

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO



TÍTULO

**“MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR COSTERO UTILIZANDO RECEPTORES GNSS DE
BAJO COSTO Y MAREÓGRAFO CONVENCIONAL”**

TESIS

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

PRESENTA

NACIELI BOJORQUEZ PACHECO

DIRECTORES DE TESIS

DR. ROSENDO ROMERO ANDRADE

DR. MANUEL EDWIGES TREJO SOTO

Culiacán Sinaloa, Julio de 2024



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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



U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

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

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

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





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
REPOSITORIO INSTITUCIONAL BUELNA

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

Ciudad de Culiacán, Sinaloa, México a 21 de junio de 2024; quien suscribe: C. Bojorquez Pacheco Naciel con número de cuenta: 0814134-7, egresada del programa de: Maestría en Ciencias de la Información de la Unidad Académica: Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, en la unidad Regional: Centro manifiesto ser autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de: Dr. Rosendo Romero Andrade y Dr. Manuel Edwiges Trejo Soto y de acuerdo al artículo 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor, cedo y comparto los derechos de mi trabajo de Tesis intitulado: “Mediciones del Nivel del Mar costero utilizando Receptores GNSS de Bajo Costo y Mareógrafo Convencional” a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su publicación, difusión, y distribución en medios impresos y digitales, con fines académicos y de investigación, la que será titular del mismo, en forma conjunta o separada con el autor.

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

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

En apego al Art. 27 de la Ley Federal de Derechos de Autor Cedo y comparto el derecho de publicación, difusión, y distribución en medios impresos y digitales, con fines académicos y de investigación a la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Naciel B

Naciel Bojorquez Pacheco

Nombre completo y firma



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y ANTIPLAGIO

A través de la presente Yo: **Naciel Bojorquez Pacheco**, con número de cuenta: **0814134-7** y alumno del Programa **de Maestría en Ciencias de la Información**, con sede en la Facultad de Informática Culiacán y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

DECLARO QUE:

El trabajo de tesis que presento para su defensa y el cual se titula: **“MEDICIONES DEL NIVEL DEL MAR COSTERO UTILIZANDO RECEPTORES GNSS DE BAJO COSTO Y MAREÓGRAFO CONVENCIONAL”**

- 1.- Es el resultado de un trabajo personal y constituye un documento original e inédito.
- 2.- Los documentos, artículos, informes, etc. Utilizados para la realización del trabajo están referenciados de forma clara, tanto en el texto principal como en el apartado de bibliografía de la presente tesis.
- 3.- Que las citas de las obras que aparecen reflejadas de forma literal y entre comillas, presentan clara especificación de la fuente (autor, año) d la que ha sido extraídas.
- 4.- Tengo conocimiento que no puedo asumir como propio el trabajo de tesis de otra persona, la copia de frases, párrafos e ideas de otro trabajo sin citar autoría, o cualquier otra acción de similares características conlleva a la realización fraudulenta del manuscrito de tesis y podrá implicar la suspensión del examen de grado en tanto no se corrija o bien la suspensión definitiva, esto acorde con el nivel en que se pudiese incurrir.
- 5.- Soy consciente de que pretender ser el autor de un trabajo, en parte o en su totalidad, escrito por otra persona constituye un delito con base en los artículos 424 y 427 del código penal federal, título vigesimosexto de los delitos en materia de derechos de autor en la República Mexicana.

Culiacán, Sinaloa a 21 de junio de 2024

Naciel B

Naciel Bojorquez Pacheco

Nombre y Firma del alumno

*“Sin agua nuestro planeta sería una de esas billones de rocas flotantes en la
inmensidad del oscuro vacío del espacio”*

Fabien Cousteau

Resumen

Actualmente el cambio climático afecta en gran medida las condiciones de nuestro planeta, entre ellas, el nivel del mar, por lo que es necesario monitorear las variaciones que este presenta a lo largo del tiempo, en este sentido, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) por sus siglas en inglés, presentan una nueva alternativa para el estudio de dichas variaciones. Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el rendimiento de receptores GNSS de bajo costo bajo la técnica de reflectometría (GNSS-R), en complemento con diferentes antenas de bajo costo, llevando a cabo una comparativa respecto a las mediciones obtenidas mediante un mareógrafo convencional. El estudio se divide en cinco campañas de medición con periodos de ~ 24 horas. Los resultados muestran variaciones en el orden centimétrico con RMS ~ 3 cm, así mismo se obtuvieron correlaciones superiores al 85% en algunas campañas y RMSE oscilando entre 0.07 cm y 2.1 cm. Adicionalmente, se validaron los resultados mediante pruebas de hipótesis de la distribución “F” de Fisher para cada una de las campañas experimentales, con un nivel de significancia de 0.05, las decisiones de las pruebas a un 95% de confiabilidad confirman que las varianzas no son significativamente diferentes. Con base a los resultados anteriores, se demuestra que los receptores y antenas de bajos costo son capaces de seguir la tendencia de las alturas relativas del nivel del mar.

Abstract

Currently, climate change greatly affects the conditions of our planet, including sea level, so it is necessary to monitor the variations that this presents over time. To address this, the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) presents a new alternative for the study of these variations. Based on this, the present work aims to evaluate the performance of low-cost GNSS receivers under the reflectometry technique (GNSS-R), in complement with different low-cost antennas, carrying out a comparison with respect to the measurements obtained by means of a conventional tide gauge. The study is divided into five measurement campaigns with periods of ~ 24 hours. The results show variations in the centimeter order with RMS ~ 3 cm, as well as correlations higher than 85% in some campaigns and RMSE ranging between 0.07 cm and 2.1 cm. Additionally, the results were validated by means of hypothesis tests of Fisher's "F" distribution for each of the experimental campaigns, with a significance level of 0.05, the test decisions at 95% confidence confirm that the variances are not significantly different. Based on the results, it is shown that low-cost receivers and antennas are capable of tracking the trend of relative sea level heights.

Agradecimientos

Primeramente doy gracias a Dios por permitirme realizar este trabajo, así mismo, a mi **Familia, padres y hermanas** quienes me han apoyado e impulsado en todo momento, especialmente a mis hijas **Ashley Danely** y **Ashlin Diarely** quienes son mi principal motivación.

A mis directores de tesis: **Dr. Rosendo Romero Andrade** y **Dr. Manuel E. Trejo Soto**, por su amistad, confianza e invaluable apoyo a lo largo de este proyecto, mostrando siempre la disponibilidad para resolver todas mis dudas. Sus conocimientos y consejos prácticos han sido una gran ayuda, que han hecho de este proceso una experiencia enriquecedora y gratificante.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio y Facultad de Informática Culiacán, que me brindaron la oportunidad de fortalecer mi formación académica. De la misma manera agradezco a **Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT)** por su financiamiento a mi formación de maestría **CVU: 1087326**. A la coordinación del Posgrado en Ciencias de la Información (PCI), **Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado** y **M.C. Thania Roxana Félix González** por el gran apoyo brindado hacia mi persona.

A **Manuel Trejo Echeagaray, Ana Vidal** y **Lizbeth Santiago**, le agradezco por su apoyo, paciencia, consejos y compañía, pero sobre todo por su amistad durante el trayecto de este proyecto. A **Daniel Hernández Andrade**, por su apoyo y disposición para ayudarme a comprender y resolver problemas complicados.

Finalmente, a cada uno de los **profesores** que me guiaron y siempre estuvieron dispuestos a resolver mis dudas.

Índice General

CAPÍTULO I.....	1
Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos particulares	4
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Antecedentes.....	5
CAPÍTULO II.....	8
Marco teórico.....	8
2.1 Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)	8
2.1.1 Sistema Global de Posicionamiento (GPS).....	10
2.2 Receptores GNSS de bajo costo	12
2.3 Cuerpos de Agua (Mares y océanos del mundo).....	15
2.3.1 Movimientos Superficiales (Mareas).....	17
2.3.2 Análisis armónico de las mareas	21
2.4 Técnicas clásicas de medición del nivel del mar	23
2.4.1 Mediciones Mareográficas	24
2.4.2 Mareógrafo GNSS	24
2.4.3 Mareógrafo convencional.....	26
2.5 Reflectometría GNSS.....	28
2.5.1 Superficie reflectiva y zona de reflectancia	29
2.6 Señal relación ruido (SNR)	32

2.7 Modelo directo e inverso.....	34
2.7.1 Modelo directo y parámetros de incógnitas	34
2.7.2 Modelo inverso	38
2.8 Retardo de Fase.....	39
2.8 Prueba de hipótesis estadística	41
2.8.1 Distribución Chi-cuadrada (X^2)	44
2.8.2 Distribución T-Student (t)	45
2.8.3 Distribución de Fisher (F)	46
CAPÍTULO III.....	48
Metodología	48
3.1 Casos de Estudio	49
3.2 Adquisición de los datos.....	51
CAPÍTULO IV	53
Resultados.....	53
4.1 Zona de Reflectancia y análisis de la relación señal-ruido (SNR).....	53
4.2 Análisis de los datos SNR	55
4.3 Prueba Estadística	66
CAPÍTULO V.....	73
Discusión y conclusión.....	73
4.1 Trabajo futuro	76
4.2 Productos generados.....	77
Referencias.....	80

Índice de Figuras

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN DEL SEGMENTO ESPACIAL DE LA CONSTELACIÓN GPS (EDUARDO HUERTA, MANGIATERRA ALDO, 2005).	11
FIGURA 2. SEGMENTO DE CONTROL GPS, RED GLOBAL DE INSTALACIONES TERRESTRES QUE RASTREAN LOS SATÉLITES GPS (GPS, 2020).....	12
FIGURA 3. RECEPTOR GNSS DE BAJO COSTO, MODELO ZED-F9P; FABRICANTE UBLOX.	13
FIGURA 4. ANTENAS GNSS DE BAJO COSTO , A) ANN-MB00, B) BT-170.....	15
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE LOS OCÉANOS, A) OCÉANO PACIFICO , B) ATLÁNTICO, C)OCÉANO INDICO Y D)OCÉANO ANTÁRTICO.....	16
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LAS AGUAS DE LOS OCÉANOS DEBIDO A LA FUERZA GRAVITACIONAL (FUERZAS DE MAREA - FÍSICA UNIVERSITARIA VOLUMEN 1 OPENSTAX)	19
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL GENERADOR DE MAREAS (STEWART, 2009).....	19
FIGURA 8. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA COMPONENTE HORIZONTAL DEL POTENCIAL DE MAREA CUANDO EL GENERADOR ESTÁ POR ENCIMA DEL ECUADOR Z.....	21
FIGURA 9. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE CONFIGURACIÓN DE UN MAREÓGRAFO GNSS.....	25
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS COMPONENTES ELECTRO-MECÁNICOS QUE INTEGRAN UNA ESTACIÓN MAREOGRÁFICA (UNAM, 2022). ..	27
FIGURA 11. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA PRIMERA ZONA FRESNEL.....	30
FIGURA 12. INTERPRETACIÓN GRÁFICA DE ERRORES TIPO I Y II (MEDINA OLALDE, 2007).....	42
FIGURA 13. INTERPRETACIÓN GRÁFICA DE (A) PRUEBAS DE UNA Y (B) DE DOS COLAS.....	44
FIGURA 14. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN STUDENT PARA UNA (A) Y DOS COLAS (B).	46

