema GPS es 10.23 Hz, la cual multiplicada por 154, 120 y 115 producen las frecuencias de la señal L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) Y L5 (1176.45 MHz) respectivamente. La longitud de onda de cada señal es 19, 24.4 y 25.5 centímetros en el mismo orden.

La Figura 2.3 muestra el cambio de la señal GPS a través del tiempo. En los bloques lanzados (II/IIA/IIR) en 1989 se observa que la señal L1 se basa en el código civil (C/A) y código P (encriptado en el código de w mostrando el código Y); la señal L2 simplemente maneja el código Y. Después, en el bloque lanzado (IIR-M) en 2005 a la señal L1 se le

agregó el código M, mientras que en la señal L2 el código M y L2C fueron incluidos. Por último, el bloque lanzado (IIF) en 2008 presentó la señal L5 [14].

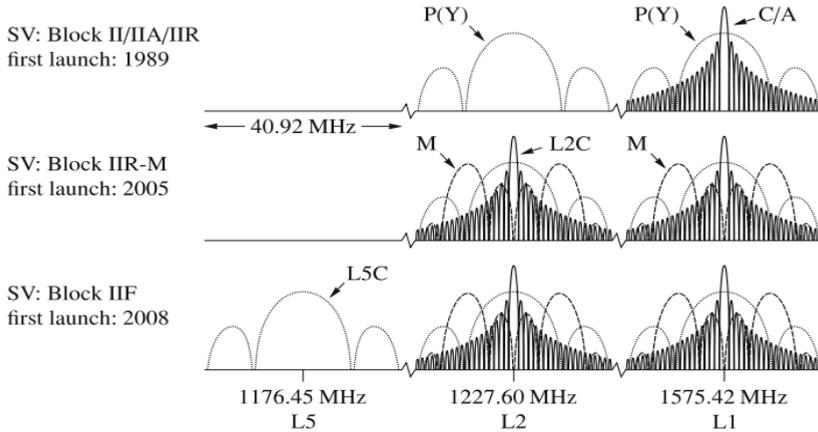


Figura 2.3: Señal GPS (cortesía de [14])

El código M se introdujo a las señales L1 y L2 para incrementar la eliminación de interferencias. La señal L2C es la segunda señal civil, diseñada específicamente para satisfacer las necesidades comerciales. Combinando L1 C/A en un receptor de doble frecuencia, L2C permite corrección ionosféricas. Civiles con receptores de doble frecuencia pueden alcanzar la misma precisión que los militares. L2C permite una más rápida adquisición de datos, mayor confiabilidad y rango de operación; también tiene un mayor poder de transmisión que L1 C/A haciendo más fácil recibirla debajo de árboles e incluso en interiores. L5 es la tercera señal civil de GPS, emitida en una banda de radio reservada exclusivamente para los servicios de seguridad de la aviación con espectro protegido, mayor potencia y mayor ancho de banda. En combinación con L1 C / A, L5 se utilizará para mejorar la precisión mediante la corrección ionosférica y la robustez mediante la redundancia de señal. Cuando se utiliza en combinación con L1 C / A y L2C, L5 proporciona un servicio muy robusto. Al combinar las señales L1 y L5

se tiene una ventaja en la resolución de la ambigüedad. L1C es la cuarta señal GPS civil, diseñada para permitir la interoperabilidad entre GPS y sistemas internacionales de navegación por satélite. El diseño mejora la recepción GPS móvil en ciudades y otros ambientes aislados. Los sistemas de satélites QZSS, IRNSS, y BeiDou también adoptan señales similares a L1C para la interoperabilidad internacional [37].

2.2.4 Observaciones GPS

El concepto de observable GPS es la medida de la distancia receptor-satélite derivada de la medida de tiempo o diferencia de fase, comparando la señal proveniente del GPS con la generada por el receptor. Esta medición es muy importante, porque el sistema se basa en ella para determinar la localización del receptor.

2.2.5 Pseudo-distancia

Pseudo-distancia es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, distorsionada por la falta de sincronización entre los relojes del satélite-receptor y el medio de propagación. El principio de medir la distancia de un satélite (G) a un receptor (M) consiste en conocer el tiempo de viaje desde que la señal fue emitida por el satélite hasta su llegada al receptor [13].

$$\Delta t_M^G = t_M - t^G \quad (2.1)$$

Donde Δt_M^G es la diferencia del tiempo de salida de la señal con respecto al de llegada; adicionalmente, se debe tener en consideración que el tiempo que se maneja es del sistema GPS y que presenta un error por retraso en los relojes del satélite (δ^G) y del receptor (δ_M). Por lo tanto, la Ecuación 2.1 se puede reescribir como:

$$\Delta t_M^G = [t_M(GPS) - \delta_M] - [t^G(GPS) - \delta^G] \quad (2.2)$$

La Ecuación 2.2 se puede simplificar transformándola en:

$$\Delta t_M^G = \Delta t_M^G(GPS) + \Delta \delta_M^G \quad (2.3)$$

Al conocer el tiempo de viaje de la señal y que lo hace a la velocidad de la luz, la distancia satélite-receptor es conocida. La Ecuación 2.3 se

multiplica por c (velocidad de luz) obteniendo la Ecuación 2.4.

$$R_M^G = C\Delta t_M^G(GPS) + c\Delta\delta_M^G = \rho_M^G + c\Delta\delta_M^G \quad (2.4)$$

R_M^G es la pseudo distancia y ρ_M^G es la distancia geométrica entre el satélite (G) y el receptor (M) para una época (t).

$$\rho_M^G = \sqrt{((x^G(t) - x_M)^2 + (y^G(t) - y_M)^2 + (z^G(t) - z_M)^2)} \quad (2.5)$$

Donde $x^G(t)$, $y^G(t)$, $z^G(t)$ son las componentes del vector de posicionamiento geocéntrico de los satélites en la época (t) y x_M , y_M , z_M son las 3 coordenadas ECEF del sitio del receptor. Es importante denotar que el retraso del reloj del satélite es conocido, ya que es incluido en las efemérides [13].

2.2.6 Fase o portadora

Las observaciones de fase portadora es la diferencia entre la fase de la señal recibida desde el satélite y la señal generada por el receptor GPS en su oscilador interno. Contiene la incógnita ambigüedad entera (N) que es igual al número entero de ciclos de fase desde la época inicial, siendo constante mientras el seguimiento a los satélites es continuo. Los cambios de ciclos de la fase o la perdida de señal introducen una nueva incógnita. La ecuación básica de la fase o portadora según [13] se obtiene de la siguiente forma:

La frecuencia circular instantánea f es la derivada de la fase φ con respecto al tiempo t .

$$f = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.6)$$

Integrando la frecuencia entre 2 épocas la fase resulta la Ecuación 2.7.

$$\varphi = \int_{t_0}^t f dt \quad (2.7)$$

Asumiendo que la frecuencia es constante y que la fase inicial ($\varphi(t_0)$) es igual a 0. La Ecuación 2.7 se puede reescribir como la Ecuación 2.8.

$$\varphi = f(t - t_r) \quad (2.8)$$

Donde el tiempo de recorrido de la señal t_r es igual a la Ecuación 2.9.

$$t_r = \frac{\rho}{c} \quad (2.9)$$

ρ es la distancia satélite-receptor y c es la velocidad de la luz. Por lo tanto, sustituyendo 2.9 en 2.8 se obtienen la Ecuación 2.10.

$$\varphi = f\left(t - \frac{\rho}{c}\right) = ft - f\frac{\rho}{c} \quad (2.10)$$

La Ecuación 2.11 presenta la fase de la recibida y reconstruida portadora con frecuencia f^G , mientras que la Ecuación 2.12 presenta la fase de la portadora generada por el receptor con frecuencia f_M .

$$\varphi^G(t) = f^G t - f^G \frac{\rho_M^G}{c} - \varphi_0^G \quad (2.11)$$

$$\varphi_M(t) = f_M t - \varphi_{0M} \quad (2.12)$$

Las fases iniciales son causadas por el error en los relojes. El error del reloj del satélite y del receptor se define en las Ecuaciones 2.13 y 2.14, respectivamente.

$$\varphi_0^G = f^G \delta^G \quad (2.13)$$

$$\varphi_{0m} = f_m \delta_M \quad (2.14)$$

La diferencia entre ambas Ecuaciones 2.13 y 2.14 es igual a la Ecuación 2.15.

$$\varphi_M^G(t) = \varphi^G(t) - \varphi_M(t) = -f^G \frac{\rho_M^G}{c} - f^G \delta^G + f_M \delta_M + (f^G - f_M)t \quad (2.15)$$

En la Ecuación 2.15, errores como el de la frecuencia $(f^G - f_M)t$ y de los relojes son despreciables. Por lo tanto, la Ecuación 2.15 se modifica resultando la Ecuación 2.16.

$$\varphi_M^G(t) = -f \frac{\rho_M^G}{c} - f \Delta \delta_M^G \quad (2.16)$$

La Ecuación 2.16 será transformada a la Ecuación 2.17 cuando la fase fraccional instantánea sea medida y el número de ciclos completos llamado ambigüedad (N) sea conocida.

$$\varphi_M^{Gk}(t) = \Delta \varphi_M^G|_{t_0} + N_M^G \quad (2.17)$$

Donde $\Delta\varphi_M^G$ es la fase fraccional medida para la época aumentada por el número de ambigüedad N . Debido a que sólo la parte fraccional de la fase es la medida a la época inicial t_0 entonces el número de ciclos entre el satélite y el receptor GPS es conocido introduciendo la parte fraccional inicial de la fase φ_0 y denotado $f = \frac{c}{\lambda}$ donde λ es la longitud de onda:

$$\varphi_M^G(t) = -\frac{1}{\lambda}\rho - \frac{c}{\lambda}(dt^G - dt_M) + N + (\varphi_0^G - \varphi_{0M}) \quad (2.18)$$

Finalmente la ecuación básica de una medición de fase portadora entre el satélite y el receptor según [13] está dada por la Ecuación 2.19.

$$\Phi_M^G = \frac{1}{\lambda}\rho_M^G + f^G\Delta\delta_M^G + N_M^G \quad (2.19)$$

2.2.7 Tipos de Posicionamiento

El sistema GPS se utiliza en diversas áreas de la ciencia, porque es flexible en las distintas formas de posicionamiento en las que se puede aplicar, lo que lleva a la necesidad de entender los conceptos básicos para identificar cada uno de las metodologías.

2.2.8 Estático vs Cinemático

Estático denota una observación inmóvil, mientras que cinemático implica movimiento. Una pérdida temporal de señal en modo estático no es tan crítica como en el cinemático.

La diferencia entre dinámico y cinemático, es que cinemático describe pura geometría de un movimiento. Por otro lado, dinámico consiste en la fuerza que causa el movimiento [14].

2.2.9 Tiempo real vs post-proceso

El término tiempo real en el aspecto de mediciones GPS significa que la solución se debe encontrar en el campo de lo inmediato. El resultado es denotado como inmediato si la observación de una sola época es usada para el cálculo de la posición y el tiempo de proceso es despreciable. También existe el concepto de cuasi-tiempo real que es menos riguroso

y el cálculo de los resultados contiene un ligero retraso. No obstante, post-proceso se refiere a que los datos son procesados después de las mediciones [14].

2.2.10 Tipo de Posicionamiento con los receptores GPS

El método empleado en esta investigación es el posicionamiento relativo GPS, usualmente aplicado en Geodesia y Topografía, para obtener precisiones en los posicionamientos al nivel de los centímetros o milímetros. El objetivo es determinar las coordenadas de un punto desconocido con respecto a un punto conocido, basado en medir simultáneamente con dos receptores hacia los mismos satélites, las correcciones se logran, debido a que uno de los receptores se encuentra en una posición con coordenadas previamente conocidas. Asumiendo que las mediciones son al mismo tiempo, se pueden hacer combinaciones simples, dobles y triples, permitiendo al usuario alcanzar una mayor precisión al reducir y eliminar errores.

2.2.11 Posicionamiento relativo de diferencia simple

El posicionamiento relativo de diferencia simple, se basa en la medición simultánea de dos receptores hacia el mismo satélite, uno de los receptores ubicado en un sitio con coordenadas ya conocidas (Figura 2.4).

De acuerdo a [14] la ecuación de diferencia simple de pseudo-distancia para un satélite G y dos receptores (M , N) en la señal $L1$ se obtiene de la siguiente forma:

La expresión 2.20 presenta la ecuación de pseudo-distancia del satélite G al receptor M y 2.21 al receptor N .

$$P_{M,1}^G = \rho_M^G + \frac{I_M^G}{f_1^2} + T_M^G + c(dt_M - dt^G) + b_{M,2} + M_{M,1}^G + e_{M,1}^G \quad (2.20)$$

$$P_{N,1}^G = \rho_N^G + \frac{I_N^G}{f_1^2} + T_N^G + c(dt_N - dt^G) + b_{N,2} + M_{N,1}^G + e_{N,1}^G \quad (2.21)$$

Al hacer la diferencia entre las Ecuaciones 2.20 y 2.21 el resultado es la ecuación de diferencia simple del satélite G a los receptores M y N (Ecuación 2.22).

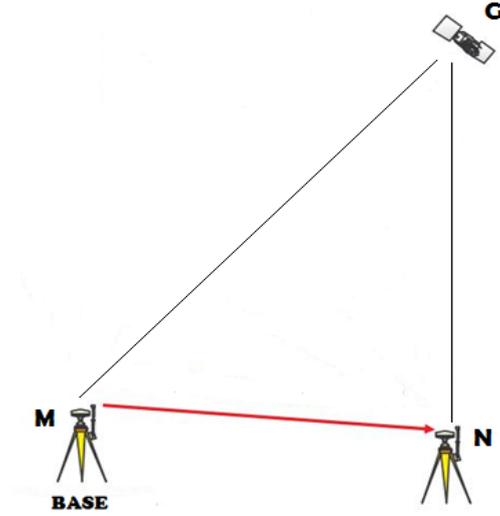


Figura 2.4: Posicionamiento relativo de diferencia simple.

$$\rho_{MN,1}^G = \rho_{MN}^G + \frac{I_{MN}^G}{f_1^2} + T_{MN}^G + cdt_{MN} + b_{MN,2} + M_{MN,1}^G + e_{MN,1}^G \quad (2.22)$$

En esta ecuación se elimina el error del reloj del satélite. Por otro lado tenemos el posicionamiento relativo simple pero con la ecuación de fase entre el satélite G a los receptores M (Ecuación 2.23) y N (Ecuación 2.24) respecto a $L1$ de acuerdo a [14].

$$\Phi_{M,1}^G = \rho_M^G - \frac{I_M^G}{f_1^2} + T_M^G + \lambda_1 N_{M,1}^G + c(dt_M - dt^G) + \lambda_1(\varphi_0^G - \varphi_{M0}) + m_{M,1}^G + \varepsilon_{M,1}^G \quad (2.23)$$

$$\Phi_{N,1}^G = \rho_N^G - \frac{I_N^G}{f_1^2} + T_N^G + \lambda_1 N_{N,1}^G + c(dt_N - dt^G) + \lambda_1(\varphi_0^G - \varphi_{N0}) + m_{N,1}^G + \varepsilon_{N,1}^G \quad (2.24)$$

Restando las Ecuaciones 2.23 y 2.24 resulta la ecuación de diferencia simple del satélite G a los receptores M y N (Ecuación 2.25).

$$\Phi_{MN,1}^G = \rho_{MN}^G - \frac{I_{MN}^G}{f_1^2} + T_{MN}^G + \lambda_1 N_{MN,1}^{*G} + cdt_{MN} + m_{MN,1}^G + \varepsilon_{N,1}^G \quad (2.25)$$

Donde $N_{MN,1}^{*G} = N_{MN,1}^G + (\varphi_0^G - \varphi_{N0})$. En la Ecuación 2.25 se elimina el error del reloj del satélite y el error por la parte fraccionada de la ambigüedad.

2.2.12 Posicionamiento relativo de diferencia doble

El posicionamiento de diferencia doble consiste en la medición simultánea de dos receptores hacia dos mismos satélites, uno de los receptores ubicado en un sitio con coordenadas conocidas (Figura 2.5).

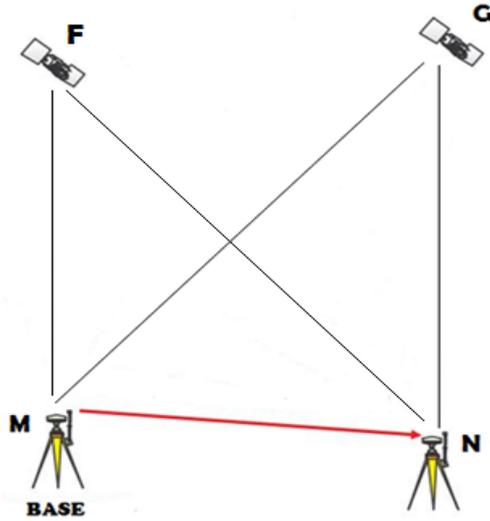


Figura 2.5: Posicionamiento relativo de diferencia doble.

El posicionamiento relativo de diferencia doble se obtiene de la diferencia de las ecuaciones de diferencia simple respecto al satélite G y los receptores $M - N$ y de la ecuación de diferencia simple respecto al satélite F a los receptores $M - N$. En el caso de pseudo-distancia las ecuaciones 2.26 y 2.27 muestran diferencia simple en $L1$.

$$P_{MN,1}^G = \rho_{MN}^G + \frac{I_{MN}^G}{f_1^2} + T_{MN}^G + cdt_{MN} + b_{MN,2} + M_{MN,1}^G + e_{MN,1}^G \quad (2.26)$$

$$P_{MN,1}^F = \rho_{MN}^F + \frac{I_{MN}^F}{f_1^2} + T_{MN}^F + cdt_{MN} + b_{MN,2} + M_{MN,1}^F + e_{MN,1}^F \quad (2.27)$$

La Ecuación 2.28 define la diferencia doble de los satélites $F - G$ a los receptores $M - N$.

$$P_{MN,1}^{FG} = \rho_{MN}^{FG} + \frac{I_{MN}^{FG}}{f_1^2} + T_{MN}^{FG} + M_{MN,1}^{FG} + e_{MN,1}^{FG} \quad (2.28)$$

En esta ecuación se elimina el error del reloj de los receptores y el desplazamiento entre canales. Por el otro lado tenemos el posicionamiento relativo de diferencia simple pero con ecuaciones de fase en L1 (Ecuación 2.29 y 2.30).

$$\Phi_{MN,1}^G = \rho_{MN}^G - \frac{I_{MN}^G}{f_1^2} + T_{MN}^G + \lambda_1 N_{MN,1}^{*G} + cdt_{MN} + m_{MN,1}^G + \varepsilon_{N,1}^G \quad (2.29)$$

$$\Phi_{MN,1}^F = \rho_{MN}^F - \frac{I_{MN}^F}{f_1^2} + T_{MN}^F + \lambda_1 N_{MN,1}^{*F} + cdt_{MN} + m_{MN,1}^F + \varepsilon_{N,1}^F \quad (2.30)$$

La Ecuación 2.31 muestra la diferencia doble de los satélites $F - G$ a los receptores $M - N$. En esta ecuación se elimina el error del reloj de los receptores.

$$\Phi_{MN,1}^{FG} = \rho_{MN}^{FG} - \frac{I_{MN}^{FG}}{f_1^2} + T_{MN}^{FG} + \lambda_1 N_{MN,1}^{FG} + m_{MN,1}^{FG} + \varepsilon_{N,1}^{FG} \quad (2.31)$$

2.2.13 Posicionamiento relativo cinemático

En el posicionamiento relativo cinemático, el receptor base se coloca inmóvil sobre la estación de referencia, mientras que el segundo receptor se mueve y su posición es determinada por época. Los modos simple, doble y triple implícitamente contienen el movimiento en la distancia geométrica. La ecuación de la distancia geométrica se muestra a continuación para un satélite G y un receptor M [14].

$$\rho_M^G = \sqrt{((x^G(t) - x_M(t))^2 + (y^G(t) - y_M(t))^2 + (z^G(t) - z_M(t))^2)} \quad (2.32)$$

2.2.14 Diseño general de un receptor GNSS

De acuerdo a [14] el receptor geodésico GNSS genérico está compuesto de los siguientes 3 bloques:

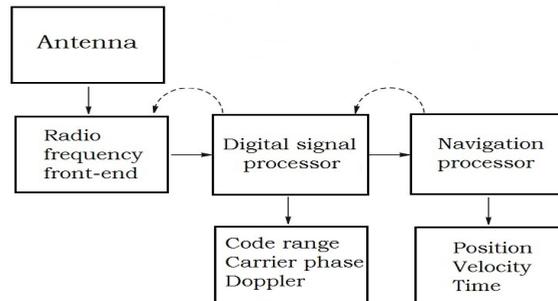


Figura 2.6: Diseño de receptor geodésico GNSS (cortesía de [14]).

- El radio frecuencia frente final que recibe y condiciona la señal de satélite recibida, la convierte a una frecuencia intermedia y de analógica a digital. El convertidor muestrea las señales, el radio frecuencia frente final implementa la frecuencia estándar, que proporciona las frecuencias de referencia y la información de tiempo.
- El procesador de señal digital correlaciona la señal local generada con la señal del satélite y proviene de observaciones, es decir, pseudo-distancia, fase portadora y doppler, así como los datos de navegación.
- El procesador de navegación decodifica el mensaje de navegación con respecto al tiempo, efemérides y los datos del almanaque; finalmente calcula posición, velocidad y tiempo.

2.2.15 Fuentes de error

Al realizar mediciones con receptores GPS, la información resultante tiene errores, porque el sistema GPS es afectado por una serie de ele-

mentos que disminuyen la calidad de los datos que brinda, hablando de precisión. Por eso es importante conocer de forma general cuales son las fuentes de errores para poder aplicar metodologías que las reduzcan.

2.2.16 Errores del reloj del receptor y del satélite

Al realizar la medición de la distancia satélite-receptor se observa que se presenta un retraso, tanto en el reloj del satélite como en el del receptor; sin embargo, el retraso del reloj del satélite es conocido y transmitido por el mensaje de navegación, mientras que el retraso del reloj del receptor no es conocido, pero puede ser estimado a través de la posición y velocidad del receptor, aunque ambos retrasos se eliminan al hacer combinaciones lineales del posicionamiento relativo entre las mediciones GPS.

2.2.17 Efectos relativos

Los efectos relativos en la órbita del satélite GPS son causados por el campo de gravedad de la Tierra, el cual causa una aceleración (perturbadora) que puede calcularse según [11] por:

$$d\ddot{\rho} = \frac{3\mu^2 a(1 - e^2)}{c^2} \frac{\rho}{\rho^5} \quad (2.33)$$

Donde c es la velocidad de la luz. El valor numérico de estos efectos relativistas pueden ser obtenidos según [39] del orden de $3 \cdot 10^{-10} m \cdot s^{-2}$.

2.2.18 Errores de la órbita del satélite

Los satélites del sistema GPS son afectados por el campo gravitatorio terrestre, la gravedad de otros planetas, la radiación solar, entre otras cosas. Lo que produce que al determinar la posición del satélite esta no sea hecha correctamente. Las efemérides broadcast tienen un error nominal de 1 a 5 metros en promedio. Por otro lado, las efemérides precisas permiten el cálculo de la órbita con hasta 5 a 10 centímetros de error. Los errores de primer orden se eliminan con mediciones GPS relativas.

2.2.19 Multi-trayectoria

El error por multi-trayectoria es ocasionado por elementos alrededor del receptor GPS que interactúan con la señal proveniente del satélite. La señal se refleja y difracta produciendo que el receptor capture una señal directa y otra indirecta. Para reducir el error es necesario colocar el receptor en un lugar despejado o utilizar una antena de anillos circulares (choke ring), la cual atrae la señal eliminando el error.

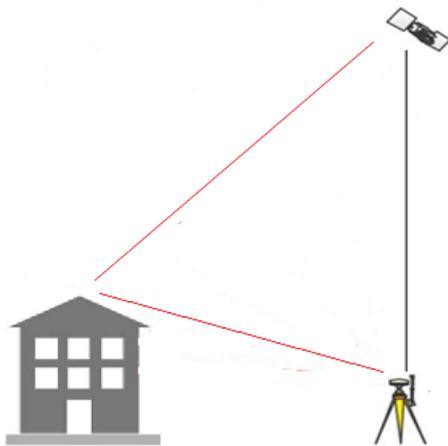


Figura 2.7: Efecto de la Multi-trayectoria.

2.2.20 Efectos atmosféricos

La atmósfera terrestre está compuesta por tropósfera, estratósfera, ionósfera, mesósfera y exósfera. Por cada una de estas capas transita la señal GPS emitida por el satélite hacia los receptores. Sin embargo, las capas que más afectan a la señal GPS son la ionósfera y la tropósfera.

La ionósfera es la capa de la atmósfera que se localiza entre los 50 y 100 km de altura, se caracteriza por la presencia de electrones libres que ocasionan dispersión no lineal en las ondas electromagnéticas que pasan por ella. El retardo de la propagación depende del contenido total de electrones (Total Electron Content TEC), la ubicación geográfica y la hora de medición, debido a que la ionósfera es más activa durante el

día que en la noche. Sus efectos se pueden minimizar al usar técnicas relativas y la combinación libre de la frecuencia (iono-free) con datos de dos frecuencias. Otro método es usar parámetros ionosféricos de las efemérides. En líneas bases cortas los errores de segundo orden se omiten.

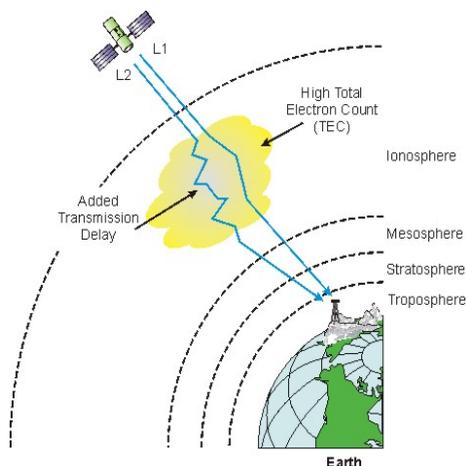


Figura 2.8: Error producido por la atmósfera (cortesía de la página web: inta.es).

La tropósfera es la capa de la atmósfera que alcanza los 50 km de altura, su error no se puede eliminar al combinar dos frecuencias, afecta a las mediciones relativas y puntuales, el error puede ser reducido al momento de procesar los datos ingresando un modelo empírico de la tropósfera con información de temperatura, humedad y presión como el de Hopfield y Saastamoinen [13]. La tropósfera se divide en dos componentes. La componente seca que es el 90% de la troposfera, es muy fácil de modelar, porque es proporcional a la densidad de las moléculas de gas en la atmósfera y cambia con su distribución. La componente húmeda es el 10% restante, pero es más complicada de modelar debido a la naturaleza polar de las moléculas de agua y del desplazamiento de electrones. La refracción troposférica está en función de la distancia cenital del satélite. El efecto del error de la tropósfera es mayor al

aumentar la latitud y alcanzar un máximo para los sitios polares.

2.3 Series de tiempo

La serie de tiempo es una secuencia de datos acerca de un fenómeno específico con respecto al tiempo. El tiempo en el que se capturan los datos suelen ser minutos, horas, días, semanas, meses o años. El objetivo de las series de tiempo es extraer un patrón de comportamiento del elemento estudiado. Las series de tiempo tienen 4 características principales [6]:

- **Tendencia:** es el comportamiento que se observa en un periodo de tiempo largo, donde la serie de tiempo aumenta o disminuye.
- **Movimiento irregular:** es el movimiento aleatorio o error en la serie de tiempo.
- **Estacionalidad:** es el comportamiento que se suele dar en un periodo de tiempo determinado.
- **Ciclo:** comportamiento de fluctuación en forma de onda.

2.3.1 Filtros

Se denomina filtro a cualquier instrumento que produce un cambio en el contenido de frecuencias en una señal. Los filtros se representan por sus características de transferencia en función de la diferencia entre la señal de entrada y la de salida en términos de ganancia o atenuación. En esta investigación se aplicaron los filtros para aislar algunas frecuencias en particular de una señal. Los filtros se pueden aplicar de 4 formas [19] con un comportamiento ideal como se observa en la Figura 2.9.

- **Filtro pasa bajas (low-pass filter):** Permite el paso de todas las señales con frecuencias menores que la frecuencia de corte (f_L) e impide el paso a las frecuencias superiores.
- **Filtro pasa altas (high-pass filter):** Extrae la señal con frecuencia mayores que la frecuencia de corte (f_H) e impiden el paso las frecuencias inferiores.

- Filtro pasa banda (band-pass filter): Permite el paso de la señal dentro de las frecuencias límites (f_L) y (f_H).
- Filtro de rechazo de banda (band-rejection filter): niega el paso a las frecuencias dentro del límite (f_L) y (f_H), permitiendo el paso a la señal restante

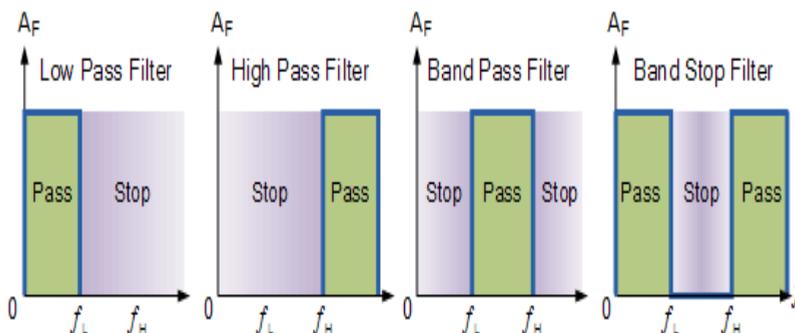


Figura 2.9: Ejemplo de los filtros ideales (cortesía de la página web: electronics-tutorials.ws).

Los modelos de los filtros en la Figura 2.9 son ideales, por lo cual en la práctica su comportamiento varía de acuerdo al filtro empleado. En la Sección 3.4 se trata el tema del filtro media móvil y Chebyshev, aplicados en el presente trabajo.

2.4 Teoría de la probabilidad

La teoría de la probabilidad es la disciplina matemática que estudia los comportamientos cuantitativos de los fenómenos aleatorios, mientras que la probabilidad es la posibilidad objetiva representada mediante un número entre 0 y 1 de que ocurra un suceso [3]. Existen algunos sucesos particulares a los cuales se les puede determinar la posibilidad de que ocurra sin hacer el experimento generando un esquema, conociendo las condiciones de éste. La ecuación de la probabilidad es la razón entre el

número de casos favorables M y el total de número de casos posibles N (Ecuación 2.34).

$$P = \frac{M}{N} \quad (2.34)$$

También hay sucesos a los cuales no se les puede calcular su probabilidad debido a que no se reduce a un esquema de casos como el tirar una flecha y acertar al blanco. Para esto, se aplica el concepto de frecuencia relativa (Ecuación 2.35) que relaciona el número de resultados favorables k obtenidos entre el total de pruebas n en el experimento.

$$Q = \frac{k}{n} \quad (2.35)$$

2.4.1 Función de densidad de probabilidad

La función de densidad de la probabilidad o PDF por sus siglas en inglés (Probability Density Function) describe la probabilidad de cada valor específico que puede tener una variable.

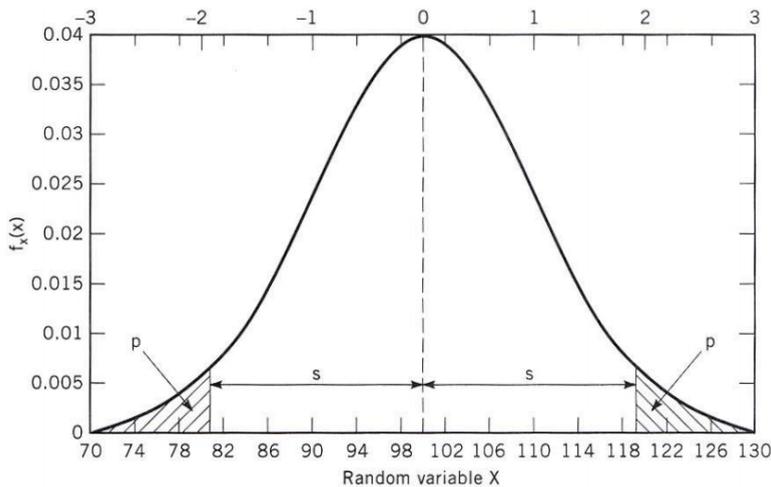


Figura 2.10: Ejemplo PDF en la distribución normal (cortesía de [36]).

La función PDF depende de la distribución utilizada, en nuestro caso

es la distribución normal; por lo que, PDF se puede expresar con [36]:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (2.36)$$

Donde σ_x es la desviación estándar y μ_x es la media aritmética. Como se mencionó anteriormente en esta investigación, la distribución normal es con la que se trabajará; por tal motivo, la forma del PDF es la campana de Gauss que podemos ver en la Figura 2.10 con la desviación estándar de 10 y media igual a 100.

2.4.2 Función de distribución acumulativa

La función de distribución acumulativa o CDF por sus siglas en inglés (Cumulative Density Function) expresa la probabilidad entre uno o dos límites especificados por el usuario en el área que se crea por la PDF utilizando una distribución determinada.

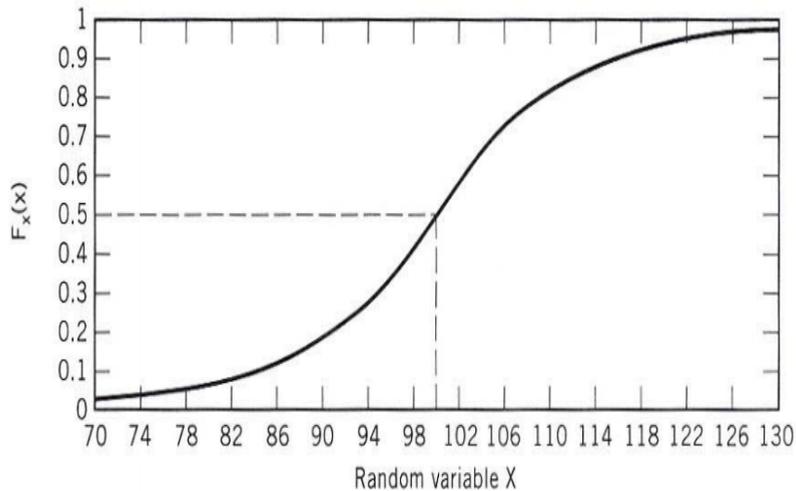


Figura 2.11: Ejemplo CDF en la distribución normal (cortesía de [36]).

La ecuación de CDF en la distribución normal se presenta en la expresión 2.37 y la Figura 2.11 [36].

$$f_x(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (2.37)$$

Donde σ_x es la desviación estándar y μ_x es la media.

2.5 Monitoreo de estructuras de ingeniería con GPS

Las obras de ingeniería civil son afectadas por diversos tipos de cargas, por lo que uno de sus principales objetivos es transmitir esas cargas de manera segura desde su punto de aplicación hasta la cimentación de la estructura. Durante el proceso de transmisión de las cargas, las estructuras sufren o responden con movimientos de diferentes características dependiendo de la carga aplicada.

2.5.1 Tipos de cargas estructurales

Los dos tipos de cargas que rigen cualquier diseño estructural son: (1) verticales y, (2) laterales. Las cargas verticales se dividen generalmente en vivas y muertas. Las cargas muertas producen movimientos lentos a la estructura de forma permanente y son contribuidas por el peso de la estructura. Las cargas vivas son resultado de aplicar fuerzas temporales a la construcción, por ejemplo: peatones y tráfico. Los efectos de las cargas vivas son reversibles y temporales; aunque si se excede el límite de elasticidad son irreversibles. Las cargas laterales son producidas principalmente por viento, terremotos y empujes laterales. Los diferentes tipos de cargas producen efectos con comportamiento estático, dinámico o una combinación de ambos, dependiendo de la rapidez de su aplicación y el tiempo. La mayoría de las cargas estáticas tienen un comportamiento dinámico que es comúnmente ignorado en el diseño y análisis de estructuras [26]. La fuerza del viento es un ejemplo de carga que presenta comportamiento semi-estática y dinámica (Figura 2.12).

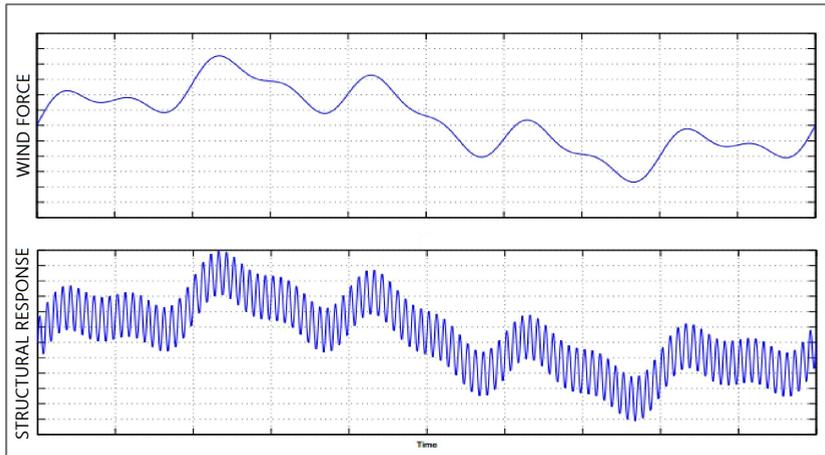


Figura 2.12: Carga del viento y la respuesta de la estructura (cortesía de [26]).

2.5.2 Movimientos estructurales

En función del tiempo de aplicación de las cargas, se pueden obtener los comportamientos: estáticos y dinámicos [21]; el comportamiento estático producido por el peso de la carga es temporal, porque al removerla, la estructura retorna a su posición original. Por otro lado, el comportamiento dinámico cambia muy rápidamente, por lo que, la estructura no tiene el suficiente tiempo para responder. Por lo tanto, cargas dinámicas y estáticas del mismo tamaño producen diferentes efectos sobre la estructura (Figura 2.13). Los movimientos dinámicos son causados por cargas como tráfico, componente dinámica de la carga del viento, y terremotos. La respuesta de la estructura a una carga dinámica es en forma de onda. La amplitud de la onda se va reduciendo al paso del tiempo y al momento de que la energía se disipa, la deformación dinámica final, corresponde a la deflexión producida por una carga estática.

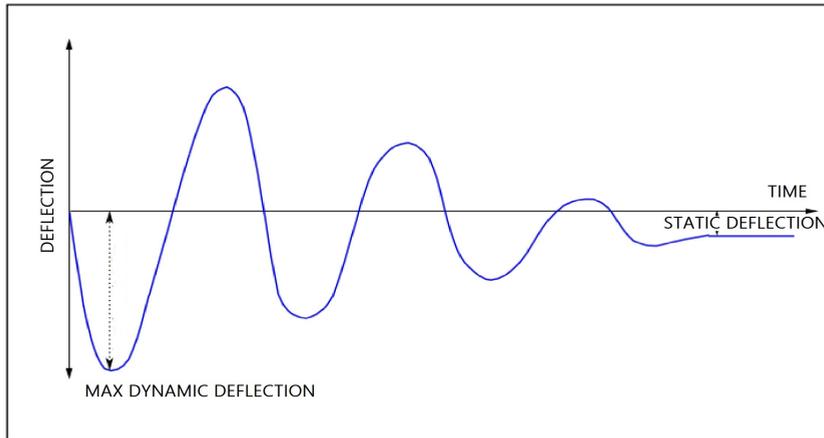


Figura 2.13: Vibración producida por cargas dinámicas (cortesía de [26]).

2.5.3 Monitoreo de puentes

En todas las estructuras de ingeniería se presentan deformaciones debido a factores humanos, físicos y climatológicos. Por eso es importante monitorear las infraestructuras civiles para evaluar su comportamiento y evitar catástrofes. El sistema GPS se ha utilizado de forma exitosa para el monitoreo de movimiento de terrenos y obras de ingeniería.

De acuerdo con [20] un puente presenta 2 tipos de deformaciones. La primera, representa un movimiento de término largo, el cual define al desplazamiento semi-estático [25], causado por sedimentación, deterioro de la loza y pérdida de estrés. La segunda deformación, está dada por el movimiento de término corto, representando el desplazamiento dinámico [25], producido por viento, terremotos y tráfico; esta deformación es recuperable en algunos casos. En términos de riesgo, es más importante el monitoreo con respecto a los movimientos de término corto, aunque presentan la problemática de ser más complicados al momento de evaluarlos. Cuando el GPS se emplea en el monitoreo de puentes, es necesario que brinde información de los dos tipos de deformaciones al mismo tiempo.

2.5.4 Límites de Diseño del Manual AASHTO

La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte, por sus siglas en inglés AASHTO, es la autoridad encargada de establecer normas para diseñar y construir autopistas en Estados Unidos. En estas normas, AASHTO presenta los 4 diferentes límites de deflexión para estructuras de acero, aluminio y/o concreto que se muestran a continuación [1].

Para cargas vehiculares en general

$$span/800 \quad (2.38)$$

Para cargas vehiculares y/o carga peatonal

$$span/1000 \quad (2.39)$$

Para cargas vehiculares sobre vigas voladizas

$$span/300 \quad (2.40)$$

Para cargas vehiculares y/o peatones sobre vigas voladizas

$$span/375 \quad (2.41)$$

Donde $span$ es la longitud del claro analizado del puente, que en el caso de la presente investigación es de 20 metros. De los 4 anteriores límites de deflexión se consideraron 2.38 y 2.39 para nuestra investigación.

2.5.5 Teorema de Nyquist-Shannon

Según el teorema de Nyquist-Shannon para definir correctamente una señal de frecuencia f_0 se tiene que medir con un intervalo de por lo menos $2f_0 + 1$ [24]. Por ejemplo, una señal de onda sinusoidal de 1 Hz, es medida en tres diferentes frecuencias; 2.5, 5 y 10 Hz. Cuando la frecuencia de medición es 2.5 Hz, una señal de forma triangular es

obtenida brindando insuficiente información; la medición a 5 Hz proporciona una señal más parecida a la original pero con algunas diferencias. Por último, al medir a 10 Hz el resultado es una señal sinusoidal razonable (Figura 2.14). Al utilizar un intervalo de medición de 20 Hz con el GPS se podrá determinar la forma del desplazamiento dinámica con una muy buena resolución cuando los movimientos ocurran a 2 Hz [26]. Por otro lado, la cuestión del teorema de Nyquist-Shannon entra

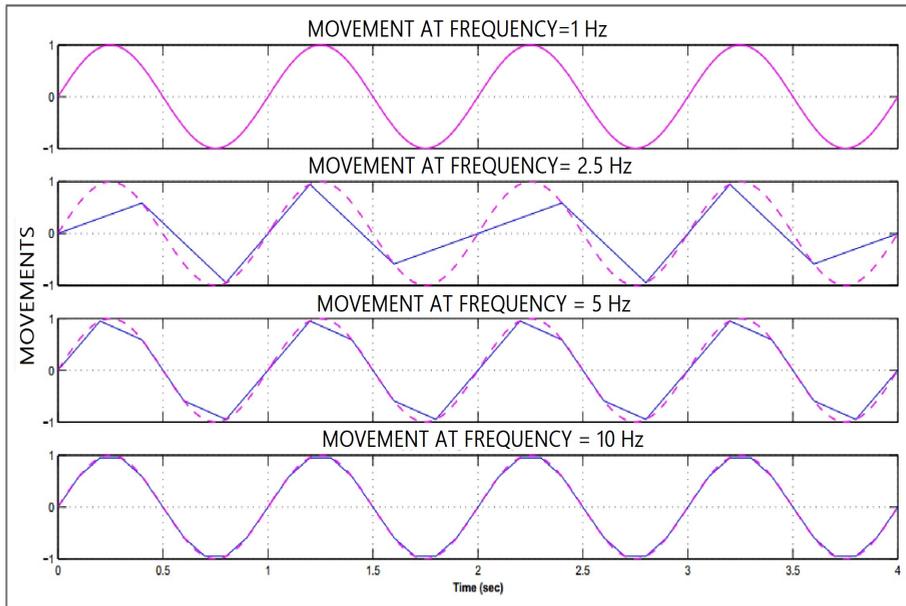


Figura 2.14: Ejemplo del teorema de Nyquist-Shannon (cortesía de [26]).

al momento de determinar la frecuencia fundamental de la estructura, ya que al emplear 20 Hz de intervalos de medición se analizara en el dominio de la frecuencia datos de 0 a 10 Hz [26].