FIGURA 15. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN F DE UNA COLA.	47
FIGURA 16. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO.	48
FIGURA 17. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
FIGURA 18. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA SOLERA (BARRA) PARA LA TOMA DE DATOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
FIGURA 19. ESTACIÓN MAREOGRÁFICA ALTATA (ALTA043). FUENTE: ALTATA, SIN. (SEMAR.GOB.MX).....	51
FIGURA 20. ARQUITECTURA PARA LA TOMA DE DATOS GNSS CON RECEPTORES Y ANTENAS DE BAJO COSTO.....	52
FIGURA 21. ZONA DE REFLECTANCIA PARA LA ESTACIÓN ABAJ/ARRI, VISTA SATELITAL – GOOGLE EARTH.....	53
FIGURA 22. PERIODOGRAMA SNR; REPRESENTACIÓN GRÁFICA SINUSOIDAL DE LAS SEÑALES GPS REFLEJAS PARA EN L1, ESTACIÓN: ABAJ.	54
FIGURA 23. EJEMPLO DE SEÑAL SNR PARA GPS EN L1, PARA EL DÍA 314, ESTACIÓN ABAJ, ACIMUT DE 150°.....	55
FIGURA 24. RMS DE LAS ALTURAS ESTIMADAS POR ESTACIÓN; RH- ALTURA INICIAL ESTIMADA, RH+RHDOT- ALTURA INICIAL CON CORRECCIÓN A LA TASA DE ALTURA, RH+RHDOT/IF – ALTURA ESTIMA CON CORRECCIÓN DE TASA DE ALTURA E INTER-FRECUENCIA.	58
FIGURA 25. COMPARATIVA DE TENDENCIA DE ALTURAS GNSS/MAREOGRÁFICAS RESPECTO AL TIEMPO, CAMPAÑA UNO.	59
FIGURA 26. CORRELACIÓN LINEAL DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE MAR BAJO LA TÉCNICA GNSS-R RESPECTO AL MAREÓGRAFO CONVENCIONAL PARA LA CAMPAÑA UNO, A)ESTACIÓN ARRI, B) ESTACIÓN ABAJ	60
FIGURA 27. TENDENCIA DE MEDICIONES RELATIVAS DEL NIVEL DEL MAR MEDIANTE GNSS-R Y MC PARA LA CAMPAÑA DOS.....	61
FIGURA 28. CORRELACIÓN LINEAL DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE MAR BAJO LA TÉCNICA GNSS-R RESPECTO AL MAREÓGRAFO CONVENCIONAL PARA LA CAMPAÑA DOS, A)ESTACIÓN ARRI, B) ESTACIÓN ABAJ Y C)ESTACIÓN BETI	61
FIGURA 29. TENDENCIA DE MEDICIONES RELATIVAS DEL NIVEL DEL MAR MEDIANTE GNSS-R Y MC PARA LA CAMPAÑA TRES.....	62

FIGURA 30. CORRELACIÓN LINEAL DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE MAR BAJO LA TÉCNICA GNSS-R RESPECTO AL MAREÓGRAFO CONVENCIONAL PARA LA CAMPAÑA TRES, A)ESTACIÓN ARRI, B) ESTACIÓN ABAJ Y C)ESTACIÓN BETI . .	62
FIGURA 31. TENDENCIA DE MEDICIONES RELATIVAS DEL NIVEL DEL MAR MEDIANTE GNSS-R Y MC PARA LA CAMPAÑA CUATRO.	63
FIGURA 32. CORRELACIÓN LINEAL DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE MAR BAJO LA TÉCNICA GNSS-R RESPECTO AL MAREÓGRAFO CONVENCIONAL PARA LA CAMPAÑA CUATRO, A)ESTACIÓN ARRI, B) ESTACIÓN ABAJ Y C)ESTACIÓN BETI	64
FIGURA 33. TENDENCIA DE MEDICIONES RELATIVAS DEL NIVEL DEL MAR MEDIANTE GNSS-R Y MC PARA LA CAMPAÑA CUATRO.	64
FIGURA 34. CORRELACIÓN LINEAL DE LAS MEDICIONES DEL NIVEL DE MAR BAJO LA TÉCNICA GNSS-R RESPECTO AL MAREÓGRAFO CONVENCIONAL PARA LA CAMPAÑA CINCO, A) ESTACIÓN ARRI, B) ESTACIÓN ABAJ.....	65
FIGURA 35. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA PARA LA CAMPAÑA UNO, A) ESTACIÓN ABAJ Y B) ESTACIÓN ARRI.	68
FIGURA 36. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA PARA LA CAMPAÑA DOS, A) ESTACIÓN ABAJ, B) ESTACIÓN ARRI Y C) ESTACIÓN BETI. ..	69
FIGURA 37. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA PARA LA CAMPAÑA TRES, A) ESTACIÓN ABAJ, B) ESTACIÓN ARRI Y C) ESTACIÓN BETI. ..	70
FIGURA 38. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA PARA LA CAMPAÑA CUATRO, A) ESTACIÓN ABAJ, B) ESTACIÓN ARRI Y C) ESTACIÓN BETI.....	71
FIGURA 39. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA PARA LA CAMPAÑA CINCO, A) ESTACIÓN ABAJ, B) ESTACIÓN ARRI.....	72

Índice de Tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE.....	9
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MODELO U-BLOX ZED-F9P; FUENTE (WWW.U-BLOX.COM).....	14
TABLA 3. FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DE LA MAREA (STEWART, 2009).....	22
TABLA 4. COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS MAREAS (STEWART, 2009).....	23
TABLA 5. RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS ERRORES TIPO I Y II (GHILANI, 2011).	42
TABLA 6. VARIABLES DE PRUEBA Y PRUEBAS ESTADÍSTICAS.	43
TABLA 7. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA DISTRIBUCIÓN χ^2	44
TABLA 8. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA DISTRIBUCIÓN T.....	46
TABLA 9. FORMULACIÓN DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LA DISTRIBUCIÓN F (GHILANI, 2011).	47
TABLA 10. FECHAS DE MEDICIÓN POR CAMPAÑA PARA AMBOS CASOS (A Y B).....	52
TABLA 11. ESTADÍSTICAS PARA LAS FRECUENCIAS L1 (1), L2C (20) Y RMS PARA CADA ESTACIÓN CON/SIN CORRECCIÓN A LA TASA DE ALTURA.....	56
TABLA 12. RMS POR ESTACIÓN; CORRECCIÓN RHDOT/IF.....	57
TABLA 13. ESTADÍSTICA DE LA COMPARATIVA DE ALTURAS GNSS Y MAREOGRÁFICAS POR CAMPAÑA.	59
TABLA 14. ESTADÍSTICAS GENERALES PARA LOS CONJUNTOS DE MEDICIONES POR CAMPAÑA.	67
TABLA 15. RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTADÍSTICA PARA LA CAMPAÑA UNO. ..	68
TABLA 16. RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTADÍSTICA PARA LA CAMPAÑA DOS....	69
TABLA 17. RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTADÍSTICA PARA LA CAMPAÑA TRES. .	70
TABLA 18. RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTADÍSTICA PARA LA CAMPAÑA CUATRO.	71
TABLA 19. RESULTADOS DE LA PRUEBA ESTADÍSTICA PARA LA CAMPAÑA CINCO.	72

A mis hijas...

CAPÍTULO I

Introducción

Actualmente, el cambio climático se ha convertido en uno de los objetos de estudio más relevantes, ya que ha sido un factor determinante en el aumento del nivel del mar (Fagundes et al., 2021), ya que, el incremento en las temperaturas repercute en las corrientes oceánicas, acidificación en las aguas oceánicas y derretimiento de los bloques polares, entre otros (Alonso-Arroyo et al., 2015; Cazenave & Nerem, 2004). La determinación de la variación del nivel del mar es una parte fundamental para el análisis de los modelos climáticos a fin de evidenciar las causas de dichos cambios (Cazenave & Nerem, 2004), ya que este afecta no solo las zonas costeras, sino a toda la sociedad en general. En este sentido, se han desarrollado diferentes técnicas para monitorear el nivel del mar (Martinez-Felix et al., 2022), siendo una de ellas las mediciones mareográficas, cuya técnica consiste en la medición de las mareas mediante un mareógrafo convencional, dicho instrumento registra de forma gráfica los niveles de las mareas en distintas horas del día, sin embargo, estas mediciones tienen ciertas deficiencias, ya que los instrumentos se encuentran sobre la placa terrestre la cual sufre deformación vertical, lo que puede causar ruido en las mediciones (Nerem et al., 2006).

Por otro lado, la altimetría satelital representa uno de los métodos más utilizados para las mediciones del mar costero, mediante diferentes misiones satelitales; Geosat Follow (EUA), TOPEX/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2 y Envisat perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA), representando la importancia de la altimetría en la determinación del nivel del mar de manera global (Vignudelli et al., 2011), sin embargo, de acuerdo con Hwang et al., (2006), uno de los principales problemas en la aplicación de altimetría viene de la falta de modelos de mareas precisos que permitan mejorar la calidad de las mediciones.

La década de los 90, se incursionó en el uso de las nuevas tecnologías para las mediciones del nivel del mar, en junio de 1990 la Agencia Espacial Europea (ESA) impulsó el uso de los satélites con altímetro de pulsos limitados, consolidando en 1993 el método de reflectometría GNSS (GNSS-R) como una de las técnicas más novedosas para llevar a cabo la altimetría oceánica (Martin-Neira et al., 2001), abriendo paso a nuevos estudios; Geremia-Nievinski et

al., (2020), realizó una validación cruzada de soluciones independientes entre un mareógrafo y las señales GNSS-R en igualdad de condiciones en la que se mostró una correspondencia entre soluciones; Alejandro Egido et al., (2009), presenta un análisis en el cual hace referencia a las ramas de investigación en las que es posible utilizar reflectometría GNSS, el cual enfatiza que el futuro de GNSS-R está en dependencia del desarrollo satelital y sus líneas de investigación, por su parte Strandberg et al., (2017), demostró que es posible obtener la cobertura de hielo en las superficie del mar mediante observaciones obtenidas a través de receptores GNSS, entre otros, si bien la precisión de los datos obtenidos no es la adecuada, esta se encuentra dentro del rango de 2 a 6 cm, de acuerdo a la metodología utilizada, ya que es necesario garantizar la calibración necesaria del instrumento (Cazenave & Nerem, 2004).

1.1 Planteamiento del problema

De acuerdo con Antonov et al., (2002), el derretimiento de los glaciares es una de las causas principales para el aumento del nivel del mar y su variabilidad influye tanto en el sistema climático como en los ciclos hidrológicos globales causados por la salinidad del agua, otra de las principales causas de dicho aumento se debe a la expansión térmica de los mares provocando zonas de inundación a lo largo de las costas (Vousdoukas et al., 2018). La tasa actual de variación del mar oscila en el rango de $+2.8 \pm 0.4$ mm/año de acuerdo con las mediciones realizadas con altímetro TOPEX/Poseidón y Jason (Cazenave & Nerem, 2004), mientras la tasa obtenida mediante los mareógrafos en los últimos 50 años va desde $+1.8 \pm 0.3$ mm/año (Nerem et al., 2006), sin embargo, de acuerdo con Hauer et al., (2016), un aumento del nivel del mar de 90 cm, tendría grandes consecuencias para las zonas costeras dejando inundaciones y problemas socioeconómicos, dado de que existe una gran actividad acuícola. En México, los estados de Sinaloa, Nayarit, Sonora, Tabasco, Quintana Roo, Veracruz y Campeche, son algunos de los principales afectados ya que se verían amenazados los sistemas lagunares más importantes (Martinez-Felix et al., 2022; Núñez Gómez et al., 2016).

Con base en lo anterior, el monitoreo del nivel del mar forma parte fundamental para detectar cambios en la tasa de variación, esto con la finalidad de prevención de riesgos. Por lo que, la Reflectometría GNSS (GNSS-R), representa hoy en día una de las técnicas de teledetección más importantes (Gleason et al., 2010), para la determinación del nivel del mar. Por otro lado, el avance tecnológico ha marcado una pauta, ya que, se cuenta con nuevas tecnologías GNSS, denominadas de Bajo-Costo, los cuales son módulos equipados capaces de obtener las señales satelitales, que en complemento con antenas geodésicas alcanzan una precisión milimétrica en cuanto a posicionamiento, lo cual hace factible su uso como alternativa de los receptores de orden geodésico (Cina & Piras, 2015; Romero-Andrade et al., 2020; Tsakiri et al., 2017).