2.5.6 Resonancia estructural

En el caso de que el comportamiento de una carga dinámica aplicada a una estructura coincida con su frecuencia fundamental, ocasionaría el fenómeno de resonancia, donde la amplitud de las deflexiones aumentaría gradualmente época a época hasta llegar al colapso de la estructura. Algunos ejemplos de la resonancia en puentes, es el caso del Puente Tacoma Narrow [27], él cual colapsó cuando los vientos coincidieron con su frecuencia fundamental; Puente Broughton [7] que colapsó cuando 74 soldados pasaron marchando sobre él; Puente Milenio de Londres [29] que en su inauguración presente un movimiento de oscilación horizontal debido a que los miles de peatones que lo cruzaban coincidieron en el ritmo de los pasos. Este fenómeno es una muestra de la importancia de conocer la frecuencia fundamental de una estructura y que al momento de diseñar la infraestructura tomarlo en consideración.

2.5.7 Modos de vibrar

Al ser afectadas las estructuras por cargas, como respuesta estas tienden a vibrar a una cierta frecuencia llamada frecuencia natural. En ocasiones las estructuras pueden vibrar en diferentes frecuencias naturales al mismo tiempo. La frecuencia natural de una construcción depende principalmente de su tamaño, masa y rigidez. Al no ser uniforme una estructura puede tener diferentes frecuencias a lo largo de su eje. De todas las frecuencias naturales la de menor valor se le denomina frecuencia fundamental. Debido a que todas las frecuencias fundamentales se caracterizan por una forma de deflexión global llamada modo, estas se denominan como modos de frecuencias [20]. Comúnmente, se genera un modelo de elemento finito para determinar los modos de frecuencia de una obra de ingeniería.

2.5.8 Transformada rápida de Fourier

En algunos casos es más sencillo extraer información de una serie de tiempo en el dominio de la frecuencia que en el dominio del tiempo, por esto, se utiliza la transformada discreta de Fourier que se expresa de la

siguiente forma [18]:

$$y_{k+1} = \sum_{j=0}^{n-1} w^{jk} x_{j+1} \quad (2.42)$$

Donde $w = e^{-2\pi in}$ es uno de los n raíces complejas de la unidad, i y j son índices que van de 0 hasta $n - 1$. De forma general, la transformada discreta de Fourier consiste en descomponer la señal compleja en un conjunto de señales sinusoidales que la generan, considerando que cada señal tiene su propia frecuencia y algunas proporcionan más potencial a la señal compleja que otras. La transformada discreta de Fourier a su vez se puede aplicar con un algoritmo menos complejo computacionalmente hablando, utilizando la transformada rápida de Fourier, la cual se encuentra predefinida en una función dentro de muchos softwares. En esta investigación la transformada rápida de Fourier se usa con ayuda del programa MATLAB para analizar las frecuencias características del Puente Juárez.

Capítulo 3

Materiales y métodos

3.1 Introducción

De forma general, la metodología que se planteó consistió en recolectar geo-información sobre la loza central del puente (zona crítica) con receptores GPS geodésicos de alta precisión, para posteriormente procesarla con el software comercial Topcon Tools; subsiguientemente, a partir de las coordenadas provenientes del software GPS se calculó el desplazamiento aparente. El análisis de las series de tiempo resultante se dividió en 2 partes; la primera se basa en obtener los desplazamientos semi-estáticos con el filtro media móvil que a su vez se utiliza para calcular la probabilidad de falla al compararlos con los límites de deflexión que AASHTO proporciona. Por otra parte, el segundo análisis de las series de tiempo se define con el filtro Chebyshev sobre las frecuencias altas con el objetivo de obtener el desplazamiento dinámico; además, las frecuencias características del puente se obtienen basado en los desplazamientos dinámicos y la transformada rápida de Fourier.

Para cumplir el objetivo principal de esta investigación fue necesario el uso de receptores geodésicos GPS con un grado específico de precisión, debido a que el error de los instrumentos puede cubrir el desplazamiento del puente en caso de ser menor y el resultado arrojado no mostraría el comportamiento real del puente. Es imposible que los datos brindados por las unidades GPS no contengan error, por lo tanto, el apoyo de herramientas computacionales para aplicar filtros es esencial.

3.1.1 Receptores geodésicos GPS

En la primera campaña 8 receptores geodésicos GPS de doble frecuencia fueron utilizados: 2 Topcon Hiper V, 4 Geomax Zenith 25 y 2 Leica SR530; en la segunda, 3 receptores Geomax Zenith 25 fueron empleados. La Figura 3.1 presenta los 3 diferentes modelos de receptores GPS.

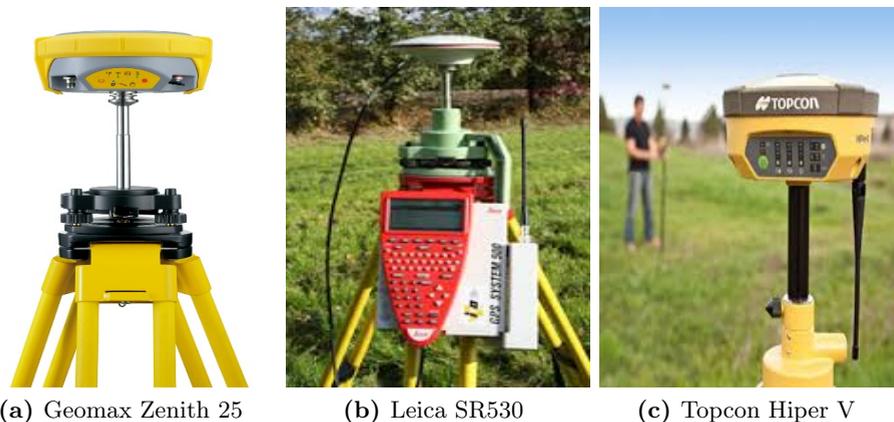


Figura 3.1: Receptores GPS (cortesía de la página web: ebay.com).

El receptor Geomax Zenith 25 es capaz de capturar 2 frecuencias, su máximo rango de medición son 5 Hz, los resultados brindados de forma estática tienen una precisión de horizontal de $3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ ppm}$ y vertical de $3.5 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ ppm}$. El receptor Leica SR530 mide con una precisión horizontal de $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$ y vertical de $5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ ppm}$, recibe dos frecuencias de la constelación GPS. El modelo Topcon Hiper V genera datos a partir de las constelaciones GPS y GLONASS con precisiones horizontales de $3 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ ppm}$ y verticales de $3.5 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ ppm}$.

3.1.2 Software Topcon Tools

Al efectuar la revisión literaria sobre el monitoreo de obras de ingeniería mediante GPS, se observó que en la mayoría de los artículos científicos para el procesamiento de datos GPS se aplican softwares comerciales

[22]. En nuestro caso para el procesamiento se manejó el software Topcon Tools v.8.2.3.; dicho software permite el procesamiento en modo cinemático, ajuste por mínimos cuadrados y la factibilidad de contar con diversos tipos de antenas.

3.1.3 MATLAB

MATLAB es un software desarrollado por MathWorks, fundado por Cleve Moler, Jack Little y Steve Bangert en 1984. MATLAB fue desarrollado para realizar cálculos matemáticos, analizar, visualizar datos y para facilitar la escritura de nuevos programas. La ventaja de este software es que combina matemática comprensiva y funciones gráficas con un poderoso lenguaje de alto nivel [31].

En el análisis de las series de tiempo, MATLAB en la versión 2016b fue una pieza fundamental en este trabajo por su facilidad para el procesamiento de la señal, con su ayuda los filtros media móvil, Chebyshev, y la transformada rápida de Fourier fueron aplicados sobre los datos de interés [38, 22].

3.2 Medición sobre las estaciones 373H y 377C de la RGNP

Como se describió anteriormente, en el capítulo 2.2.10 el posicionamiento relativo consiste en recolectar información simultáneamente con dos unidades GPS, donde un receptor trabaja como estación de referencia y su posición es conocida con anticipación. En la ciudad de Culiacán, Sinaloa se encuentran materializados algunos vértices de la RGNP y una estación de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA); por esta razón, se decidió utilizar como estaciones de control dos vértices de la RGNP para evaluar el Puente Juárez que son identificados como 373H y 377C (Figura 3.2), ubicados a una distancia corta con respecto a los extremos del puente; sin embargo, los vértices no contaban con coordenadas conocidas. Por consiguiente, se les otorgó coordenadas con una sesión de medición a un intervalo de 15 segundos por 4 horas continuas, máscara de elevación de 15 grados y tomando la estación CULC de la RGNA como base al efectuar el posicionamiento relativo estático y así

aumentar la precisión reduciendo los errores; su procesamiento se hizo con el software Topcon Tools. Las coordenadas resultantes se muestran en la Tabla 3.1.

Table 3.1: Coordenadas UTM (zona 13 Norte) de las estaciones 373H y 377C

Vértice	Norte (m)	Este (m)	Altura (m)
373H	2746987.962	259444.459	12.148
377C	2747348.175	259129.768	16.340

Las estaciones de control se encuentran muy cercanas al puente Juárez, la Figura 3.2 muestra sus localizaciones.

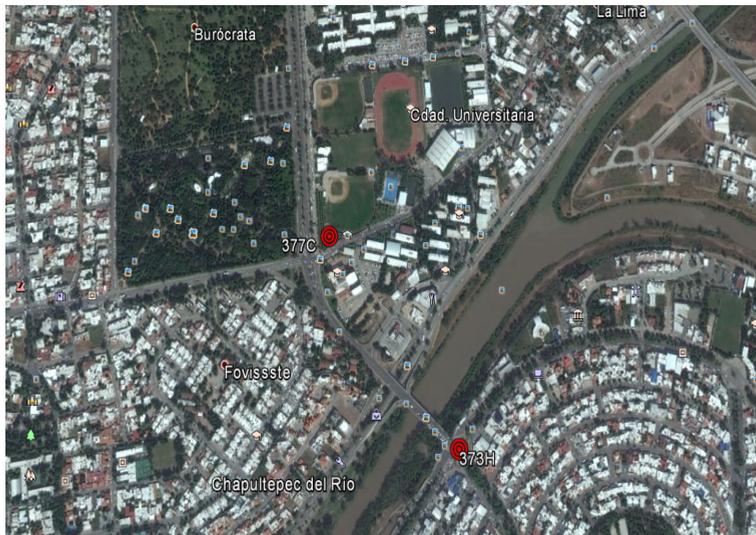


Figura 3.2: Localización de la estación de control (cortesía de Google Earth, 2017).

3.2.1 Descripción de los monumentos de medición

El monumento de la estación 373H y 377C son placas metálicas empotradas en el concreto por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); sobre esta estación el GPS fue montado mediante un trípode. Por el contrario, los vértices sobre el puente son marcas sobre el concreto; de tal forma que, el GPS fue montado sobre una baliza auxiliado por un bípode y además fue sostenido por el pasa-manos del puente [2]. La Figura 3.3 presenta como se colocó el receptor GPS para la evaluación del Puente Juárez.



Figura 3.3: Colocación del receptor GPS Geomax sobre el puente (ZEN2).

3.3 Campaña de medición sobre el Puente Juárez

La primera campaña de medición se realizó de lunes a domingo con 3 sesiones de una hora por día, durante los periodos de mayor tráfico sobre el puente: 8:00-9:00, 12:00-13:00 y 17:00-18:00, a un intervalo de medición de 1 Hz; 8 receptores GPS geodésicos de doble frecuencia se utilizaron (2 Topcon Hiper V, 2 Leica SR530 y 4 Geomax Zenith 25). Las estaciones sobre el puente se denominaron como ZEN1, TOP1 y LEI1 en la parte derecha, mientras que en la parte izquierda ZEN2, TOP2 y LEI2. Las estaciones de control fueron 373H y 377C. La Figura 3.4

presenta la ubicación en 3 dimensiones de los receptores sobre el Puente Juárez. Por otro lado, la segunda campaña GPS se efectuó el día 16 de febrero del 2017; 3 receptores GPS se utilizaron (modelo Geomax Zenith 25), dos receptores se montaron en las estaciones ZEN1 y ZEN2, donde ocurren los movimientos de mayor magnitud. Complementariamente, la estación de control 373H fue medida por el receptor restante.

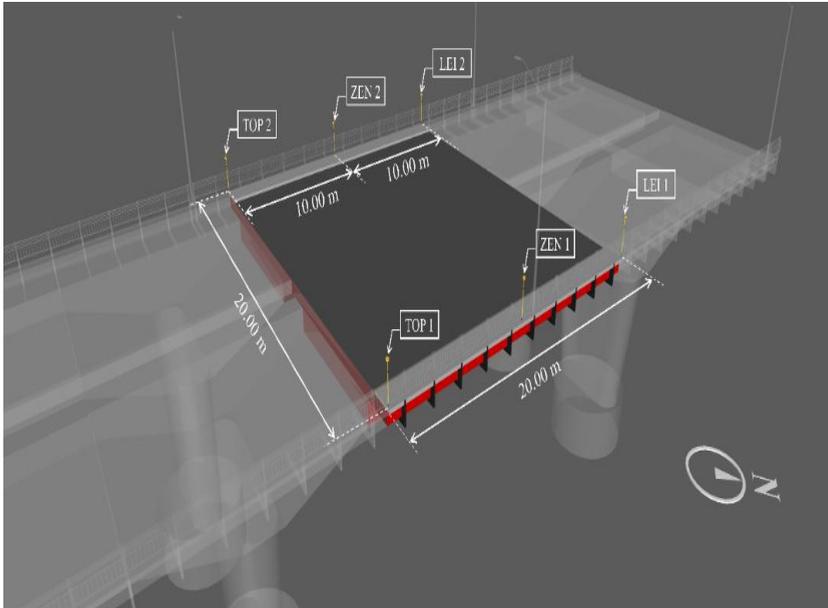


Figura 3.4: Posición de los receptores GPS sobre el Puente Juárez (cortesía de [32]).

La segunda campaña consta de dos diferentes sesiones 12:00 a 12:30 y de 17:00 a 17:30; cada sesión duró media hora, el intervalo de medición fue de 5 Hz y la máscara de elevación de 15° .

3.3.1 Planeación de las mediciones

Conocer las horas más óptimas para realizar las mediciones en dependencia del número de satélites visibles, la geometría de los satélites, el

comportamiento de la ionósfera y los valores de la dilución de la precisión o DOP, son necesarios para mejorar la calidad de nuestro trabajo y esto es posible con el uso del software Trimble Planning online. Se eligió el software Trimble Planning online porque sus datos están actualizados, las gráficas son interactivas para una mayor apreciación, nos muestra la visibilidad de los satélites, el valor del DOP, el comportamiento de la ionósfera para una específica ubicación y fecha, igualmente es una herramienta que se encuentra de fácil acceso en el siguiente weblink: (<https://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/>).

Primeramente, para hacer la planeación de las mediciones en el software trimble planning online se ingresan las coordenadas del lugar de interés, fecha, la máscara de elevación y el huso horario, como se ve en la Figura 3.5.



The image shows a web-based configuration form titled "Configuración". It contains several input fields and buttons:

- Latitud:** Input field with "N 24.8192°" and a "Seleccionar..." button.
- Longitud:** Input field with "O 107.3808°".
- Altura:** Input field with "0m".
- Máscara:** Input field with "10°" and an "Obstrucciones..." button.
- Día:** Input field with "20/01/2017" and a "Hoy" button.
- Intervalo visible:** Dropdown menu with "12:00 a.m." selected.
- Intervalo de tiempo [horas]:** Dropdown menu with "24" selected.
- Huso Horario:** Dropdown menu with "(UTC-07:00) Chihuahua, La Paz, Mazatlan" selected.
- Aplicar:** A large button at the bottom right.

Figura 3.5: Configuración del software Trimble Planning online.

El segundo paso es seleccionar los sistemas de navegación de interés, teniendo las opciones de GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou y QZSS.

A continuación se muestra 6 gráficas como ejemplo de la información recabada en la planeación de las mediciones de acuerdo a los parámetros ingresados en el primer paso.

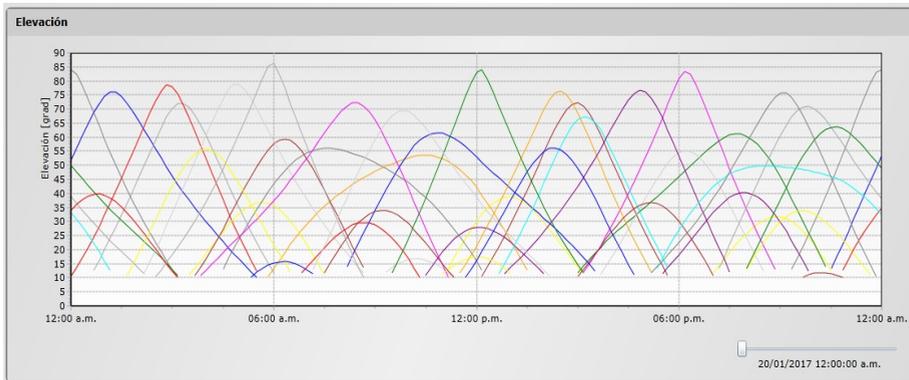


Figura 3.6: Elevación de satélites.

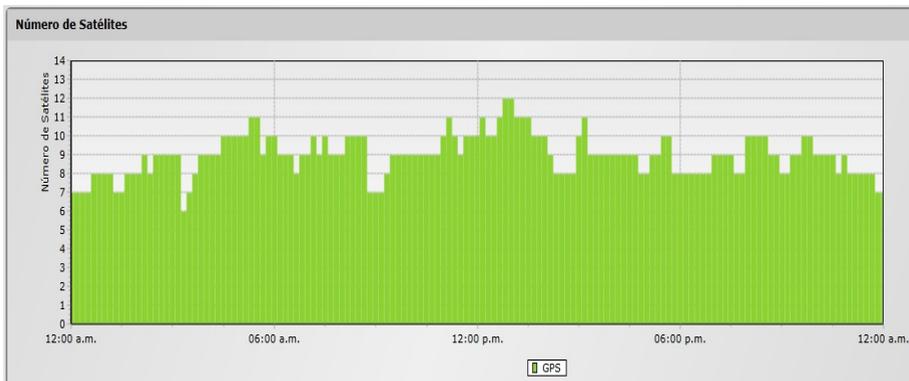


Figura 3.7: Número de satélites.

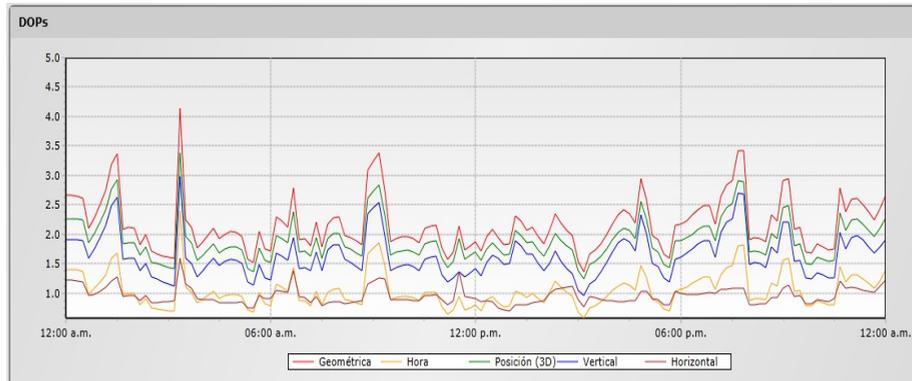


Figura 3.8: DOPs.

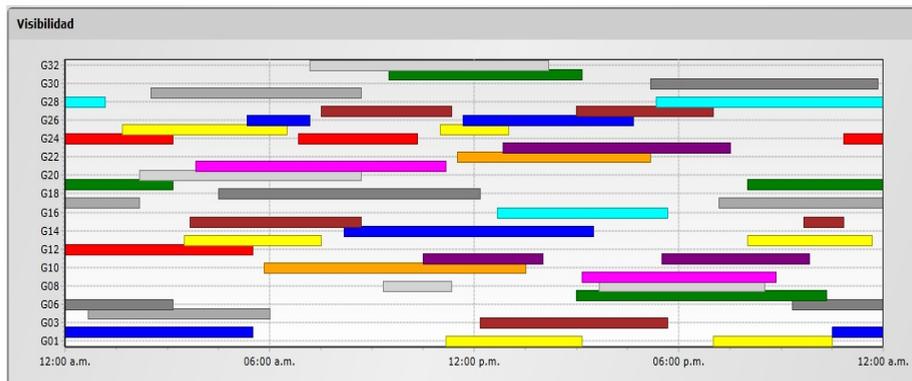


Figura 3.9: Visibilidad de satélites.

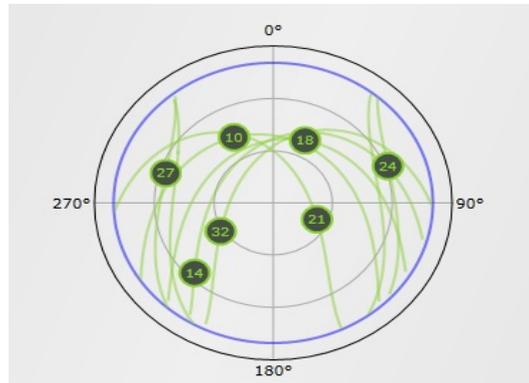


Figura 3.10: Vista de cielo.

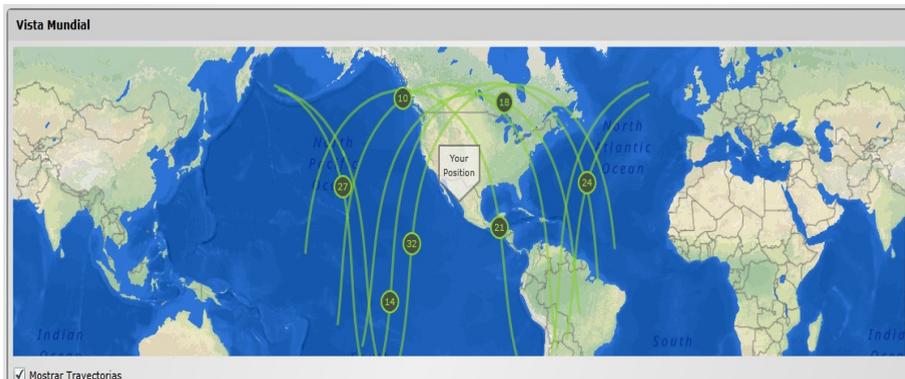


Figura 3.11: Vista Global.

3.4 Propuesta metodológica para el análisis de las series de tiempo recolectadas por el GPS

Los valores arrojados por el software Topcon tools se expresan en función del tiempo para describir el cambio de las tres coordenadas. En la Figura 3.12 se muestra un ejemplo de las series de tiempo crudas para

las coordenadas norte-sur, este-oeste y altura sobre la estación ZEN1.

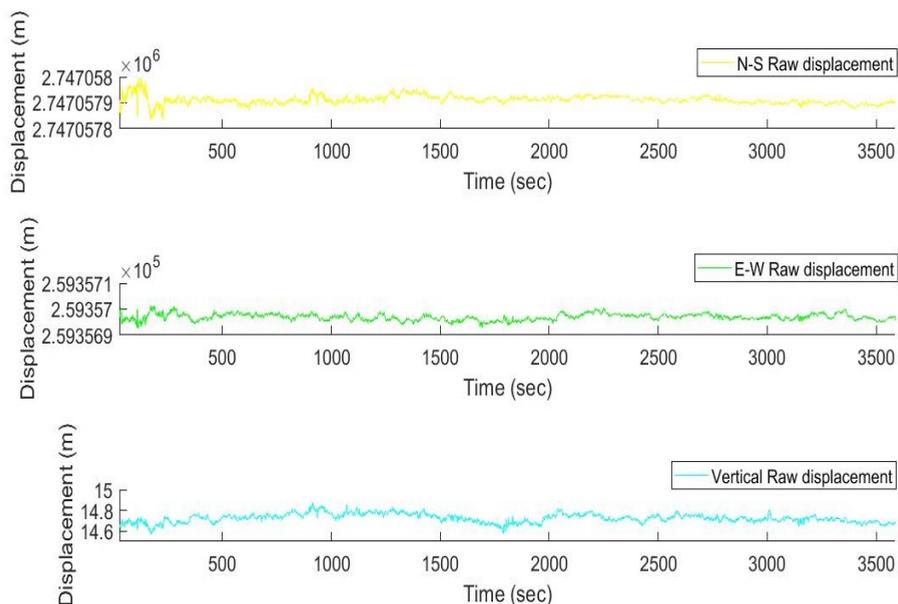


Figura 3.12: Series del tiempo crudas de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).

La ilustración nos muestra que la información proporcionada por los receptores contiene ruido producido por elementos como la multi-trayectoria de la señal, desincronización entre los relojes satélite-receptores y retrasos atmosféricos. Adicionalmente, las coordenadas pertenecen al elipsoide WGS84; por ello, para ser más sencillo el análisis de las series del tiempo estas se transforman a desplazamiento aparente y el ruido que contiene se reduce o elimina con filtros.

3.4.1 Series de tiempo de desplazamiento aparente

La transformación de las series de tiempo crudas a desplazamiento aparente se realiza para observar el comportamiento de las coordenadas con respecto a un cero relativo representando el nivel de equilibrio

del punto de monitoreo haciendo más fácil apreciar el comportamiento del Puente Juárez [22, 8]. La transformación se basa en la siguiente ecuación.

$$A_i = R_i - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_i \quad (3.1)$$

Donde A_i es el desplazamiento aparente, R_i es la posición cruda obtenida a partir del receptor GPS, n es el número de puntos muestreado e $i = 1, \dots, n$.

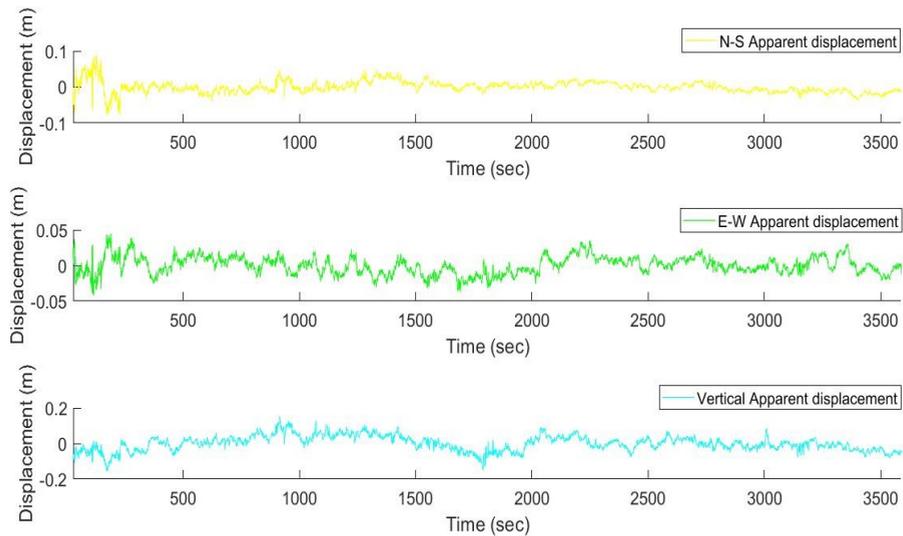


Figura 3.13: Desplazamiento aparente de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).

Como ejemplo se observa en la Figura 3.13 el desplazamiento aparente de la estación ZEN1 en la primera campaña, el lunes para la sesión de 8:00 a 9:00 horas.

3.4.2 Filtrado sobre las series de tiempo

A pesar de que el desplazamiento aparente permite una mejor visualización de la información, un particular comportamiento del Puente

Juárez no se puede apreciar por el ruido en los datos. Debido a lo cual, se decidió dividir la problemática en dos vertientes; aplicando el filtro media móvil en el desplazamiento aparente para obtener los desplazamientos semi-estáticos y con el filtro Chebyshev de nuevo sobre el desplazamiento aparente para obtener los desplazamientos dinámicos, ambos describen el comportamiento que sufre el puente bajo cargas cotidianas.

3.4.3 Filtro de Media móvil

El filtro media móvil, es un filtro pasa bajas con buen comportamiento en el dominio del tiempo, pero malo en el dominio de la frecuencia. Algunas investigaciones emplean este filtro para obtener los desplazamientos semi-estáticos [22, 8]. El filtro media móvil se utiliza para suavizar las series de tiempo, se basa en tomar un número de elementos de acuerdo al tamaño de la ventana seleccionada, iniciando en el elemento 1 y calcula su promedio; después toma el mismo número de elementos, pero iniciando en el número 2 para calcular su promedio y así subsecuentemente. A continuación se muestra la ecuación del filtro de la media móvil [30].

$$Y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j] \quad (3.2)$$

Donde $x[]$ es la señal de entrada, $Y[]$ es la señal de salida, y M es el número de puntos usados en la media móvil (tamaño de la ventana).

3.4.4 Filtro Chebyshev

El filtro Chebyshev es más complejo que media móvil, ya que para su diseño necesita de un mayor número de parámetros, además existen dos diferentes tipos de filtros Chebyshev, los cuales se mencionan a continuación y se observan en la Figura 3.14.

- Tipo 1: Ondulación en la banda pasante.
- Tipo 2: Ondulación en la banda atenuante.

En el caso de la especificación básica de filtros se necesitan 5 parámetros basados en las características de atenuación (Figura 3.15):

- Máxima atenuación en la banda de paso.
- Ondulación en la banda de paso.
- Mínima atenuación en la banda de rechazo.
- Frecuencias de esquina de la banda de paso.
- Frecuencia de la esquina de la banda de rechazo.

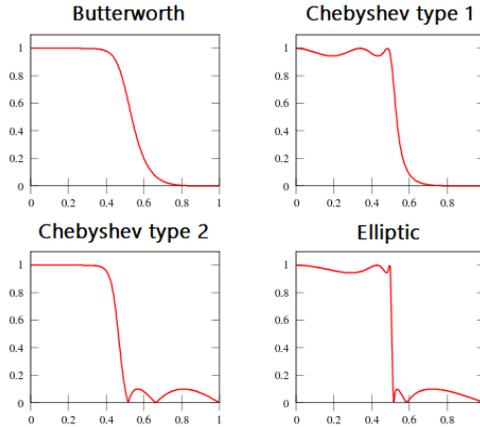


Figura 3.14: Comparando Filtros Chebyshev con respecto a otros filtros (cortesía de la página web: en.wikipedia.org).

Filtro Chebyshev tipo 1 tiene una ondulación en la banda de paso. Mientras mayor es el orden, mayor es la pendiente en la región de transición, pero mayor es la ondulación y el número de ondulaciones en la banda de paso. Para el filtro Chebyshev de tipo 1, la ganancia como función angular de frecuencia w orden n de pasa bajas, es igual al valor absoluto de la función de transferencia $|H_n(jw)|$ [33]:

$$G_n(w) = |H_n(jw)| = \frac{1}{\sqrt{1 + e^2 + T_n^2\left(\frac{w}{w_0}\right)}} \quad (3.3)$$

Donde e es el factor de ondulación, w_0 es la frecuencia de corte, y T_n es el orden polinomial Chebyshev.

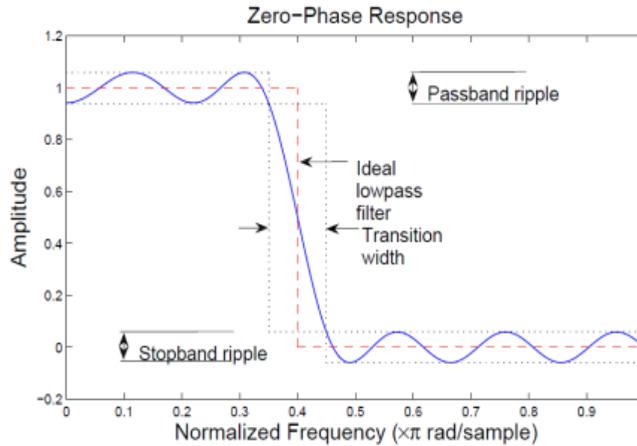


Figura 3.15: Diseño del filtro (cortesía de página web: math-works.com).

3.4.5 Desplazamientos resultantes del filtrado

Las series de tiempo resultantes del filtrado son dos:

- Componente de periodo largo, usando el filtro media móvil y representa el desplazamiento semi-estático.
- Componente de periodo corto, usando el filtro Chebyshev y expresa el desplazamiento dinámico.

Son denominadas de periodo corto y largo, debido a la velocidad y frecuencias de sus comportamientos. Por ejemplo, la componente de periodo corto es de alta velocidad de tal forma que, su frecuencia es alta (desplazamientos dinámicos) y lo contrario se puede observar en la componente de periodo largo (desplazamientos semi-estáticos).

3.4.6 Desplazamientos semi-estáticos

Los desplazamientos semi-estáticos son expresados por la componente de periodo largo [25] y pueden ser usados para analizar el movimiento del puente [17]. La Figura 3.16 muestra un ejemplo de los desplazamientos semi-estáticos y aparentes de la estación ZEN1 en la primera sesión, el lunes para el periodo de 8:00-9:00 presentados en términos de norte-sur, este-oeste y altura.

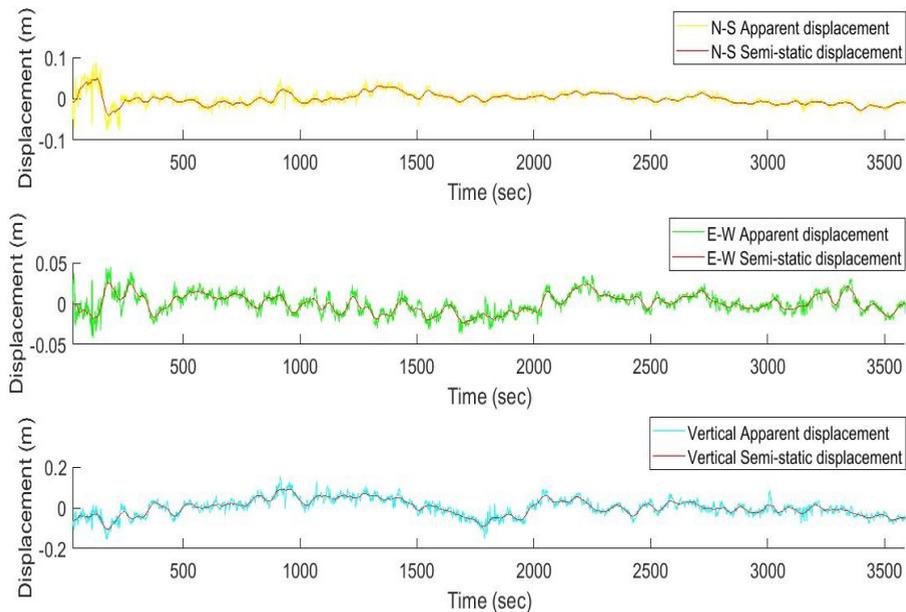


Figura 3.16: Desplazamiento aparente y semi-estático de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).

Desplazamientos semi-estáticos fueron calculados por el filtro media móvil con una ventana de 41 segundos usando el software MATLAB [22, 8]. La función utilizada para aplicar el filtro media móvil en MATLAB es *movmean* como se ve en las siguientes líneas del código (el código completo se puede observar en el Anexo A):

```
%Smoothing time series with Moving Average
kk1=movmean(NORTH11,41);
kk2=movmean(EAST11,41);
kk3=movmean(VERTICAL11,41);
```

Donde KK son las series de tiempo de desplazamientos semi-estáticos, $NORTH11$, $EAST11$ Y $VERTICAL11$ son las series de tiempo de desplazamiento aparente y por último, 41 es el tamaño de la ventana del filtro.

3.4.7 Probabilidad de falla

Al obtener los desplazamientos semi-estáticos, la componente vertical es comparada con los límites de deflexión que señala AASHTO. Naturalmente, los desplazamientos medidos durante el monitoreo GPS del Puente Juárez no son constantes porque su distribución es aleatoria. Para determinar la distribución correspondiente que siguen los desplazamientos medidos se construye un histograma y la función de probabilidad de densidad para cada sesión GPS. El PDF indicará en una forma clara la naturaleza aleatoria del desplazamiento [36]. Distintas distribuciones (normal, lognormal, tipo1, etc.) pueden ser utilizadas en la profesión para representar la incertidumbre de las variables aleatorias. Se encontró que la mejor opción fue la distribución normal para la información GPS recolectada en el Puente Juárez. Como ejemplo, la Figura 3.17 presenta el histograma y PDF de la sesión de 8:00 a 9:00 sobre la estación ZEN1, en la primera campaña, el día lunes. En este trabajo de investigación solamente se evaluará la componente vertical. Las series de tiempo correspondiente a la componente vertical de los desplazamientos semi-estáticos por sesión pueden ser expresadas por la curva del PDF, dependiendo de la distribución (asumiendo la distribución normal para esta investigación). Por lo tanto, la probabilidad de falla, la cual es igual al área de la curva PDF afuera de los límites de deflexión de AASHTO, se puede calcular de la siguiente forma [36]:

$$pf = 1 - P(a < X \leq b) \quad (3.4)$$

Donde X representa el desplazamiento medido, y a , b son los límites establecidos por el código de construcción [1].

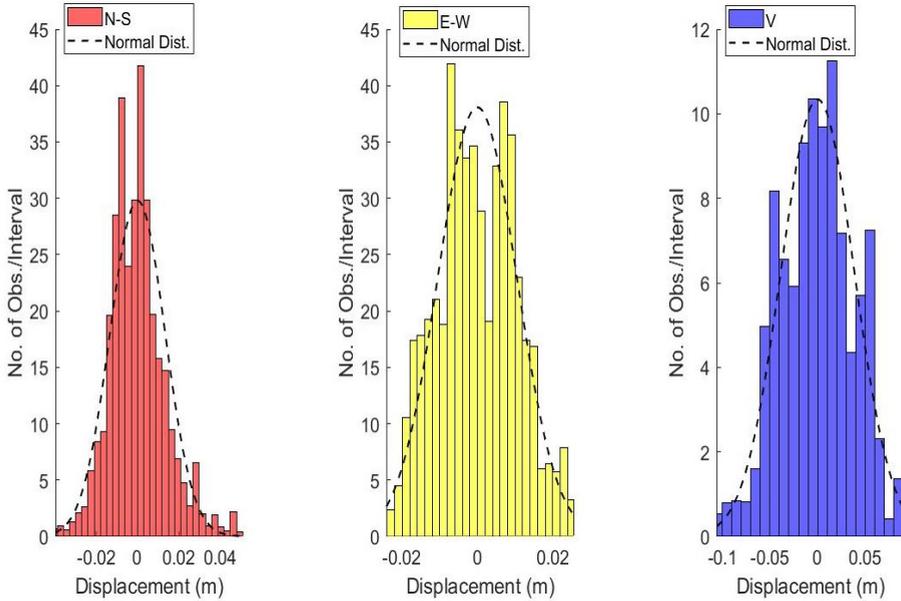


Figura 3.17: Histogramas y PDF de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).

La probabilidad $P(a < X \leq b)$ puede ser calculada como:

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f_x(x) dx \quad (3.5)$$

Donde $f_x(x)$ es el PDF de los desplazamientos bajo examinación. Considerando que los desplazamientos recolectados por el GPS asumen la distribución normal, el correspondiente PDF puede ser expresado como:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (3.6)$$

$$-\infty < x < +\infty \quad (3.7)$$

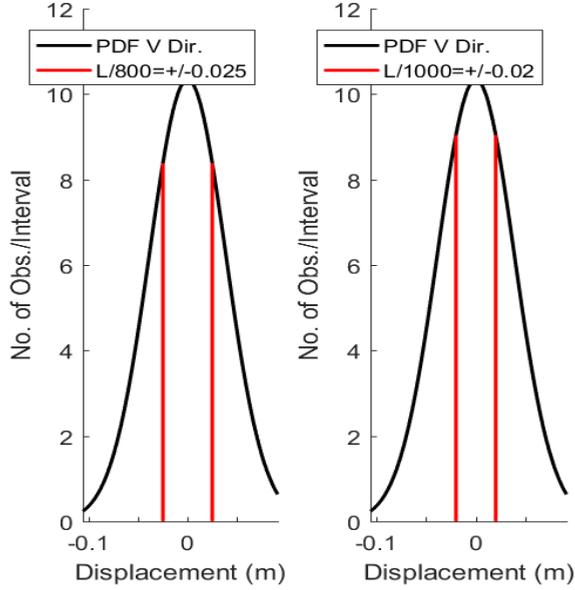


Figura 3.18: PDF y límites de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).

Donde μ_x y σ_x representa la media y la desviación estándar de un conjunto de datos de los correspondientes desplazamientos recolectados, respectivamente. Por lo tanto, la Ecuación 3.6 puede ser reescrita como:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_a^b \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (3.8)$$

o

$$P(a < X \leq b) = \Phi\left(\frac{b - \mu_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu_x}{\sigma_x}\right) \quad (3.9)$$

Donde $\Phi()$ representa CDF en la distribución normal. Los valores de CDF pueden ser fácilmente obtenidos usando programas de cómputo, también los valores de CDF son reportados en la literatura [36]. Finalmente, la ecuación 3.9 se expresa como:

$$pf = 1 - \left(\Phi\left(\frac{b - \mu_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu_x}{\sigma_x}\right)\right) \quad (3.10)$$

Los límites a y b en la Ecuación 3.10 son reportados en el manual de AASHTO [1]. Basado en esta guía, dos límites de deflexión son considerados (1) $L/800$, and (2) $L/1000$, donde L es la longitud del claro del puente (en nuestro caso 20 metros). El primer límite considera cargas vehiculares y el segundo cargas vehiculares y/o peatonales. Los correspondientes valor de los límites son: 0.025 metros, and 0.02 metros, respectivamente. Como ejemplo de los límites previos, la Figura 3.18 presenta el PDF de la componente vertical sobre la estación ZEN1 en el periodo de 8:00-9:00 en la primera campaña, el día lunes con respecto a los límites de deflexión. Básicamente, el área de la curva PDF afuera de los límites (línea roja) no satisface los estándares de AASHTO.

3.4.8 Desplazamientos dinámicos

Los desplazamientos dinámicos son expresados por la componente de periodo corto, su cálculo se realizó teniendo en consideración que la señal de vibraciones dinámicas en el monitoreo de un puente por GPS puede ser expresada por medio de la siguiente ecuación:

$$y(n) = M(n) + D(n) + N(n) \quad (3.11)$$

Donde $M(n)$ representa las frecuencias bajas producidas por el error de multi-trayectoria, errores atmosféricos, o por errores de los relojes, entre los cuales la multi-trayectoria es la mayor parte; $D(n)$ es la vibración dinámica del puente y $N(n)$ es ruido aleatorio [33]. Aplicando un filtro pasa altas, los desplazamientos dinámicos son obtenidos. El filtro usado fue Chebyshev de tipo 1, 8vo orden [25, 22, 38], 1dB de ondulación y 0.4 Hz como frecuencia de corte. La frecuencia de corte de 0.4 Hz es apropiada, ya que se encuentra en el rango de 0.4-5 Hz, el cual considera una gran variedad de movimientos dinámicos, incluyendo oscilaciones de la mayoría de las estructuras de ingeniería [23].

El desplazamiento dinámico es calculado aplicando el filtro Chebyshev sobre el desplazamiento aparente. La Figura 3.19 presenta el desplazamiento dinámico de la estación ZEN1 para el periodo de 8:00-9:00 en la primera campaña, el día lunes. Desplazamiento dinámico describe la calidad del filtro utilizado durante el análisis y como guía para entender el comportamiento de la estructura afectada por cargas [17].

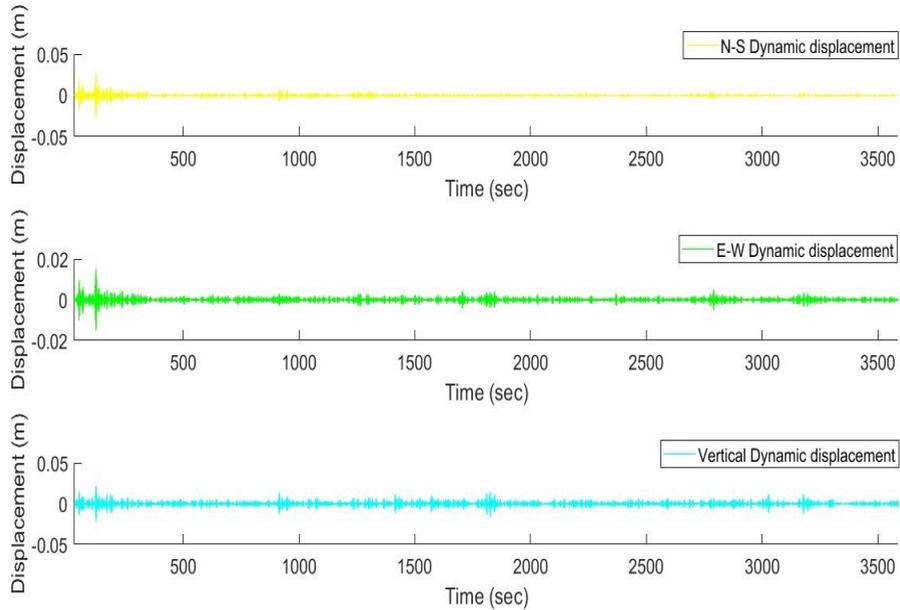


Figura 3.19: Desplazamiento dinámico de la estación ZEN1 (primera campaña, lunes, periodo 1).

Una gráfica del comportamiento del filtro Chebyshev es presentada en la Figura 3.20. A partir de la gráfica se puede ver que el filtro funciona correctamente en las frecuencias altas.

Las funciones utilizadas para aplicar el filtro Chebyshev en MATLAB son *cheby1* y *filter*, mientras que, para ver el comportamiento del filtro se empleó la función *freqz*. A continuación se muestra líneas del código:

```
%COEFFICIENTS CHEBYSHEV FILTER
```

```
[b,a] = cheby1(8,1,0.4/0.5,'high');
```

```
%PLOTING CHEBYSHEV FILTER PERFORMANCE
```

```
freqz(b,a)
```

```
%APPLYING CHEBYSHEV FILTER
```

```
kk1 = filter(b,a, NORTHH11);
```

```
kk2 = filter(b,a, EASTH11);
```

```
kk3 = filter(b,a, VERTICALH11);
```

Donde *cheby1* necesita como parámetros el orden del filtro, los decibelios de ondulación, la frecuencia de corte y el tipo de filtro. *Freqz* sólo utiliza como elementos de entrada los coeficientes resultantes de la función *cheby1*. *Filter*, aplica los coeficientes sobre la serie de tiempo de desplazamiento aparente.

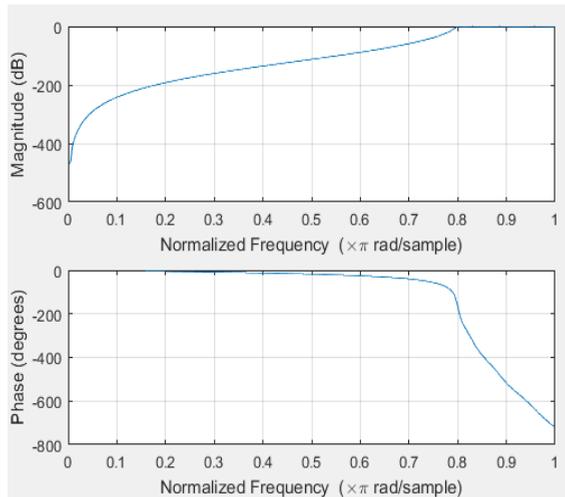


Figura 3.20: Comportamiento del Filtro Chebyshev.

3.4.9 Frecuencias características del Puente Juárez

Uno de los primordiales parámetros de seguridad en una obra de ingeniería es la frecuencia fundamental, definida en la sección 2.5.7 como la frecuencia de menor magnitud con la que vibra una estructura. El fenómeno de resonancia es el motivo de que la frecuencia fundamental sea importante (sección 2.5.6).

Normalmente, el método utilizado para conocer la frecuencia funda-

mental de una infraestructura civil es generar su modelo de elemento finito, conociendo las características de su diseño; pero, en nuestro caso el Puente Juárez es antiguo y no se tiene un plano con sus distintivos; a pesar de ello, el GPS es capaz de determinarla [28].

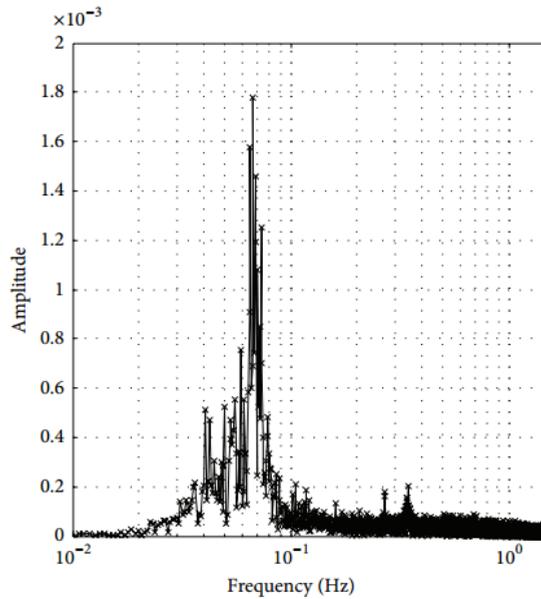


Figura 3.21: Frecuencias características del Puente Forth Road (cortesía de [25]).

Para determinar la frecuencia fundamental del Puente Juárez, se aplica la transformada rápida de Fourier al desplazamiento dinámico con el objetivo de conocer cuál es su comportamiento en el dominio de la frecuencia; la frecuencia fundamental se verá representada gráficamente como la frecuencia que aporte más potencial a la señal. La Figura 3.21 presenta un ejemplo de las frecuencias fundamental del Puente Forth Road, siendo el pico más alto de la gráfica [25].

Capítulo 4

Resultados

4.1 Introducción

Al aplicar diferentes tipos de filtros sobre las series de tiempo de desplazamiento aparente se obtienen dos comportamientos del puente, los cuales como se mencionó previamente son semi-estático y dinámico; con cada uno de estos comportamientos se obtuvieron características de desempeño del Puente Juárez como la probabilidad de falla, las frecuencias naturales y rangos de desplazamientos que éste presenta bajo cargas cotidianas de uso. En este capítulo se presentan las diversas series de tiempo resultantes de la recolección de datos en campo y el análisis que se efectuó, el cual indica el estado en que se encuentra dicho puente.

4.2 Resultados de la primera campaña de medición

La primera campaña de medición se realizó con 6 receptores GPS de doble frecuencia; 3 en la acera derecha y 3 en la izquierda de la loza central del puente distribuidos de acuerdo a la Figura 3.3. La campaña empezó el lunes y terminó el domingo, cada día presenta 3 sesiones de medición de una hora a un intervalo de 1 Hz. Debido a la gran cantidad de datos obtenidos se tomaran los resultados de la estación ZEN2 para el día lunes como ejemplo.

4.2.1 Desplazamiento semi-estático de la primera campaña

El comportamiento semi-estático es resultado de aplicar el filtro media móvil sobre las series de tiempo de desplazamiento aparente. En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se presenta la comparación entre el desplazamiento aparente y semi-estático para las tres componentes espaciales del día lunes sobre la estación ZEN2 (primera campaña; 8:00-9:00, 12:00-13:00 y 17:00-18:00 de 15/02/2016). En estas figuras es fácil notar que el desplazamiento aparente es suavizado para determinar la componente de periodo largo que a su vez expresa los desplazamientos semi-estáticos; también es interesante ver que la componente vertical es la que presenta una magnitud mayor en el rango de valores sobre el eje y de la gráfica. Los desplazamientos semi-estáticos completos en ZEN2 se pueden observar en el Anexo B.

Al comparar los desplazamientos verticales semi-estáticos con respecto a los límites de deflexión se determina la probabilidad de falla del Puente Juárez. El primer paso en la determinación de la probabilidad de falla es conocer la distribución que presentan los datos recolectados por el GPS.

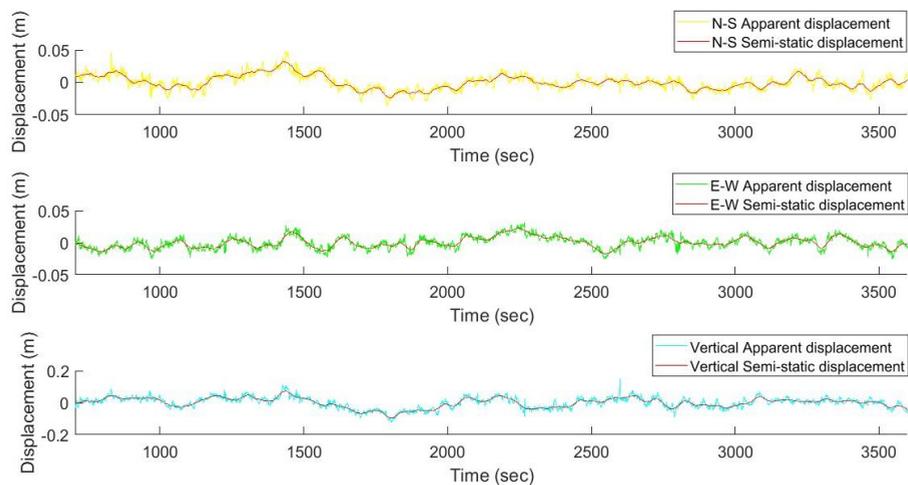


Figura 4.1: Desplazamiento aparente y desplazamiento semi-estático para la estación ZEN2 (sesión 1 de 15/02/2016).

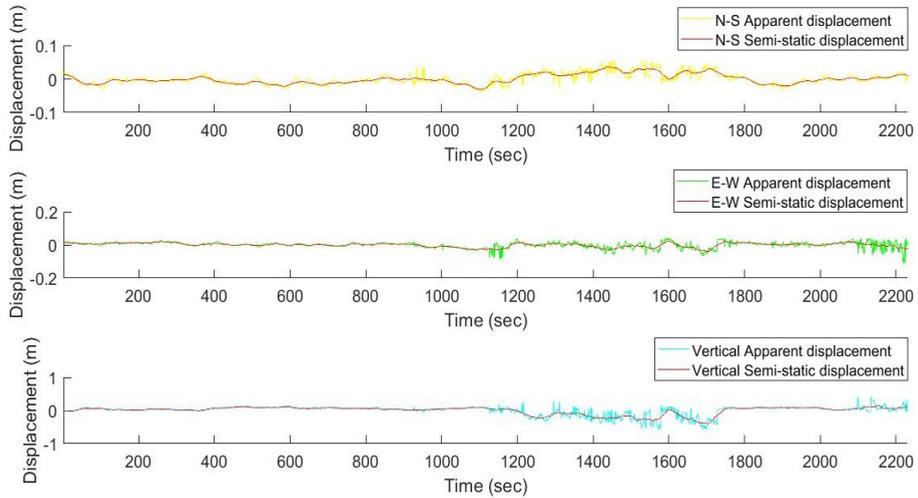


Figura 4.2: Desplazamiento aparente y desplazamiento semi-estático para la estación ZEN2 (sesión 2 de 15/02/2016).

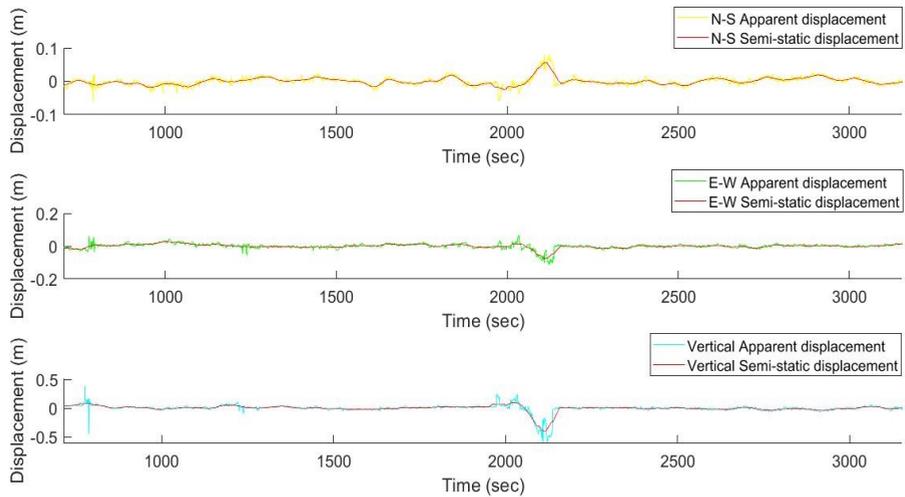


Figura 4.3: Desplazamiento aparente y desplazamiento semi-estático para la estación ZEN2 (sesión 3 de 15/02/2016).

Para conocer la distribución de los datos se construyeron histogramas con cada una de la sesiones de medición de los desplazamientos semi-estáticos. Se concluyó que el comportamiento al que más se apegan la mayoría de los resultados es a la distribución normal.

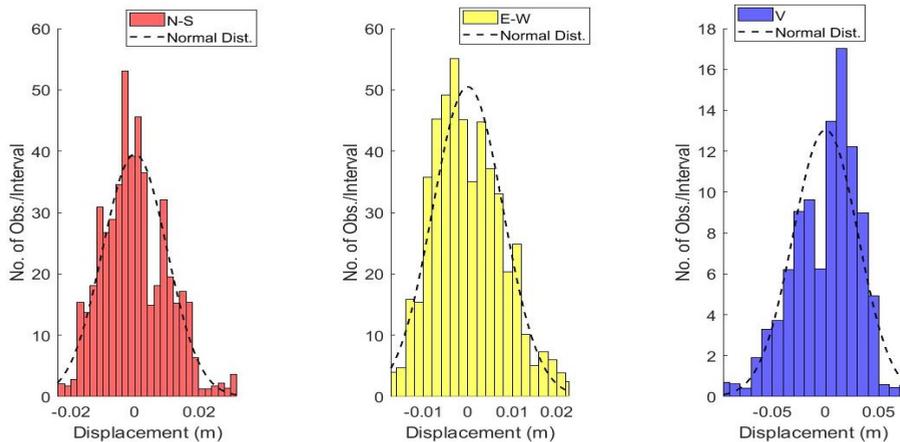


Figura 4.4: Histograma y PDF de ZEN2 (sesión 1 15/02/2016).

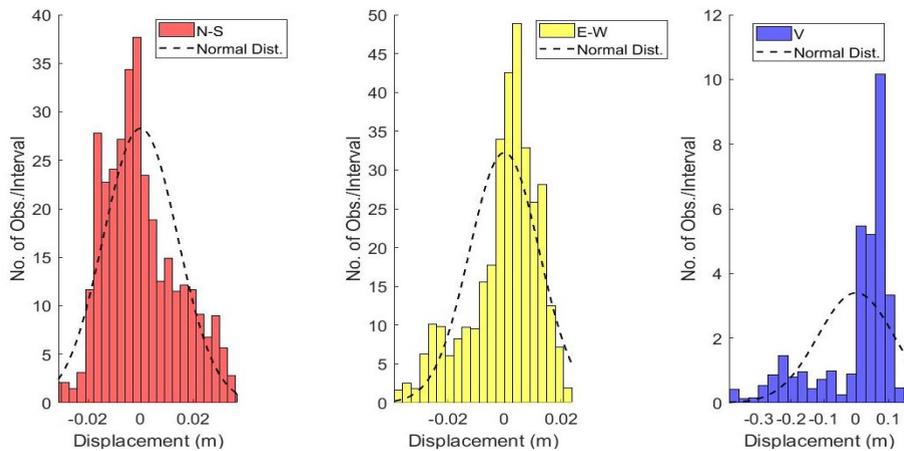


Figura 4.5: Histograma y PDF de ZEN2 (sesión 2 de 15/02/2016).

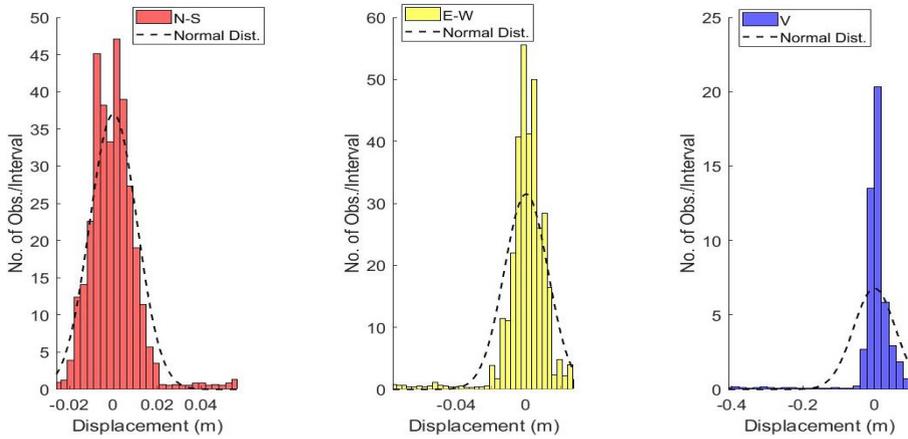


Figura 4.6: Histograma y PDF de ZEN2 (sesión 3 de 15/02/2016).

Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran los histogramas y el PDF para los datos de la primera campaña del día lunes sobre la estación ZEN2 en las tres componentes espaciales (norte-sur, este-oeste y vertical), el resto de las imágenes se pueden observar en el Anexo C.

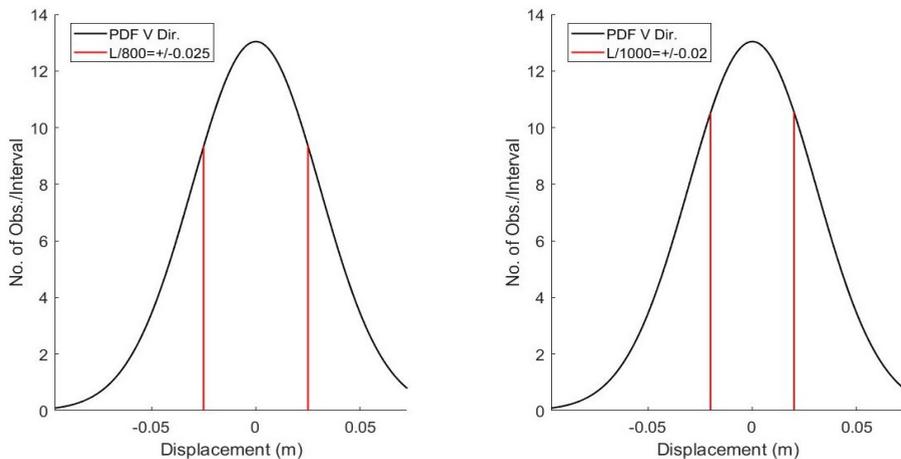


Figura 4.7: PDF y Límites de ZEN2 (sesión 1 15/02/2016).

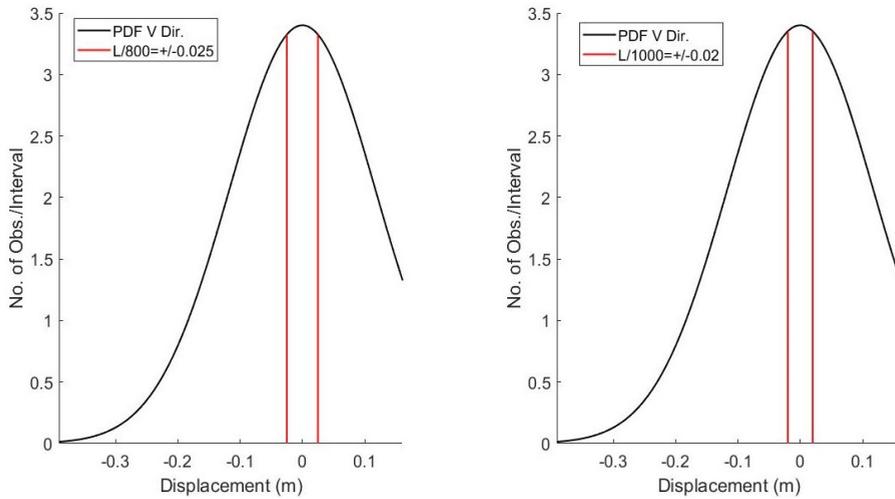


Figura 4.8: PDF y Límites de ZEN2 (sesión 2 15/02/2016)

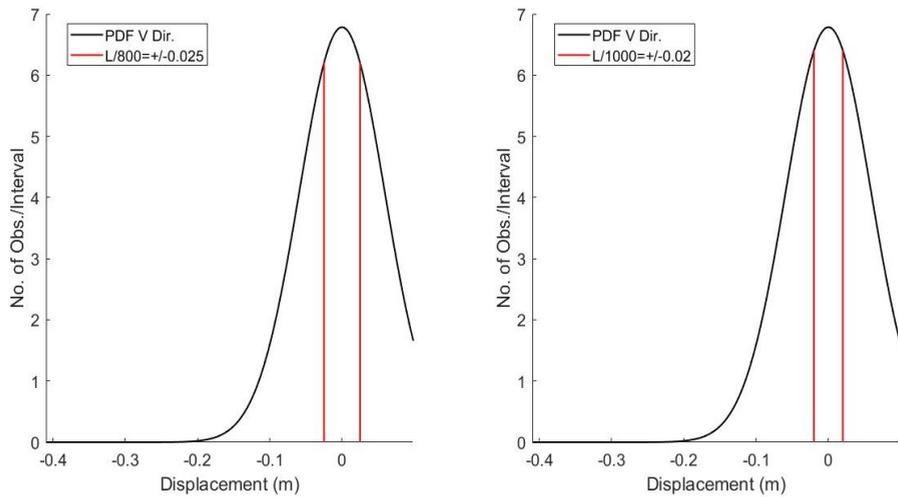


Figura 4.9: PDF y Límites de ZEN2 (sesión 3 15/02/2016)

Posteriormente, se generaron los PDF de cada una de las sesiones de medición y tomando los límites de deflexión previamente señalados, la probabilidad de falla se calcula. Las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 presentan los PDF comparados con los límites de deflexión establecidos en el manual de AASHTO para la primera campaña del día lunes sobre la estación ZEN2. El Anexo D muestra todos los PDF sobre la estación ZEN2. La probabilidad de falla de todas las sesiones (primera campaña) en la estación ZEN2 se pueden ver en la siguiente tabla.

Table 4.1: Probabilidad de falla sobre la estación ZEN2 primera campaña de medición.

Session GPS	Fecha	P_f L/800 (%)	P_f L/1000 (%)
Lunes 1	15/02/2016	41.39	51.33
Lunes 2	15/02/2016	83.13	86.46
Lunes 3	15/02/2016	67.07	73.38
Martes 1	16/02/2016	43.51	53.24
Martes 2	16/02/2016	51.64	60.36
Martes 3	16/02/2016	61.39	68.65
Miércoles 1	17/02/2016	46.70	56.06
Miércoles 2	17/02/2016	35.07	45.53
Miércoles 3	17/02/2016	49.99	58.94
Jueves 1	18/02/2016	42.83	52.63
Jueves 2	18/02/2016	36.12	46.51
Jueves 3	18/02/2016	19.13	29.59
Viernes 1	19/02/2016	33.08	43.66
Viernes 2	19/02/2016	32.40	43.01
Viernes 3	19/02/2016	33.64	44.18
Sábado 1	20/02/2016	50.88	59.71
Sábado 2	20/02/2016	72.85	78.12
Sábado 3	20/02/2016	82.50	85.96
Domingo 1	21/02/2016	42.45	52.29
Domingo 2	21/02/2016	40.17	50.23
Domingo 3	21/02/2016	15.01	24.96

En la tabla 4.1 se muestra la probabilidad de falla para cada una de las sesiones de medición realizadas sobre la estación ZEN2 en función de los dos límites de deflexión que AASHTO señala; se puede observar que el día con mayor probabilidad de falla en ZEN2 fue el lunes (12:00 a 13:00) y sábado (17:00 a 18:00) con resultados mayores al 80%.

Calculando la media de porcentaje de probabilidad de falla para todos las estaciones por sesión (primera campaña) se obtuvo que el día con el mayor porcentaje de probabilidad de falla fue el lunes en la segunda sesión, los días jueves y domingo presentaron el menor valor de probabilidad de falla en la sesión número 3; 5 de 7 días tienen el peor comportamiento en los desplazamientos a medio día y 3 sesiones de 21 están debajo del 40% de probabilidad de falla, es decir, que la mayoría de las sesiones se comportan con una probabilidad de falla mayor al 40%. Los datos anteriores son ilustrados en la Figura 4.10, donde el eje x señala cada una de las 21 sesiones GPS.

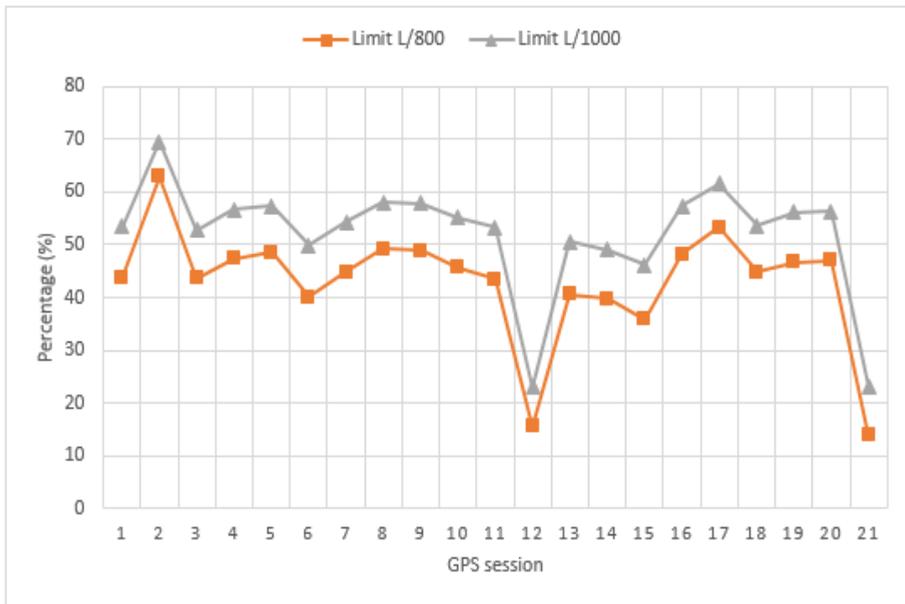


Figura 4.10: Promedio de la p_f por sesión considerando todos los receptores (15/02/2016 a 21/02/2016).

Analizando los datos de la primera campaña de medición por sesión, receptor GPS y límites de deflexión se generan las Figuras 4.11 y 4.12. El eje x señala cada una de las 21 sesiones GPS.

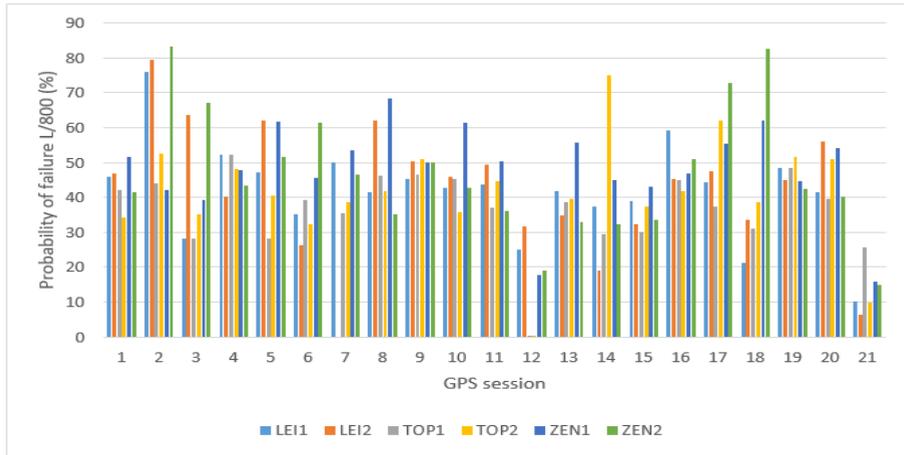


Figura 4.11: p_f por receptor (L/800) (15/02/2016 a 21/02/2016).

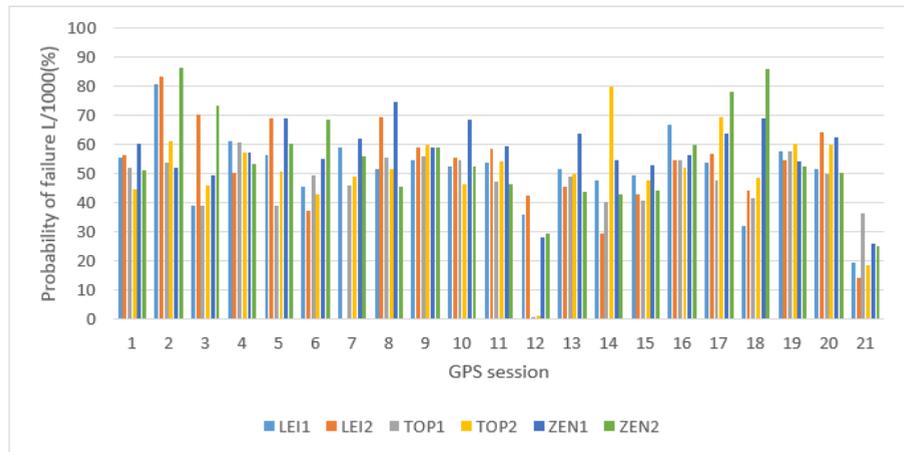


Figura 4.12: p_f por receptores (L/1000) (15/02/2016 a 21/02/2016).

Ambas gráficas presentan el mismo comportamiento que la Figura 4.10, sin embargo, nos permite observar que las estaciones del centro no son siempre las que presentan las mayores deflexiones, esto podría ser adjudicado al movimiento de torsión que se produce en la loza central del Puente Juárez. En el límite $L/800$ y $L/1000$ la estación ZEN2 muestra la mayor probabilidad de falla con más de un 80% en las sesiones 2 y 18. Las probabilidades de falla más bajas fueron en la sesión 12 sobre las estaciones TOP1 y TOP2. Por otro lado, la estación LEI2 perdió datos cuando medía el día miércoles de 12:00 a 13:00.

4.2.2 Desplazamiento dinámico de la primera campaña

El desplazamiento dinámico se obtiene al aplicar el filtro chebyshev en las frecuencias altas sobre el desplazamiento aparente. En las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se presentan los desplazamientos dinámicos en las tres direcciones correspondientes a las tres sesiones de medición del día lunes sobre la estación ZEN2 (primera campaña), donde se puede observar al igual que en el comportamiento semi-estático los mayores desplazamientos se producen en la componente vertical.

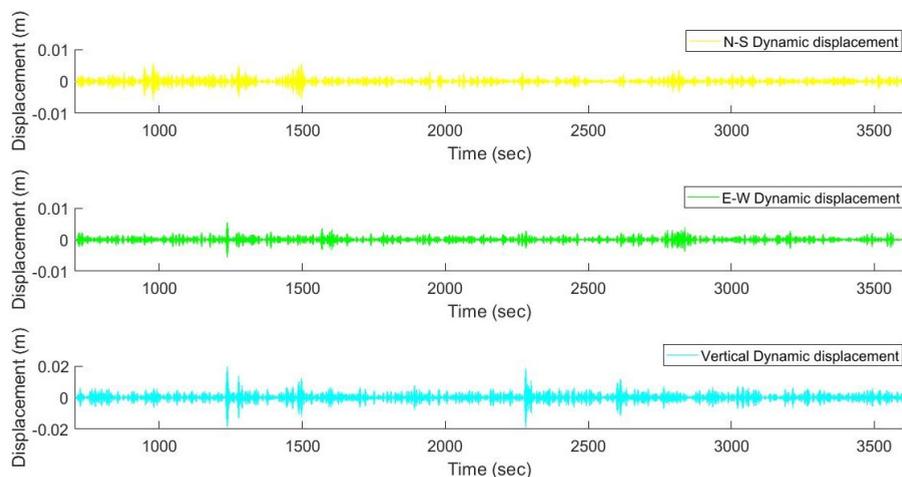


Figura 4.13: Desplazamiento dinámico en ZEN2 (sesión 1 de 15/02/2016).

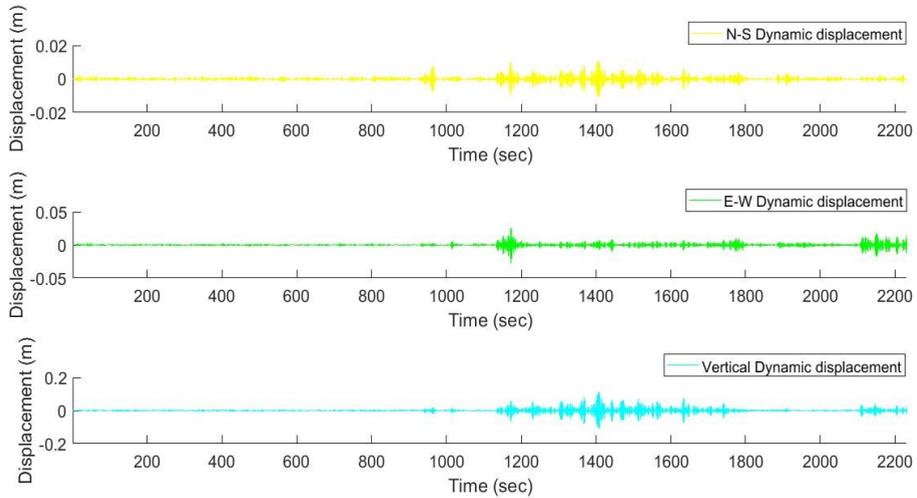


Figura 4.14: Desplazamiento dinámico en ZEN2 (sesión 2 de 15/02/2016).

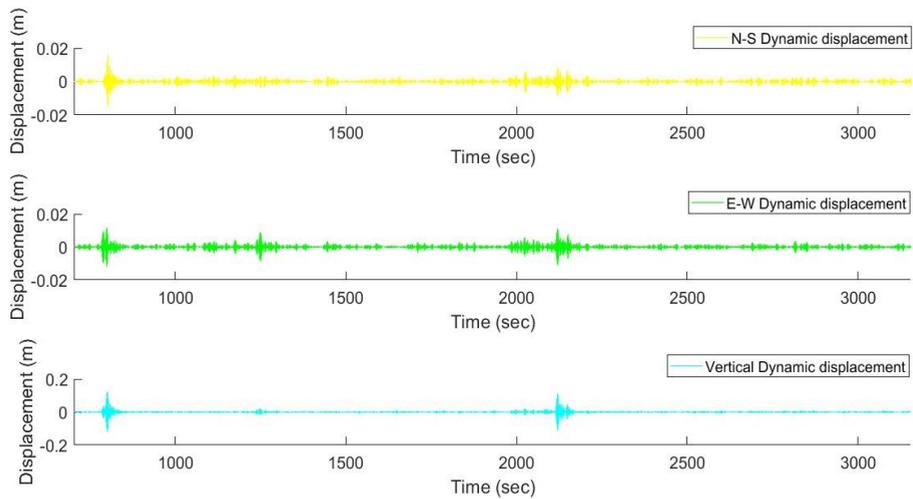


Figura 4.15: Desplazamiento dinámico en ZEN2 (sesión 3 de 15/02/2016).

Los desplazamientos dinámicos del resto de la campaña de medición en ZEN2 se pueden observar en el Anexo E.

Considerando los máximos desplazamientos dinámicos para cada sesión (primera campaña) y estación; el máximo valor de deflexión fue de 0.25 metros y la estación con resultados menos favorables fue ZEN2 presentando los mayores rangos de deflexión en 17 sesiones de 21. La Figura 4.16 muestra la información anterior, donde el eje x representa cada una de las 21 sesiones GPS.

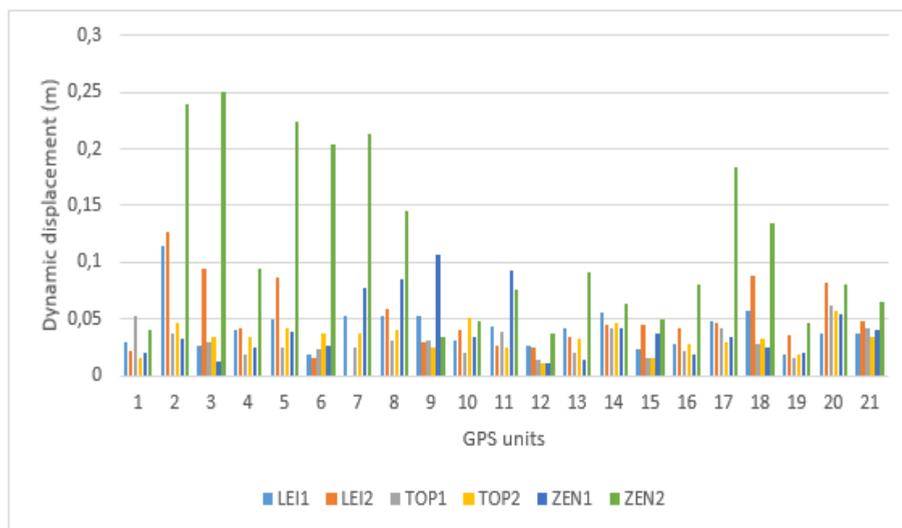


Figura 4.16: Máximos desplazamientos dinámicos por sesión y estación (15/02/2016 a 21/02/2016).

Al comparar las Figuras 4.16, 4.11 y 4.12 se esperaría que el comportamiento fuera similar para cada estación; no obstante, los desplazamientos dinámicos son movimientos rápidos donde la estación ZEN2 presenta los movimientos de mayor magnitud (0.25 metros). Por otro lado, la probabilidad de falla se calcula considerando movimientos fuera de los límites, no es solo un gran desplazamiento como el comportamiento dinámico; por lo que, su desempeño es variado, es decir, que no se presenta una conducta sobresaliente en una específica estación.

4.2.3 Frecuencias características de la primera campaña de medición

La propuesta para encontrar las frecuencias naturales de la estructura es aplicando la transformada rápida de Fourier en los desplazamientos dinámicos; sin embargo, al no conocer el diseño estructural del Puente Juárez es complicado determinar el rango en que se encuentra la frecuencia fundamental de dicha estructura. El intervalo de medición fue de 1 Hz lo que permite visualizar datos en el dominio de la frecuencia de 0 a 0.5 Hz de acuerdo con Nyquist-Shannon [24]. Las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19 presentan el potencial espectral, es decir, el comportamiento dinámico del puente Juárez en el dominio de la frecuencia sobre la estación ZEN2 (primera campaña) del día lunes para las tres componentes espaciales, no obstante, ninguna frecuencia natural se puede observar a través de las gráficas, incluso en ninguna estación se apreció algo relevante en términos de frecuencia. La principal causa de que no se encuentre ninguna frecuencia natural es que pueden estar localizadas en un rango mayor a 0.5 HZ. El Anexo F contiene el comportamiento del puente sobre la estación ZEN2 en el dominio de la frecuencia.

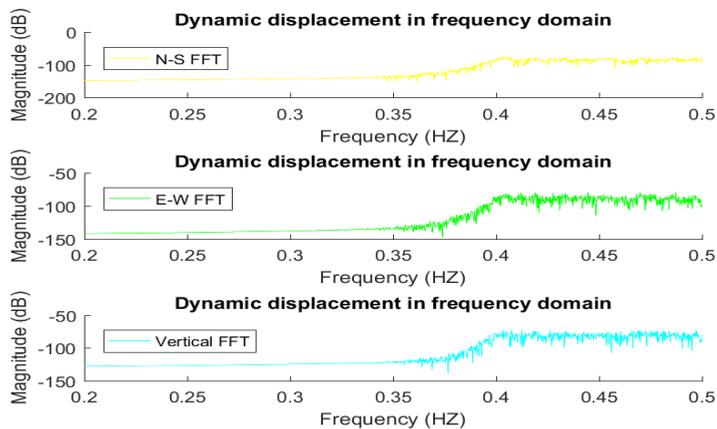


Figura 4.17: Frecuencias características en ZEN2 (sesión 1, 15/02/2016).