Por lo que, se propone el uso de receptores de bajo costo para llevar a cabo mediciones del mar costero, comparando y evaluando los resultados obtenidos respecto a las soluciones obtenidas con un Mareógrafo convencional. Así mismo, se plantea la validación de resultados mediante pruebas estadísticas.

1.2 Justificación

De acuerdo con Rover & Vitti, (2019); Zimmermann et al., (2019), la reflectometría con GNSS (GNSS-R) tradicional utiliza generalmente receptores de orden geodésico, cuya estructura está diseñada para reducir o mitigar el efecto multirayectoria, mientras que, los componentes físicos y electrónicos de los receptores de bajo costo poseen menor efecto mitigador para los trayectos múltiples, sin embargo, el alto precio de los receptores geodésicos representa una problemática, tomando en cuenta que durante el desarrollo de la experimentación el riesgo de pérdida del equipo es elevado especialmente en las zonas costeras, presentando como solución alternativa el uso de receptores de bajo costo (Biagi et al., 2016).

La propagación retardada entre las señales reflejas y directas no presentan ruido significativo debido a que este, está en función de la ganancia de la antena lo cual permite el uso de antenas de bajo costo (Fagundes et al., 2021). Por otro lado, Rover & Vitti, (2019),

demonstraron la factibilidad de los receptores y antenas de bajo costo del fabricante U-Blox en reflectometría GNSS mediante observaciones de relación señal-ruido (SNR), obteniendo variaciones centimétricas respecto a un receptor de orden geodésico; por su parte Knight et al., (2020), utilizó un receptor de bajo costo (MT8-Ublox) de frecuencia única para medir los niveles del mar costero, evaluando los resultados obtenidos frente a un mareógrafo convencional proporcionando una precisión en el orden de centímetros.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se pretende probar la efectividad del receptor de bajo costo en complemento con diferentes antenas (de bajo costo y orden geodésico) validando los resultados obtenidos mediante pruebas de hipótesis.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar estadísticamente la efectividad del uso de receptores de bajo costo para la determinación del nivel del mar costero, contrastando las observaciones GNSS con las de un mareógrafo convencional.

1.3.2 Objetivos particulares

- Evaluar el rendimiento de los receptores de bajo costo mediante la técnica de reflectometría GNSS (GNSS-R).
- Comparar los resultados obtenidos por receptores GNSS de bajo costo respecto a un mareógrafo convencional, implementando el uso de diferentes tipos de antenas (de bajo costo y de orden geodésico).
- Evaluar los resultados obtenidos mediante pruebas de hipótesis.

1.4 Hipótesis

Es posible utilizar receptores GNSS de bajo costo para determinar y monitorear el nivel del mar costero bajo la técnica de reflectometría GNSS, así como la validación de los resultados mediante pruebas de hipótesis.

1.5 Antecedentes

Actualmente, el estudio del nivel del mar se ha convertido en uno de los objetivos científicos más relevantes, dada su importancia para dar a conocer diferentes fenómenos climáticos, sin embargo, la interrogante de dicho fenómeno data del siglo XVII con la formulación de nuevas teorías sobre las leyes que rigen el comportamiento de nuestro planeta. Con ello, se empezó a implementar instrumentación robusta para la interpretación de las mareas, a lo largo del día, esto como consecuencia de las necesidades socio-económicas (Stewart, 2009).

En este sentido, una de las primeras técnicas de medición del mar se dio, a través de los mareógrafos a finales del siglo XIX, sin embargo, las nuevas técnicas y metodologías se hicieron notar. En 1978, se puso en órbita el primer satélite capaz de medir la altura del nivel del mar mediante datos geospaciales de altimetría satelital (Martínez, 2020), dicho satélite constaba de una serie de sensores de radar, cuya función es captar las señales reflejadas en la superficie del mar. No obstante, otra de las alternativas se presenta en los Sistemas Globales de Navegación por satélite (GNSS), inicialmente diseñado para la obtención de posicionamiento preciso (Hofmann-Wellenhof et al., 2007), sin embargo, dada sus características han sido utilizados para diferentes trabajos de investigación como lo son; campo de deformación y determinación de las velocidades de deformación de la corteza terrestre (Grenerczy et al., 2000), impacto ionosférico y correcciones en observaciones GPS (Hernández-Pajares et al., 2007), monitoreos del nivel del mar (Cipollini et al., 2017), por mencionar algunos.

La reflectometría GNSS, se implementó como medio de medición para el nivel del mar, esta técnica se basa principalmente en la obtención de la relación señal-ruido (SNR) de las señales reflejadas en la superficie de los océanos (Lowe et al., 2002), siendo demostrada su factibilidad en el monitoreo del nivel del mar, ya que, con el SNR es posible detectar la interferencia entre frecuencias (directas e indirectas), lo que permite determinar la altura de la superficie reflectante (Fagundes et al., 2021). Usualmente, la técnica GNSS-R se lleva a cabo mediante sistemas geodésicos, estaciones de referencia y monitoreo continuo (Martinez-Felix et al., 2022). En este sentido, se han desarrollado nuevas metodologías para la explotación de dicha técnica en diferentes estudios; determinación de la profundidad de la

nieve (Larson et al., 2009); contenido de humedad en la vegetación (Small et al., 2010); determinación de la variación del nivel del mar local, dicho estudio se llevó a cabo en el observatorio de Ósala Suecia (mareógrafo GNSS), basándose en el principio del efecto multitrayectoria para reflexiones especulares, además, se implementa el uso de datos de la relación señal-ruido (SNR) comparando los resultados con los datos proporcionados por el mareógrafo convencional, obteniendo una correlación superior al 97% (Larson et al., 2013), así mismo, se ha evaluado un periodo de 10 años de mediciones del nivel del mar, basándose en los datos SNR obtenidos a través de mediciones con GPS (Larson et al., 2017).

Actualmente en el estado del arte se cuenta con trabajos de investigación de GNSS-R, en los cuales se implementa el uso de los denominados receptores GNSS de bajo costo, como por ejemplo; Ichikawa et al., (2019), utilizó un receptor de bajo costo colocado en un vehículo aéreo no tripulado (VANT) para determinar el nivel del mar en la costa del lago Biwa Japón, mediante la diferencia entre señales reflejadas y directas estimando la altura geométrica del VANT mediante el método de mínimos cuadrados ponderados, teniendo como resultado concordancia entre los datos del sensor y el receptor GNSS teniendo una precisión de 0.01 m. Por su parte Fagundes et al., (2021), evaluó aproximadamente un año de datos obtenidos en el lago Guaíba Brasil, comparando las mediciones del nivel del agua obtenidas mediante un mareógrafo de radar (ubicado en el mismo lugar) y las obtenidas con un sensor de código abierto de bajo costo, utilizando datos SNR, demostró la funcionalidad del dispositivo de bajo costo teniendo como resultado una coincidencia de 98% y errores medios cuadráticos (RMSE) de 2.9 cm.

Así mismo, se desarrolló un sistema de boya GNSS de bajo costo para el monitoreo del nivel del mar costero, implementada por Knight et al., (2020), utilizando un receptor de bajo costo de frecuencia única con una configuración de recepción de señal solo para GPS/GLONASS a un intervalo de muestreo de 5 Hz. El rendimiento de la boya fue comparada en función de los datos obtenidos frente a un mareógrafo de referencia mediante una prueba estadística Van de Castélee, dado como resultado un RMSE de 1.4 cm. En este sentido, Williams et al., (2020), utilizó un GNSS de bajo costo para medir el nivel del agua en una zona costera mesomareal, utilizando el principio de SNR para calcular la diferencia de altura entre el receptor y la superficie del agua, los resultados fueron comparados respecto

a un mareógrafo GNSS dando como resultado un RMSE promedio diario de 1.7 cm para un rango de marea superior a 3 m. Chen et al., (2023), utilizó un teléfono inteligente (Android Redmi Note 9 Pro) en complemento con una antena de bajo costo, conectado a un receptor GNSS de bajo costo, registrando ~ 80 horas de datos SNR, los cuales fueron comparados con un mareógrafo de presión (TG), y un dispositivo alternativo conformado por un receptor de bajo costo y una antena de orden geodésico, demostrando que dichos módulos pueden generar mediciones estables para el monitoreo del nivel del mar con un RMSE de aproximadamente 16 cm siendo equivalente al obtenido mediante el dispositivo de orden geodésico.

CAPÍTULO II

Marco teórico

2.1 Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

Los sistemas globales de navegación por satélites son un conjunto de satélites artificiales utilizados inicialmente para la obtención de posicionamiento, es decir, para conocer la ubicación de cualquier punto sobre el globo terrestre (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Actualmente existen diversas plataformas satelitales que conforman los GNSS como lo son; Sistema de Posicionamiento Global (GPS: por sus siglas en inglés), perteneciente a Estados Unidos en sus inicios fue de uso militar, en la actualidad es el más utilizado civilmente en diversas aplicaciones por su fácil manejo y amplia variedad de satélites (Eduardo Huerta, Mangiaterra Aldo, 2005), Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS: por sus siglas en inglés), es un sistema satelital implementado por Rusia, siendo la competencia más cercana a GPS, aunado a esto se han desarrollado nuevos sistemas de constelaciones como el Sistema de Navegación por Satélite Galileo (Galileo: por sus siglas en inglés) desarrollado en Europa, Sistema de Navegación por Satélite BeiDou (BDS: por sus siglas en inglés) de China (Gong et al., 2022), QZSS (Japón), NavIC (India), presentando un sistema de posicionamiento independientes entre sí (Isaí Robles Bravo, 2020).

Los GNSS están conformados por tres segmentos; *segmento espacial*, está comprendido por las constelaciones satelitales orbitando alrededor de la Tierra enviando señales electromagnéticas en por lo menos dos frecuencias; *segmento de control*, es el encargado de monitorear, actualizar y corregir las órbitas de los satélites de las diferentes constelaciones (GPS, GLONAS, Galileo, etc.) en función de la órbita y altitud, por último; *segmento de usuario*, consiste en el conjunto de estaciones/receptores capaces de captar las señales satelitales, ya sea para uso militar o civil (Hernández-Andrade et al., 2020; Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Por otro lado, las constelaciones GNSS presentan diferentes configuraciones de órbita; MEO-Órbita Terrestre de Altitud Media, distribuidas en órbitas casi circulares de manera uniforme, siendo estas de cobertura global, IGSO-Órbitas Geosincrónicas Inclinadas y GEO-

Órbitas Geoestacionarias, implementadas para complementar los sistemas regionales (Hegarty, 2012; Teunissen & Montenbruck, 2017). La Tabla 1, muestra las características principales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite.

Tabla 1. Características principales de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite.