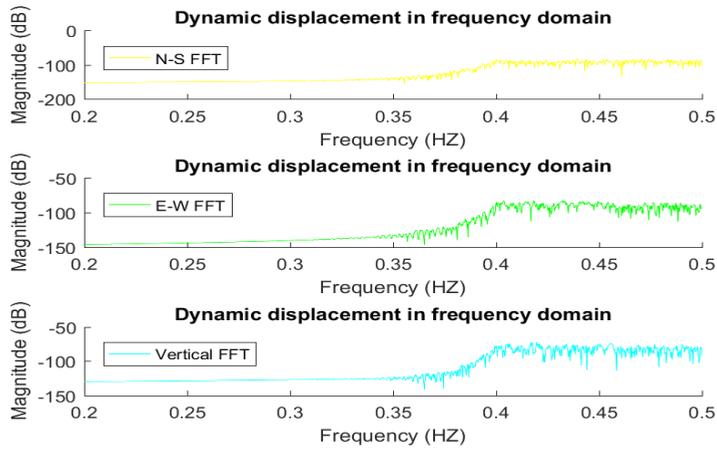


Figura 4.18: Frecuencias características en ZEN2 (sesión 2, 15/02/2016).

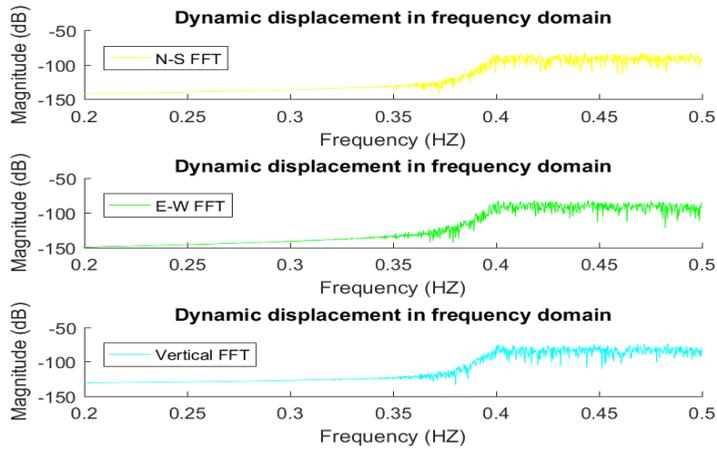


Figura 4.19: Frecuencias características en ZEN2 (sesión 3, 15/02/2016).

4.3 Resultados de la segunda campaña de medición

El principal inconveniente de la primera campaña de medición es que no se encontró alguna de las frecuencias naturales del Puente Juárez tal vez debido al intervalo de medición (1 Hz). En la actualidad los receptores GPS son capaces de recolectar información con un intervalo de medición de hasta 100 Hz reduciendo la ventaja que tiene el acelerómetro sobre él con una capacidad de medición de 200 Hz. Sin embargo, la máxima capacidad de medición que tienen los receptores GPS disponibles para este trabajo es de 5 Hz; por lo tanto, se decidió hacer otra campaña de medición con ese intervalo de medición. En base a los resultados de la primera campaña de medición, el día con los máximos desplazamientos fue el lunes a medio día y la tarde sobre las estaciones ZEN1-ZEN2; por lo tanto, se consideran para la segunda campaña.

4.3.1 Desplazamiento semi-estático de la segunda campaña

La segunda campaña de medición consta de 2 sesiones de media hora. En las siguientes figuras se muestran los desplazamientos semi-estáticos, donde la componente vertical sufre los movimientos más drásticos.

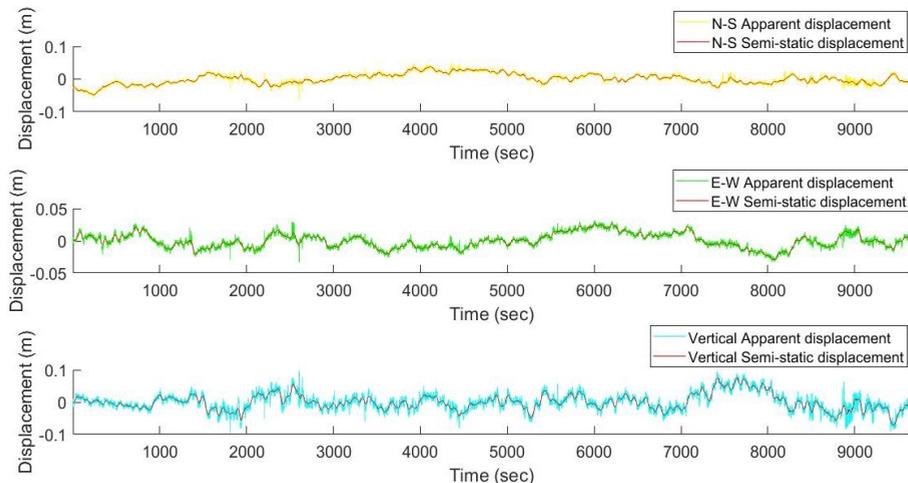


Figura 4.20: Semi-estático en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).

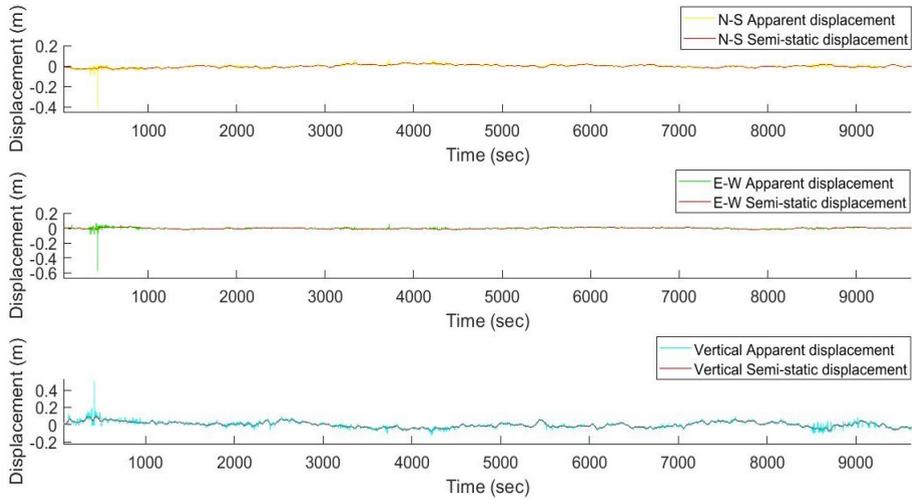


Figura 4.21: Semi-estático en ZEN1 (sesión 2, 16/02/2017).

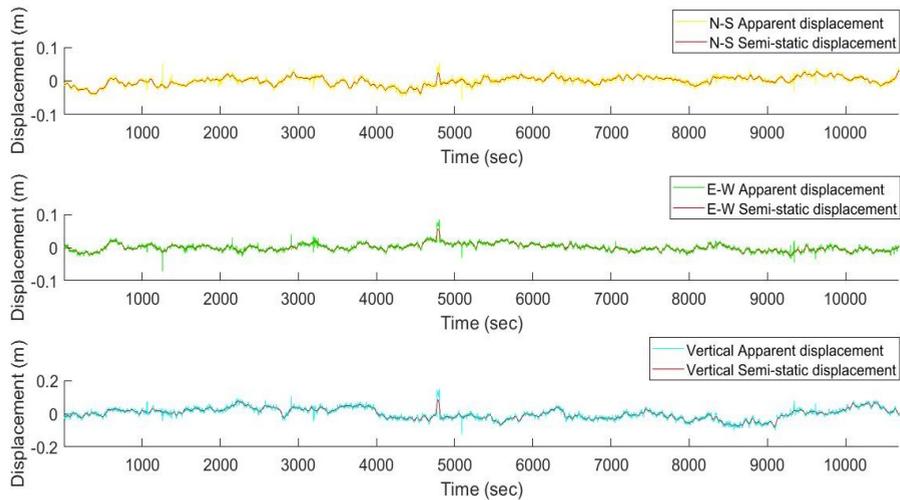


Figura 4.22: Semi-estático en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).

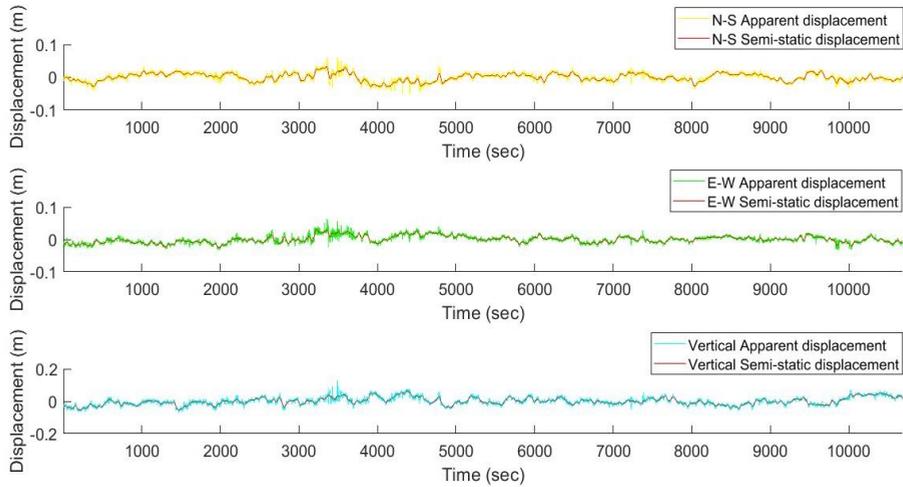


Figura 4.23: Semi-estático en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).

Calculando la p_f se obtuvieron los siguientes PDFs con un comportamiento muy parecido con respecto a la primera campaña.

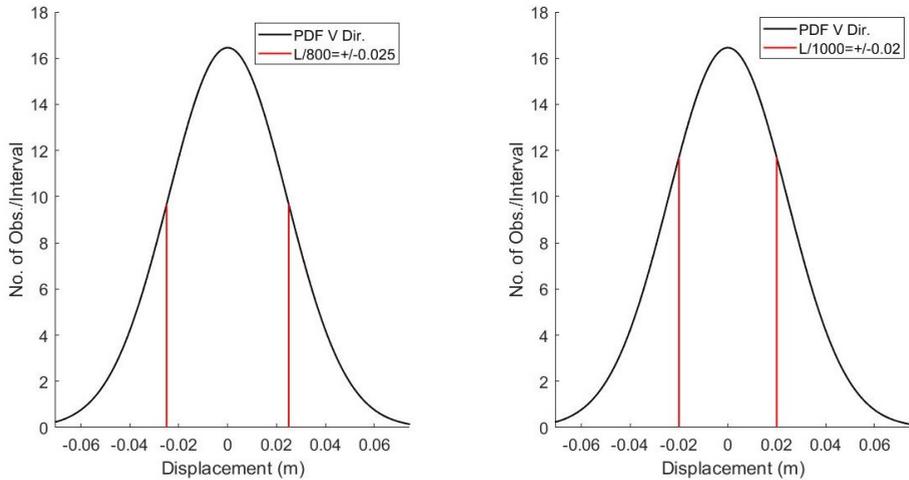


Figura 4.24: PDF y límites en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).

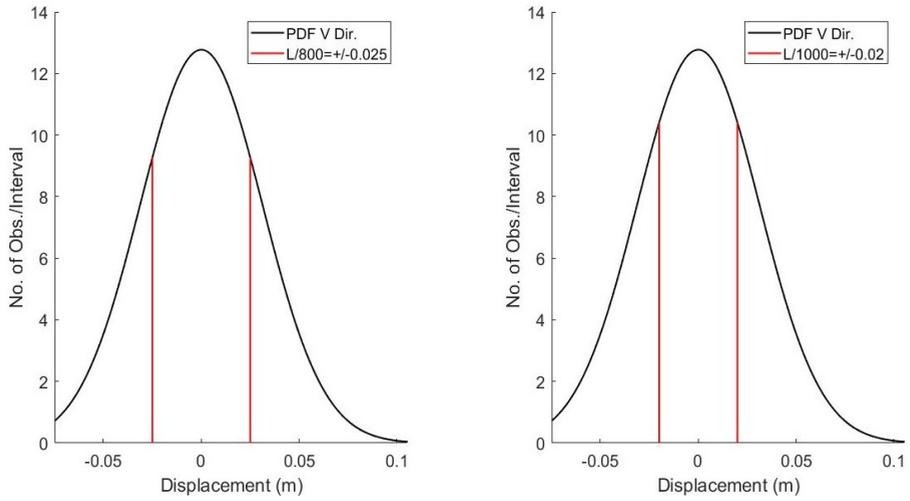


Figura 4.25: PDF y límites en ZEN1 (sesión 2, 16/02/2017).

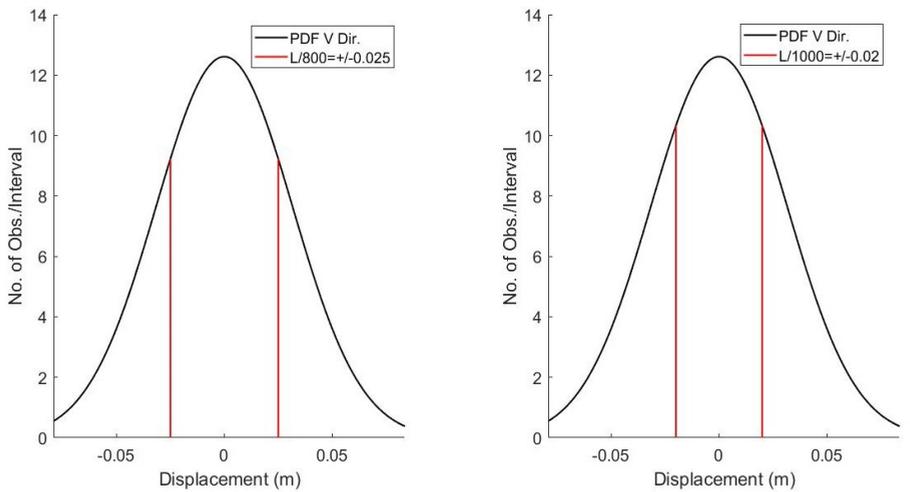


Figura 4.26: PDF y límites en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).

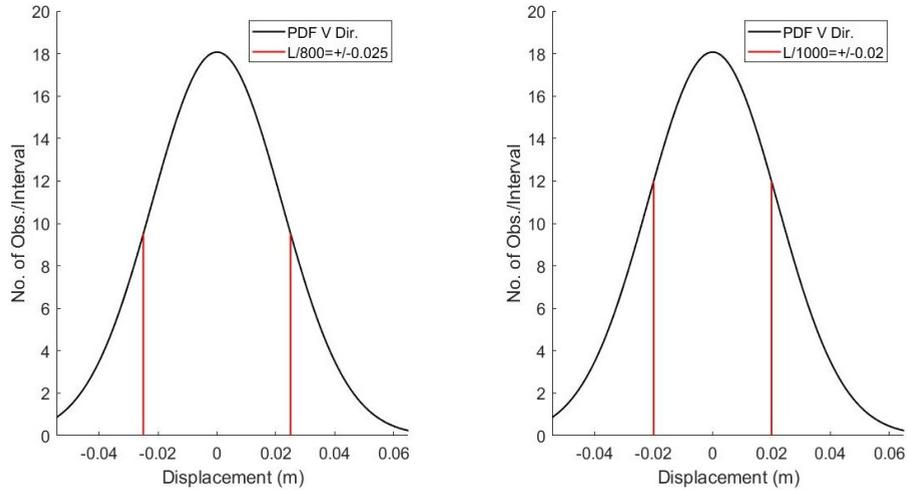


Figura 4.27: PDF y límites en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).

La probabilidad de falla resultante de la segunda campaña se puede observar en la Tabla 4.2.

Table 4.2: Probabilidad de falla de la segunda campaña de medición.

Sesión	Estación	Fecha	p_f L/800 (%)	p_f L/1000 (%)
ZEN1	12:00-12:30	16/02/2017	30.23	40.9
ZEN2	12:00-12:30	16/02/2017	42.4	52.2
ZEN1	17:00-17:30	16/02/2017	42.9	52.7
ZEN2	17:00-17:30	16/02/2017	25.7	36.5

En la probabilidad de falla de la segunda campaña de medición se obtuvo el mayor porcentaje sobre ZEN1 en la sesión 2 con 42.9% y 52.7% considerando los límites de deflexión L/800 y L/1000, respectivamente; el mínimo porcentaje de falla fue en la estación ZEN2 para la sesión 2; El promedio por sesión es de 36.3% (L/800), 46.55% (L/1000) para la sesión 1; 34.3% (L/800) y 44.6% (L/1000) para la sesión 2.

4.3.2 Desplazamiento dinámico de la segunda campaña

En las Figuras 4.28, 4.29, 4.30 y 4.31 se muestran los desplazamientos dinámicos para la segunda campaña de medición.

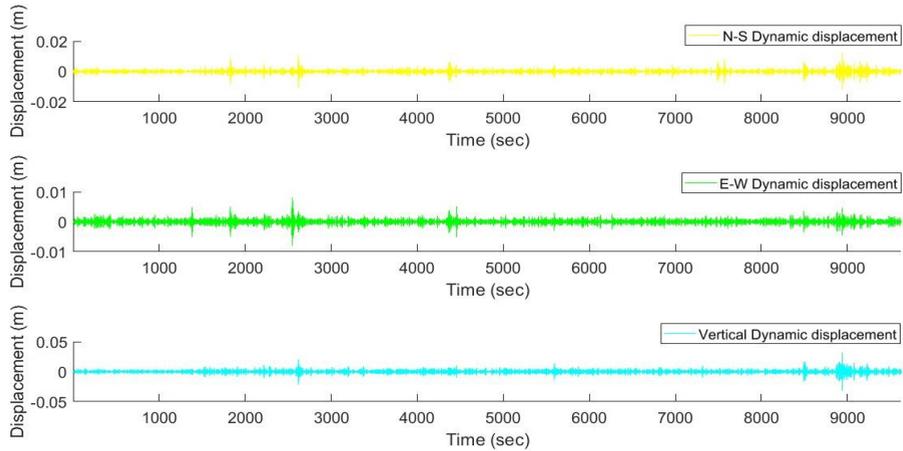


Figura 4.28: Movimiento dinámicos en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).

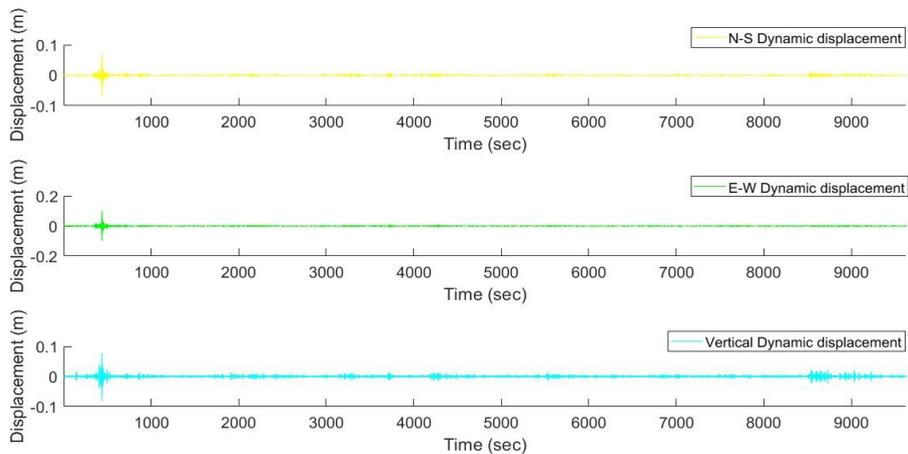


Figura 4.29: Movimiento dinámicos en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).

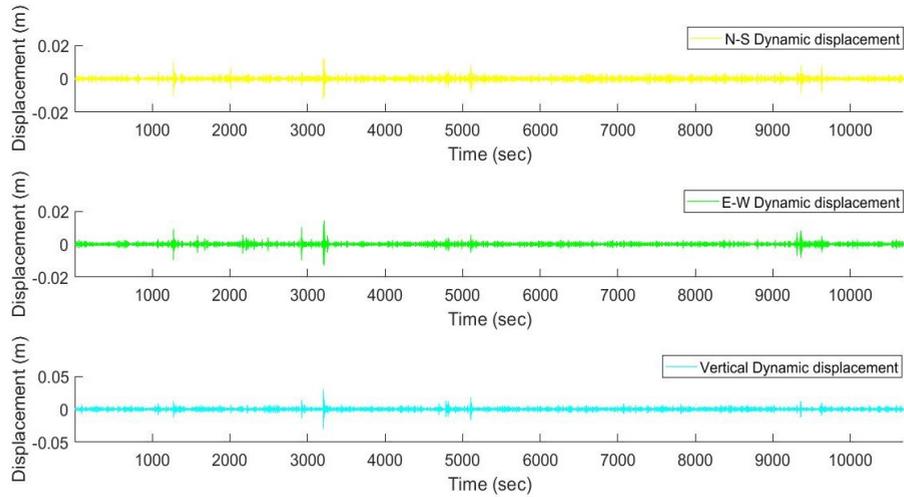


Figura 4.30: Movimiento dinámicos en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).

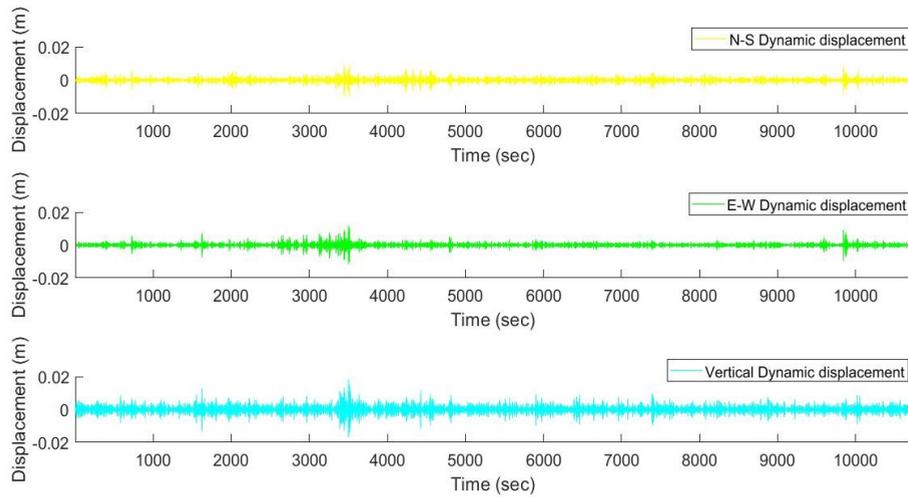


Figura 4.31: Movimiento dinámicos en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).

Extrayendo los máximos desplazamientos dinámicos en la segunda campaña (Figura 4.32) de medición GPS sobre el Puente Juárez se encontró que el máximo desplazamiento fue en la estación ZEN2 de 0.26 metros.

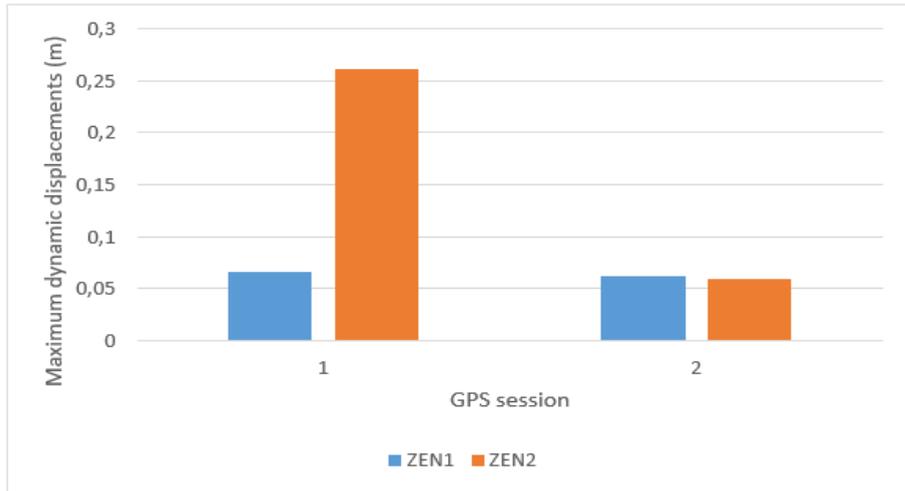


Figura 4.32: Máximo desplazamiento dinámico en la segunda campaña GPS (16/02/2017).

4.3.3 Frecuencias características de la segunda campaña

El comportamiento dinámico en el dominio de la frecuencia determinados en la segunda campaña (Figuras 4.33, 4.34 y 4.35) presenta el mismo desempeño que los de la primera campaña de medición, es decir, que no se encontró ninguna frecuencia natural del Puente Benito Juárez. El resultado de no haber determinado las frecuencias características del puente se debe a que éstas no se ubican en el rango de frecuencias del 0 al 2.5 Hz y/o las cargas no excitaron los modos de vibrar del puente lo suficiente para que se observen en el potencial espectral.

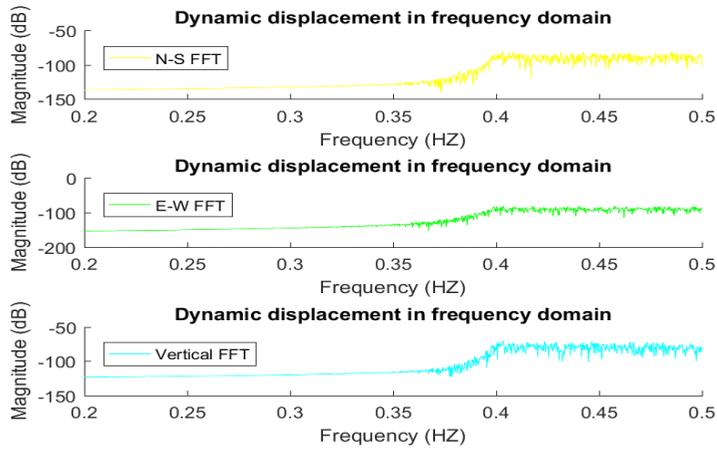


Figura 4.33: Frecuencias características en ZEN1 (sesión 1, 16/02/2017).

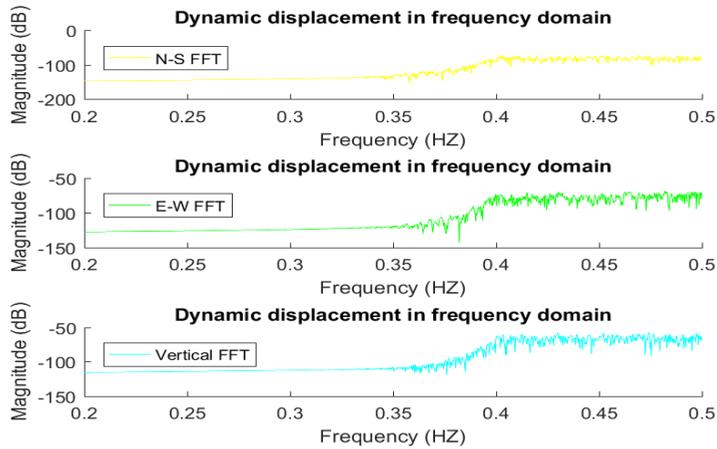


Figura 4.34: Frecuencias características en ZEN1 (sesión 2, 16/02/2017).

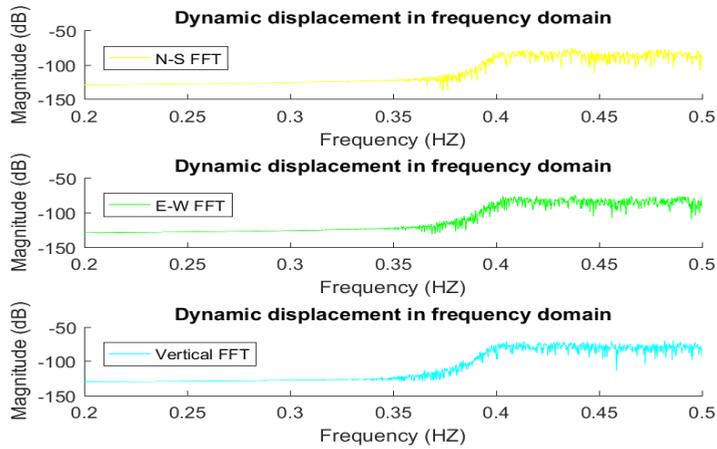


Figura 4.35: Frecuencias características en ZEN2 (sesión 1, 16/02/2017).

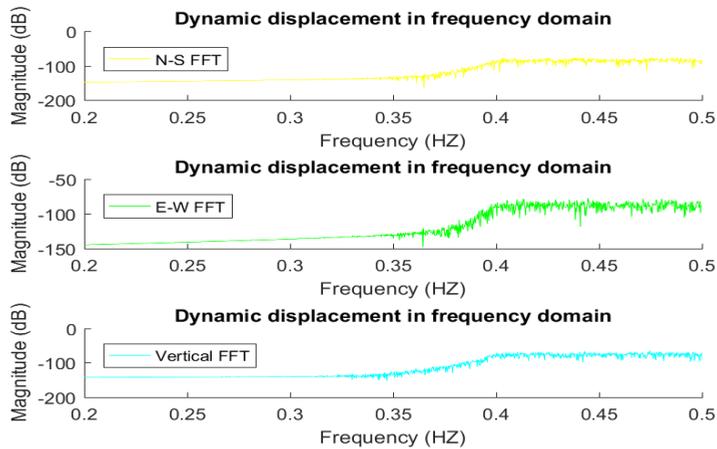


Figura 4.36: Frecuencias características en ZEN2 (sesión 2, 16/02/2017).

4.4 Comparación entre la primera y segunda campaña de medición

El objetivo de la segunda campaña de medición es validar la primera campaña pero con un mayor intervalo de medición. De acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon [24] para conocer el comportamiento de un puente la frecuencia de muestreo debe ser mayor a dos veces la frecuencia fundamental de la estructura y para obtener una mejor resolución en el resultado, la frecuencia de muestreo tiene que ser diez veces mayor a la frecuencia fundamental. El medir con el mayor intervalo de medición posible para nuestros receptores GPS y comparar los resultados con la primera campaña de medición nos ayudará a concluir si la primera sesión de medición contiene información con la capacidad de representar el comportamiento real del Puente Juárez.

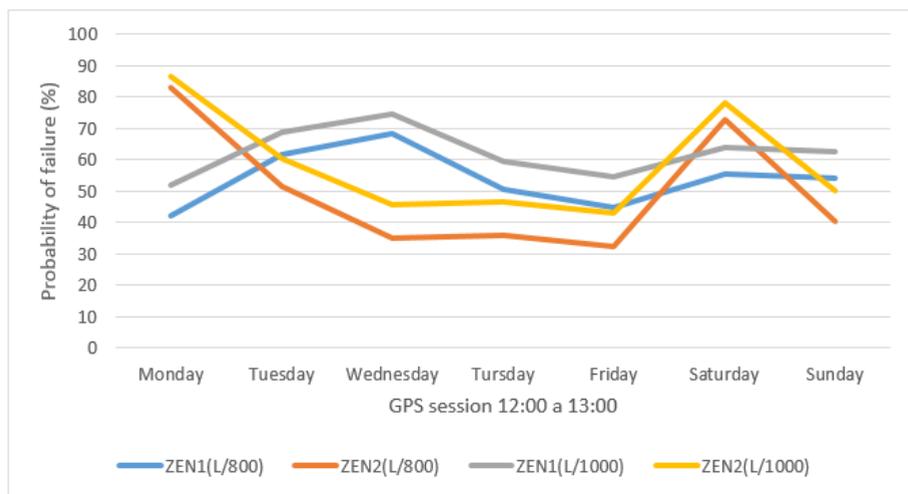


Figura 4.37: Probabilidad de falla de la primera campaña en la sesión de 12-13 horas (15/02/2016 a 21/02/2016).

El problema del Puente Juárez es que no se conoce su frecuencia fundamental ni características específicas de su estructura para poder generarla a partir de modelo de elemento finito. Sin embargo, este

trabajo de investigación presenta una metodología eficiente, precisa, y económica para determinar el comportamiento de estructuras utilizando la tecnología GPS y la teoría de probabilidades.

En el caso de los desplazamientos semi-estáticos su comparación se hizo mediante la probabilidad de falla calculada. Para hacer la comparación, de la primera campaña de medición se consideró todas las sesiones de 12:00-13:00 y 17:00-18:00 sobre las estaciones ZEN1-ZEN2, mientras que en la segunda campaña se toman todos los datos. En la Figura 4.37 se observa el comportamiento de la primera campaña de medición GPS de 12:00 a 13:00 horas para las estaciones ZEN1-ZEN2; se puede notar que la probabilidad de falla durante toda la semana es mayor o muy cercana a 40%; en la estación ZEN2 su comportamiento más drástico fue el lunes ($>80\%$) y el sábado ($>70\%$) considerando los dos límites de deflexión, mientras que los más bajo fueron en miércoles, jueves y viernes; por otro lado, la estación ZEN1 contiene un porcentaje de probabilidad de falla mayor el miércoles de aproximadamente 70% para ambos límites de deflexión y el mínimo fue el día lunes. Se observa un comportamiento similar a un espejo entre las dos estaciones.

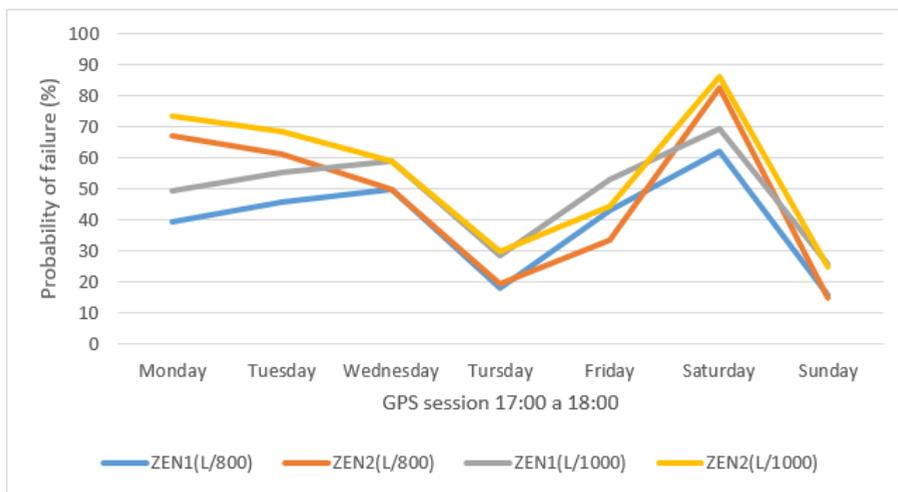


Figura 4.38: Probabilidad de falla de la primera campaña en la sesión de 17-18 horas (15/02/2016 a 21/02/2016).

En la sesión de 17:00 a 18:00 horas se presenta un comportamiento muy parecido entre las dos estaciones a excepción del día lunes (Figura 4.38).

Efectuando un análisis estadístico se determina la media de la probabilidad de falla y su correspondiente desviación estándar para todas las sesiones semanales de las estaciones ZEN1 y ZEN2 en la primera campaña, los cuales se muestran en la Tabla 4.3.

Table 4.3: Media y desviación estándar de la probabilidad de falla (primera campaña de medición, 15/02/2016 a 21/02/2016).

Estación	Sesión	Límite	Media (%)	σ (%)
ZEN1	12:00-13:00	L/800	53,88	9,16
ZEN2	12:00-13:00	L/800	50,19	20,18
ZEN1	12:00-13:00	L/1000	62,19	7,83
ZEN2	12:00-13:00	L/1000	58,60	17,27
ZEN1	17:00-18:00	L/800	39,07	16,78
ZEN2	17:00-18:00	L/800	46,96	25,35
ZEN1	17:00-18:00	L/1000	48,49	15,90
ZEN2	17:00-18:00	L/1000	55,09	22,96

La estación ZEN1 en la segunda campaña de 12:00-12:30 tiene una probabilidad de falla de 30.25% y 40.95% para cada uno de los límites; comparando con la primera campaña estos están dentro del error probable al 99.7%, es decir, $3\sigma \pm \mu$, esto refleja que su comportamiento estuvo debajo de lo que se esperaba. Para la sesión de 17:00-17:30 la estación ZEN1 se desempeñó con 42.94 % y 52.73% en la segunda campaña respectivamente a los límites; de acuerdo a la primera campaña de medición están arriba de la media dentro del error probable al 68%, lo que significa $\sigma \pm \mu$. Por otro lado, la estación ZEN2 en la sesión de 12:00-12:30 presenta un comportamiento igual a 42.35% y 52.19% dentro del 68% de error probable debajo de la media; la sesión de 17:00-17:30 horas tuvo valores de 25.74% y 36.5% localizados dentro del 68% de error probable debajo de la media. Siendo rigurosos en el análisis el compor-

tamiento más atípico fue en la estación ZEN1 en la sesión 12:00-12:30 horas. El resumen de la confrontación entre ambas campañas sobre la probabilidad de falla se observa en la Tabla 4.4.

Table 4.4: Probabilidad de falla de la segunda campaña de medición y su correspondiente error probable basado en los datos de la primera campaña de medición.

Estación	Sesión	Fecha	p_f L/800(%)	p_f L/1000(%)	Error probable (%)
ZEN1	12:00-12:30	16/02/2017	30.25	40.95	99.7
ZEN2	12:00-12:30	16/02/2017	42.35	52.19	68
ZEN1	17:00-17:30	16/02/2017	42.94	52.73	68
ZEN2	17:00-17:30	16/02/2017	25.74	36.5	68

La comparación del desplazamiento dinámico entre las dos campañas de medición es a través de los máximos movimientos dinámicos encontrados en la primera campaña. En la Tabla 4.5 se muestra la media y la desviación estándar de los máximos desplazamientos dinámicos por sesión para las estaciones ZEN1 y ZEN2.

Table 4.5: Media y desviación estándar de los máximos movimientos dinámicos del Puente Juárez (primera campaña de medición, 15/02/2016 a 21/02/2016).

Estación	Sesión	Media (m)	σ (m)
ZEN1	12:00-13:00	0,055	0,0245
ZEN2	12:00-13:00	0,145	0,073
ZEN1	17:00-18:00	0,037	0,0327
ZEN2	17:00-18:00	0,111	0,087

Comparando los resultados de la Tabla 4.5 con respecto a la segunda campaña, la sesión a partir de las 12:00 horas sobre la estación ZEN1 sufrió un máximo desplazamiento de 0.066 metros, el cual se encuentra

dentro del 68% de error probable. En la sesión de 17:00-17:30 horas la estación ZEN1 presentó movimientos de hasta 0.062 metros dentro del error probable al 68%. Por otro lado, la estación ZEN2 se movió una distancia igual a 0.261 metros (12:00 a 12:30) alcanzando el error probable al 90% y de 0.059 metros con un porcentaje de 68%. El peor comportamiento fue en la estación ZEN2 en la sesión de medio día con un movimiento de 0.26 metros. Sin embargo, el máximo desplazamiento de la primera campaña en el día lunes es de 0.25 metros en la sesión 17:00-18:00 y de 0.239 metros de 12:00-13:00 horas sobre la misma estación, coincidiendo ambas campañas. Los resultados anteriores se pueden encontrar en la Tabla 4.6.

Table 4.6: Máximos desplazamientos dinámicos de la segunda campaña de medición y su correspondiente error probable basado en los datos de la primera campaña de medición.

Estación	Sesión	Fecha	Movimiento (m)	Error probable (%)
ZEN1	12:00-12:30	16/02/2017	0.066	68
ZEN2	12:00-12:30	16/02/2017	0.261	90
ZEN1	17:00-17:30	16/02/2017	0.062	68
ZEN2	17:00-17:30	16/02/2017	0.059	68

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones y Recomendaciones

El principal objetivo de este trabajo de investigación consistió en determinar cuál es la respuesta estructural del Puente Juárez bajo condiciones normales de uso, lo que se logró analizando datos geo-espaciales derivados de colocar receptores geodésicos GPS de doble frecuencia en la loza central del Puente Juárez. Los datos geo-espaciales son representados mediante coordenadas referidas al elipsoide WGS84, las cuales expresan el desplazamiento que sufre el puente a través del tiempo (series de tiempo). Estas son transformadas a series de tiempo de desplazamiento aparente, para tener la información con respecto a un punto de equilibrio. Debido a que las series de tiempo de desplazamiento aparente en el dominio del tiempo presentaron una cantidad considerable de ruido producido por fuentes de error que afectan al sistema GPS. Desafortunadamente, no se logró apreciar o extraer un comportamiento particular del Puente Juárez; por esto, se aplicaron filtros para separar los comportamientos semi-estático, dinámico y las frecuencias características.

De acuerdo al análisis sobre las series de tiempo de desplazamientos semi-estáticos en la primera campaña de medición en función del promedio de probabilidad de falla entre los 6 receptores por cada sesión, se obtuvo que el día con la mayor probabilidad de falla fue el lunes en la segunda sesión, los días jueves y domingo presentaron el menor valor de probabilidad de falla en la sesión número 3; 5 de 7 días tienen el peor

comportamiento en los desplazamientos a medio día y 3 sesiones de 21 están debajo del 40% de probabilidad de falla, es decir, que la mayoría de las sesiones se comportan con una probabilidad de falla mayor a este porcentaje. Teniendo en consideración las estaciones con respecto a cada una de las sesiones, en 7 de ellas la estación ZEN1 presentó la más alta probabilidad de falla. ZEN2 en 6, 2 sesiones para LEI1 y LEI2, en TOP1 fueron 3 y 1 para TOP1; lo que demuestra una aleatoriedad en el movimiento del puente producido probablemente por torsión, y un peor desempeño en la parte central del puente Juárez. La probabilidad de falla en algunas estaciones fue mayor de 80%. Basado en los resultados anteriores, los cuales están validados en la literatura científica [32], se puede decir que la hipótesis es verdadera.

Es necesario, hacer énfasis, que la probabilidad de falla indica el porcentaje de desplazamientos recolectados por los receptores GPS que sobrepasan los límites de deflexión señalados en la normativa de AASHTO. Esto define en cierta manera la seguridad del puente. Las probabilidades de falla altas sugieren que el Puente Juárez tiene una elevada fatiga estructural causada por su edad (cercana a cumplir con su periodo de vida útil), el tipo de diseño estructural (columnas y losas aligeradas unidos por un asentamiento en forma de L) y que no existe una restricción en el tipo de vehículos que pueden transitarlo.

Considerando todas las sesiones de 12:00-13:00 y 17:00-18:00 sobre las estaciones ZEN1-ZEN2 de la primera campaña y todos los datos de la segunda campaña, se validó que ambas reportan comportamientos dinámicos, semi-estáticos y las frecuencias características muy similares. En el caso del desempeño dinámico el peor comportamiento fue en la estación ZEN2, sufriendo un desplazamiento máximo en la primera campaña el día lunes de 0.25 metros y 0.239 metros, sobre la segunda y tercera sesión, respectivamente [32]. Mientras que la segunda campaña presentó movimientos de hasta 0.26 metros sobre la misma estación. Por otro lado, en las frecuencias naturales para ambas campañas no se encontró alguna información relevante.