Constelación	Orbita	Número nominal de satélites	Plano orbital	Inclinación orbital	Servicio	Inicio del servicio	Origen	Cobertura	Frecuencias (MHz)
GPS	MEO	24	6	56°	SPS,PPS	1993	USA	Global	L1-1575.42, L2-1227.60 L5-1176.45
GLONASS	MEO	24	3	54.8°	SPS,PPS	1993	Rusia	Global	L1-1602.00, L2-1246.00 L3-1202.025
BeiDou	MEO	27	3	55°	OS,AS,WADS,SM	2012	China	Global	B1-1561.098, B2-1207.14
	IGSO	3			S				B3-1268.52
	GEO	5							
Galileo	MEO	30	3	56°	OS,CS,PRS	216/2017	Europa	Global	E1-1575.42, E5a-1176.45 E5b-1207.14, E6-1278.75
QZSS	IGSO, GEO	3	IGSO	43°	GCS, GAS, PRS, EWS, MCS	2018	Japón	Regional este de Asia y Oceanía	L1-1575.42, L2-1227.60 L5-1176.45, E6-1278.75
NavIC	IGSO, GEO	4	IGSO	29°	SPS,RS	2016	India	$-30^{\circ} < \varphi < 50^{\circ}$ $30^{\circ} < \lambda < 130^{\circ}$	L5-1176.45 S-2492.028
		3							

SPS: Standard Positioning Service; PPS: Precise Positioning Service; OS: Open Service; AS: Authorized Service; WADS: Wide Area Differential Service; SMS: Short Message Service; CS: Commercial Service; PRS: Public Regulated Service; GCS: GPS Complementary Service; GAS: GPS Augmentation Service; EWS: Early Warning Service; MCS: Message Communications Service; PS: Precision Service; RS: Restricted Service .

2.1.1 Sistema Global de Posicionamiento (GPS)

De acuerdo con Hegarty, (2012); Hofmann-Wellenhof et al., (2008); Löfgren & Haas, (2014), el origen de los sistemas globales de navegación por satélite (GPS) data en la década de los 70's cuando fue lanzado el primer satélite por el departamento de Defensa de los Estados Unidos, teniendo por nombre inicial NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Timing and Ranking, Global Positioning System). El objetivo principal de GPS es proporcionar posicionamiento preciso (latitud, longitud) en cualquier punto sobre la superficie terrestre, ya sea para uso militar o civil (Pozo Ruz et al., 2000).

Esta constelación cuenta satélites separados en bloques de segmento; Bloque I, lanzado en 19785 con un total de 11 satélites con un ángulo de inclinación de 65° y con un tiempo de vida útil de 5 años, actualmente no cuenta con satélites en operación; Bloque II, conformado por 9 constelaciones y siendo lanzado en el año de 1989 ; Bloque IIA, cuenta con 19 satélites lanzados entre 1990 y 1997; Bloque IIR, en sus inicios poseía 11 satélites, puestos en órbita en el año 1997, con un tiempo de vida útil de 7.5 años; Bloque IIR-M, 7 satélites en órbita con fecha de lanzamiento en los años 2005 y 2009, posteriormente entre 2010 y 2016 se lanzaron 12 satélites pertenecientes al Bloque IIF, con un periodo de vida de 12 años y finalmente GPS III/IIIF teniendo lugar en los años 2018 al 2020. Al 3 de julio de 2023, se cuenta con un total de 31 satélites operativos en la constelación GPS, sin incluir los repuestos en órbita fuera de servicio, cada uno de estos bloques con características similares (GPS, 2023).

En este sentido, el segmento espacial GPS (Figura 1), se compone de 24 satélites operacionales en órbitas terrestres media (MEO), a una altura aproximada de 20,200 km, teniendo dos ciclos completos al día, es decir cada uno tiene periodos de 12 h, distribuidos en seis planos orbitales con una inclinación respecto al ecuador de 55° , es decir 4 satélites por plano orbital. De acuerdo con Hegarty, (2012), todos los satélites GPS modulan en las mismas frecuencias; L_1 -1575.42 MHz (código C/A y P), L_2 -1227.60 MHz (código P) y una señal tercera señal L_5 -1176.45 MHz. La señal de pseudocódigos de GPS incluye el código; C/A (Clear/Acquisition) abierto, presente en la portadora L_1 con una frecuencia de 1.03 MHz para uso civil; código P (Precision Code), esta señal es de uso militar está presente tanto en

la portadora L_1 como en L_2 , con frecuencia de 10.23 MHz, cuando el código P se encuentra encriptado da paso al Código P(Y), opera en modo anti-engaño, es decir, no permite que se replique la señal GPS (Sharma & Hablani, 2014).

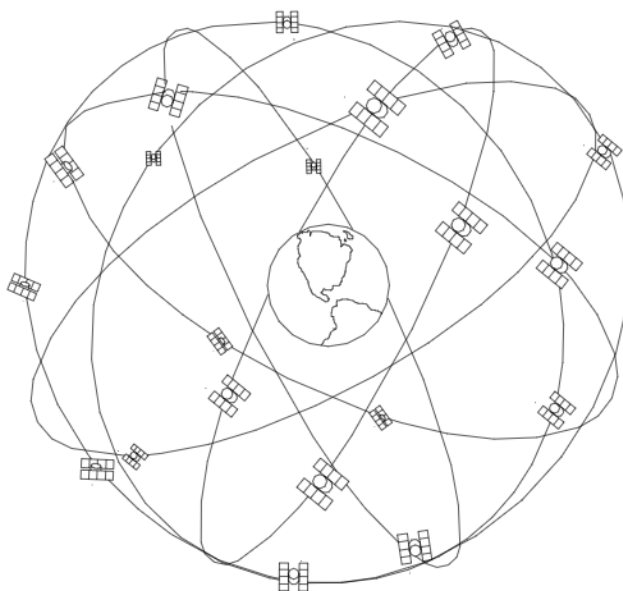


Figura 1. Representación del segmento espacial de la constelación GPS (Eduardo Huerta, Mangiaterra Aldo, 2005).

Por su parte el segmento de control - OCS (*Operational Control Segment*) por sus siglas en inglés, consta de las estaciones terrestres encargadas de monitorear, controlar y corregir las órbitas de los satélites, además de la captación de los datos obtenidos del segmento espacial. Está conformado por la estación principal (MCS) – *Master Control Station* por sus siglas en inglés, estaciones de monitoreo (MS) y antenas terrestres (GA) (Figura 2).

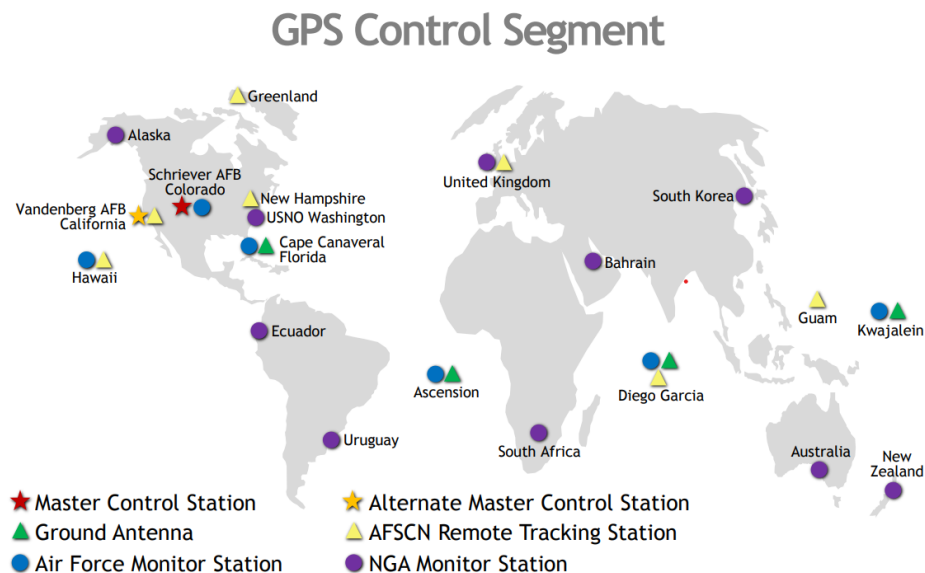


Figura 2. Segmento de control GPS, red global de instalaciones terrestres que rastrean los satélites GPS (GPS, 2020).

Mientras que el segmento de usuario está constituido por los receptores capaces de recibir la señal proporcionada por los satélites, su arquitectura principal consta de una antena y un receptor. GPS está diseñado para dos tipos de usuarios; Standard Positioning Service (SPS) por sus siglas en inglés, siendo este de uso militar y Precise Positioning Service (PPS) por sus siglas en inglés, diseñado para múltiples usuarios, la principal diferencia entre estos servicios es la precisión con la que se cuenta (Julio Capdevila, 2012).

2.2 Receptores GNSS de bajo costo

De acuerdo con Bellone et al., (2016), los receptores GNSS de bajo costo son módulos derivados de la evolución tecnológica, ya que con el mejoramiento de los sistemas de hardware y procesamiento es posible el desarrollo de nuevas tecnologías GNSS como lo son los receptores de bajo costo, estos módulos presentan características similares (hardware y software) a los receptores GNSS de orden geodésico aunque a un menor costo (~200€), satisfaciendo las necesidades de posicionamiento ya que modulan tanto en L_1 (frecuencia

única) como en L_2 (doble frecuencia) (Hamza et al., 2021). Debido a la arquitectura de estos receptores, hace más fácil su manejo y portación, presentando alta resolución a un menor consumo energético lo que representa una mejor practicidad en el área de la topografía y geodésia (Zhang et al., 2017).

En este sentido, los receptores de bajo costo se han utilizado en trabajos de posicionamiento (Romero-Andrade et al., 2019; Zamora Maciel et al., 2020) demostrando su factibilidad para líneas de base geodésicas, probando diferentes tipos de métodos como lo son; Posicionamiento en Tiempo Real (RTK) (Paziewski et al., 2021), Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) (Wen et al., 2020) y método relativo estático (Romero-Andrade et al., 2020). Con base en lo anterior, se ha incursionado en el uso de estos receptores para el monitoreo de profundidad de la nieve bajo la técnica de reflectometría GNSS (GNSS-R) (Rover & Vitti, 2019) y mediciones del nivel del mar costero (Fagundes et al., 2021; Ichikawa et al., 2019; Knight et al., 2020).

Por otro lado, este trabajo presenta el uso de receptores de bajo de costo del fabricante U-Blox, modelo Zed-F9P serie 02B-00 (Figura 3), en complemento con las antenas de bajo costo ANN-MB1 (L_1 – 1559-1606 MHz , L_5 – 1164-1188MHz) (Figura 4a) y Beitian (BT-170), es una antena multifrecuencia ya que recibe señales GPS L1/L2, GLONASS L1/L2, BDS B1/B2/B3 y GALILEO E1/E5b (Figura 4b).



Figura 3. Receptor GNSS de bajo costo, modelo ZED-F9P; fabricante U-Blox.

De acuerdo con Broekman & Gräbe, (2021) y los receptores de bajo costo captan señales GNSS crudas de fase portadora y pseudorango de las constelaciones; GPS en L_1 (1575.42 MHz) y L_2 (1227.6MHz), GLONASS en G_1 y G_2 (1602 MHz, 1248 MHz), Galileo con frecuencia E_1 (1575.42 MHz), BeiDou en B_1 (1575.42 MHz), cuyas características principales se muestran en la Tabla 2. Sin embargo, dichos receptores presentan una dificultad ya que, al no poseer un sistema de almacenamiento interno obliga el uso de memoria externa (móvil, equipo de cómputo, etc.) (Zamora-Maciel, 2018).

Tabla 2. Características principales del modelo U-Blox ZED-F9P; fuente (www.u-blox.com)

Modelo	Frecuencia	Salida de datos	Interfaz	Precisión	Constelaciones	GNSS observados simultáneamente	Portadoras	Sensibilidad
ZED-F9P	1575.42 - 1602 MHz	Pseudo rango sin procesar	UAR, USB, I2C y SPI	Centimétrica	BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS / QZSS	4	B1I, B2I/a, E1B/C, E5a/b, L1C/A, L1OF, L2C, L2OF, L5	Seguimiento y navegación -162 dBm Inicio frío - 148 dBm

El módulo multibanda cuenta con una precisión al centímetro, aunque está en función de las condiciones de medición, y el software utilizado para su manejo (Bellone et al., 2016), este se encuentra en el mercado con un valor aproximado de 258.70 USD (www.u-blox.com), es operado mediante el Software U-Center del mismo fabricante y son alimentados energéticamente con la fuente de almacenamiento externo (computadora o móvil), los datos obtenidos proporcionan información Doppler y calidad de la medición, además los datos crudos contienen el mensaje de pseudodistancia y fase portadora (UBX-RXM - RAWX) y son convertibles a los formato RINEX versión 2 y 3 (Ublox, 2023).