Se concluye que los mayores desplazamientos dinámicos y semi-estáticos ocurren en la estación ZEN2 tal vez ocasionados porque en ese costado del puente se alberga una mayor carga vehicular por el semáforo que rige el tránsito vehicular; en la mayoría de los días a medio día se presentó

un mayor número de desplazamientos fuera de los estándares ocasionado por la carga vehicular y las altas temperaturas; el promedio de probabilidad de falla en 17 de 21 sesiones (primera campaña) es mayor al 40%, sin embargo, en algunas sesiones la probabilidad de falla es mayor al 80%; el máximo desplazamiento dinámico que sufrió el puente fue de 0.26 metros en la estación ZEN2; al comparar los resultados de la primera y segunda campaña de medición se esperaba validar los resultados pero con un mayor intervalo de medición, el cual fue de 5 Hz basado en la capacidad de nuestros receptores y el comportamiento encontrado fue muy similar en ambas campañas, demostrando que las mediciones de 1 Hz pueden representar con una muy buena resolución el comportamiento real del Puente Benito Juárez. Se demostró que el GPS es una herramienta eficiente en tiempos y precisión para este tipo de estudios, con el único inconveniente de tener un intervalo de medición bajo con respecto a los acelerómetros para obtener un mejor resultado en el comportamiento del puente sobre el dominio de la frecuencia. Lamentablemente, no se cumplió el objetivo de encontrar la frecuencia fundamental debido a que éstas no se ubican en el rango de frecuencias del 0 al 2.5 Hz y/o las cargas no excitaron los modos de vibrar del puente lo suficiente para que se observen en el potencial espectral. Por último, el hecho de que el Puente Juárez tenga un muy mal desempeño no significa que éste colapsará, debido a los diversos factores de seguridad tomados en cuenta durante el diseño estructural de puentes, no obstante, es fundamental el monitoreo constante para determinar si el Puente Juárez se sigue comportando igual o si situación empeora, lo cual puede ser devastador, si no se toman en cuenta las medidas necesarias. Es importante que al momento de volver a monitorear el Puente Juárez se tenga en consideración los datos resultantes de este trabajo como parámetro base de cómo se comportó el puente en febrero del 2016 y 2017. Para trabajos futuros se propone las siguientes recomendaciones:

- Repetir el mismo estudio y análisis sobre un puente peatonal donde sea posible cerrar el tráfico, se tenga los planos de la estructura para elaborar su modelo de elemento finito y sea posible excitarlo con un grupo de personas con el objetivo de obtener comportamiento dinámico y semi-estático con/sin carga vertical. Adicionalmente, validar las frecuencias características que brinda el

GPS con respecto al modelo de elemento finito.

- Emplear o extender el estudio a otros puentes de la ciudad.
- Elaborar un software y hardware que permita analizar un puente de manera económica en tiempo real de forma permanente siguiendo el mismo procedimiento para alertar una situación de emergencia.
- Expandir la metodología presentada en este estudio a monitoreo de edificios, para generar un algoritmo que describa el comportamiento estándar que sufre un edificio al momento de medir con un GPS reduciendo el error en el posicionamiento producido por movimientos de él.

Bibliografía

- [1] AASHTO. Manual, h. s. *Washington, DC, 529*, 2010.
- [2] V. Ashkenazi and G. Roberts. Experimental monitoring of the humber bridge using gps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 120(4):177–182, 1997.
- [3] V. Bolshakov and P. Gaidayev. *Teoria de la elaboracion matematica de mediciones geodesicas*. Mir Moscu, 1989.
- [4] H. Borko. Information science: what is it? *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 19(1):3–5, 1968.
- [5] M. Celebi. Gps in dynamic monitoring of long-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(5):477–483, 2000.
- [6] C. Chatfield. *The analysis of time series: an introduction*. 2016.
- [7] M. Castellano E. Álvarez, R. Cabal and F. Ruiz. Efectos dinámicos en puentes de ferrocarril. *E.T.S.I. Industriales (UPM)*, 155:173–185, 1985.
- [8] E. Elbeltagi, M. Kaloop, and M. Elnabwy. Monitoring and assessment of mansoura railway steel bridge using rtk-gps technique. pages 9–11, 2013.
- [9] M. T. Elnabwy, M. R. Kaloop, and E. Elbeltagi. Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using rtk-gps technique. *Measurement*, 46(10):4282–4292, 2013.

- [10] Y. Fujino, M. Murata, S. Okano, and M. Takeguchi. Monitoring system of the akashi kaikyo bridge and displacement measurement using gps. *SPIE's 5th Annual International Symposium on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aging Infrastructure*, pages 229–236, 2000.
- [11] W. Gurtner U. Hugentobler L. Mervart M. Rothacher G. Beutler, E. Brockmann and A. Verdun. Extended orbit modeling techniques at the code processing center of the international gps service for geodynamics (igs): theory and initial results. *Manuscr. Geod.*, 19:367–386, 1994.
- [12] GPS.gov. <http://www.gps.gov/systemsgpsspace/generations>. *National Coordination Office for Space Positioning, Navigation and Timing*, 2017.
- [13] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle. *GPS Theory and practice*. Springer, New York, fourth edition, 2001.
- [14] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle. *GNSS global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, fifth edition, 2007.
- [15] SB Im, S. Hurlebaus, and YJ Kang. Summary review of gps technology for structural health monitoring. *Struct Eng*, 139:1653–64, 2011.
- [16] INEGI. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/estructura/>. *Censo de población, hogares y vivienda*, 2015.
- [17] MR. Kaloop. Bridge safety monitoring based-gps technique: case study zhujiang huangpu bridge. *Smart Structures and Systems*, 9:473–87, 2012.
- [18] MathWorks.com. <https://es.mathworks.com/help/matlab/math/fourier-transforms.html>. *Fourier Transforms*, 2017.
- [19] MathWorks.com. <https://es.mathworks.com/help/signal/ref/cheby1.html>. *Chebyshev Type 1 filter design*, 2017.

- [20] X. Meng. Real-time deformation monitoring of bridges using gps/accelerometers. *Doctoral dissertation, University of Nottingham*, 2002.
- [21] F. Moore. *Understanding Structures*. McGraw-Hill, 1999.
- [22] F. Moschas and S. Stiros. 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, 2011.
- [23] F. Moschas and S. Stiros. Noise characteristics of high-frequency, short-duration gps records from analysis of identical, collocated instruments. *Measurement*, 46:1488–506, 2013.
- [24] H. Nyquist. Certain topics in telegraph transmission theory. *Proceedings of the IEEE (Reprinted as Classic Paper: Original article published in Transactions of the A. I. E. E., 90(2):280–305*, 2002.
- [25] P. Psimoulis, I. Peppas, L. Bonenberg, S. Ince, and X. Meng. Combination of gps and rts measurements for the monitoring of semi-static and dynamic motion of pedestrian bridge. *Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, 3rd, 2016.
- [26] N. Raziq. Gps structural deformation monitoring: the mid-height problem. 2008.
- [27] H. A. Rivera. Evaluacion de estructuras en resonancia. Master's thesis, Universidad Autonoma de Zacatecas, 2011.
- [28] G. Roberts, C. Atkins, CJ Brown, and X Meng. Further results from using gps to monitor the deflections of the forth road bridge. *FIG*, ed.FIG Working Week, 2007.
- [29] Meng X. Brown C. J. & Dallard P. Roberts, G. W. Gps measurements on the london millennium bridge. *In Proceedings-Institution of Civil Engineers Bridge Engineering*, 159(4):153, 2006.
- [30] S. W. Smith. Moving average filters. the scientist and engineers guide to digital signal processing. pages 277–284, 1997.

- [31] M. H. Trauth and E. Sillmann. *MATLAB and design recipes for earth sciences: how to collect, process and present geoscientific information*. pringer Science & Business Media, 2012.
- [32] G. E. Vazquez Becerra, J. R. Gaxiola-Camacho, R. Bennett, G. M. Guzman-Acevedo, and I. E. Gaxiola-Camacho. Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the juarez bridge using gps technology. *Measurement*, 2017.
- [33] J. Wang, X. Meng, C. Qin, and J. Yi. Vibration frequencies extraction of the forth road bridge using high sampling gps data. *Shock and Vibration*, 2016.
- [34] T. Watson and R. Coleman. Structural monitoring of cable-stayed bridge: Analysis of gps versus modeled deflections. *Journal of Surveying Engineering*, 133(1):23–28, 2007.
- [35] A. Wieser and F. Brunner. Analysis of bridge deformations using continuous gps measurements. *INGEO2002*, 2nd, 2002.
- [36] A. S. WieserNowak and K. R. Collins. *Reliability of structures*. 2012.
- [37] G. Xu. *GPS*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, third edition edition, 2007.
- [38] J. Yu, X. Meng, X. Shao, B. Yan, and L. Yang. Identification of dynamic displacements and modal frequencies of a medium-span suspension bridge using multimode gnss processing. *Engineering Structures*, 81:432–443, 2014.
- [39] Y. Zhu and E. Groten. Relativistic effects in gps-techniques applied to geodesy and surveying. *Springer Berlin Heidelberg*, pages 41–46, 1988.

Anexos A

Código en MATLAB

Program developed by German Michel Guzman Acevedo 11/13/16. This program is part of the research for the structural health assessment of the Benito Juarez Bridge.

for x=1:5

Creating a 21x3 matrix to store the maximum displacements

```
LEICA1MAX=zeros(21,3);
```

Creating a 21x3 matrix to store the average displacements

```
LEICA1AV=zeros(21,3);
```

Creating a 21x3 matrix to store the standard deviation of disp.

```
LEICA1STD=zeros(21,3);
```

Creating a 21x3 matrix to store the COV of the displacements.

```
LEICA1COV=zeros(21,3);
```

Creating a 21x3 matrix to store the percentage of vertical displacements out of the AASHTO deflection limits. The first column is for the limit L/300. The second column is for the limit L/800. The third column is for the limit L/1000.

```
LEICA1PDF=zeros(21,3);
```

Giving values for the three limits: (1) alim1 and blim1 correspond to the limit L/300, (2) alim2 and blim2 correspond to the limit L/800, and (3) alim3 and blim3 correspond to the limit L/1000. For this case L=20 m.

```
alim1=-(20/300);  
blim1=(20/300);  
alim2=-(20/800);  
blim2=(20/800);  
alim3=-(20/1000);  
blim3=(20/1000);
```

Reading each file from LEICA1

```
read_files = dir('C:Users//A10//Desktop  
//programa//Bridge//GPS_LEICA1//*.txt');
```

variables

```
s=0;n=0;z=0;
```

One file is read by each cycle

```
for k = 1:length(read_files)
```

Printing file's name

```
read_files(k).name
```

Opening file

```
fp=fopen(read_files(k).name,'r');
```

```
fp1=fopen('pdf.docx','w');
```

Scanning information

```
vector=fscanf(fp,'%s %d %f %f %f');
```

```
newsize=size(vector);
```

Forming the position vectors

```
jj=0;jj1=0;jj2=0;jj3=0;jj4=0;
```

```
for ii=1:newsize(1,1);
```

```
jj3=jj3+1;
```

```
jj3;
```

```
if(jj3==5)
```

```
vector(ii,1);
```

```
jj=jj+1;
```

```
TIMEH1(jj,1)=((vector(ii,1)));  
end  
if(jj3==6)  
jj1=jj1+1;  
NORTH1H1(jj1,1)=vector(ii,1);  
end  
if(jj3==7)  
jj2=jj2+1;  
EAST1H1(jj2,1)=vector(ii,1);  
end  
if(jj3==8)  
jj4=jj4+1;  
VERTICAL1H1(jj4,1)=vector(ii,1);  
end  
if(jj3==8)  
jj3=0;  
end  
end
```

Building vectors

```
TIMEH1=TIMEH1(1:jj);  
NORTH1H1=NORTH1H1(1:jj);  
EAST1H1=EAST1H1(1:jj);  
VERTICAL1H1=VERTICAL1H1(1:jj);
```

Mean of the vectors

```
m1=mean(NORTH1H1)  
m2=mean(EAST1H1)  
m3=mean(VERTICAL1H1);  
size(NORTH1H1)
```

Creating apparent displacement vectors

```
NORTH1H1=NORTH1H1-m1;  
EAST1H1=EAST1H1-m2;  
VERTICAL1H1=VERTICAL1H1-m3;
```

```
Smoothing time series with Moving Average
kk1=movmean(NORTHH1,41);
kk2=movmean(EASTH1,41);
kk3=movmean(VERTICALH1,41);

If x is equal to 1, apparent and semi-static displacement will be printed
figure('Name',read_files(k).name,'NumberTitle','off');
subplot(3,1,1);
hold on
Plotting Normal Dist.
plot(TIMEH1,NORTHH1,'LineWidth',0.1,'Color',[1 1 0]);
plot(TIMEH1,kk1,'LineWidth',0.1,'Color',[1 0 0]);
legend('N-S Apparent displacement', 'N-S Semi-static displacement');
xlim([TIMEH1(1,1) TIMEH1(length(TIMEH1),1)]);
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Displacement (m)');
title(read_files(k).name);
hold off

subplot(3,1,2);
hold on
Plotting Normal Dist.
plot(TIMEH1,EASTH1,'LineWidth',0.1,'Color', [0 1 0]);
plot(TIMEH1,kk2,'LineWidth',0.1,'Color',[1 0 0]);
legend('E-W Apparent displacement', 'E-W Semi-static displacement')
xlim([TIMEH1(1,1) TIMEH1(length(TIMEH1),1)]);
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Displacement (m)');
title(read_files(k).name);
hold off

subplot(3,1,3);
hold on
Plotting Normal Dist.
plot(TIMEH1,VERTICALH1,'LineWidth',0.1,'Color',[0 1 1]);
plot(TIMEH1,kk3,'LineWidth',0.1,'Color',[1 0 0]);
```

```

legend('Vertical Apparent displacement','Vertical Semi-static displacement');
xlim([TIMEH1(1,1) TIMEH1(length(TIMEH1),1)]);
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Displacement (m)');
title(read_files(k).name);
hold off

```

Storing graphs Automatically

```

first =read_files(k).name ;
last = '.fig';
name = [first,' ',last]
savefig(name)
end

```

Storing Absolute Maximum Values

```

LEICA1MAX(k,1)=max(abs(kk1));
LEICA1MAX(k,2)=max(abs(kk2));
LEICA1MAX(k,3)=max(abs(kk3));

```

Storing Average Value

```

if(x==1)
LEICA1AV(k,1)=mean(kk1);
LEICA1AV(k,2)=mean(kk2);
LEICA1AV(k,3)=mean(kk3);

```

Storing Standard Deviation Value

```

LEICA1STD(k,1)=std(kk1);
LEICA1STD(k,2)=std(kk2);
LEICA1STD(k,3)=std(kk3);

```

Storing Coefficient of Variation Value

```

LEICA1COV(k,1)=abs(100*(LEICA1STD(k,1)/LEICA1AV(k,1)));
LEICA1COV(k,2)=abs(100*(LEICA1STD(k,2)/LEICA1AV(k,2)));
LEICA1COV(k,3)=abs(100*(LEICA1STD(k,3)/LEICA1AV(k,3)));

```

Storing percentage of vertical displacement out of the limits.

```
LEICA1PDF(k,1)=1-(normcdf((blim1-LEICA1AV(k,3))/LEICA1STD(k,3))-
normcdf((alim1-LEICA1AV(k,3))/LEICA1STD(k,3)));
LEICA1PDF(k,2)=1-(normcdf((blim2-LEICA1AV(k,3))/LEICA1STD(k,3))-
normcdf((alim2-LEICA1AV(k,3))/LEICA1STD(k,3)));
LEICA1PDF(k,3)=1-(normcdf((blim3-LEICA1AV(k,3))/LEICA1STD(k,3))-
normcdf((alim3-LEICA1AV(k,3))/LEICA1STD(k,3)));
```

```
if (x==2)
```

If x is equal to 2, apparent and semi-static displacement will be printed
Drawing PDF for each direction North, East, and Vertical, assuming a
Normal distribution for the displacements (Clean).

```
min1=min(kk1);
min2=min(kk2);
min3=min(kk3);
max1=max(kk1);
max2=max(kk2);
max3=max(kk3);
inter1=abs(1-3.3*log(length(kk1)));
inter2=abs(1-3.3*log(length(kk2)));
inter3=abs(1-3.3*log(length(kk3)));
interspace1=(max1-min1)/inter1;
interspace2=(max2-min2)/inter2;
interspace3=(max3-min3)/inter3;
pd1=fitdist(kk1,'Normal');
m1=pd1.mu;
pd2=fitdist(kk2,'Normal');
m2=pd2.mu;
pd3=fitdist(kk3,'Normal');
m3=pd3.mu;
x_values_1=min1:interspace1:max1;
x_values_2=min2:interspace2:max2;
x_values_3=min3:interspace3:max3;
y1=pdf(pd1,x_values_1);
y2=pdf(pd2,x_values_2);
y3=pdf(pd3,x_values_3);
```

```

figure('Name','PDF THREE COMP. LEICA1-
MONDAY-8:00-9:00','NumberTitle','off');
hold on
plot(x_values_1,y1,'LineWidth',2,'Color',[1 0 0]);
plot(x_values_2,y2,'LineWidth',2,'Color',[1 1 0]);
plot(x_values_3,y3,'LineWidth',2,'Color',[0 0 1]);
legend('North Component','East Component','Vertical Component')
x11=[m1,m1];
y11=[0,max(y1)];
plot(x11,y11,'-',m1,0,'m*','LineWidth',2,'Color',[1 0 0]);

x22=[m2,m2];
y22=[0,max(y2)];
plot(x22,y22,'-',m2,0,'m*','LineWidth',2,'Color',[1 1 0]);

x33=[m3,m3];
y33=[0,max(y3)];
plot(x33,y33,'-',m3,0,'m*','LineWidth',2,'Color',[0 0 1]);

xlabel('Displacement (m)');
ylabel('Probability Density');
totalvector=[kk1;kk2;kk3];
minlimx=min(totalvector);
maxlimx=max(totalvector);
xlim([minlimx maxlimx]);
title(read_files(k).name);
hold off
print(k,'-dpng')
end

if(x==3)
If x is equal to 3, Displacement limits will be printed
figure('Name',read_files(k).name,'NumberTitle','off');
subplot(1,3,1);
hold on

```

Plotting Normal Dist.

```
x_values_3= min(kk3):0.0001:max(kk3);
mu=nanmean(kk3);
sigma=nanstd(kk3);
f=exp(-(x_values_3-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi));
plot(x_values_3,f,'-', 'LineWidth',1.5,'Color',[0 0 0]);
Plotting limits L/300
xx=[-0.0667,-0.0667];
yy=[0,exp(-(-0.0667-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi))];
plot(xx,yy,'-', 'LineWidth',1.5,'Color',[1 0 0])
xxx=[0.0667,0.0667];
yyy=[0,exp(-(-0.0667-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi))];
plot(xxx,yyy,'-', 'LineWidth',1.5,'Color',[1 0 0]);
Adding properties to the graph
legend('PDF V Dir.', 'L/300=+/-0.0667');
xlabel('Displacement (m)');
ylabel('No. of Obs./Interval');
xlim([min(kk3) max(kk3)]);
hold off
```

```
subplot(1,3,2);
```

```
hold on
```

Plotting Normal Dist.

```
x_values_3= min(kk3):0.0001:max(kk3);
mu=nanmean(kk3);
sigma=nanstd(kk3);
f=exp(-(x_values_3-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi));
plot(x_values_3,f,'-', 'LineWidth',1.5,'Color',[0 0 0])
Plotting limits L/800
xx=[-0.025,-0.025];
yy=[0,exp(-(-0.025-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi))];
plot(xx,yy,'-', 'LineWidth',1.5,'Color',[1 0 0])
xxx=[0.025,0.025];
yyy=[0,exp(-(-0.025-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi))];
plot(xxx,yyy,'-', 'LineWidth',1.5,'Color',[1 0 0]);
```

```

Adding properties to the graph
legend('PDF V Dir.', 'L/800= $\pm$ 0.025')
xlabel('Displacement (m)');
ylabel('No. of Obs./Interval');
xlim([min(kk3) max(kk3)]);
hold off

subplot(1,3,3);
hold on
Plotting Normal Dist.
x_values_3= min(kk3):0.0001:max(kk3);
mu=nanmean(kk3);
sigma=nanstd(kk3);
f=exp(-(x_values_3-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi));
plot(x_values_3,f,'-', 'LineWidth',1.5, 'Color',[0 0 0])
Plotting limits L/1000
xx=[-0.02,-0.02];
yy=[0,exp(-(-0.02-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi))];
plot(xx,yy,'-', 'LineWidth',1.5, 'Color',[1 0 0])
xxx=[0.02,0.02];
yyy=[0,exp(-(0.02-mu).^2./(2*sigma^2))./(sigma*sqrt(2*pi))];
plot(xxx,yyy,'-', 'LineWidth',1.5, 'Color',[1 0 0]);
Adding properties to the graph
legend('PDF V Dir.', 'L/1000= $\pm$ 0.02')
xlabel('Displacement (m)');
ylabel('No. of Obs./Interval');
xlim([min(kk3) max(kk3)]);
hold off
print(k, '-dpng')
end

Chebyshev filter
[b,a] = cheby1(8,1,0.4/0.5, 'high');

if(x==7)
If x is equal to 7, Filter performance will be printed

```

```
freqz(b,a)
end
```

Chebyshev filter is applied to the apparent displacement vectors

```
kk1 = filter(b,a, NORTH11);
kk2 = filter(b,a, EAST11);
kk3 = filter(b,a, VERTICAL11);
```

```
if (x==4)
```

If x is equal to 4, Dynamic displacement will be printed

```
figure('Name',read_files(k).name , 'NumberTitle','off');
```

```
subplot(3,1,1);
```

```
hold on
```

Plotting Normal Dist.

```
plot(TIMEH1,kk1,'LineWidth',0.1,'Color',[1 1 0]);
```

```
legend('N-S Dynamic displacement','Location','best');
```

```
legend('N-S Dynamic displacement');
```

```
xlim([TIMEH1(1,1) TIMEH1(length(TIMEH1),1)]);
```

```
xlabel('Time (sec)');
```

```
ylabel('Displacement (m)');
```

```
title(read_files(k).name);
```

```
hold off
```

```
subplot(3,1,2);
```

```
hold on
```

Plotting Normal Dist.

```
plot(TIMEH1,kk2,'LineWidth',0.1,'Color',[0 1 0]);
```

```
legend('E-W Dynamic displacement')
```

```
legend('E-W Dynamic displacement')
```

```
xlim([TIMEH1(1,1) TIMEH1(length(TIMEH1),1)]);
```

```
xlabel('Time (sec)');
```

```
ylabel('Displacement (m)');
```

```
title(read_files(k).name);
```

```
hold off
```

```
subplot(3,1,3);
```

```

hold on
Plotting Normal Dist.
plot(TIMEH1,kk3,'LineWidth',0.1,'Color',[0 1 1]);
legend('Vertical Dynamic displacement');
legend('Vertical Dynamic displacement');
xlim([TIMEH1(1,1) TIMEH1(length(TIMEH1),1)]);
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Displacement (m)');
title(read_files(k).name);
hold off
first =read_files(k).name ;
last = '.fig';
name = [first,' ',last]
savefig(name)
end

```

Applying FFT

```

tamano=size(TIMEH1);
NFFT=2*nextpow2(tamano(1,1));
kk4=fft(kk1,NFFT)/NFFT;
kk5=fft(kk2,NFFT)/NFFT;
kk6=fft(kk3,NFFT)/NFFT;
f=1*(0:(NFFT/2))/NFFT;

```

```

if(x==6)

```

If x is equal to 6, fundamental frequency will be printed

Plotting power spectrum (options)

```

figure('Name',read_files(k).name,'NumberTitle','off');
thd(kk3, 1)
print(k,'-dpng')
end

```

3 maximum values of the power spectrum are found

```

[val]=find(abs(kk6(1:NFFT/2+1))==max(max((abs(kk6(1:NFFT/2+1))))));
MaximumFre(k,1)=f(val);
vector3=abs(kk6(1:NFFT/2+1));

```

```

vector3(val)=0;
[val]=find(vector3==max(max((vector3))));
MaximumFre(k,2)=f(val);
vector4=vector3;
vector4(val)=0;
[val]=find(vector4==max(max((vector4))));
MaximumFre(k,3)=f(val);

```

Amplitudeis transformed to dB

```

dB1 = mag2db(abs((kk4(1:NFFT/2+1))));
dB2 = mag2db(abs((kk5(1:NFFT/2+1))));
dB3 = mag2db(abs((kk6(1:NFFT/2+1))));

```

```

if(x==5)

```

```

If x is equal to 5, Power spectrum will be printed
figure('Name',read_files(k).name , 'NumberTitle','off');
subplot(3,1,1);
hold on
Plotting Normal Dist.
semilogx(f,dB1,'LineWidth',0.1,'Color',[1 1 0]);
title('Dynamic displacement in frequency domain')
legend('N-S FFT','Location','northwest');
xlim([0.2 0.5]);
xlabel('Frequency (HZ)')
ylabel('Magnitude (dB)')
hold off

```

```

subplot(3,1,2);
hold on
Plotting Normal Dist.
semilogx(f,dB2,'LineWidth',0.1,'Color',[0 1 0]);
title('Dynamic displacement in frequency domain')
legend('E-W FFT','Location','northwest');
xlim([0.2 0.5]);
xlabel('Frequency (HZ)')
ylabel('Magnitude (dB)')

```

```
hold off
```

```
subplot(3,1,3);
```

```
hold on
```

```
Plotting Normal Dist.
```

```
semilogx(f,dB3,'LineWidth',0.1,'Color',[0 1 1]);
```

```
title('Dynamic displacement in frequency domain')
```

```
legend('Vertical FFT','Location','northwest');
```

```
xlim([0.2 0.5]);
```

```
xlabel('Frequency (HZ)')
```

```
ylabel('Magnitude (dB)')
```

```
hold off
```

```
print(k,'-dpng')
```

```
end
```

```
Closing file
```

```
fclose(fp);
```

```
end
```

```
Storing percentage of vertical displacement out of the deflection limit
```

```
fprintf(fp1,'%f %f %f
```

```
n', LEICA1PDF');
```

```
Closing file
```

```
fclose(fp1);
```

```
If condition to pause loop cycles
```

```
if(x>5)
```

```
pause(60);
```

```
end
```

```
end
```