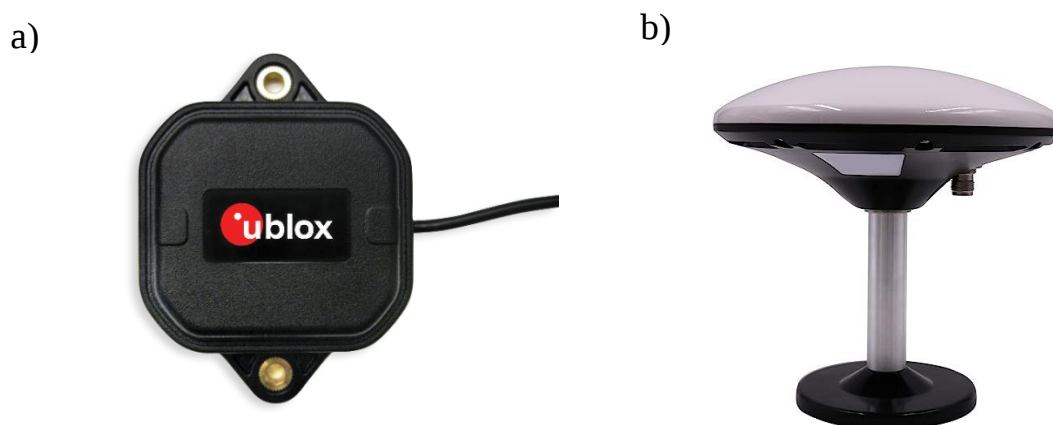


Figura 4. Antenas GNSS de bajo costo , a) ANN-MB00, b) BT-170.

2.3 Cuerpos de Agua (Mares y océanos del mundo)

De acuerdo con Michael, (2006), aproximadamente el 70.8% de nuestro planeta se encuentra cubierto por agua, equivalente a $361,254,000 \text{ Km}^2$, contra el 29.2% de superficie continental. Las masas o cuerpos de agua se encuentran conformados por los Océanos, Mares, Ríos, Embalses, Lagos etc. Algunos denominados salados (Océanos/Mares) y otros como aguas dulces (Ríos/Embalses), podemos encontrarlos en la superficie o bien subterráneos (Acuíferos). De acuerdo con Gío-Argáez, (1999), los primeros estudios sobre los mares datan a principios del siglo X, basada en la necesidad de pesca, navegación y exploración de nuevos lugares, acentuando a través de mapas las rutas trazadas dando forma a la figura de la tierra.

Con base en lo anterior, los océanos son grandes extensiones de agua que pueden dividir dos o más continentes, mientras que los mares son una proporción de agua más pequeña, siendo su extensión la principal diferencia entre ambos, además, de la temperatura y la intensidad de las mareas (Stewart, 2009).

De acuerdo con la Comisión Colombiana del Océano, (2016), los océanos se formaron hace aproximadamente 4000 mil millones de años a consecuencia de las lluvias desmedidas

provocadas por los gases condensados en la atmósfera y el enfriamiento del planeta. De esta acumulación de agua el 97% corresponde a agua salada, dividida en cinco océanos importantes;

El Océano Pacífico (Figura 5a) ocupa el 35% de la superficie terrestre, con una extensión de aproximadamente 165 millones de Km^2 . Este se localiza entre el Estrecho de Bering y el Norte de la Antártida con una longitud de 15, 500 km y una anchura de 17,700 km (desde Panamá hasta la Península Malaya), cuenta con una profundidad media de 4,282 m, mientras que la máxima profundidad (11,034 m) conocida se encuentra en la Fosa de las Marianas (Guam) (Comisión Colombiana del Océano, 2016), la temperatura de sus aguas está en función de la localización, es decir, $-1.4^{\circ}C$ (en los polos) a $30^{\circ}C$ (en el Ecuador). El Atlántico (Figura 5b), es considerado en segundo océano más grande se extiende 82 millones de Km^2 (17% de la superficie de la tierra), ubicado entre los países de Europa y América del Norte, por lo que, posee un gran importancia económica ya que es uno de los océanos con mayor tráfico marítimo. El Océano Índico (Figura 5c), se expande desde África, pasando por la península arábiga hasta Indonesia (Srimal et al., 2018), con una extensión de 74 millones de Km^2 , es decir, el 15% de superficie terrestre, su temperatura media es de $22^{\circ}C$ reduciendo considerablemente cerca de la Antártida ($0^{\circ}C$). Océano Antártico (Figura 5d), cubre una superficie de 20,327,000 de Km^2 , se diferencia de los demás océanos ya que es el único que rodea completamente un continente (Antártica), localizado en el hemisferio sur su temperatura varía desde los $10^{\circ}C$ a $-2^{\circ}C$.

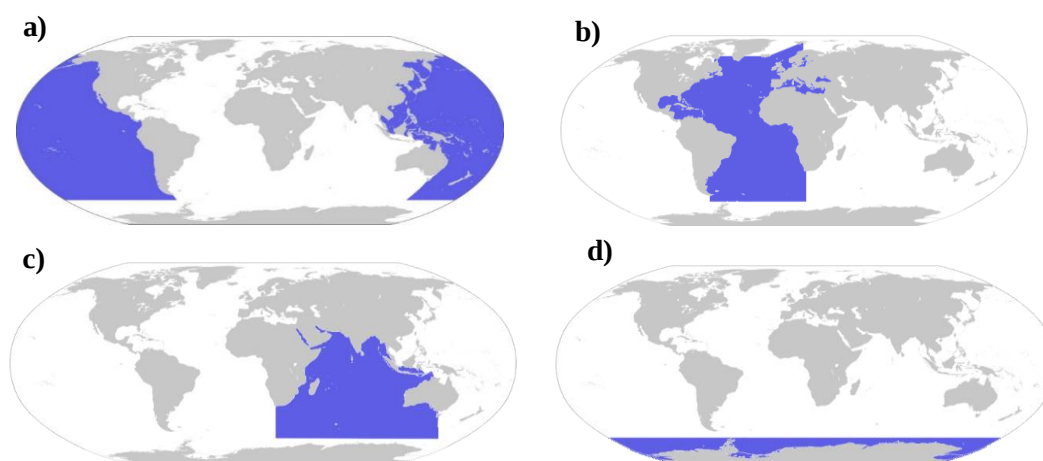


Figura 5. Distribución de los océanos, a) Océano Pacífico , b) Atlántico, c)Océano Indico y d)Océano Antártico.

Finalmente, el Océano Ártico es el más pequeño cubriendo una extensión de 14 millones de Km^2 , ubicado en el polo Norte es el más frío de todos con una temperatura mínima de $-50^{\circ}C$ en invierno y una máxima de $0^{\circ}C$.

Por otro lado, los mares son extensiones de agua salada en menor tamaño que los océanos, estos se denominan según su ubicación, su principal característica es la profundidad, es decir, son pocos profundos por lo que sus temperaturas son cambiantes ya que el sol puede penetrar la capa de agua elevando su temperatura notablemente, presentan movimientos tanto superficiales (oleaje) como bajo el agua (corriente marina).

Con base a Stewart, (2009), se definen dos tipos; Mares mediterráneos, son en su mayoría mares cerrados y delimitan con el océano exterior, entre los cuales se encuentran los mares del Océano Atlántico (Mar Negro), mar Mediterráneo Ártico, mar Mediterráneo Americano (Golfo de México y mar del Caribe) entre otros. Mientras que los Mares Marginales, están definidos por los márgenes continentales o Zona de Costa, como lo son, el Mar de China Meridional y Mar Árabe.

2.3.1 Movimientos Superficiales (Mareas)

De acuerdo con Pugh & Woodworth, (2014), las mareas son ondulaciones periódicas sobre la superficie del mar como consecuencia de atracción gravitatoria del sol y la luna hacia la tierra, es considerado como desplazamiento vertical cíclico, es decir, con periodos de 12h 24 min y 24 h 50 min aproximadamente. Estas se extiende a lo largo de la zona costera de manera local, en cada ciclo de marea se presenta la “bajamar” (cuando la marea alcanza el punto mínimo de profundidad) y la “pleamar” (cuando alcanza su punto máximo de altura), esto se puede observar en las zonas de playa o costa, cuando hay bajamar la playa se extiende y el agua retrocede hacia el mar mientras que, la pleamar la playa se ve inundada por el oleaje y sedimento provenientes del mar. La diferencia vertical entre la pleamar y la bajamar se denomina amplitud, y puede variar de 1 a 15 m dependiendo de la localidad costera (SMN, 2022).

Los ciclo de marea pueden dividirse en tres tipos; diurno (un pleamar y un bajamar por día), semidiurno (dos pleamares y bajamares al día) o bien, mixto (unos días diurno y otros semi diurno a lo largo del mes) (Brown et al., 2022), así mismo, se consideran Mareas Vivas a aquellas que se producen durante las fases de la Luna, es decir, en la Luna llena y la Luna nueva (Marea Viva de Conjunción), y en la alineación del Sol, la Luna y la tierra (Marea Viva de Oposición), por su parte, la Marea Muerta se produce durante las fases creciente y cuarto menguante, cuando las posiciones de la Tierra, el Sol y la Luna forman un ángulo aparente de 90° . Por otro lado, el primero en explicar el fenómeno de las mareas, incluyendo las oscilaciones de periodo semidiurno, fue Newton. Según su teoría, las mareas se originan por la diferencia existente en cada punto de la tierra entre dos fuerzas, la atracción de la Luna (o el Sol) sobre dicho punto (que depende de la distancia al satélite y por lo tanto es mayor en los puntos más cercanos a la Luna) y la fuerza centrífuga que sufre al girar en torno al centro de gravedad del sistema Tierra Luna (constante en todos los puntos de la Tierra, pues todos ellos trazan un giro de idéntico radio en torno al centro de gravedad).

Con base en lo anterior, Newton demostró que existe una fuerza de atracción entre dos cuerpos, y debido a que los mares son fluidos pueden moverse o deformarse por estas fuerzas (Figura 6). De acuerdo con Stewart, (2009), las mareas pueden calcularse mediante ecuaciones hidrodinámicas para fluidos como el agua, en la teoría del equilibrio de las mareas supone que, la superficie libre está bajo la acción combinada de la gravedad terrestre y la fuerza perturbadora de las mareas. Estrictamente, debemos ajustar la gravedad de la tierra por los efectos centrífugos de su rotación, y considerar la gravedad aparente (Pugh, 1987). El efecto dinámico gravitacional e inercial de la Luna sobre el océano se descompone en dos direcciones; radial (parte del centro de la Tierra), y tangencial (paralela a la superficie de la Tierra).



Figura 6. Representación esquemática de los desplazamientos de las aguas de los océanos debido a la fuerza gravitacional (Fuerzas de marea - Física universitaria volumen 1 | OpenStax)

Para estudios de las mareas y otros movimientos de largo período, es habitual despreciar la vertical los movimientos y las aceleraciones verticales, suponiendo que el agua tiene una densidad uniforme. Por otro lado, para calcular el potencial de generación de mareas (Figura 7) se ignora la rotación de la tierra, considerando que las mareas se generan debido a que la Tierra y la Luna comparten el mismo centro de masas, por lo que, la rotación de la Luna sobre la Tierra produce un potencial V_M en cualquier punto de la superficie terrestre (Stewart, 2009).

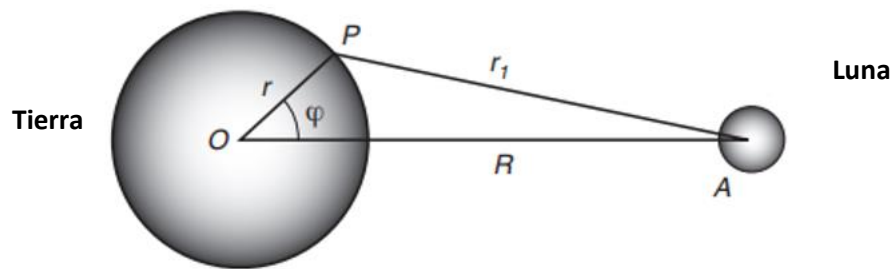


Figura 7. Representación esquemática para la determinación del potencial generador de mareas (Stewart, 2009).

$$V_M = -\frac{\gamma^M}{r_1} \quad (1)$$

Donde; γ es la constante gravitacional (9.8 m/s^2), M es la masa de la luna y r_1 es la distancia tangencial.

Del triángulo OPA, se tiene que;

$$r_1^2 = r^2 + R^2 - 2rR \cos \varphi \quad (2)$$

Donde: r ; es la distancia radial, R ; es la distancia de la tierra a la luna.

Sustituyendo la Ecuación (2) en la Ecuación (1) tenemos que;

$$V_M = -\frac{\gamma M}{R} \left\{ 1 - 2 \left(\frac{r}{R} \right) \cos \varphi + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (3)$$

Utilizando los polinomios de Legendre se tiene:

$r/R \approx 1/60$, por lo que la Ecuación (3) se expresa en términos de r/R :

$$V_M = -\frac{\gamma M}{R} \left\{ 1 + \left(\frac{r}{R} \right) \cos \varphi + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \right) (3 \cos^2 \varphi - 1) + \dots \right\} \quad (4)$$

Con base en la Ecuación anterior (4), la fuerza de marea se calcula a partir de la gradiente espacial del potencial, por lo que, el primer término de dicha ecuación no representa fuerza alguna, mientras que el segundo término representa una fuerza constante paralela al centro de masas de la tierra-luna, el tercer término hace referencia a las mareas, es decir, produce las mareas, dando como resultado el Potencial de generación de Mareas;

$$V = -\frac{\gamma M r^2}{2R^3} (3 \cos^2 \varphi - 1) \quad (5)$$

De acuerdo con Stewart, (2009), dicho potencial generador puede dividirse en componentes perpendiculares (P) y paralelos (H) a la superficie del mar, mientras que las mareas son producidas por la componente horizontal (G) (Figura 8) (Cartwright, 2000), por lo que;

$$H = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} = \frac{2G}{r} \sin 2\varphi \quad (6)$$

Donde:

$$G = \frac{3}{4} \gamma M \left(\frac{r^2}{R^3} \right) \quad (7)$$

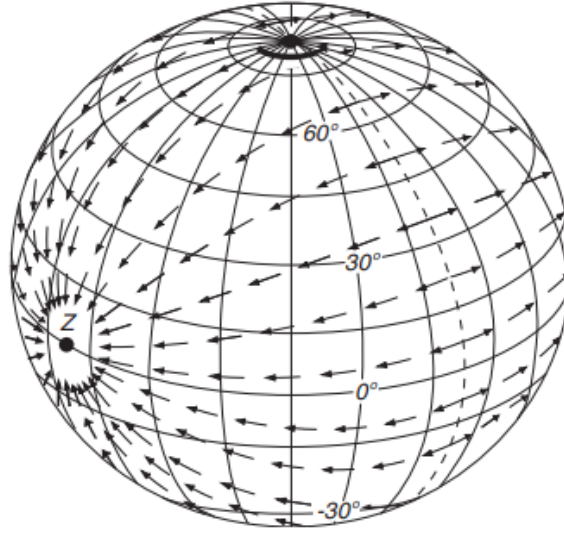


Figura 8. Representación esquemática de la componente horizontal del potencial de marea cuando el generador está por encima del ecuador Z.

En este sentido, se hace notar las protuberancias producidas por la Luna, estas son simétricas con respecto al sistema Tierra-Luna, lo cual rectifica los periodos de mareas antes mencionados. Dado que, la órbita elíptica de la Luna no es fija la distancia de la Tierra a la Luna (R) es variable, es decir, cambia una vez al mes, además, una vez cada 8.85 años y una cada 17.61 años.

2.3.2 Análisis armónico de las mareas

La predicción de las mareas en zonas costeras presenta una problemática, dado que, en aguas de poca profundidad las olas no pueden moverse a la velocidad necesaria, es decir, no sigue la pauta del Sol y la Luna, de igual manera, las aguas en el ecuador se tendrían que

expandir alrededor de la Tierra en un periodo de 24 h, lo cual no es posible, ya que esto solo ocurriría a una velocidad de 460 Km/s en una profundidad de 22 km (Stewart, 2009).

De acuerdo con Martínez Félix, (2020), la predicción de mareas se presenta de dos maneras; predicción de mareas en aguas de poca profundidad (zonas costeras) y predicción de mareas en aguas profundas (océanos). Actualmente son utilizados dos métodos o técnicas de predicción de mareas para aguas superficiales o de poca profundidad; Método Armónico, es el más tradicional y utilizado, en este se tratan las mareas como ondas, utilizando las frecuencias fundamentales de las mareas (Tabla 3) para el análisis (Stewart, 2009).

Tabla 3. Frecuencias fundamentales de la Marea (Stewart, 2009).

	Frecuencia/Hora	Periodo	Fuente
f_1	14.49205211	1 Día Luna	Hora Lunar Media Local
f_2	0.54901653	1 Mes	Longitud Media Lunar
f_3	0.04106864	1 Año	Longitud Media Solar
f_4	0.00464184	8.847 Años	Longitud del Perigeo Lunar
f_5	-0.00220641	18.613 Años	Longitud del nodo ascendente Lunar
f_6	0.00000196	20,940 Años	Longitud del Perigeo Solar

El análisis armónico de las mareas consiste en la medición del nivel del mar en un periodo de tiempo, extrayendo las amplitudes y fases de las ondas sinusoidales. De acuerdo con Wolanski & Elliott, (2016), las mareas se comportan de manera sinusoidal, es decir, son una serie de componentes armónicos que en combinación producen diferentes variables infinitas para cualquier punto sobre la superficie.

Los componentes armónicos pueden ser; semidiurnos (N_2 , M_2 , K_2 y S_2), diurnos (K_1 , O_1 , P_1 y Q_1) y periodo largo (M_f , M_m , S_{sa}), cada uno de ellos con periodos y amplitudes diferentes representados en Tabla 4; donde n son los números de Doodson (-5 y 5) para el cálculo de la frecuencia fundamental. La suma de los componentes da como resultado un ciclo de marea en la estación Primavera-Verano, teniendo un ciclo de 28 días con dos rangos; Mareas vivas (máxima altura) y Marea Muerta (mínima altura) (Martínez Félix, 2020).

Tabla 4. Componentes principales de las Mareas (Stewart, 2009).

Tipo de Marea	Componente armónico	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	Amplitud (m)	Periodo (h)
Semidiurno	$n_1 = 2$							
	M_2	2	0	0	0	0	0.242334	12.4206
	S_2	2	2	-2	0	0	0.112841	12.0000
	N_2	2	-1	0	1	0	0.046398	12.6584
	K_2	2	2	0	0	0	0.030704	11.9673
Diurno	$n_1 = 1$							
	K_1	1	1	0	0	0	0.141565	23.9344
	O_1	1	-1	0	0	0	0.100514	25.8194
	P_1	1	1	-2	0	0	0.046843	24.0659
	Q_1	1	-2	0	1	0	0.019256	26.8684
Periodo largo	$n_1 = 0$							
	M_f	0	2	0	0	0	0.041742	327.85
	M_m	0	1	0	-1	0	0.022026	661.31
	S_{sa}	0	0	2	0	0	0.019446	4383.05

Con base en Stewart, (2009), este método presenta algunas desventajas, puesto que, es necesario contar con 18.6 años de datos para resolver la modulación de la marea lunar, la variabilidad no contemplada en las mareas puede producir errores en las aptitudes calculadas, así mismo, en algunas zonas costeras el comportamiento de las mareas no es lineal, ya que se propagan por aguas poco profundas.

2.4 Técnicas clásicas de medición del nivel del mar

Se define el Nivel medio del Mar (MSL), como el nivel de las aguas del mar en reposo, determinado mediante el promedio en un periodo de tiempo (meses, años), compensando los efectos de marea, olas, etc. El monitoreo del nivel medio del mar es muy importante ya que, es uno de los principales indicadores del cambio climático y calentamiento global (Lofgren et al., 2010). Así mismo, estas mediciones son de suma importancia para la determinación del origen cero altimétrico para las redes de nivelación nacionales, y otras aplicaciones como; gestión de zona costera y playas, sistemas de navegación marina, etc. Las primeras mediciones del nivel del mar observadas se dieron en Mallorca en 1287 por Ramon Llull, el cual buscaba una explicación sobre los movimientos del mar.

2.4.1 Mediciones Mareográficas

Las estaciones mareográficas se han utilizado desde muchos años atrás para medir las variaciones y el comportamiento del nivel del mar costero respecto a un punto de referencia fijo (nivel medio del mar), uno de los instrumentos más antiguo es la regla graduada, esta se colocaba en la playa o pilotes de los muelles para registrar de forma visual las alturas por periodos de tiempo establecidos. De acuerdo con Nerem et al., (2006), los mareógrafos han sido parte fundamental de las mediciones del mar desde los años 90's, ya que nos han proporcionado información sobre el cambio del nivel de este, aunque los registros de mediciones con mareógrafos tienen menos de 50 años, existen algunos otros que se remontan desde hace 100 años o más.

Con base en Cipollini et al., (2017), los datos proporcionados por los mareógrafos son utilizados para la predicción de las mareas y sirven como referencia para los trabajos de ingeniería en las zonas costeras, así mismo, son requeridos para diferentes disciplinas como; la geodesia, geología, oceanografía, climatología, entre otras. Actualmente existen redes mareográficas (locales y regionales) estratégicamente distribuidas, que se encargan de la recopilación de información sobre los cambios del nivel del mar, sin embargo, los datos obtenidos por estos presentan algunas limitaciones; no existe un nivel de referencia común para todos los mareógrafos, dado que estos se encuentran adheridos a la tierra presentan los movimientos la misma, por lo que, el movimiento vertical de la corteza terrestre es uno de los principales factores de error en las mediciones (Wöppelmann & Marcos, 2016), además, la distribución de los mareógrafos es deficiente ya que se encuentra limitado por los márgenes continentales. Dado lo anterior, existen dos tipos de mareógrafos; mareógrafo GNSS y mareógrafo Convencional.

2.4.2 Mareógrafo GNSS

Los mareógrafos compuestos bajo la técnica GNSS, fueron probados por primera vez por Martin-Neira et al., (2001), desde entonces se han realizado estudios que conllevan el uso de sistemas terrestres y espaciales, entre otros. Las señales GNSS reflejadas en la superficie del

mar presenta una ventaja ante los mareógrafos convencionales, debido a que, las mediciones realizadas son absolutas, es decir, se mide el nivel del mar respecto a un Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) (Löfgren & Haas, 2014).