Anexos B

movimiento Semi-estático de apEN2

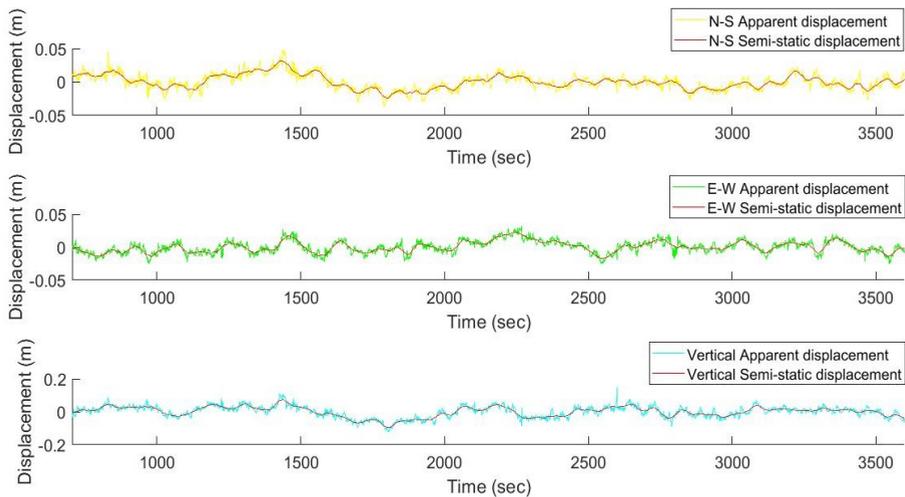


Figura B.1: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1

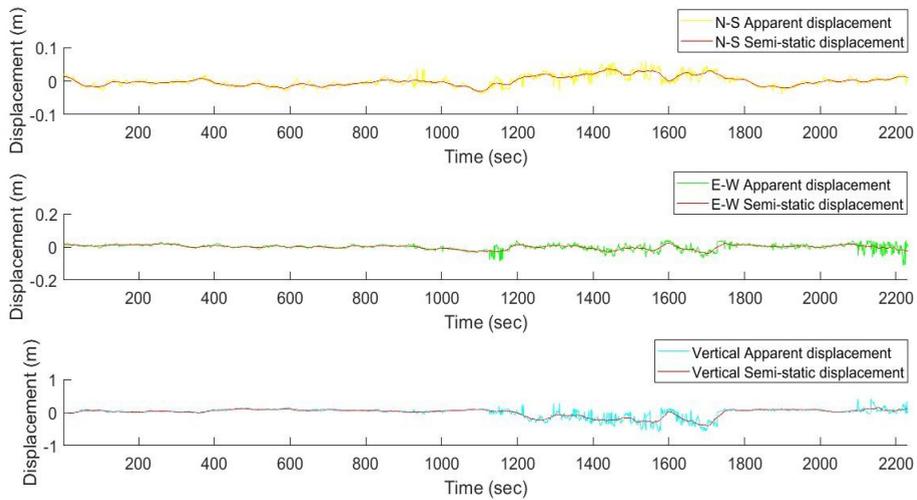


Figura B.2: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2

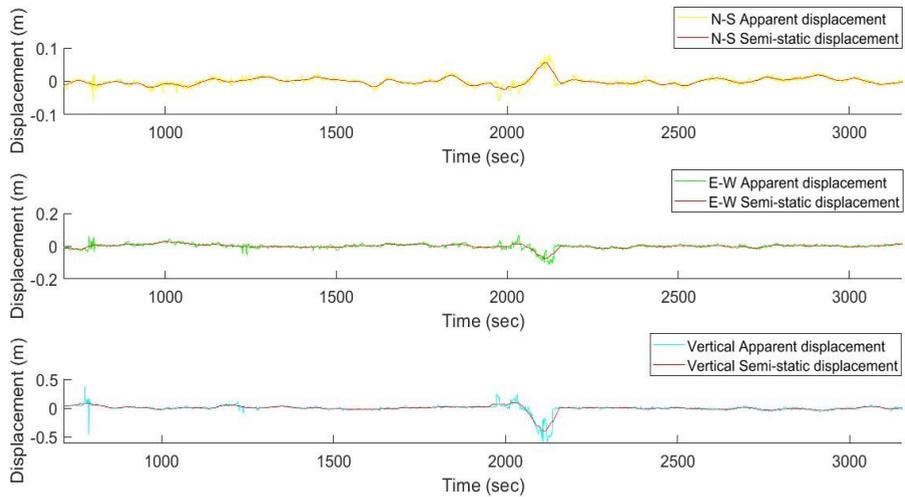


Figura B.3: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3

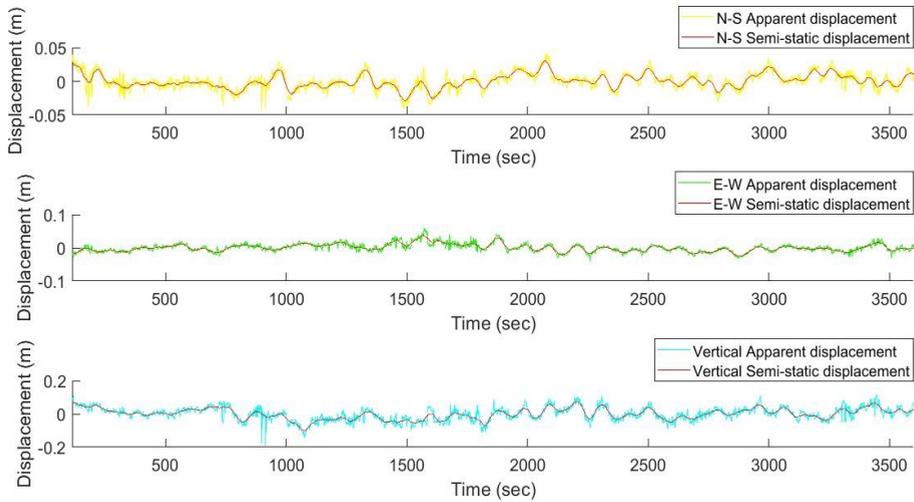


Figura B.4: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1

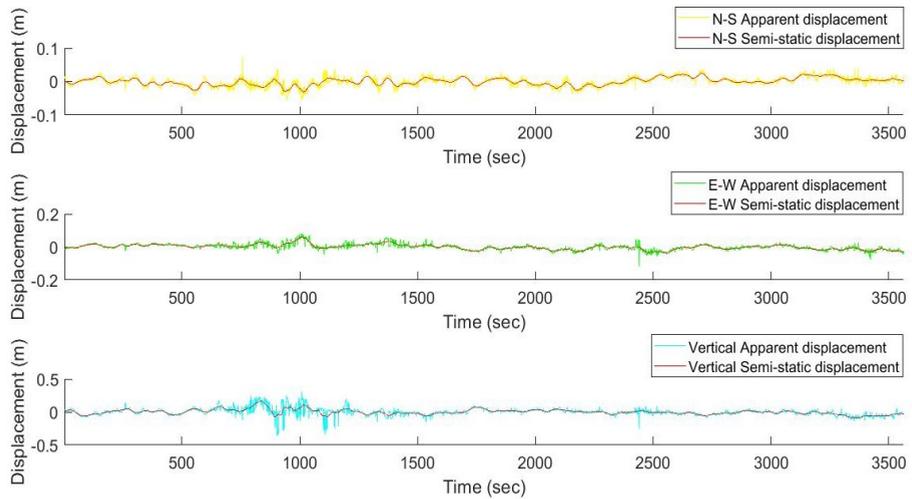


Figura B.5: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2

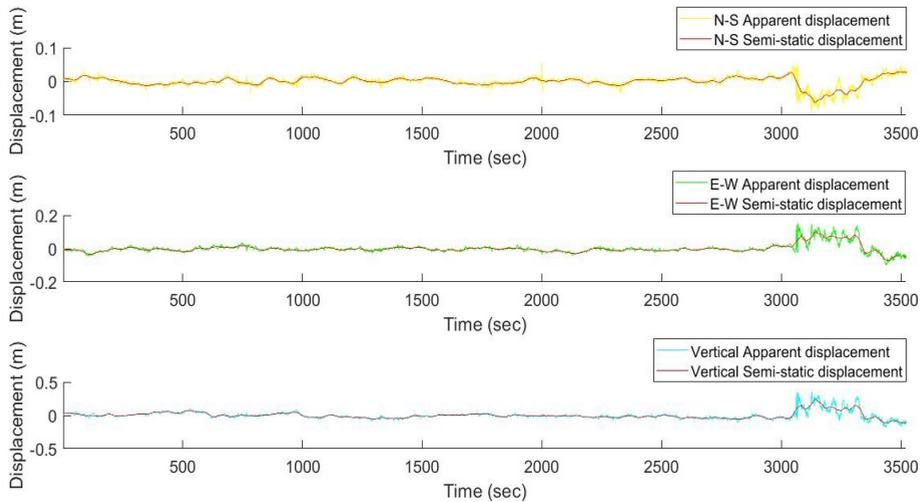


Figura B.6: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3

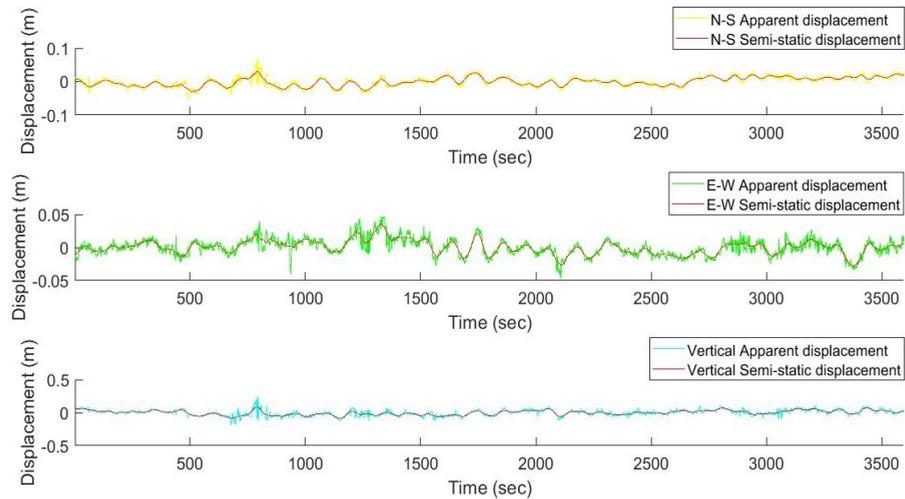


Figura B.7: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1

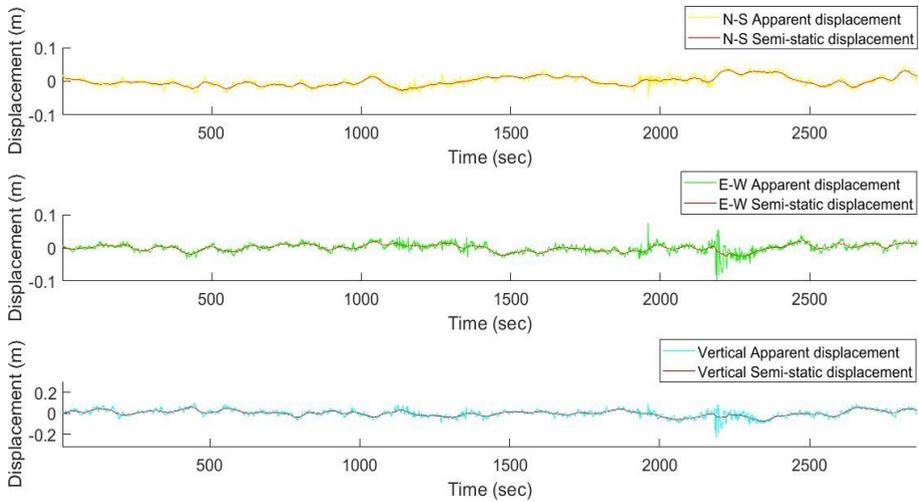


Figura B.8: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2

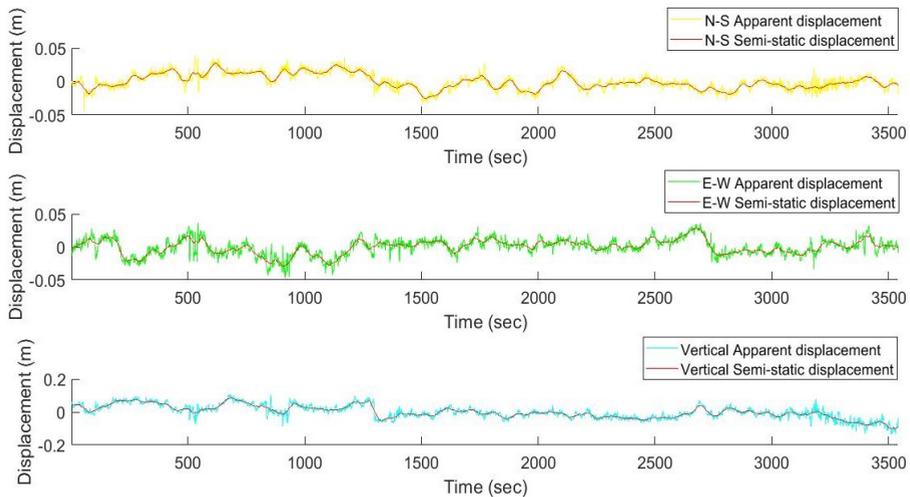


Figura B.9: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3

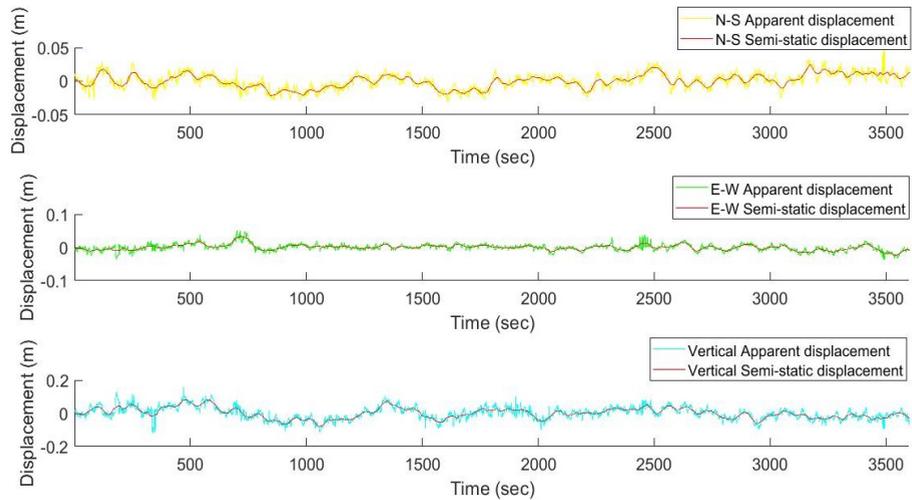


Figura B.10: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1

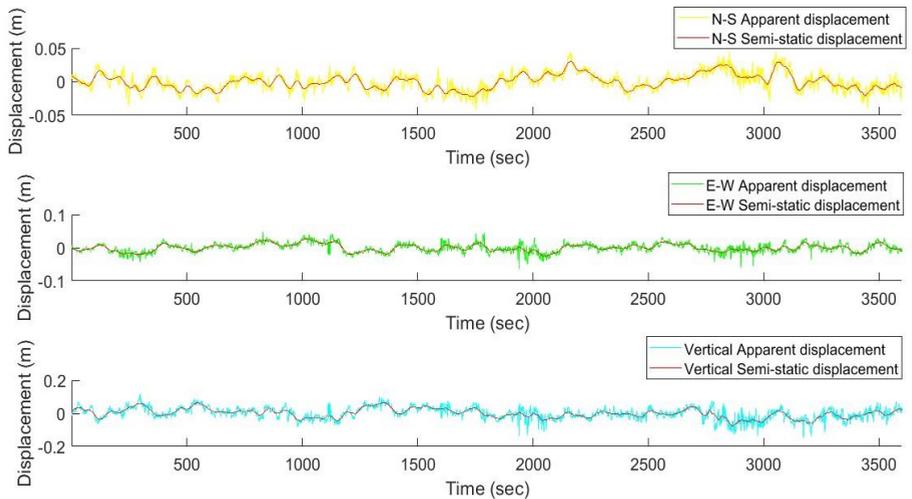


Figura B.11: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2

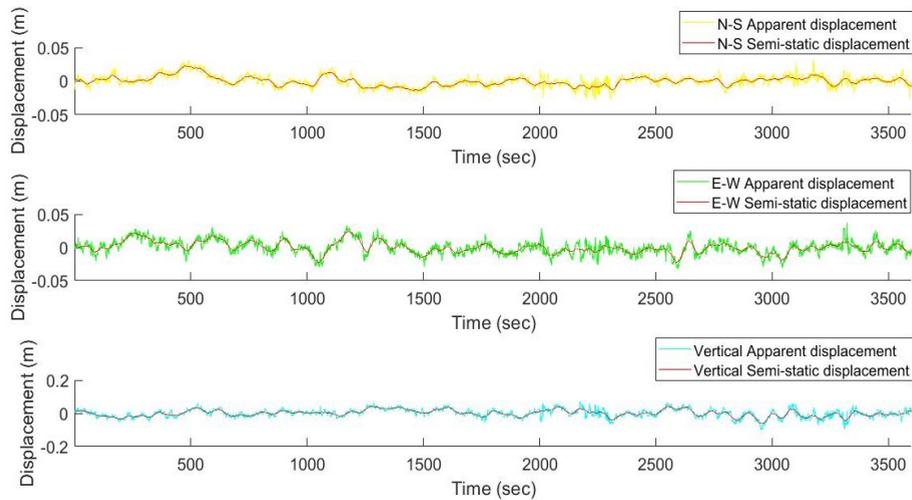


Figura B.12: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3

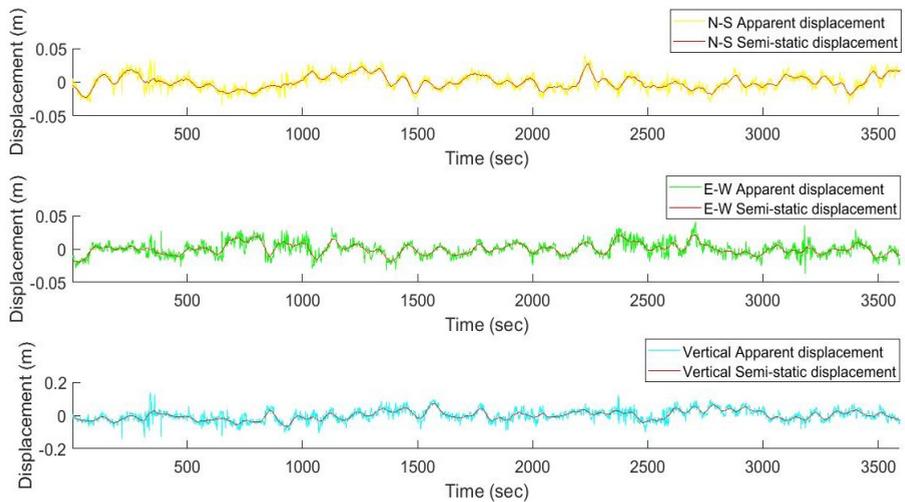


Figura B.13: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1

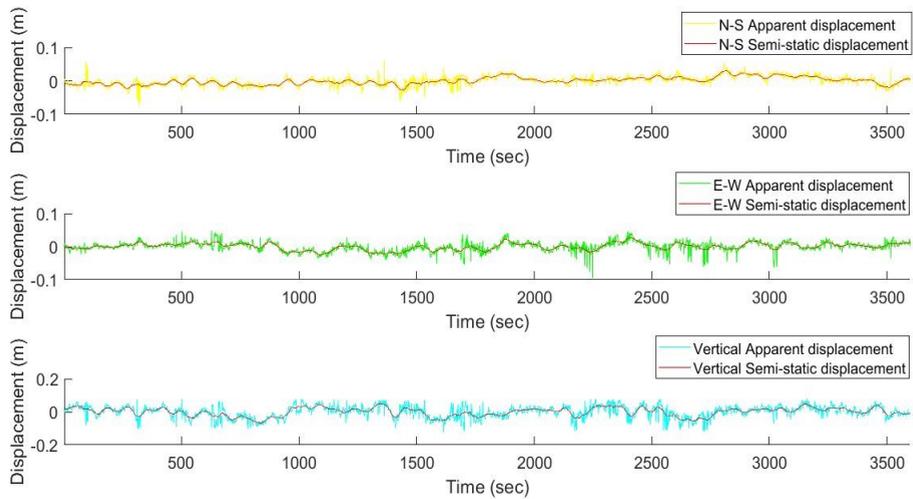


Figura B.14: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2

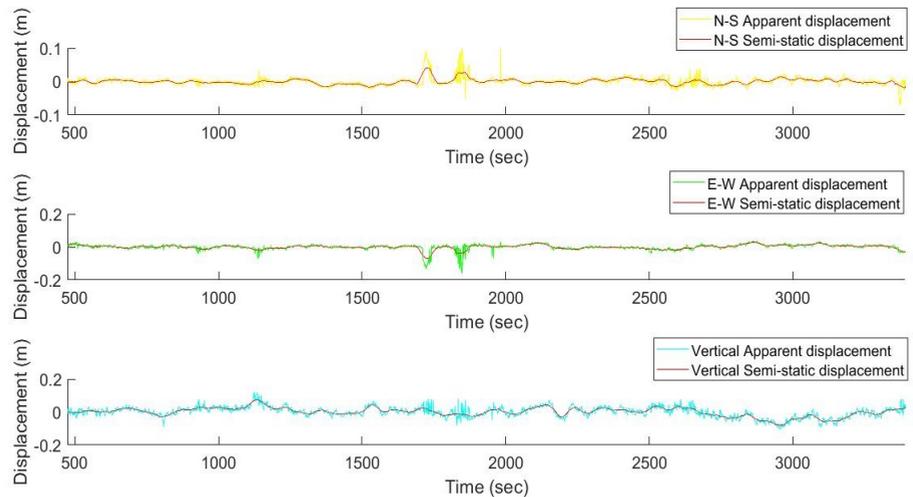


Figura B.15: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3

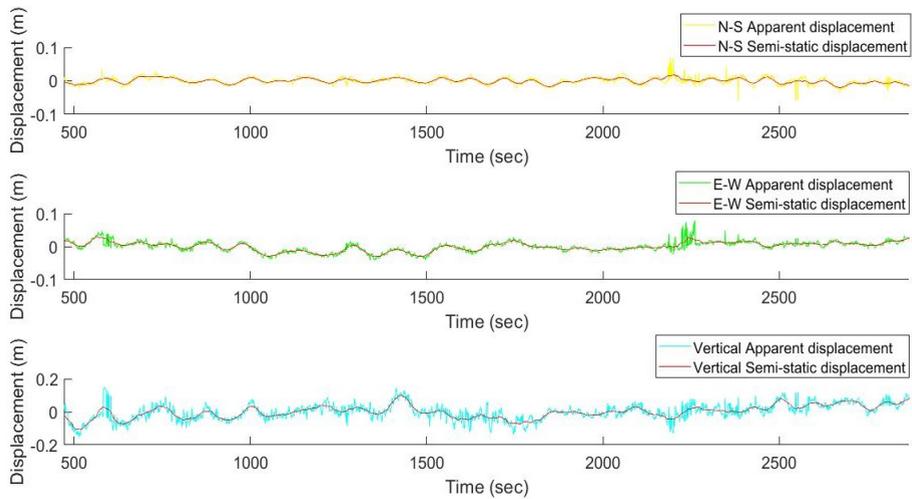


Figura B.16: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1

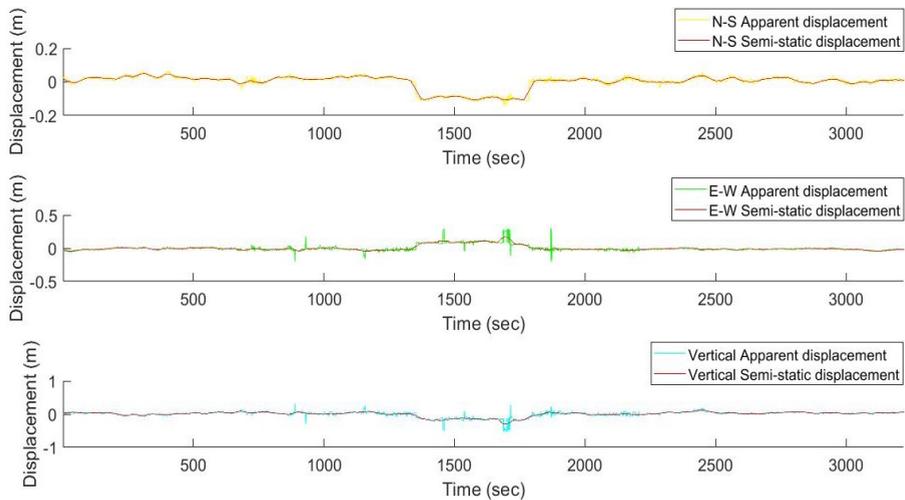


Figura B.17: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2

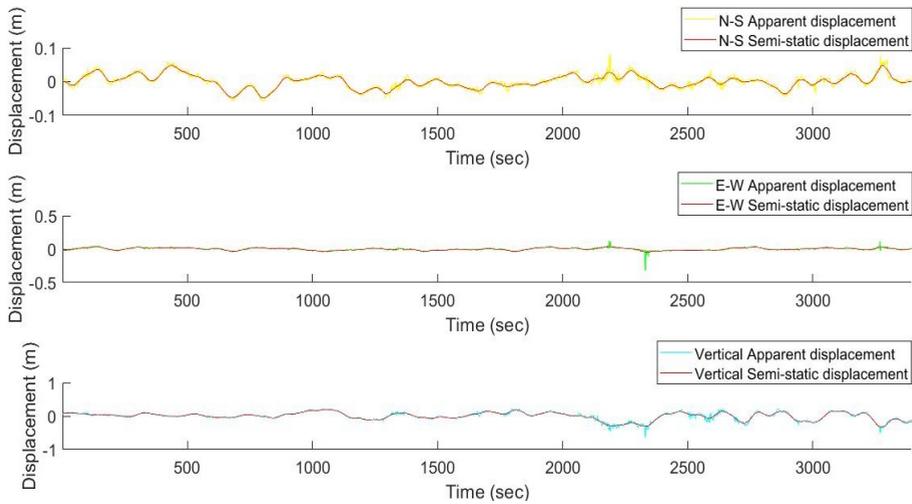


Figura B.18: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3

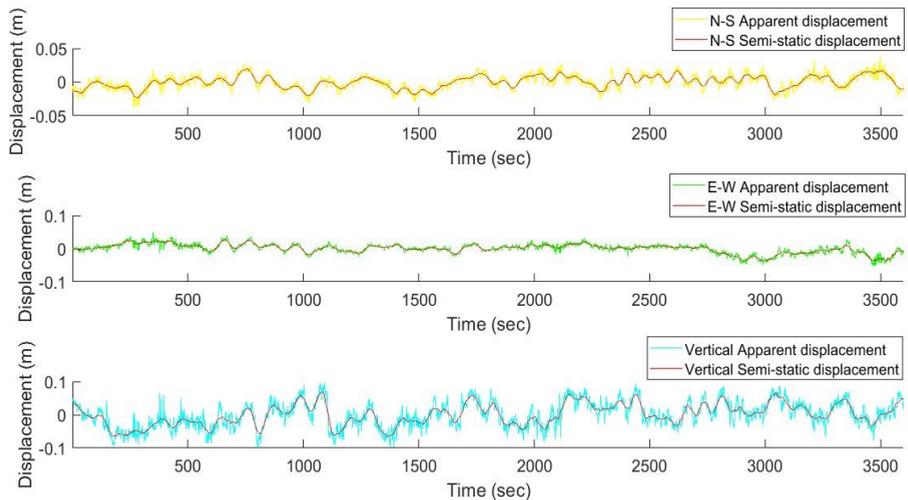


Figura B.19: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1

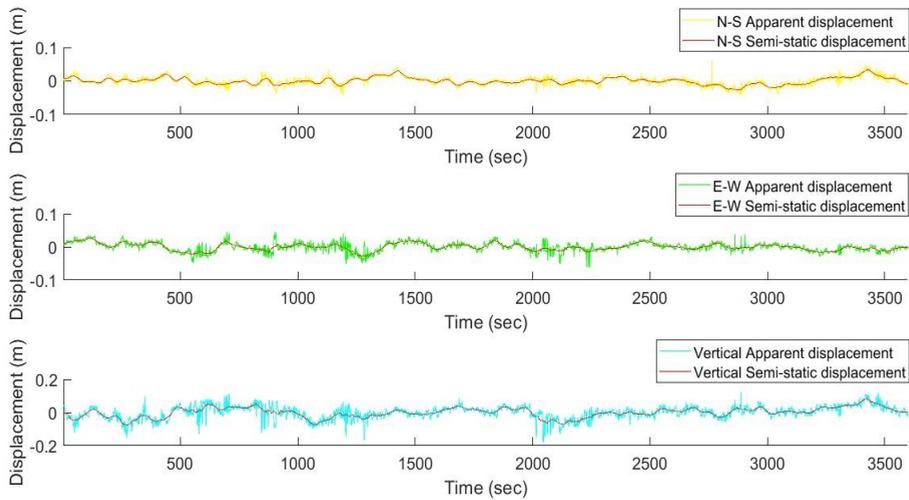


Figura B.20: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2

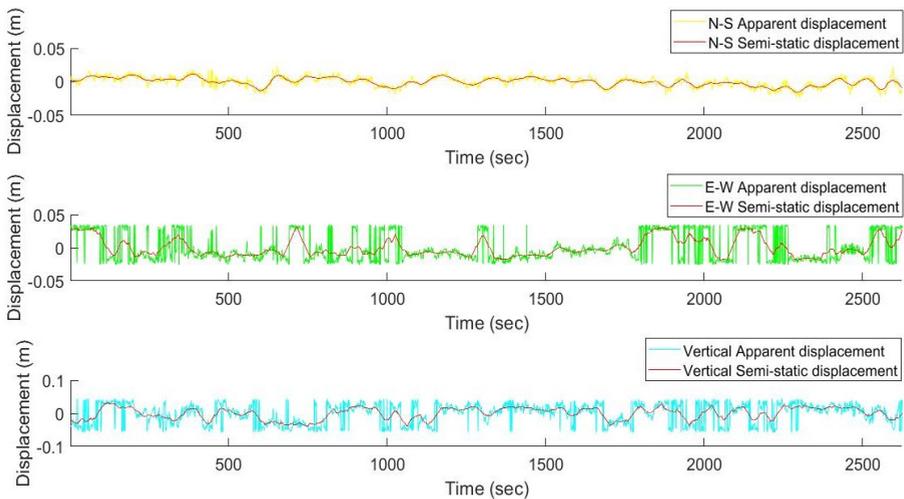


Figura B.21: Desplazamientos semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3

Anexos C

histogramas semi-estáticos de ZEN2

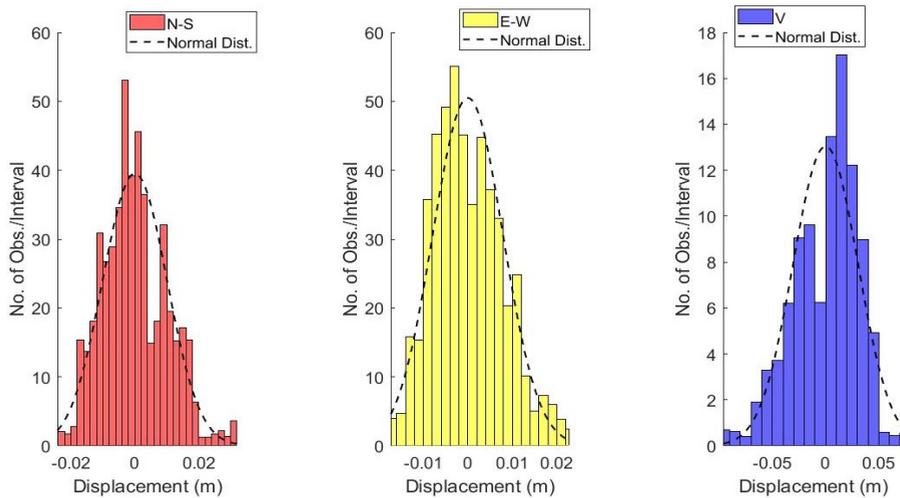


Figura C.1: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1

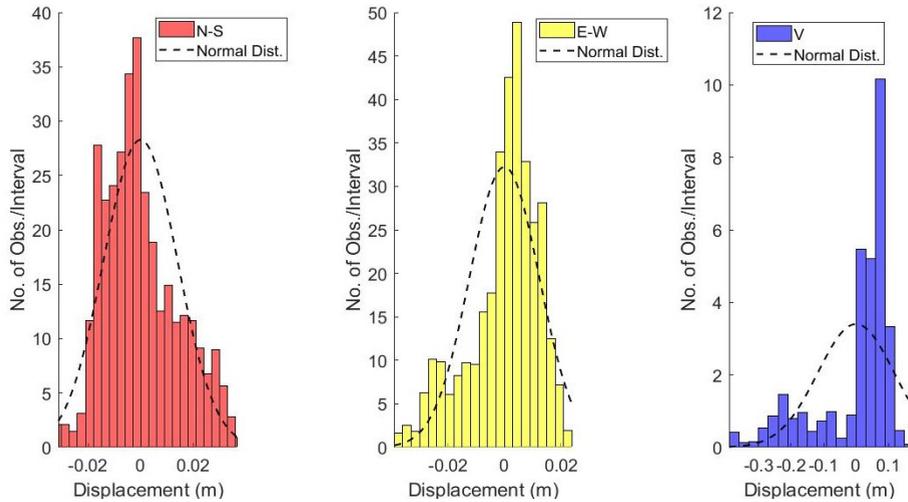


Figura C.2: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2

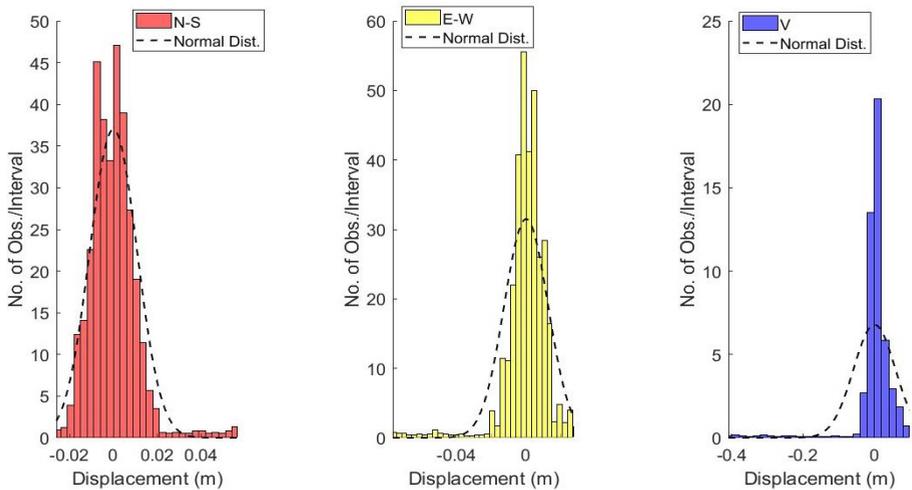


Figura C.3: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3

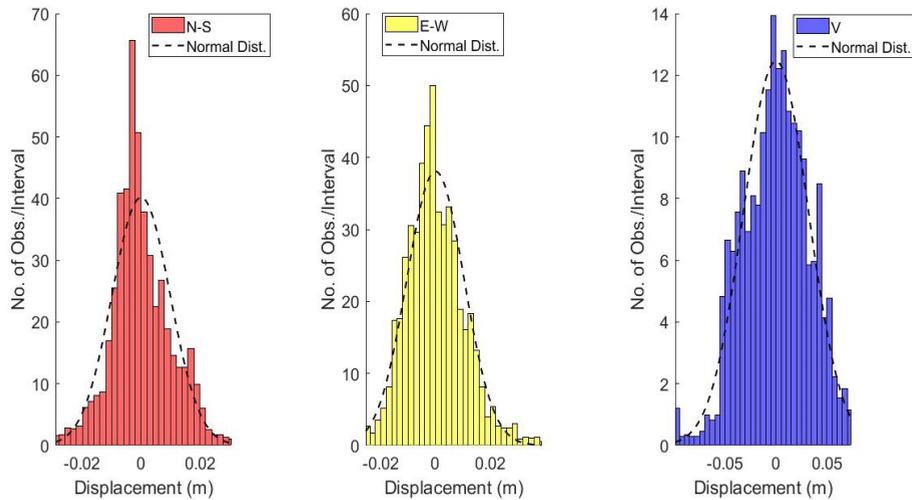


Figura C.4: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1

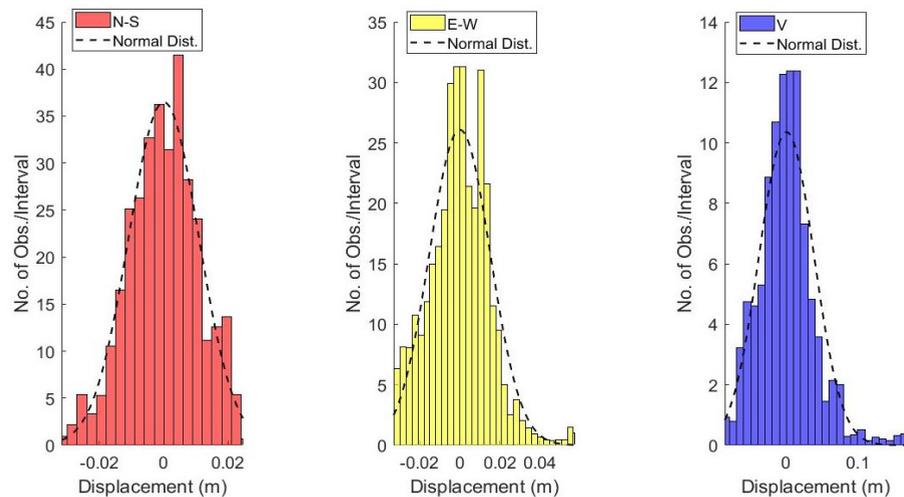


Figura C.5: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2

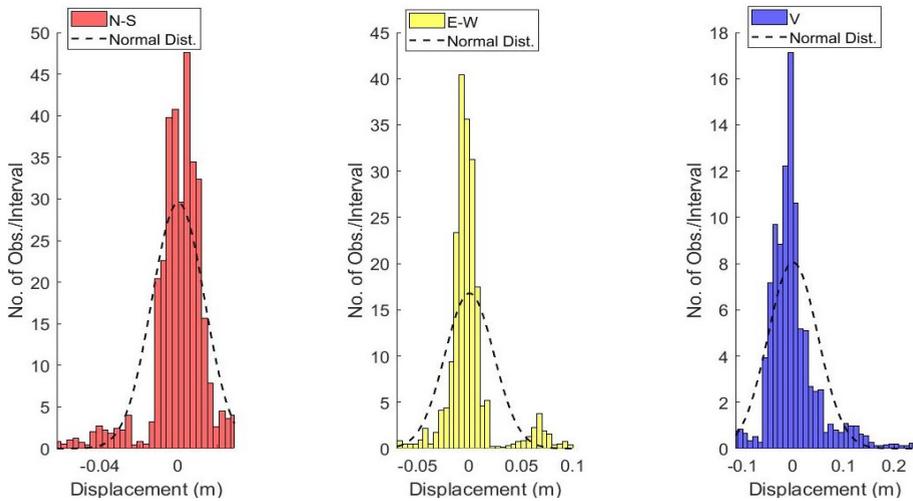


Figura C.6: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3

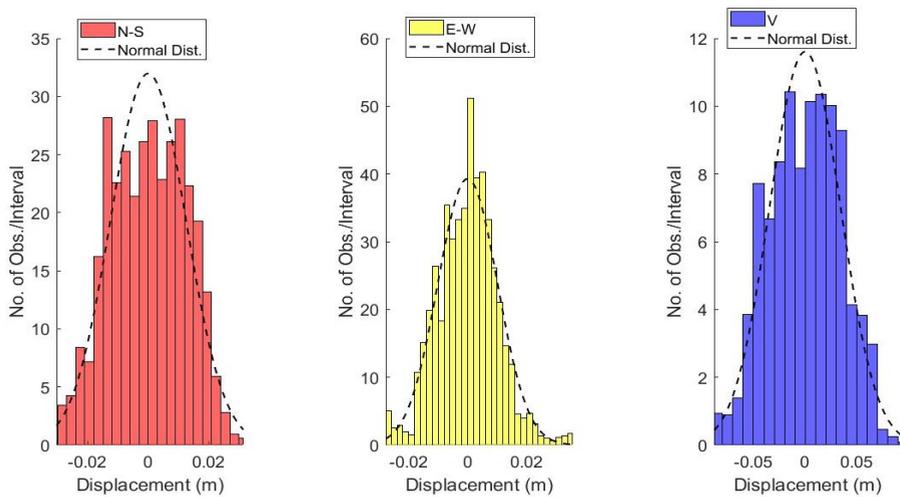


Figura C.7: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1

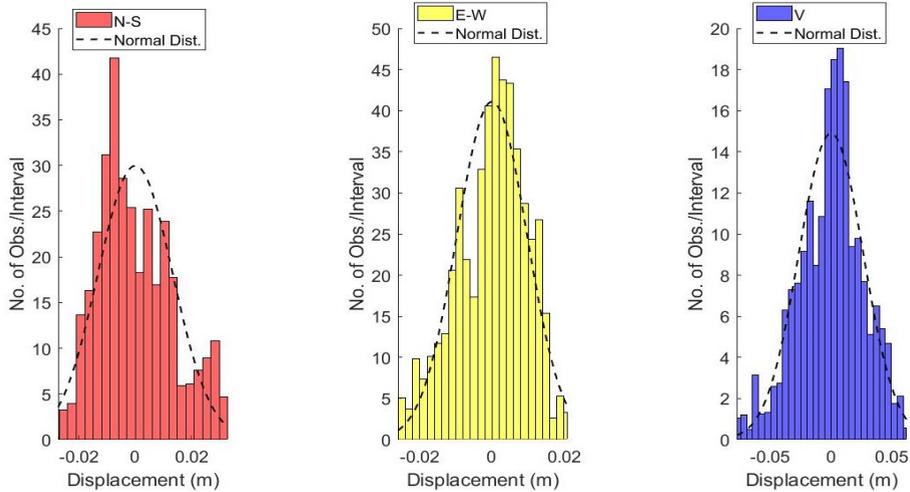


Figura C.8: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2

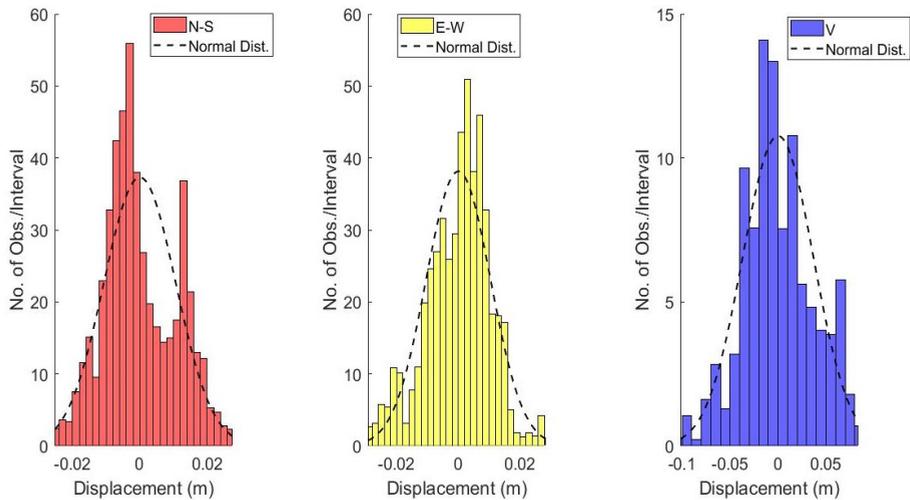


Figura C.9: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3

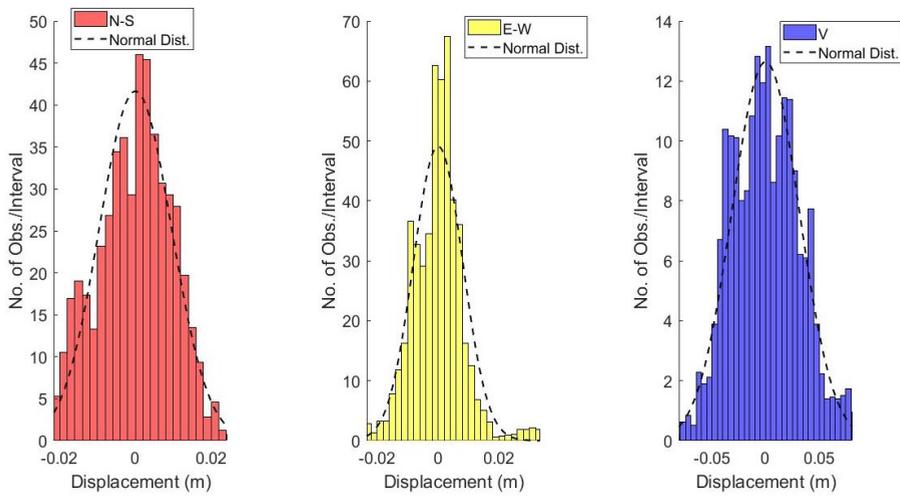


Figura C.10: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1

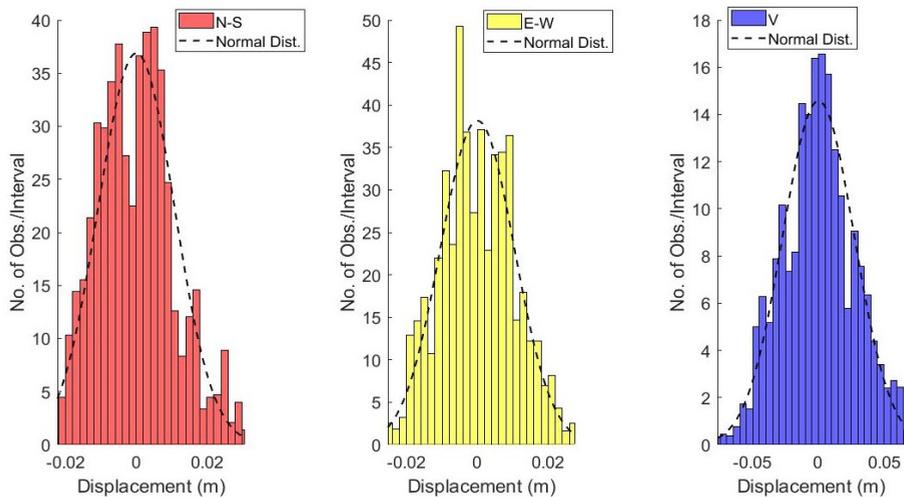


Figura C.11: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2

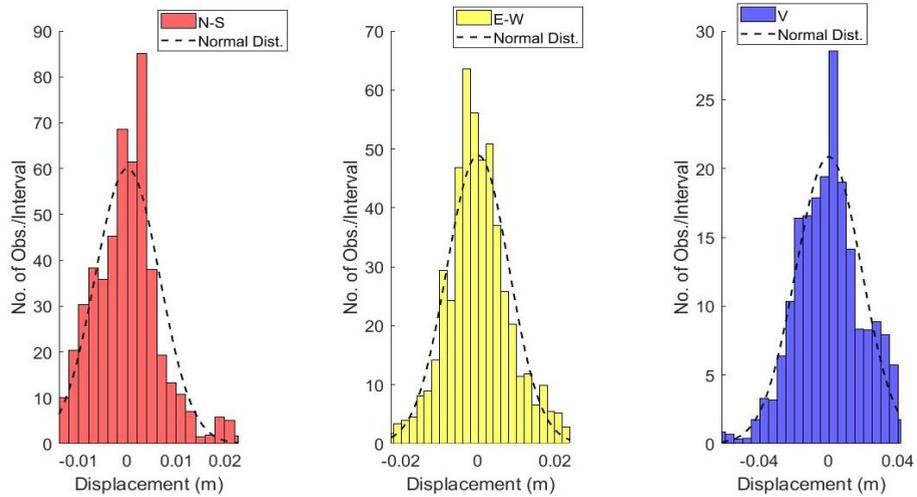


Figura C.12: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3

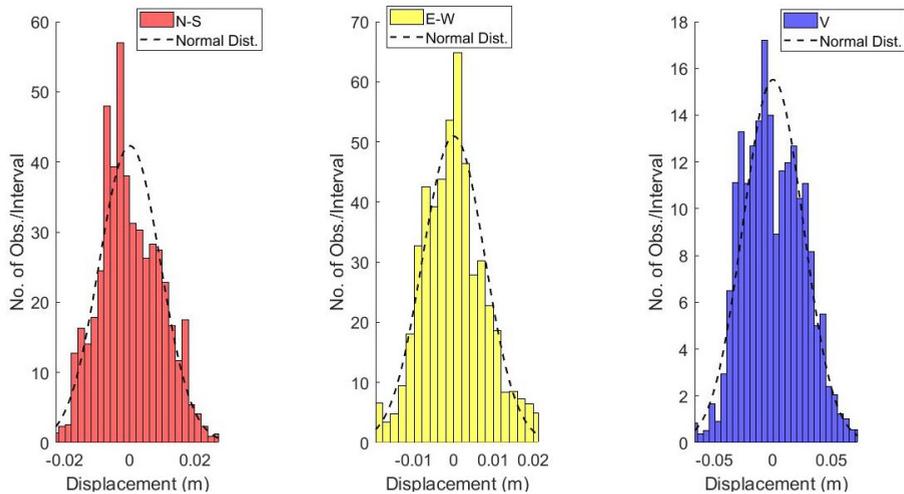


Figura C.13: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1

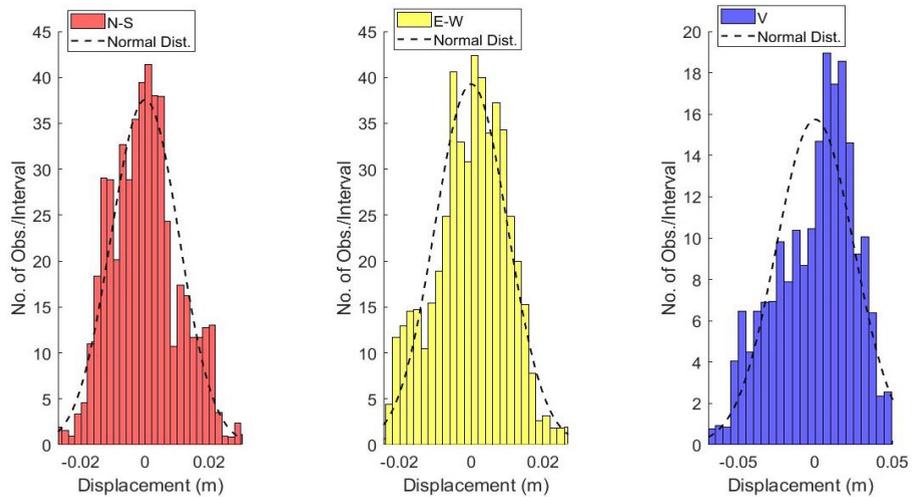


Figura C.14: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2

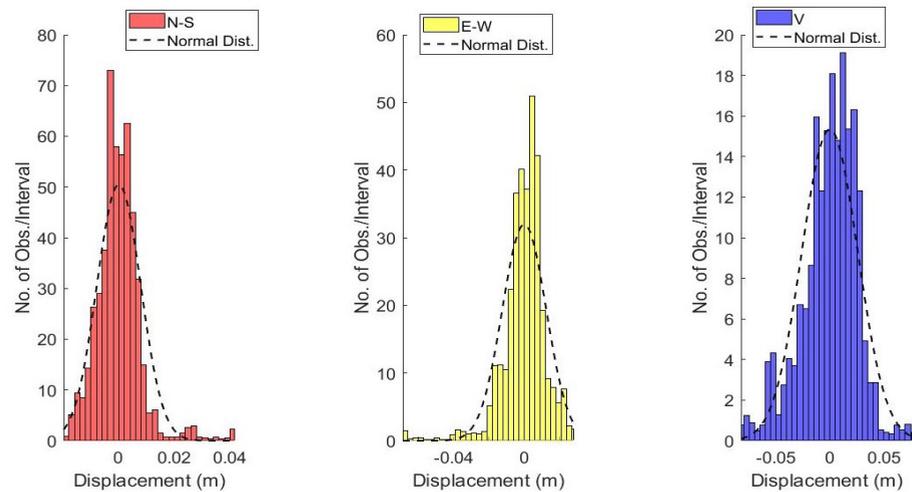


Figura C.15: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3

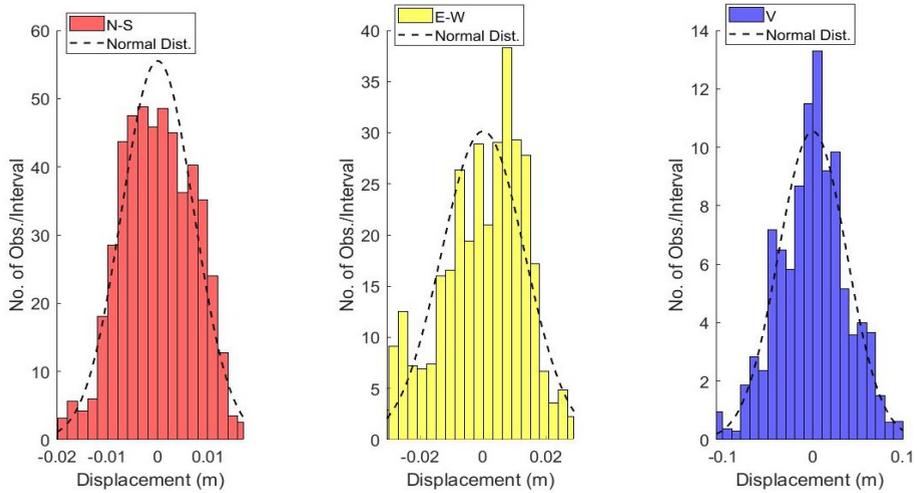


Figura C.16: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1

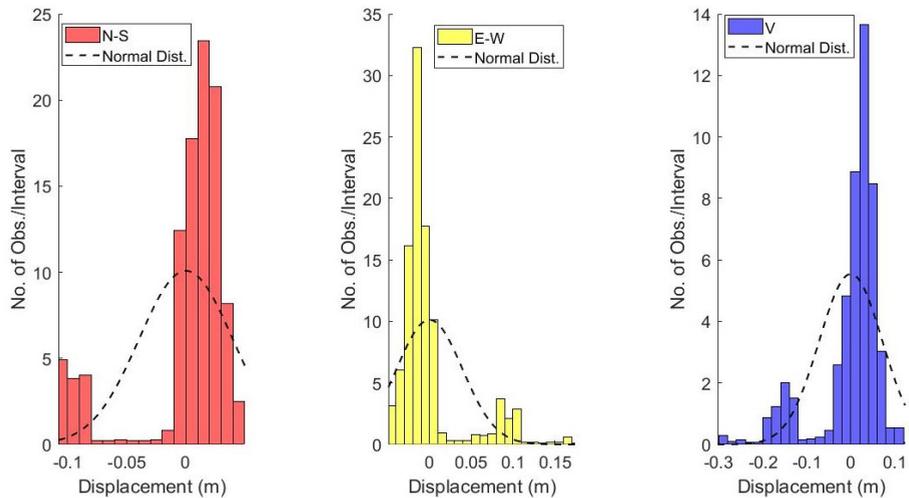


Figura C.17: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2

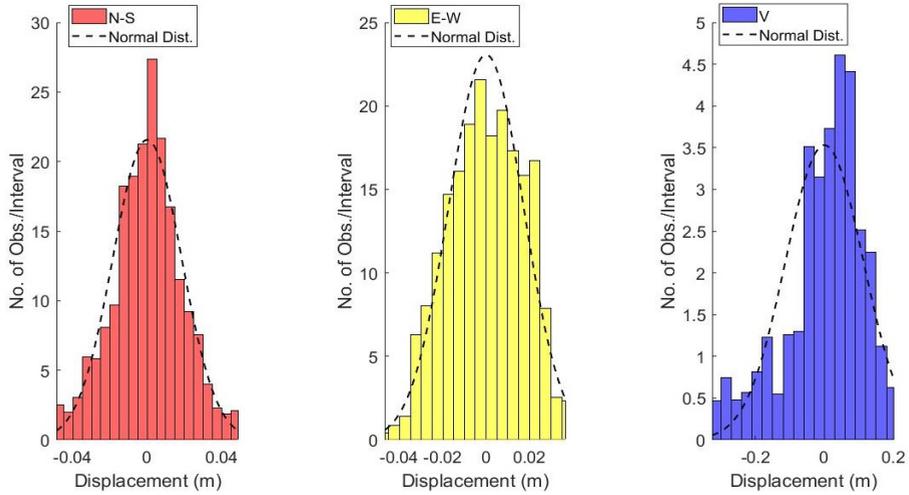


Figura C.18: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3

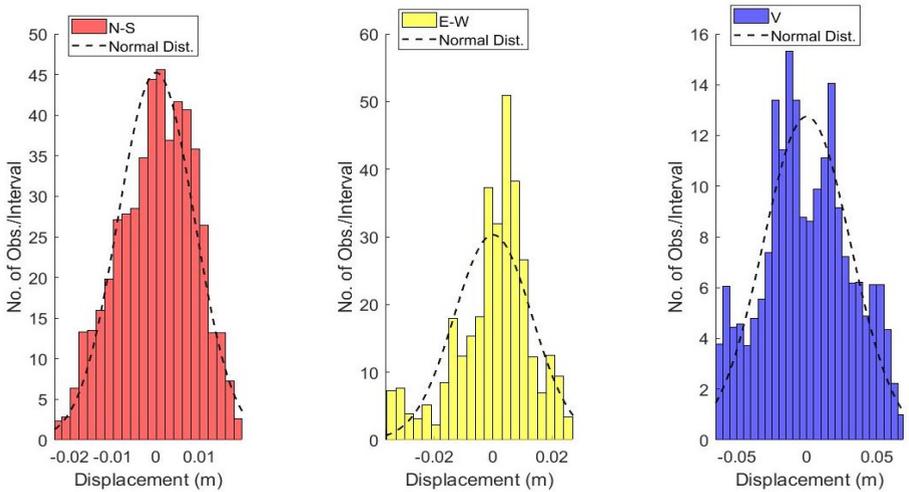


Figura C.19: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1

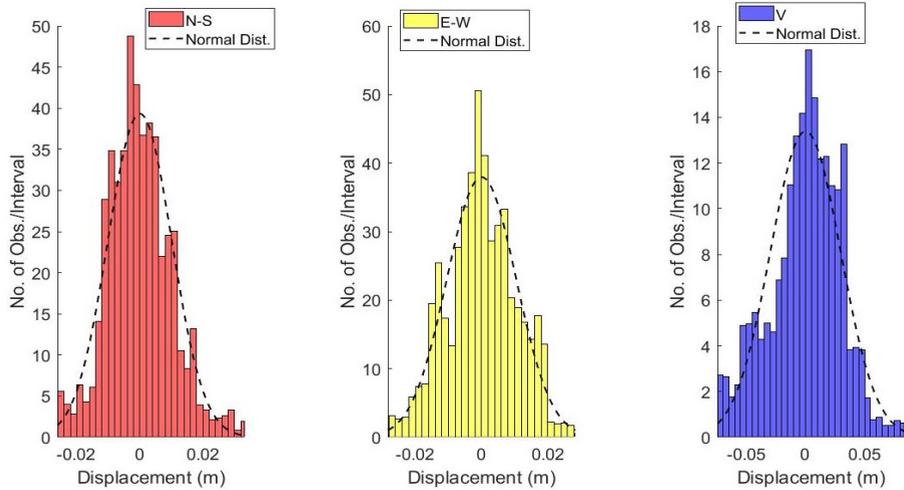


Figura C.20: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2

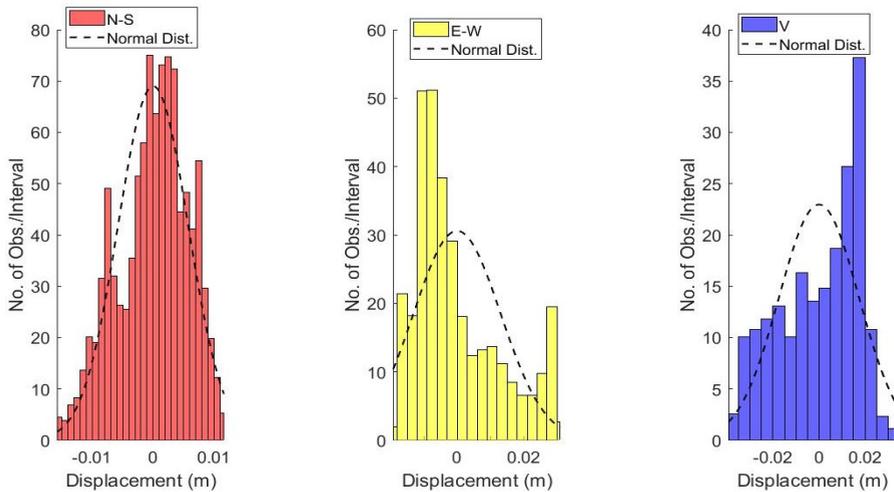


Figura C.21: histogramas semi-estáticos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3

Anexos D

PDF y límites estación ZEN2

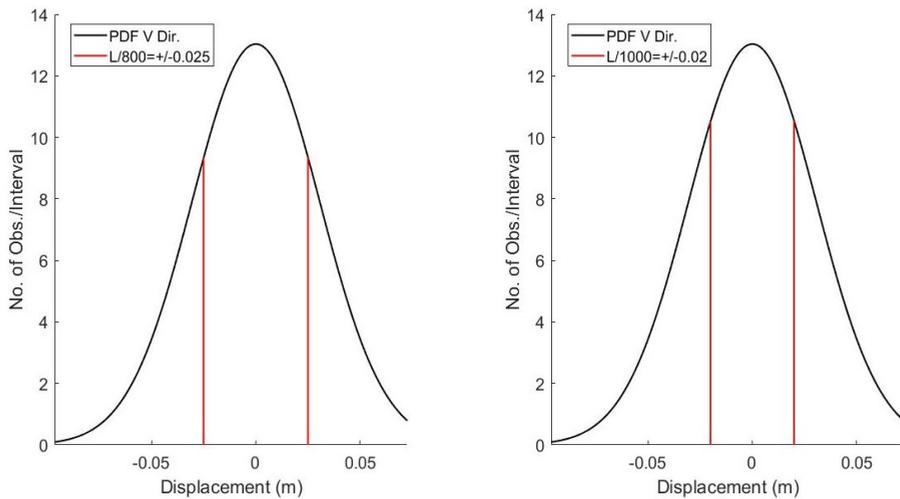


Figura D.1: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1

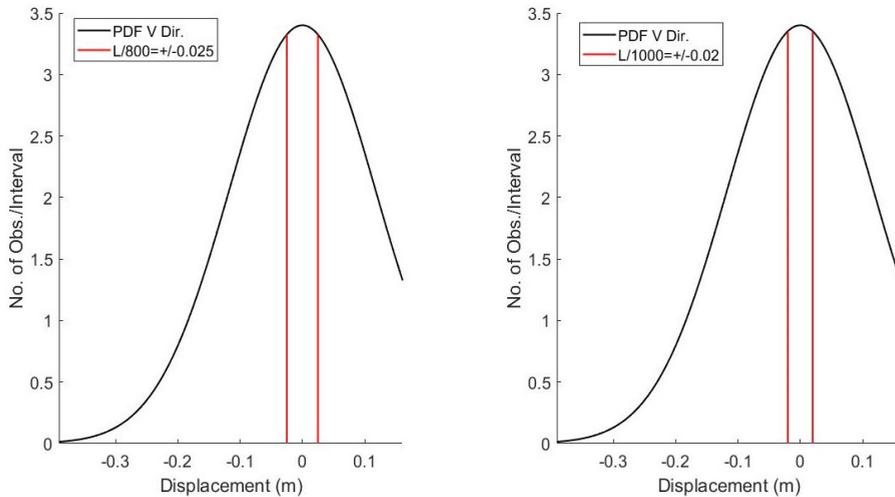


Figura D.2: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2

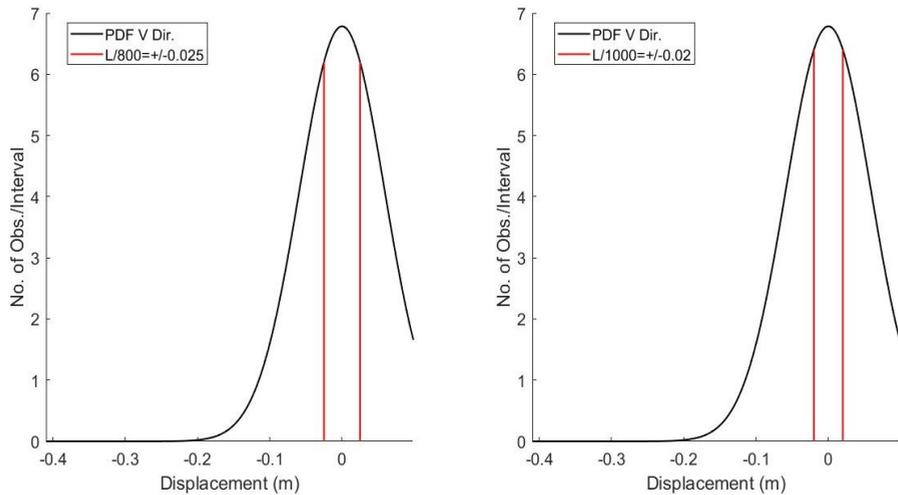


Figura D.3: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3

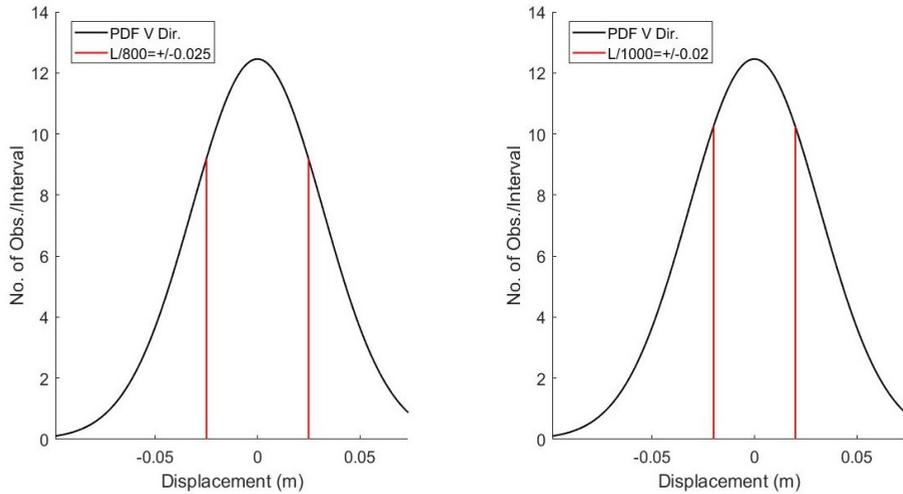


Figura D.4: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1

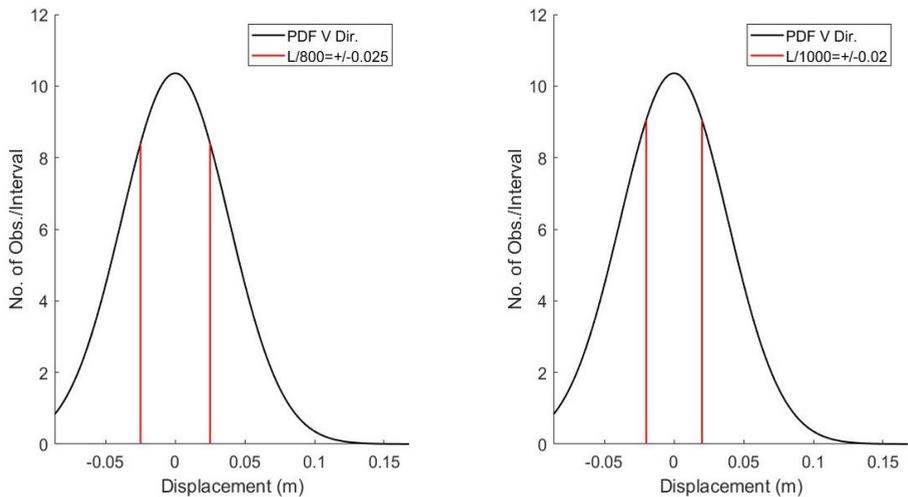


Figura D.5: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2

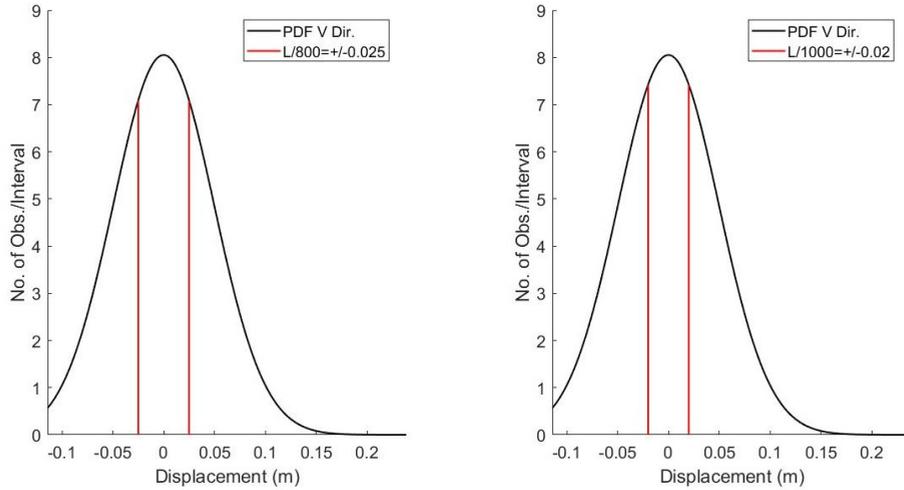


Figura D.6: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3

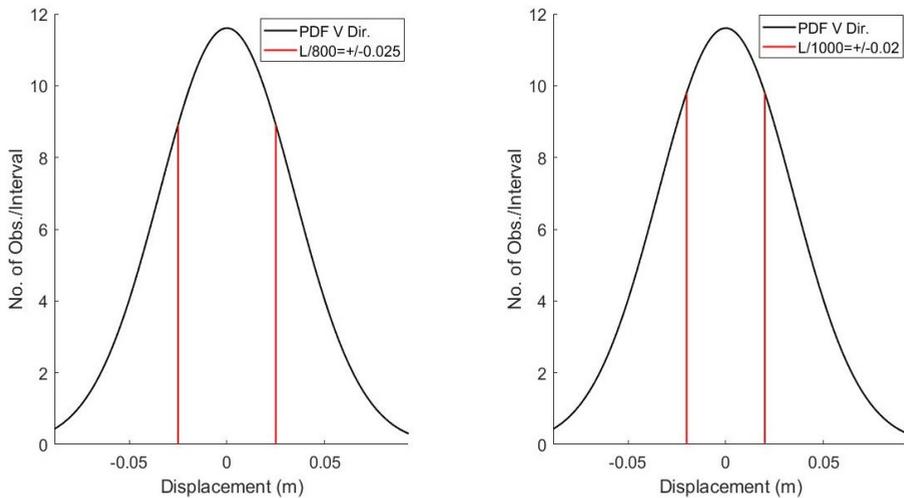


Figura D.7: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1

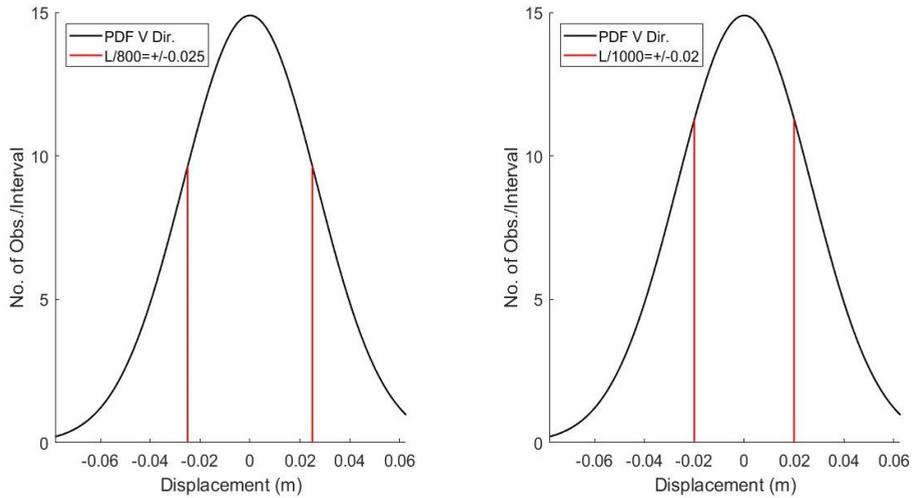


Figura D.8: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2

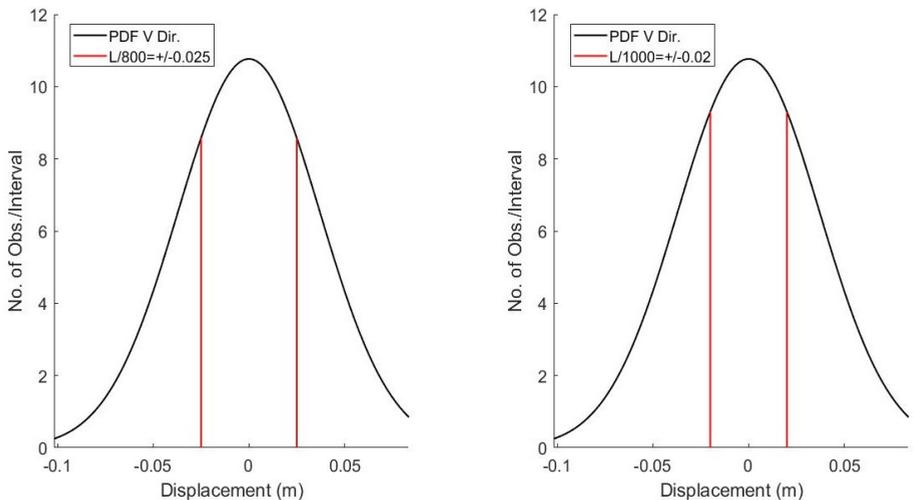


Figura D.9: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3

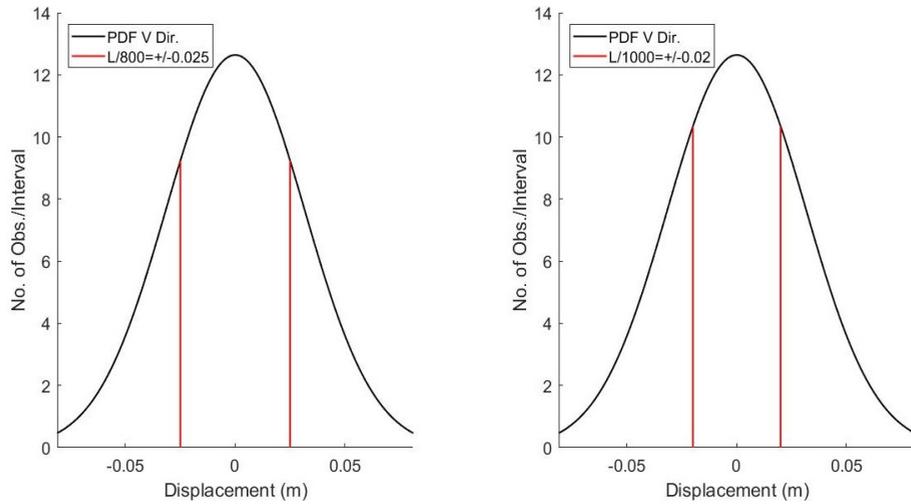


Figura D.10: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1

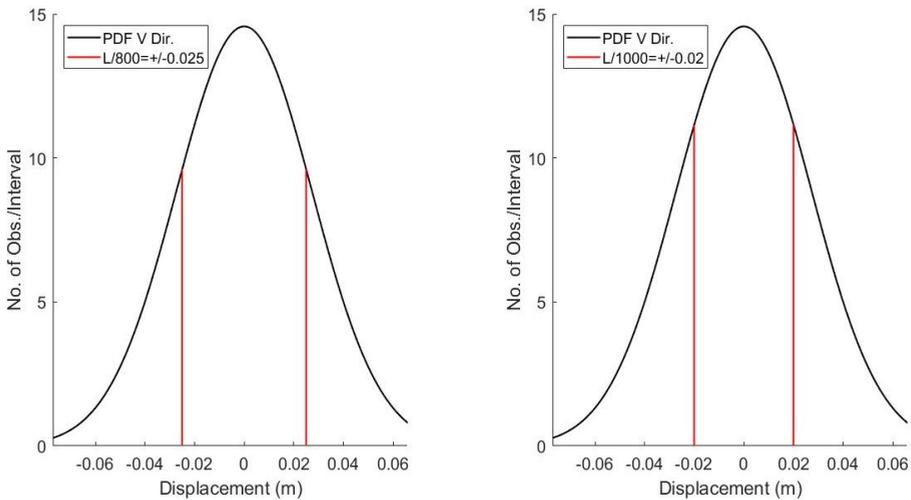


Figura D.11: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2

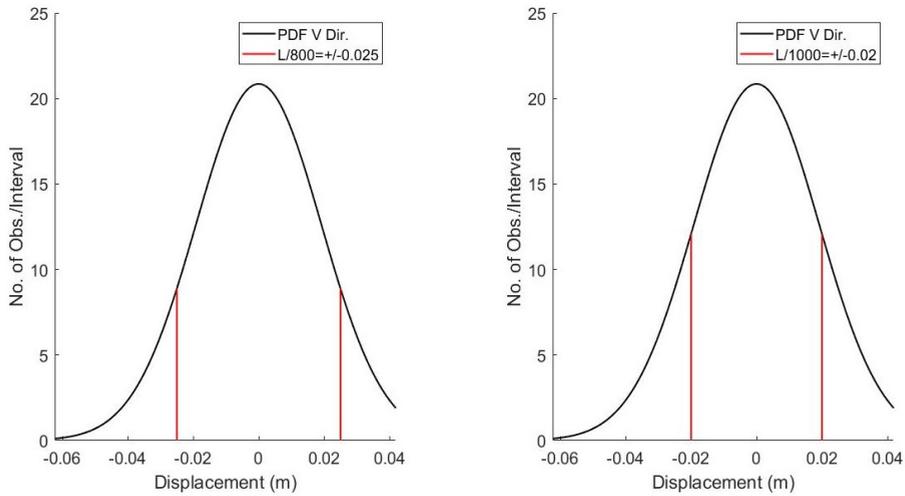


Figura D.12: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3

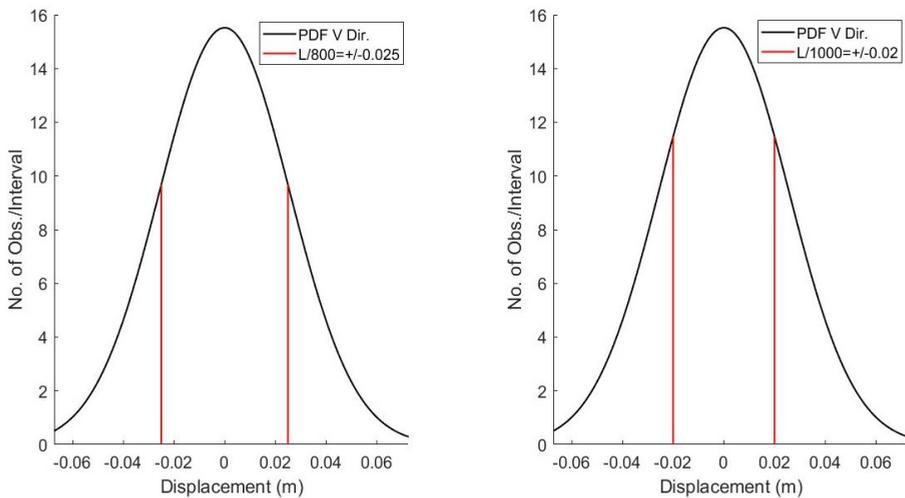


Figura D.13: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1

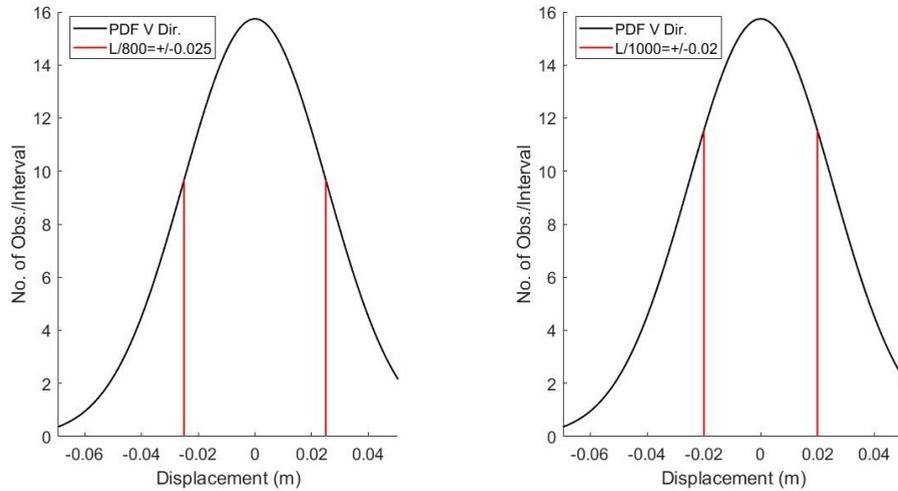


Figura D.14: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2

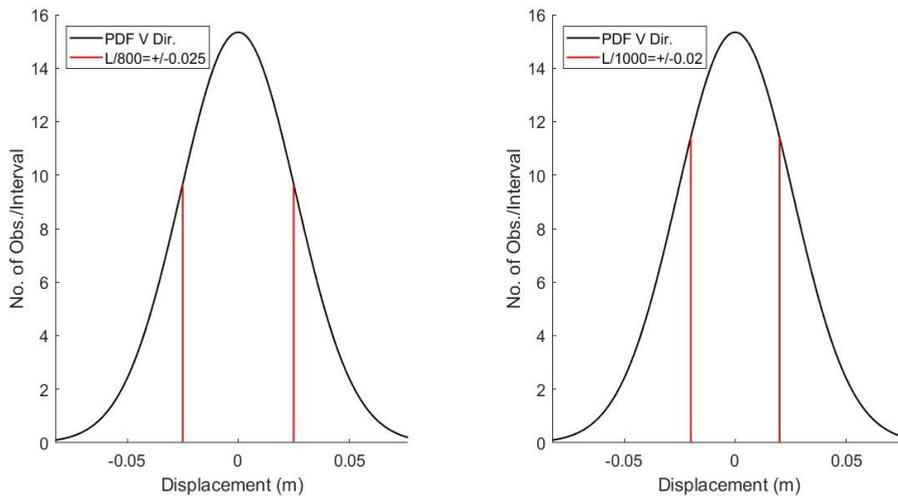


Figura D.15: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3

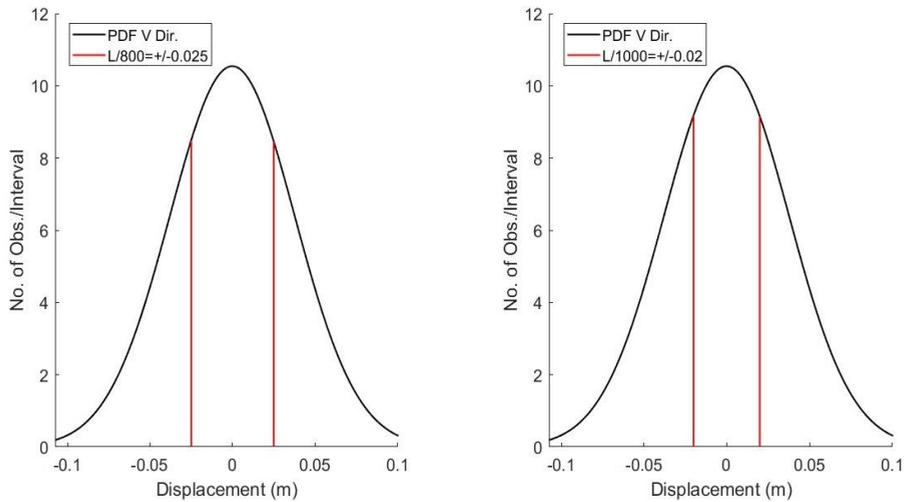


Figura D.16: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1

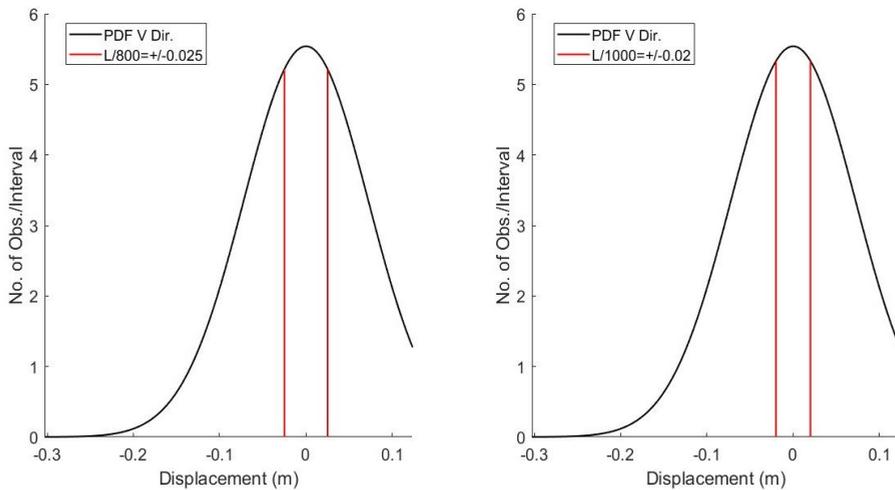


Figura D.17: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2

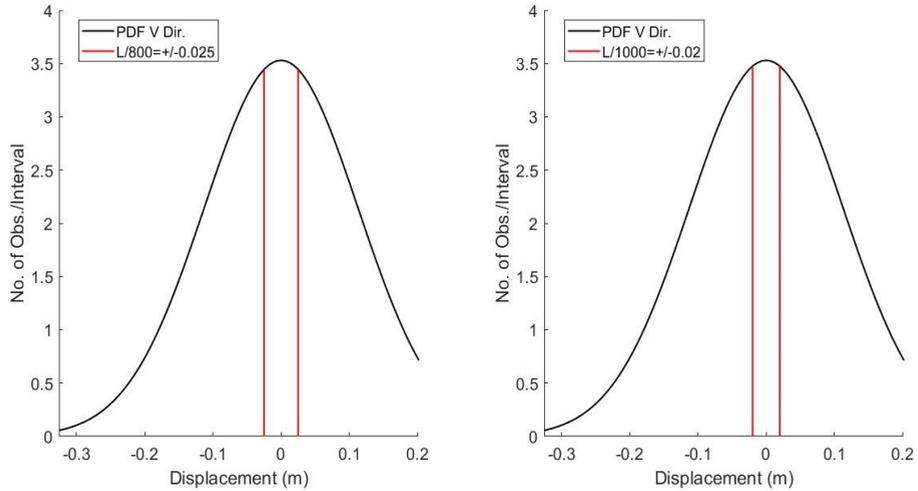


Figura D.18: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3

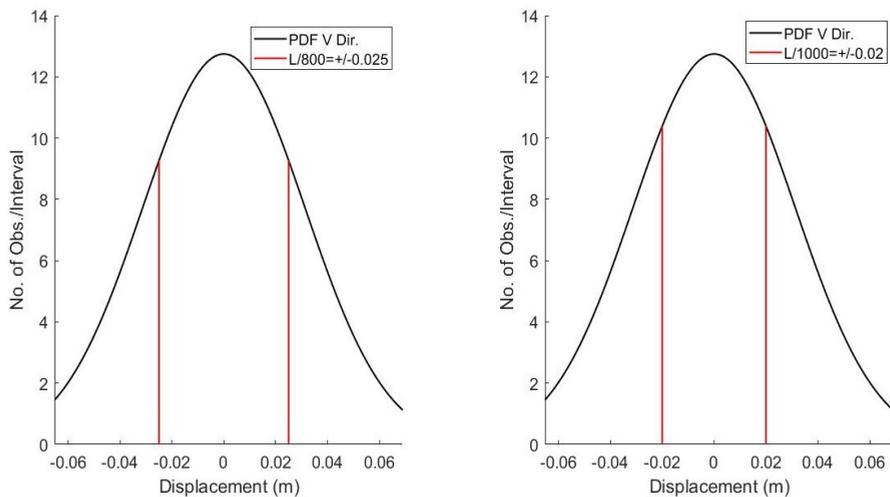


Figura D.19: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1

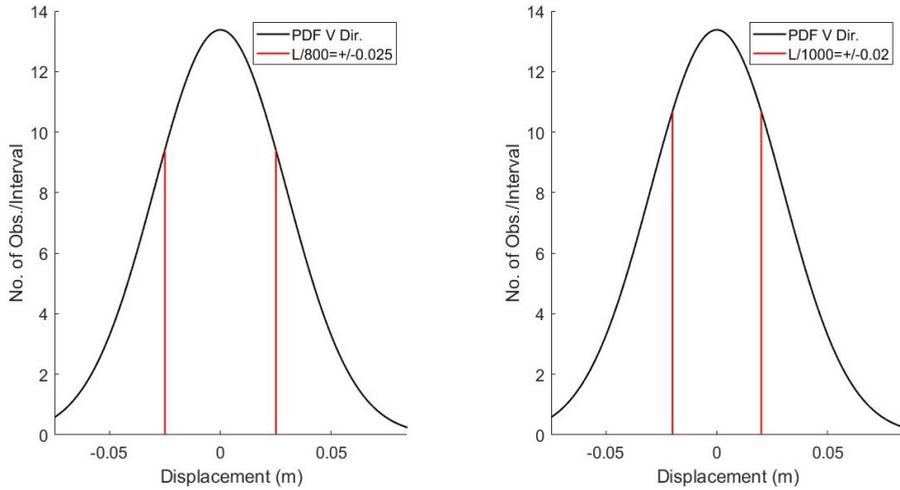


Figura D.20: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2

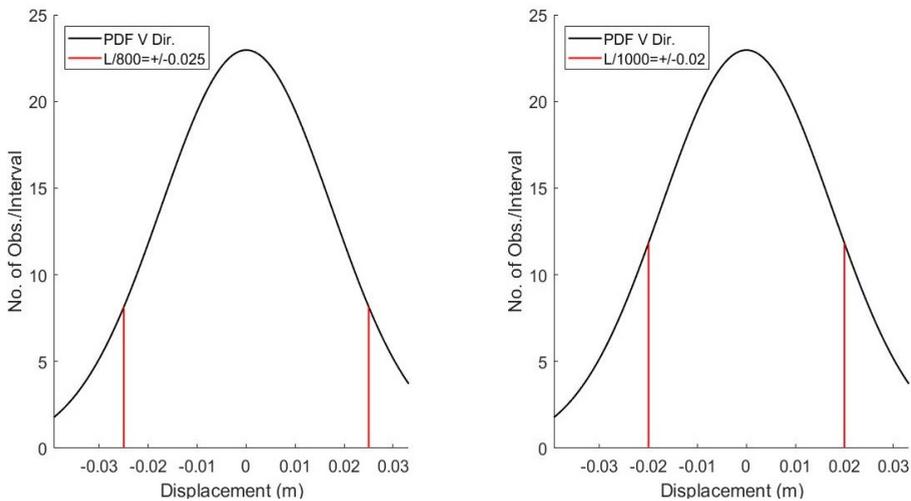


Figura D.21: PDF y límites de deflexión en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3