En este sentido, existen dos tipos de configuración para los mareógrafos GNSS; uno basado en dos antenas y dos receptores, las antenas están configuradas de tal manera que, una de ellas recibe las señales directas emitidas por el satélite debido a su colocación (hacia el cenit), polarizada circularmente de forma derecha (RHCP, por sus siglas en ingles), mientras que la segunda antena se encuentra colada hacia abajo (nadir), esta es polarizada circularmente a la izquierda (LHCP) para recibir las señales satelitales reflejadas en la superficie del mar (Figura 9a). La cantidad de señales directas (RHCP) e indirectas (LHCP) recibidas está en función de la conductividad de la superficie reflejante y el ángulo de elevación del satélite (Larson, Löfgren, et al., 2013a). Los datos obtenidos son analizados mediante postproceso con el método de retardo de fase, dicho análisis da como resultado la altura del nivel del mar de manera local (Lofgren et al., 2010). El segundo tipo de configuración se basa en una antena y un receptor (Figura 9b), por lo que es necesario separar las señales directas e indirectas mediante análisis espectral (mediante SNR).

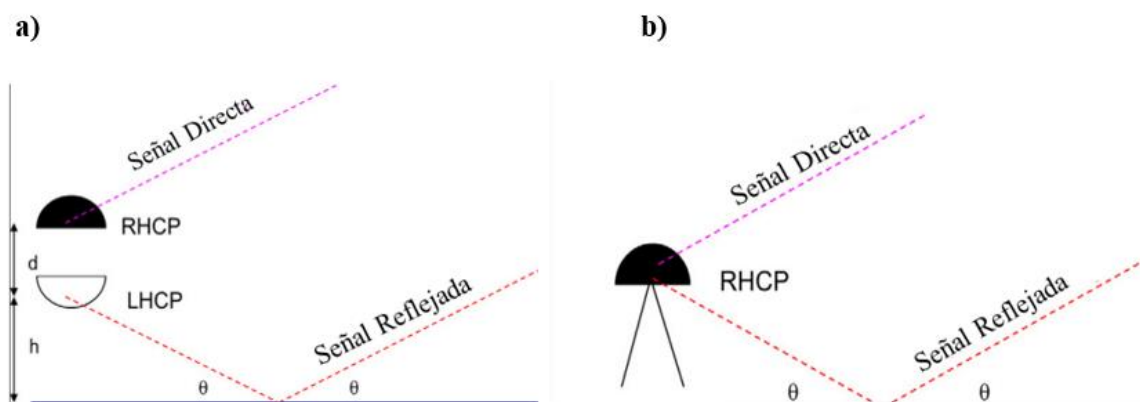


Figura 9. Representación esquemática de configuración de un mareógrafo GNSS.

a) mareógrafo GPS tradicional con dos antenas GNSS y dos receptores, Las antenas de calidad geodésica están montadas sobre la superficie del mar. Una antena polarizada circularmente de forma derecha (RHCP) apunta al cenit y recibe las señales directas. Una antena polarizada circularmente de forma izquierda (LHCP) apunta al nadir y recibe las señales que se reflejan en la superficie del mar. b) el sistema de mareógrafo GNSS de una antena RHCP y un receptor. La antena es de calidad geodésica y apunta en dirección cenital. Las señales directas se reciben desde arriba y las señales reflejadas (multitrayecto) desde la parte trasera de la antena (Larson, Löfgren, et al., 2013a).

De acuerdo con Martínez, (2020), las estaciones mareográficas GNSS reciben señales provenientes de diferentes satélites en distintas direcciones, con parámetros de elevación y azimut por época. En este sentido, las antenas RHCP son colocadas hacia el cenit con el objetivo de maximizar la obtención de señales directas y reducir las captación de señales reflejadas, sin embargo, estas no mitigan en su totalidad las señales reflejadas, por lo que, es utilizado el método de trayectos múltiples para corregir dichos reflejos (Larson et al., 2013), este método se basa en la suposición de que los trayectos múltiples son repetibles y pueden ser tratados como reflexión especular, para la determinación del nivel del mar, los patrones de interferencia entre las señales directas e indirectas son utilizados para determinar la distancia entre la superficie reflectante al centro de fase de la antena RHCP, dichos patrones son obtenidos de los datos de pseudodistancia, fase portadora y relación señal-ruido SNR.

2.4.3 Mareógrafo convencional

Por su parte el mareógrafo convencional o tradicional, se presenta como un instrumento capacitado para medir la variaciones verticales del mar, cuyo principio se basa en el registro mecánico y electrónico (sin señales GPS) de dichas variaciones. Los mareógrafos pueden variar, según su arquitectura, desde una regla graduada hasta estaciones mareográficas modernas con sensores de radar (UNAM, 2022). Dichos instrumentos se han utilizado a lo largo de los años para la recopilación de datos y series temporales esenciales para la comprensión e investigación del comportamiento del nivel del mar.

El principal objetivo de un mareógrafo, es medir las variaciones del nivel del mar con base a una referencia terrestre fija, esto mediante la colocación de los instrumentos en ambientes no perturbados por las olas, los datos pueden ser registrados de manera analógica mediante la utilización de pluma, lápiz u otro dispositivo capaz de marcar sobre una hoja de papel colocada sobre un cilindro giratorio, dicho cilindro presenta movimiento lento, por lo que se genera un registro continuo de las variaciones del nivel de mar a lo largo del tiempo, dicho cilindro se encuentra colocado en el interior de un tubo vertical fijo, lo suficientemente largo

y sumergido en el agua de tal manera que no sufra perturbaciones por el vacío y rebase de las olas (Figura 10).

Para ello se tapa el extremo sumergido del tubo para impedir que el agua fluya libremente sobre este, sin embargo, se generan orificios laterales con el diámetro necesario para que entre y salga agua de manera lenta y así filtre el oleaje del agua en el interior del tubo, para finalmente representar en nivel promedio del agua en el exterior, para posteriormente medir la distancia vertical recorrida por el agua dentro del tubo.

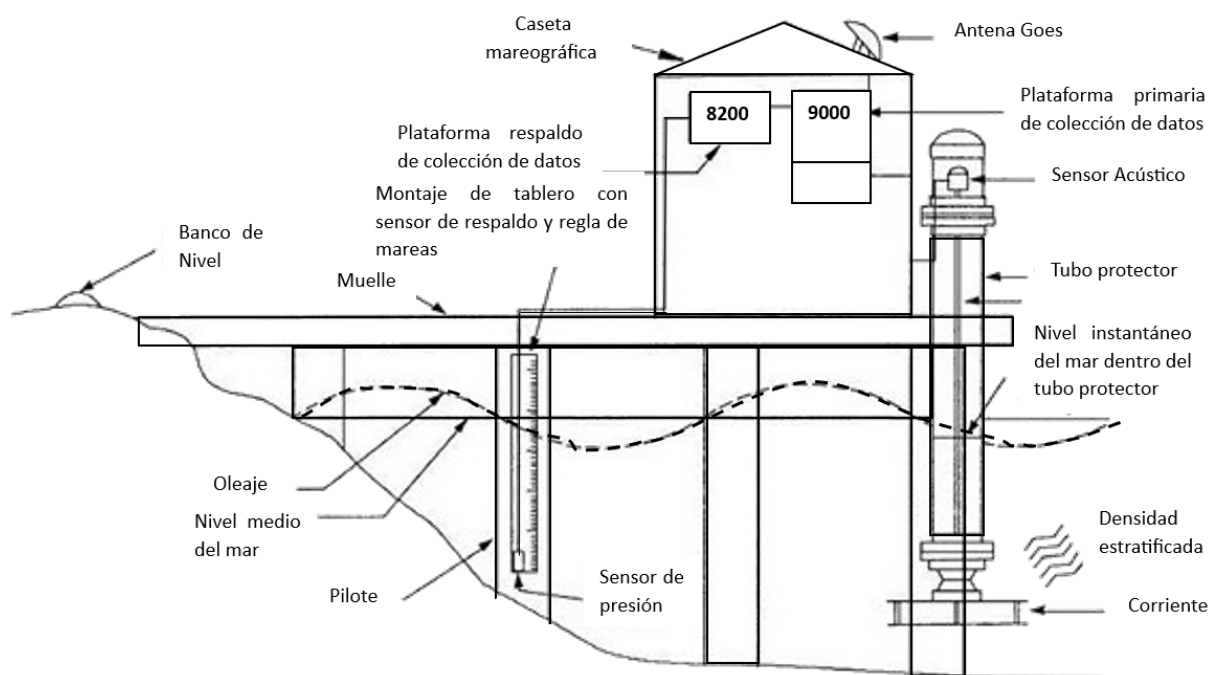


Figura 10. Representación esquemática de los componentes electro-mecánicos que integran una estación mareográfica (UNAM, 2022).

2.5 Reflectometría GNSS

Inicialmente el sistema GPS fue diseñado para obtener posicionamiento sobre la superficie terrestre, sin embargo, este se ha utilizado ampliamente en la navegación y determinación precisa de la medida del tiempo, sin embargo, en la década de los 90's Martin-Neira, (1993) presenta la técnica de reflectometría GNSS como medida complementaria para el estudio de cambio climático y monitoreo del medio ambiente (profundidad de la nieve, humedad del suelo y mediciones del nivel del mar) utilizando el retraso entre la señal directa y la señal reflejada, bajo el nombre de Sistema de Interferometría y Reflectometría Pasiva (PARIS).

En este sentido, se han derivado diversos estudios relacionados con el monitoreo del nivel del mar bajo la técnica GNSS-R (Awange & Kiema, 2019; Löfgren et al., 2010; Martínez, 2020), analizando las características de las señales multitrayectoria reflejadas sobre cualquier tipo de superficie como el suelo, agua, vegetación, entre otros. Sin embargo, para el análisis de dichas señales es necesario conocer las diferencias entre las señales reflejadas sobre las señales directas, por lo que, es importante el papel que desempeña la polarización de la señal al entrar en contacto con la superficie reflejante, esto mediante el uso de los coeficientes de reflexión especular (Martínez, 2020). De acuerdo con Chuvieco & Salinero, (1990), la polarización de las señales GNSS, hace referencia a la capacidad de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio, es decir, la orientación del campo eléctrico de la onda transmitida por el satélite. Por lo general, en GNSS se utiliza el termino polarización lineal, esta puede ser horizontal o vertical dado que el campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación.

Con base en lo anterior, las señales GNSS suelen tener polarización circular o elíptica lo que significa que la dirección del campo eléctrico puede ser en sentido derecho o RHCP por sus siglas en inglés (Right-Hand Circular Polarization) o izquierdo (LHCP - Left-Hand Circular Polarization) conforme la propagación de la onda (Löfgren & Haas, 2014). Sin embargo, la señal RHCP puede verse afectada por las propiedades eléctricas del medio de reflexión, por lo que, es posible utilizar los coeficientes de reflexión especular de la zona de reflectancia (zona Fresnel), dichos coeficientes son expresados a continuación, tanto para la polarización horizontal (Γ_H) como para la vertical (Γ_V):

$$\Gamma_H = \frac{\text{sen}\phi - \sqrt{\eta - \cos^2\phi}}{\text{sen}\phi + \sqrt{\eta - \cos^2\phi}} \quad \Gamma_V = \frac{\eta \cdot \text{sen}\phi - \sqrt{\eta - \cos^2\phi}}{\eta \cdot \text{sen}\phi + \sqrt{\eta - \cos^2\phi}} \quad (8)$$

Donde ϕ , es el ángulo de elevación de la onda de llegada, η - constante dieléctrica compleja, dicha constante es dependiente de la constante dieléctrica relativa (permitividad relativa), la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\eta = \eta_r - j60\lambda\sigma \quad (9)$$

Donde, η_r es la constante dieléctrica relativa, λ es la longitud de onda, σ es la conductividad del medio reflejante en función de señal de frecuencia y j es una unidad imaginaria igual a -1 .