Anexos E

Comportamiento dinámico de ZEN2

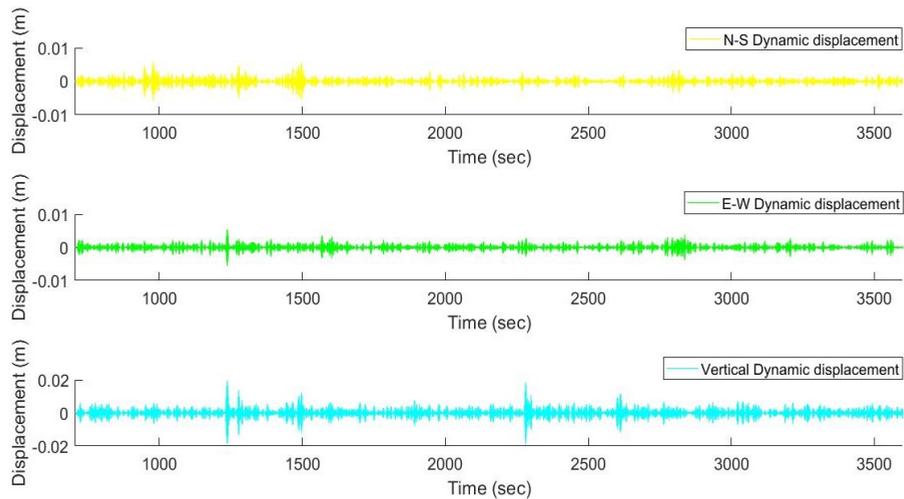


Figura E.1: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1

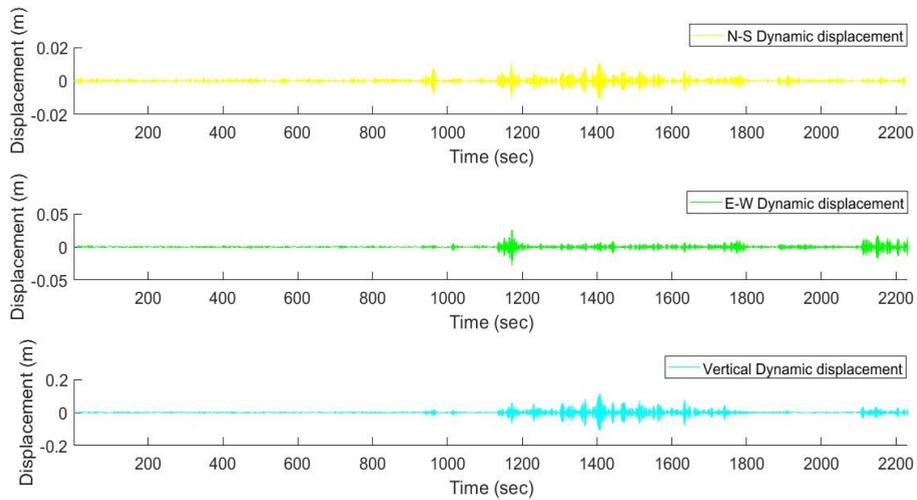


Figura E.2: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2

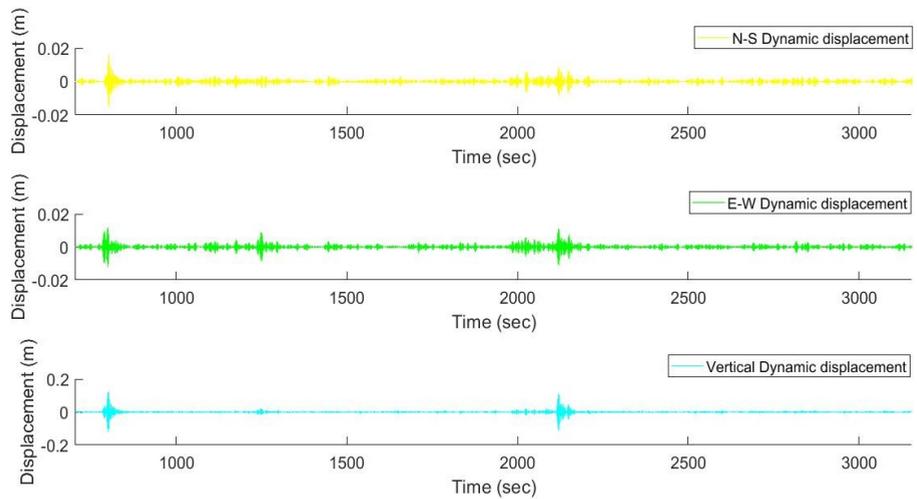


Figura E.3: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3

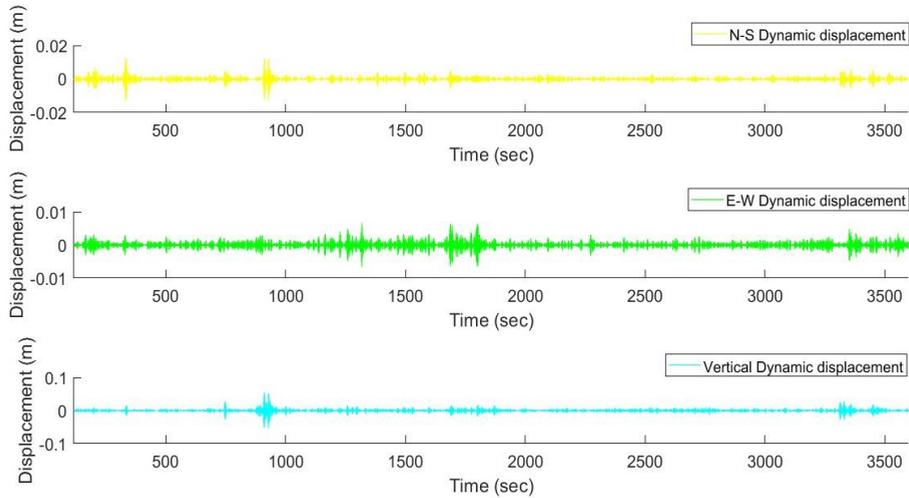


Figura E.4: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1

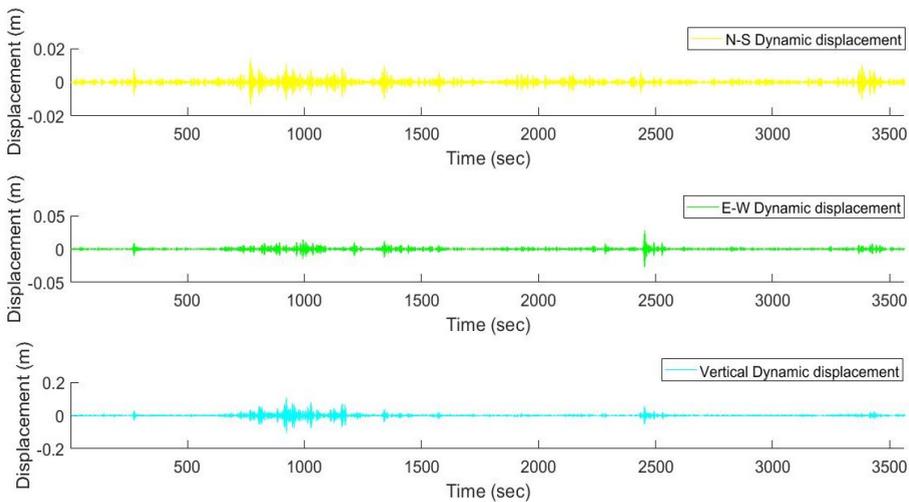


Figura E.5: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2

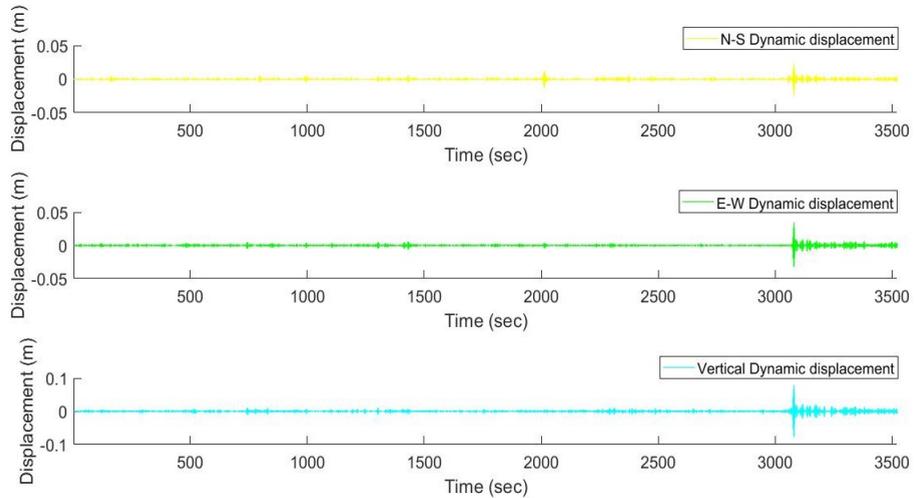


Figura E.6: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3

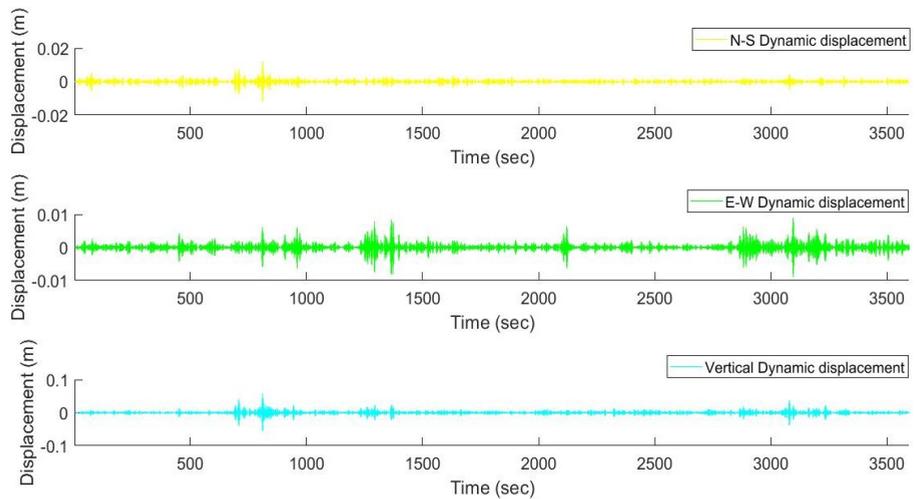


Figura E.7: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1

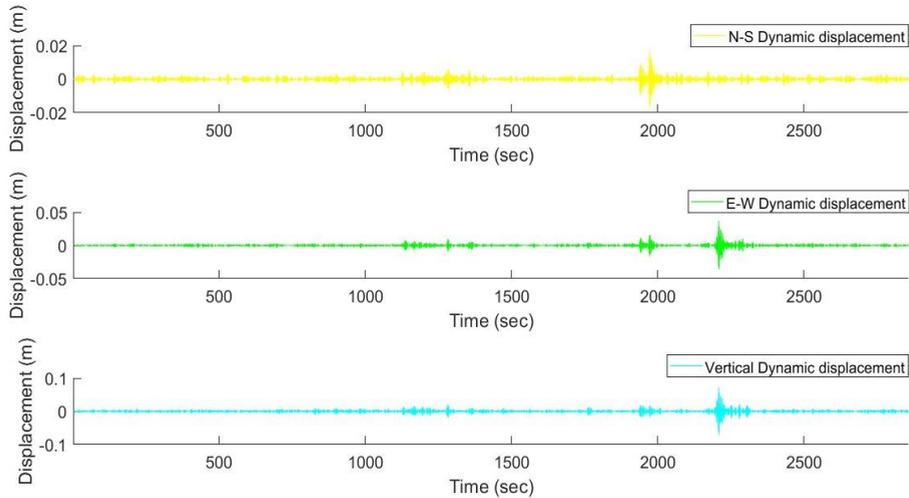


Figura E.8: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2

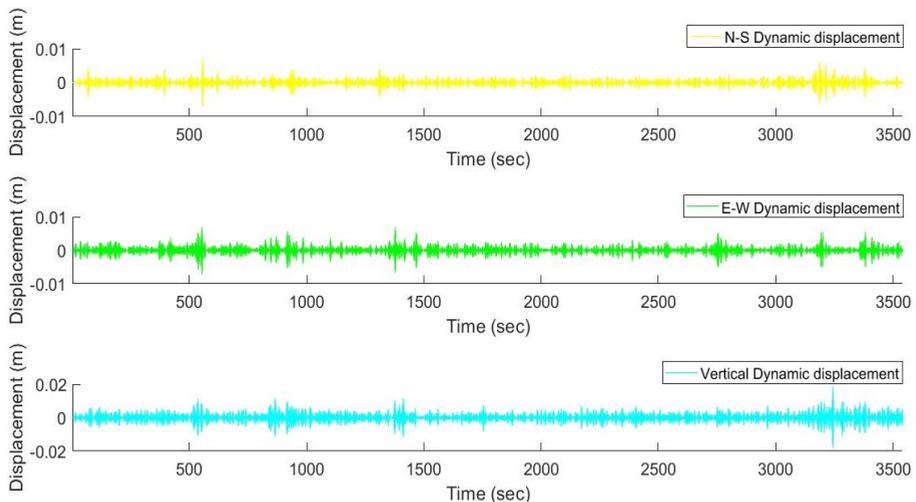


Figura E.9: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3

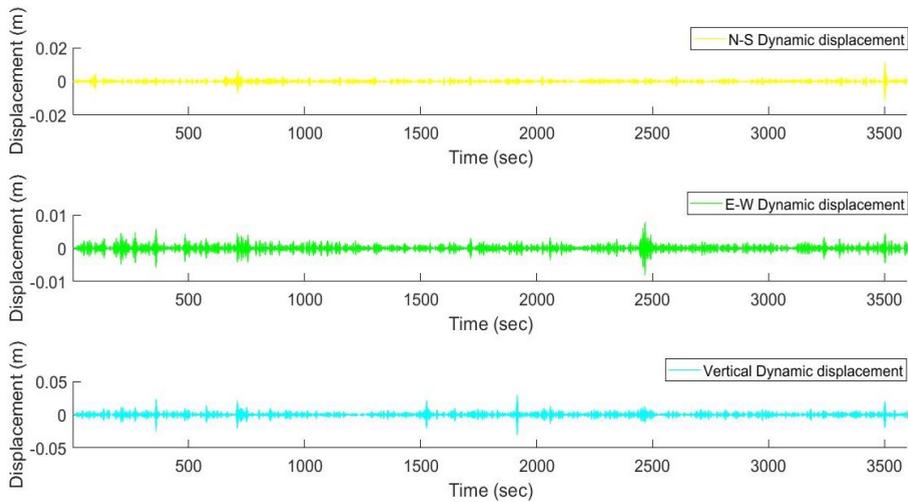


Figura E.10: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1

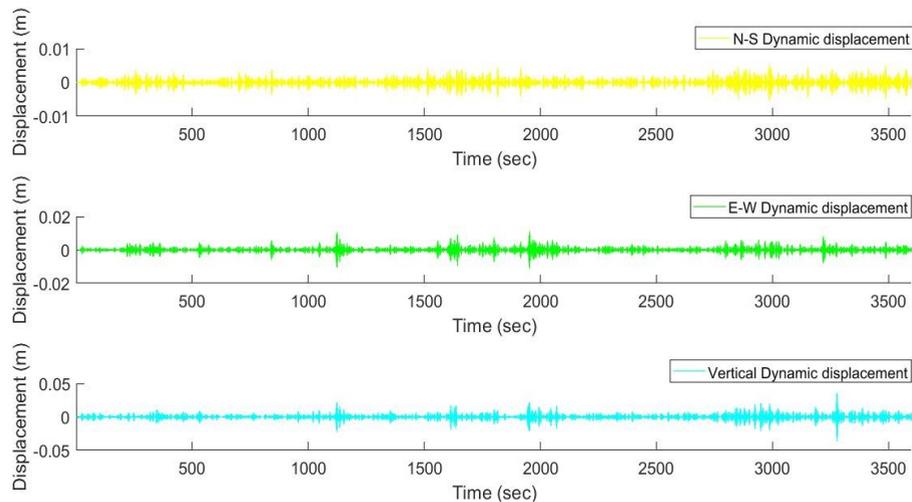


Figura E.11: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2

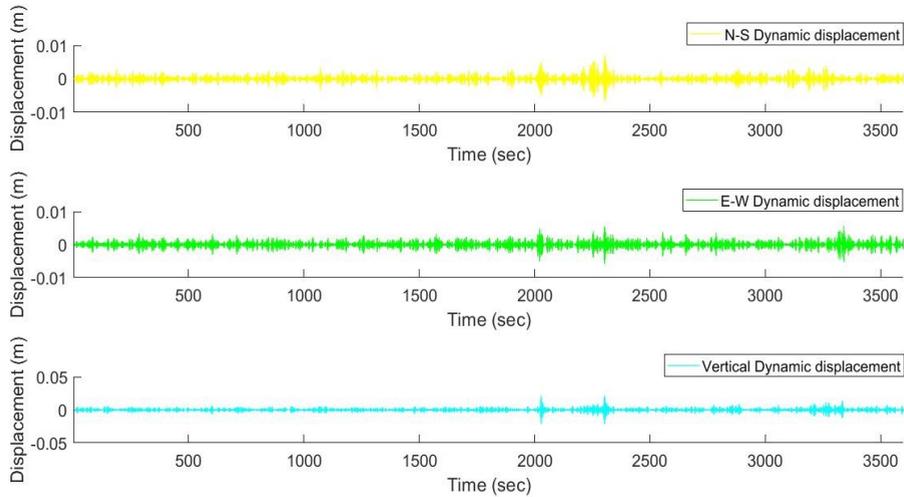


Figura E.12: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3

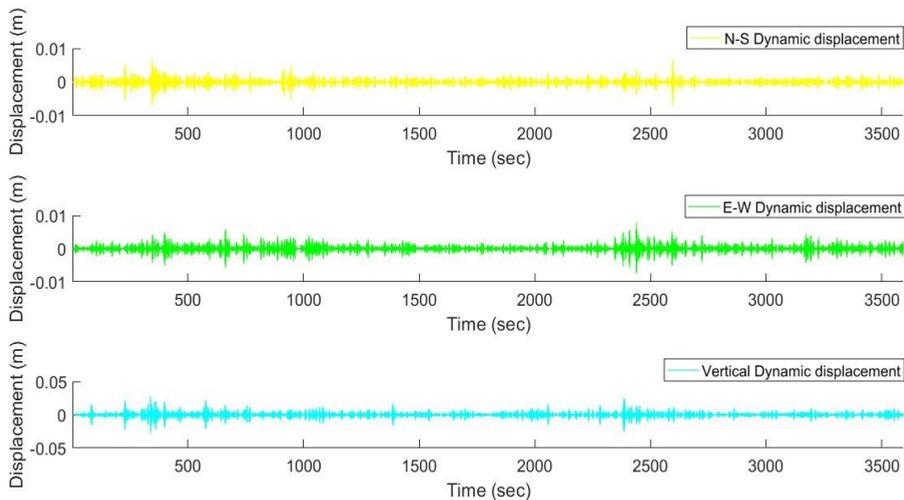


Figura E.13: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1

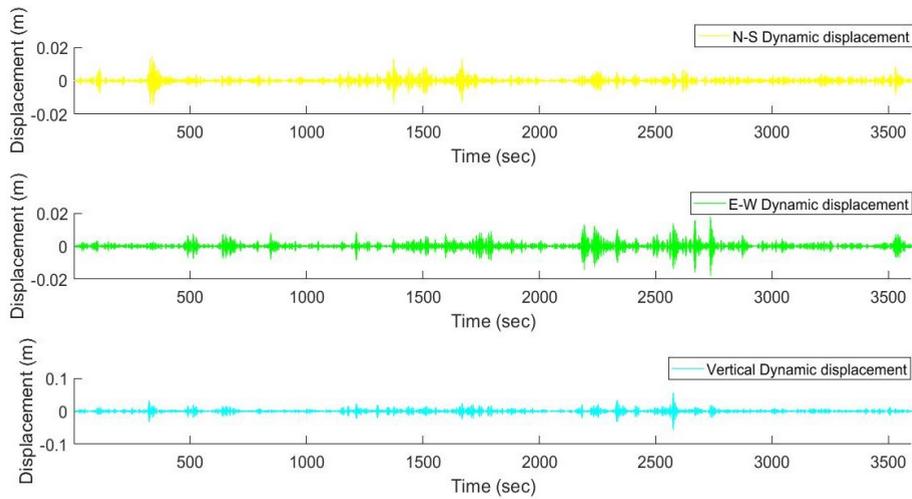


Figura E.14: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2

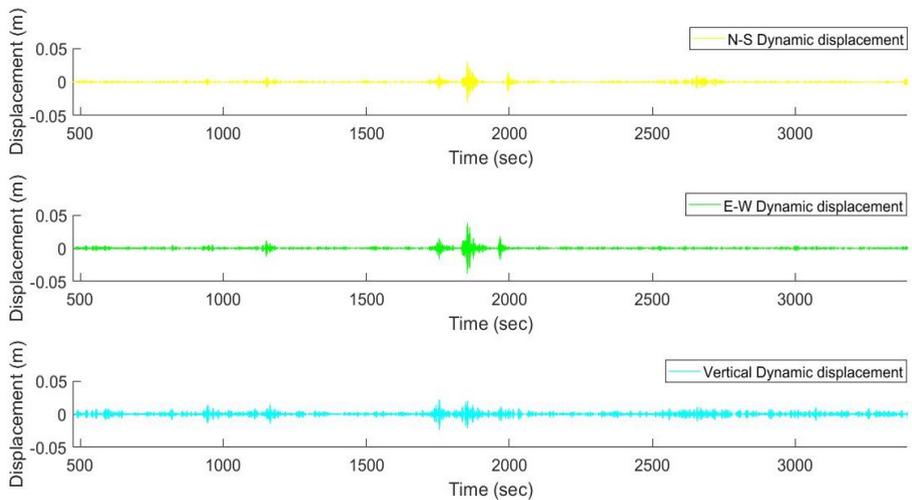


Figura E.15: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3

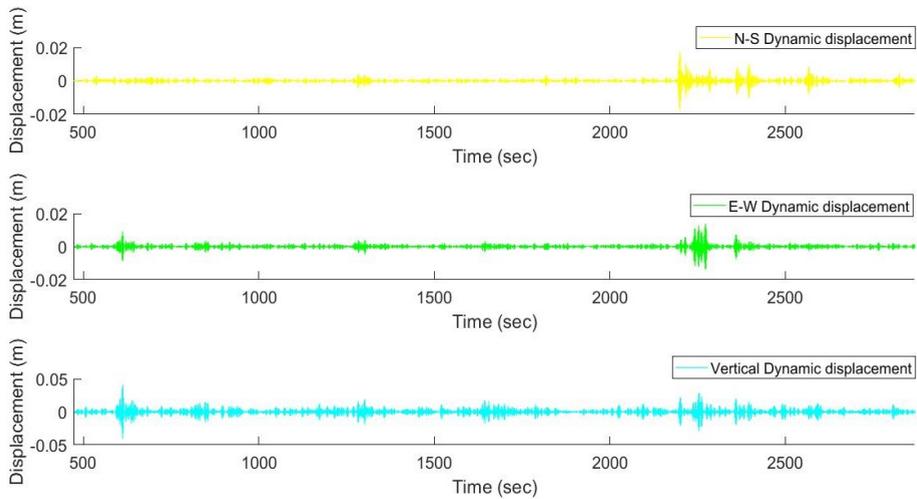


Figura E.16: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1

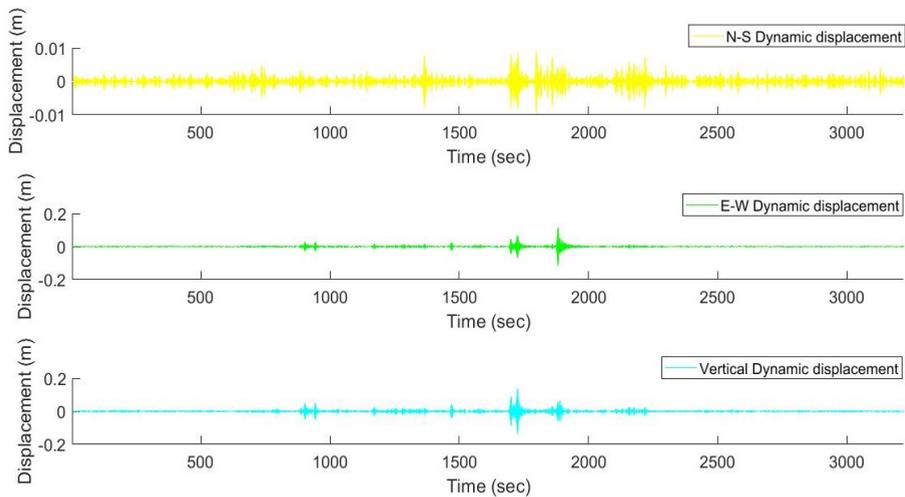


Figura E.17: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2

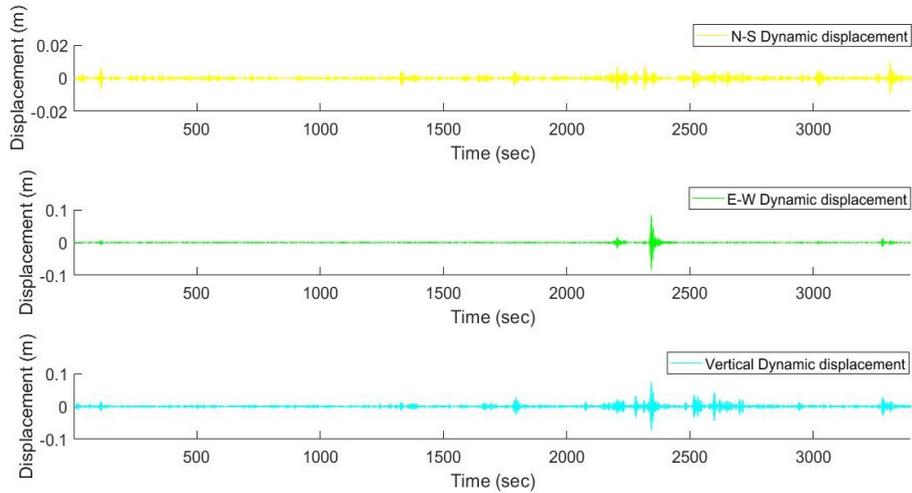


Figura E.18: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3

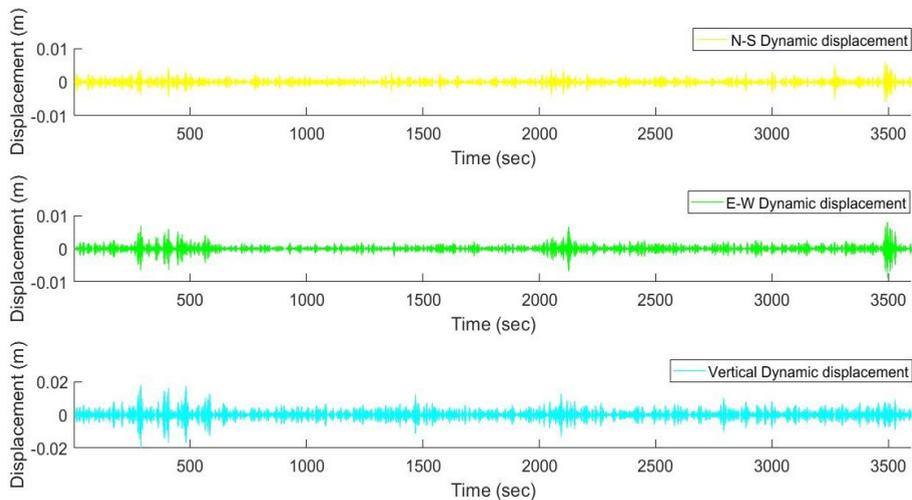


Figura E.19: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1

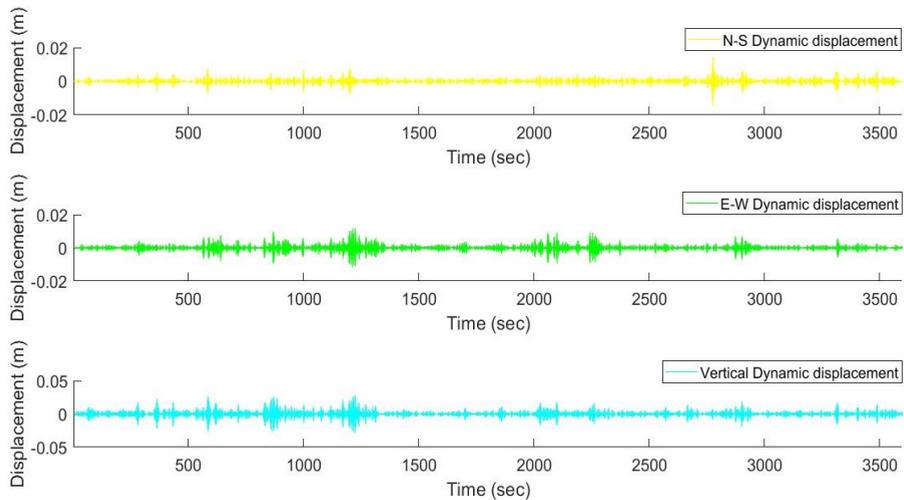


Figura E.20: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2

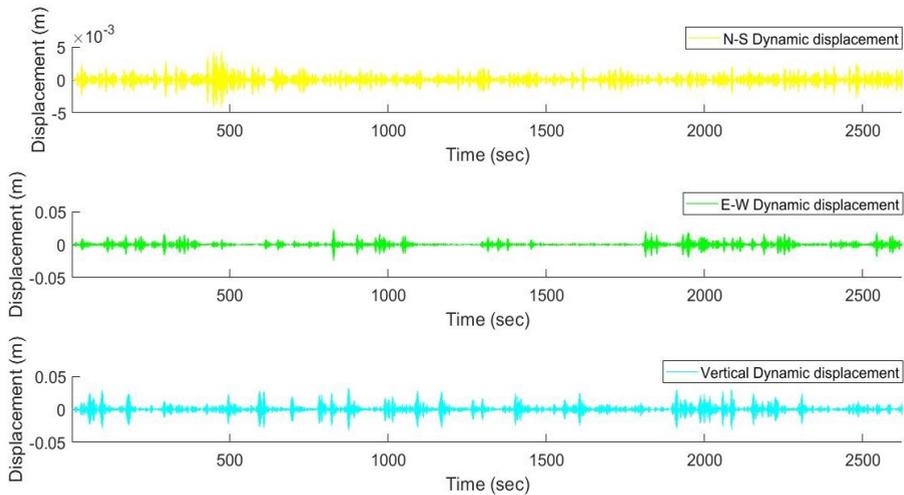


Figura E.21: desplazamientos dinámicos en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3

Anexos F

Frecuencias características ZEN2

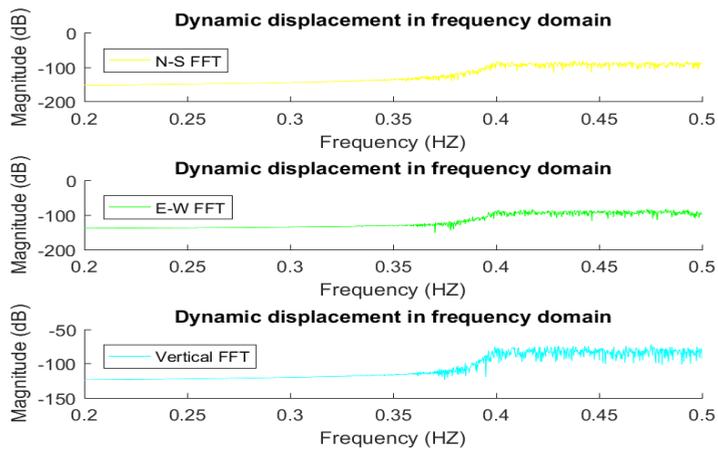


Figura F.1: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 1

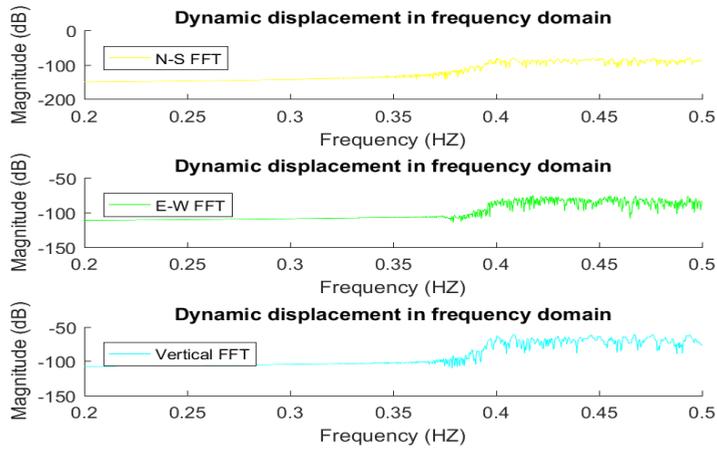


Figura F.2: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 2

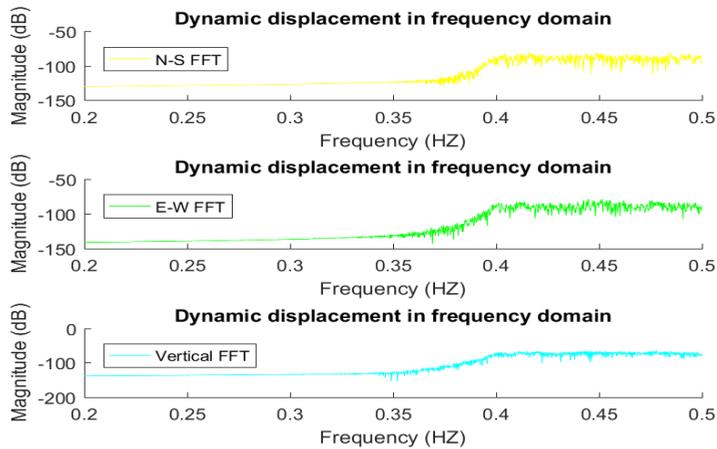


Figura F.3: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, lunes y sesión 3

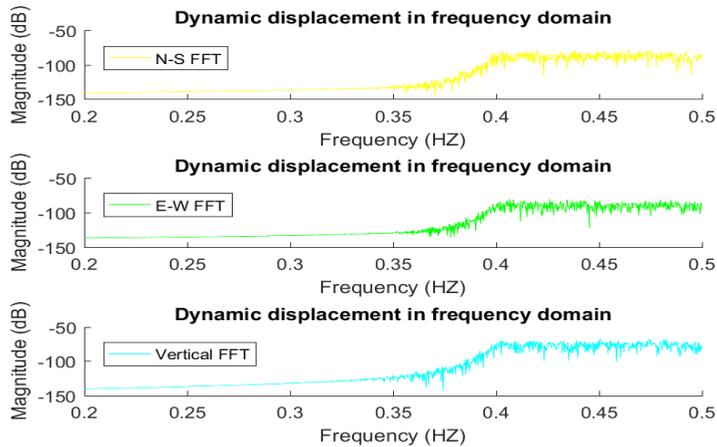


Figura F.4: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 1

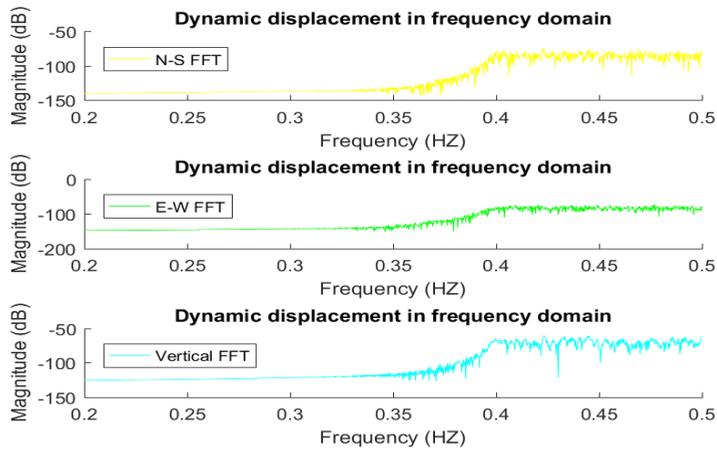


Figura F.5: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 2

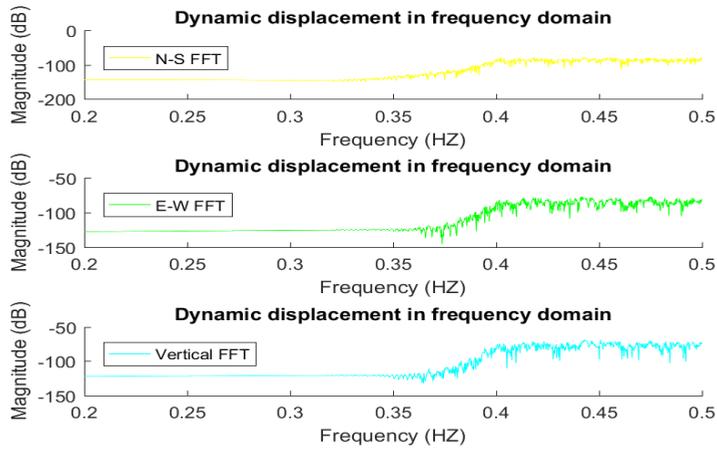


Figura F.6: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, martes y sesión 3

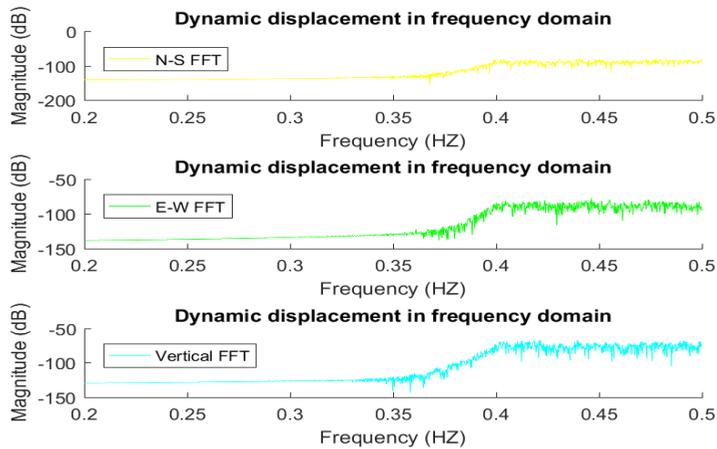


Figura F.7: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 1

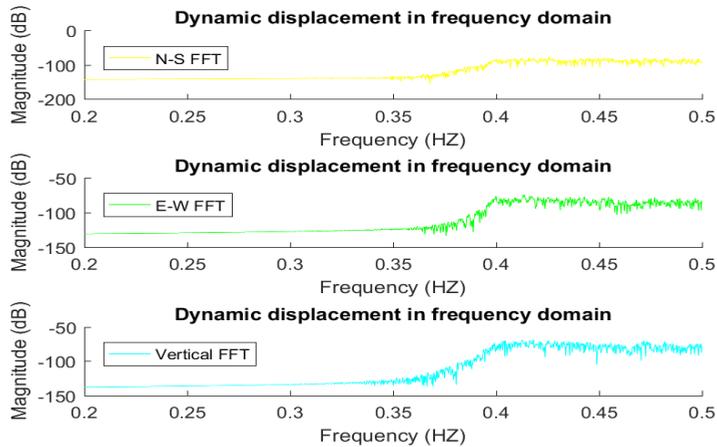


Figura F.8: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 2

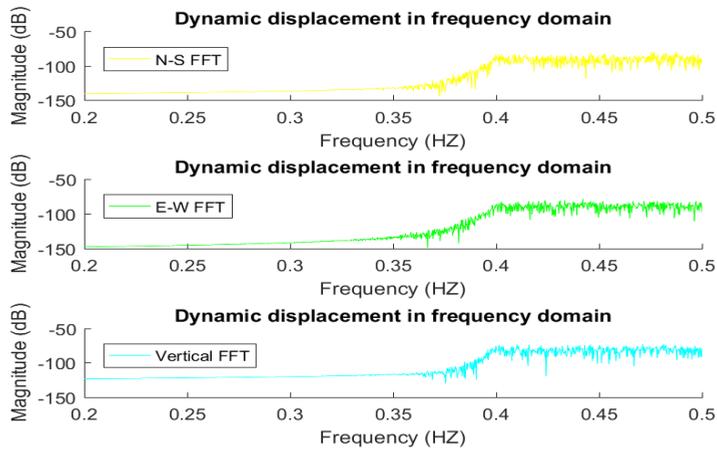


Figura F.9: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, miércoles y sesión 3

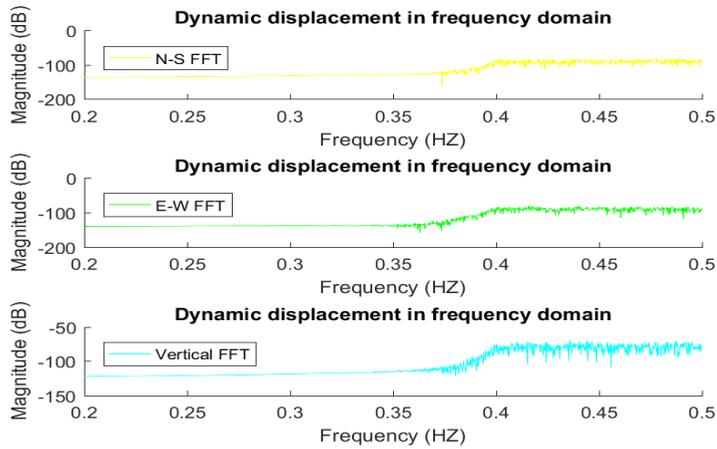


Figura F.10: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 1

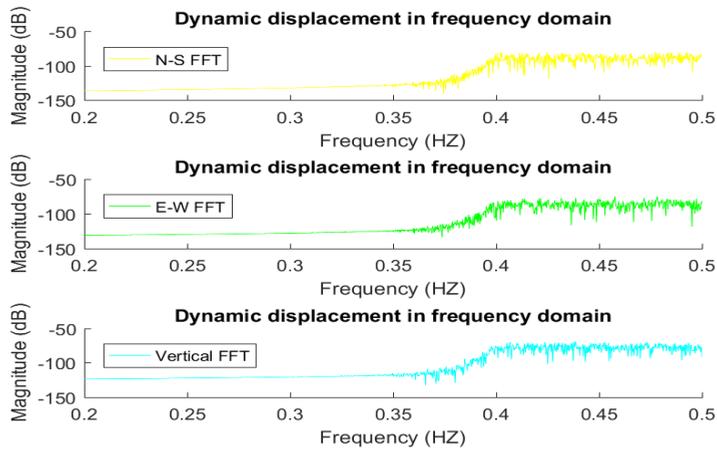


Figura F.11: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 2

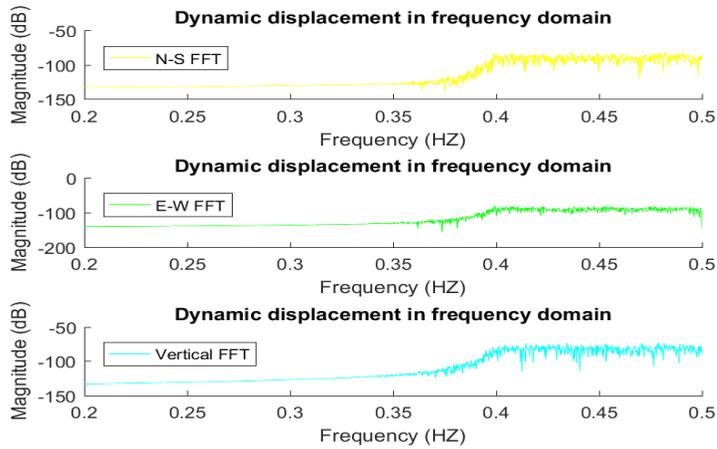


Figura F.12: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, jueves y sesión 3

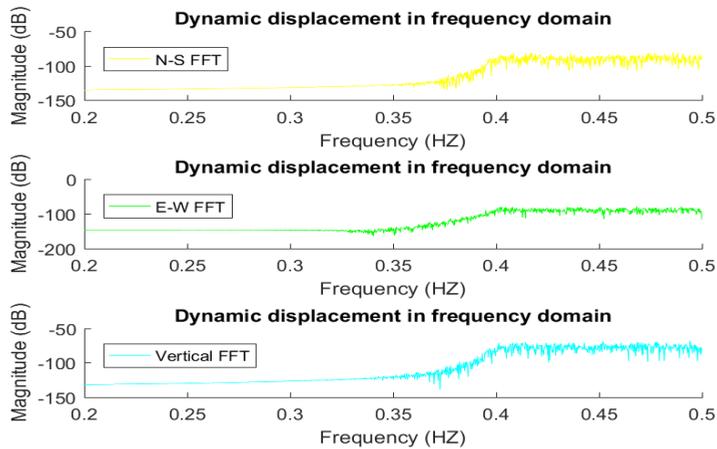


Figura F.13: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 1

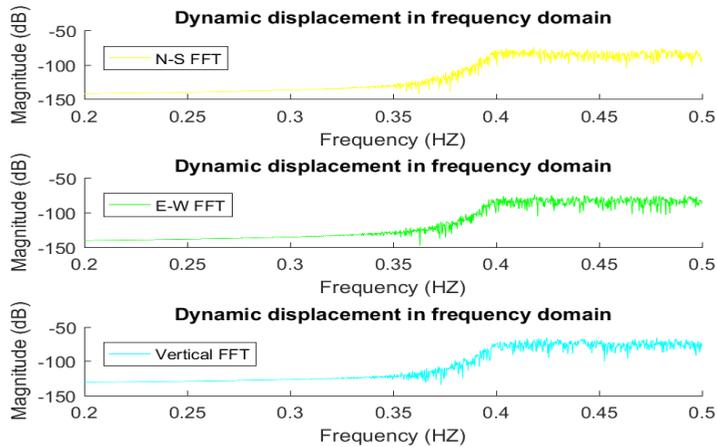


Figura F.14: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 2

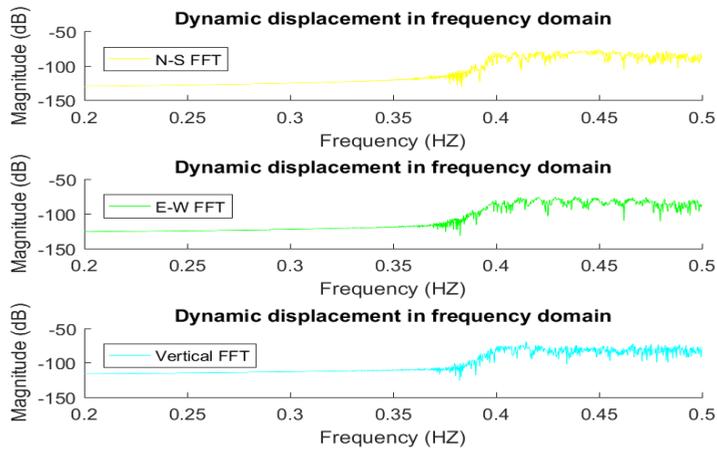


Figura F.15: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, viernes y sesión 3

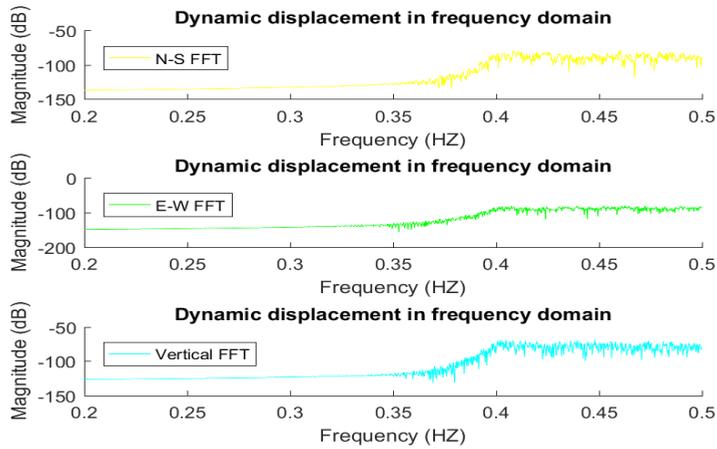


Figura F.16: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 1

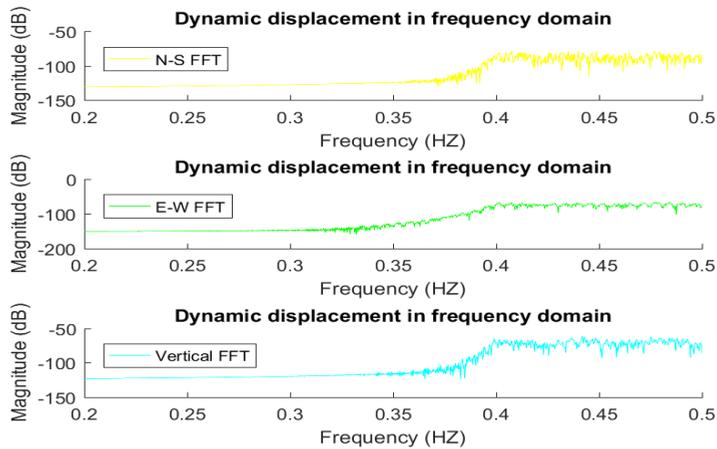


Figura F.17: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 2

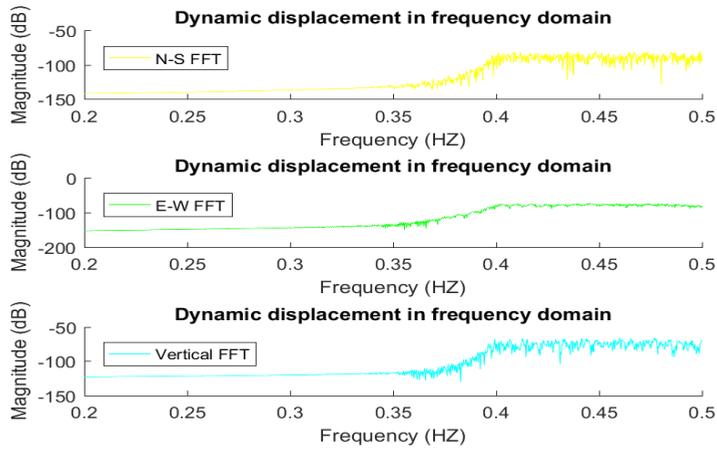


Figura F.18: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, sábado y sesión 3

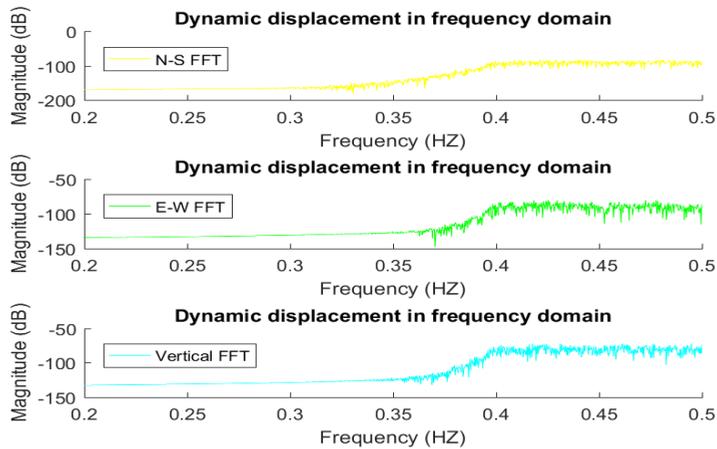


Figura F.19: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 1

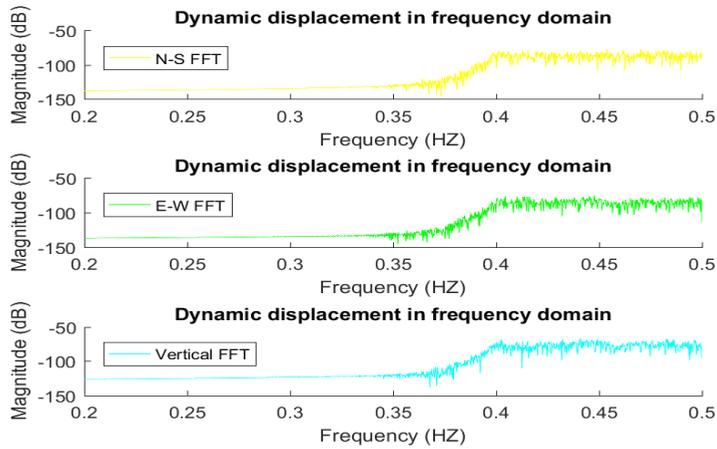


Figura F.20: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 2

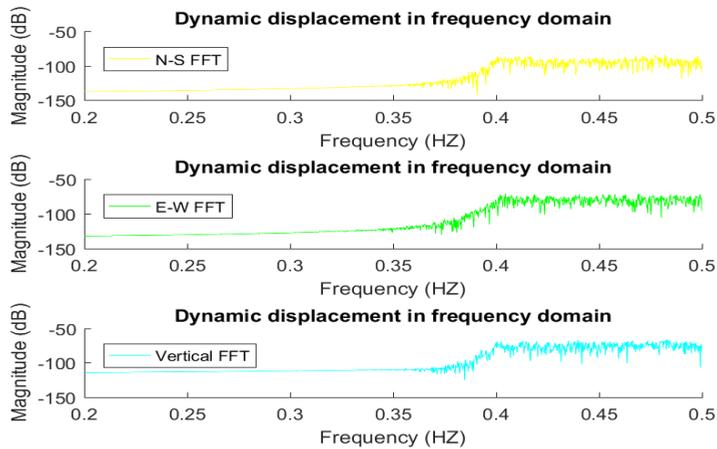


Figura F.21: Frecuencias características en la estación ZEN2, primera campaña, domingo y sesión 3