Así mismo, los coeficientes son referidos en términos de reflexión lineal (Ecuación 10), es decir, como coeficientes co-polarizados (Γ_O), cruzados u opuestos (Γ_X).

$$\Gamma_O = \frac{\Gamma_H + \Gamma_V}{2} \quad \Gamma_X = \frac{\Gamma_H - \Gamma_V}{2} \quad (10)$$

2.5.1 Superficie reflectiva y zona de reflectancia

De acuerdo con Löfgren et al., (2011), las señales incidentes sobre la superficie reflejante no se generan desde un único punto geométrico o especular, es decir, puede abarcar una extensión considerable de superficie en todas direcciones, por lo que, reflejo en la superficie del mar no puede considerarse desde un punto especular. Sin embargo, esto contribuye a la señal total reflejada, debido a la gran cobertura de las señales GNSS circundante al punto especular. Por lo tanto, se puede utilizar la reflexión especular para aproximar la superficie reflejante, es decir, el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales (Martinez-Felix et al., 2022), asumiendo que la potencia de la señal es coherente, entonces, la superficie reflectiva puede ser representada por la primera zona Fresnel con el punto especular en el

centro, de modo que está definida por un cambio de fase en la señal, a través de la superficie reflectiva, de menos de la mitad de la longitud de onda de la señal. Para la primera zona Fresnel es posible calcular el semieje mayor (a) y el semieje menor (b), a partir de la siguiente Ecuación (11) (Löfgren et al., 2011).

$$a = \frac{\sqrt{\lambda \text{sen} \theta}}{\text{sen}^2 \theta} \quad b = \frac{\sqrt{\lambda h \text{sen} \theta}}{\text{sen} \theta} \quad (11)$$

Donde, λ es la longitud de onda, h es la altura de la antenna sobre la superficie reflejante y θ es el ángulo de elevación. En este sentido, la Figura 11 muestra la representación gráfica de la primera zona Fresnel para una altura de 4.3 m sobre la superficie reflectante, aquí se puede apreciar la relación que existe entre el ángulo de elevación del satélite y la altura de la antenna, es decir, a medida que incrementa el ángulo de elevación el área de la superficie reflectante disminuye (Löfgren et al., 2011).

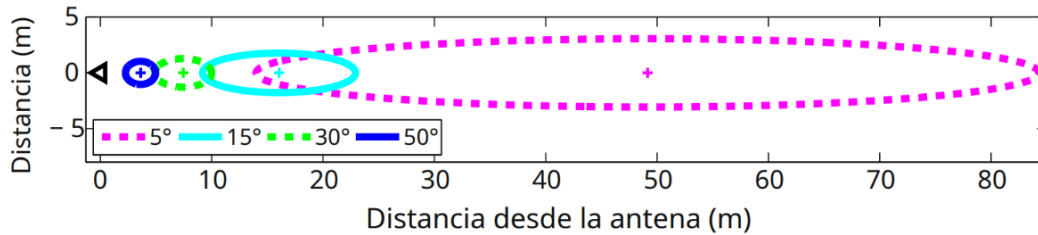


Figura 11. Representación gráfica de la primera zona Fresnel.

Extensión de la zona reflectante respecto al ángulo de elevación del satélite (la línea discontinua magenta presenta un ángulo de elevación de 5° siendo la de mayor cobertura, líneas turquesa, verde y azul, presentan ángulos de 15°, 30° y 50° respectivamente) (Löfgren & Haas, 2014).

De acuerdo con Löfgren et al., (2011), la rigurosidad de la superficie reflectante juega un papel importante, ya que a medida que aumenta la robustez de la superficie, la señal reflejada es dispersada en el espacio. Para la zona Fresnel, no solo la longitud o extensión de la superficie reflectante es importante, sino también su orientación y su forma (elíptica). La elipticidad depende del ángulo de elevación del satélite y va desde 0 (circular) hasta 1

(extendido hasta el infinito), es decir, a mayor elevación angular el área reflectante es casi circular, mientras que a menor elevación angular la superficie es elíptica, de modo que, el semieje mayor de la elipse se extiende en la misma dirección del vector de la antena, lo que significa que la superficie reflectante se mueve continuamente con el satélite (Löfgren et al., 2011; Martinez-Felix et al., 2022).

Por otro lado, de acuerdo con Martínez, (2020), uno de los principios para la colocación de un mareógrafo GNSS se basa en la zona de reflectancia, es decir, se debe establecer de tal manera que una sección de la dicha zona se encuentre directamente sobre el agua, esto con el objetivo de recibir e identificar el mayor número de señales reflejadas sobre la superficie del mar. La zona de reflectancia se encuentra conformada por las elipses formadas a partir de la trayectoria observada de cada satélite, teniendo como resultado una circunferencia alrededor de la antena, cada uno de estos elipses reciben el nombre de Zona Fresnel (Fresnel Zone - por sus siglas en inglés) y representan el área ocupada por la señal entre el satélite y el receptor (Larson et al., 2017), cuyo diámetro está en función de la altura del receptor (H_R), el ángulo de elevación (e) y la frecuencia de la señal (L_1, L_2 o L_5).

En este sentido, para calcular las elipses de la zona de reflectancia es necesario conocer algunos parámetros, para lo cual se utiliza un sistema de coordenadas local (ENU- por sus siglas en inglés) cuyo origen se encuentra en el centro de fase de la antena receptora, es decir, es necesario que el satélite se encuentre en el sistema de referencia local (X_S, Y_S, Z_S) para obtener el azimut (A_z) (Ecuación 12) y el ángulo de elevación (e) (Ecuación 13)(J. Sanz Subirana et al., 2011).

$$A_z = \tan(A_z) = \frac{X_E}{X_N} \quad (12)$$

$$e = \tan(e) = \frac{X_U}{\sqrt{X_E^2 + X_N^2 + X_U^2}} \quad (13)$$

Con los parámetros anteriores se puede calcular el área que abarca la primera zona Fresnel así como sus elementos (diámetro- d , radio- R , semieje menor- b y semi eje mayor- a) (Ecuaciones 14-17, respectivamente), sin embargo, se debe conocer la longitud de onda de la señal (λ) y la altura de la antena respecto a la superficie reflectante (H) (Larson & Nievinski, 2013).

$$d = n \frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

$$R = H \cdot \tan(e) + (d/\sin(e))/\tan(e) \quad (15)$$

$$b = \sqrt{2 \cdot d \cdot H/\sin(e) + (d/\sin(e))^2} \quad (16)$$

$$a = b/\sin(e) \quad (17)$$

2.6 Señal relación ruido (SNR)

En GNSS-R, la relación señal ruido (SNR, *signal-to-noise ratio*, por sus siglas en inglés) juega un papel fundamental, dado que, esta es la principal observación registrada por los receptores GNSS, siendo dependiente de la intensidad de la señal emitida por el satélite, la ganancia de la antena y el efecto multirayectoria (Zhang et al., 2017), el SNR muestra la relación entre la potencia de la señal “P” y potencia del ruido “N” (Xiao et al., 2020), cuya Ecuación (18) se expresa de la siguiente manera.

$$S/N = 10 \log_{10} P/N \text{ [dB]} \quad (18)$$

En términos de reflectometría, y conforme su arquitectura las antenas GNSS están diseñadas para la mitigación de señales indirectas (LHCP) reduciendo su potencia en ~13 a 23 dB, siendo el caso contrario para las señales recibidas directamente del satélite (RHCP), sin embargo, no rechazan totalmente las señales reflejadas o indirectas (Larson et al., 2013).

De acuerdo con Löfgren & Haas, (2014), para la determinación del nivel del mar, los azimut y ángulos de elevación se deben elegir de tan manera que las zonas de reflectancia estén en el agua, además, la ganancia de la antena varía según la dirección de llegada de las señales, es decir, cuando las señales recibidas se encuentran a un ángulo de elevación negativo (por debajo del horizonte) la ganancia de la antena disminuye un valor constante de 9 dB respecto a las señales recibidas en dirección al cenit, así mismo, esta decrece conforme el ángulo de elevación se aproxime a -90° . En este sentido, se considera el efecto multitrayectoria como la principal fuente de error en cuanto a posicionamiento, sin embargo, dada su naturaleza es utilizado para el análisis de las características de las superficies reflectantes, ya que esta se genera por la diferencia de fase entre las señales directas y reflejadas captadas por el receptor (Hernández-Andrade, 2021; Hofmann-Wellenhof et al., 2008), la diferencia entre dichas señales varía a medida que se mueve el satélite, presentando un patrón de interferencia en forma de oscilación SNR, de modo que, a partir de esto es posible calcular la altura de la superficie reflectante (Löfgren & Haas, 2014).

Por otro lado, los datos SNR pueden ser modelados una vez que se elimina el efecto de la señal directa mediante un polinomio de bajo orden (Ecuación 19).

$$dSNR = A \cos(4\pi H \lambda^{-1} \sin \theta + \phi) \quad (19)$$

Por lo tanto, el residual para observaciones individuales de una antena y un receptor se modela mediante la siguiente Ecuación (20).

$$SNR = A \cos\left(\frac{4\pi H}{\lambda} \sin \theta + \phi\right) \quad (20)$$

Donde λ , es la longitud de onda GNSS (para la frecuencia L_1), e es el ángulo de elevación del satélite con respecto al horizonte, H es la distancia vertical entre el centro de fase de la antena y la superficie reflejante, A representa la amplitud de los datos SNR y ϕ es la diferencia de fase (Syetiawan et al., 2021). De acuerdo con Löfgren & Haas, (2014) y Syetiawan et al., (2021), los SNR pueden representarse mediante un periodograma de Lomb-Scargle (LSP), donde se categorizan las oscilaciones uniformemente respecto al tiempo, estimando la potencia en función de la oscilación.

2.7 Modelo directo e inverso

2.7.1 Modelo directo y parámetros de incógnitas

El modelo directo es utilizado para calcular las observaciones de reflectometría GNSS esperadas, basándose principalmente en la propagación de las ondas electromagnética desde los satélites hasta la superficie reflectante y su posterior reflexión hacia la antena o receptor, considerando la distancia entre el satélite y el receptor, así como, la geometría de la reflexión en la superficie y las propiedades del medio de propagación, siendo correlacionados entre si (Martínez, 2020). La representación de los datos SNR son representados con la siguiente Ecuación (21).

$$SNR = P_s / P_n \quad (21)$$

Donde el denominador (P_n), indica la intensidad del ruido y permanece constante y el numerador (P_s) es la potencia de la señal compuesta (Nieviniski & Larson, 2014a).

$$P_s = P_s^I + P_s^C \quad (22)$$

Donde $P_s^I = P_d^I + P_r^I$, es la suma de las potencias directas (d) e indirectas (r-reflejadas), y $P_s^C = |V_d + V_r|^2$, suma compleja de los voltajes promedio de la señal directa e indirecta. En este sentido, de acuerdo con Nieviniski & Larson, (2014a), la Relación Señal Ruido (SNR) está en función de las fases interferométricas.

$$\phi_i = \phi_r - \phi_d \quad (23)$$

Donde ϕ_d , representa la fase de señal directa y ϕ_r es la fase de señal reflejada. Con base en lo anterior, el modelo SNR se compone de la siguiente manera.

$$SNR = tSNR + dSNR \quad (24)$$

Donde, $tSNR = (P_d^C + P_r^C + P_s^I)/P_n$ y $dSNR = 2 \sqrt{P_d^C} \sqrt{P_r^C} P_n^{-1} \cdot \cos \phi_i$. De igual manera, se obtiene la Ecuación (25) de la intensidad de visión de la señal directa conforme a Nievinski & Larson, (2014a).

$$P_d = P_d^R \cdot G_d^R \quad (25)$$

Donde P_d^R , representa la componente de intensidad de la señal RHCP (polarizado circularmente de forma derecha) y G_d^R , corresponde al valor del patrón de antena en la dirección del satélite y la polarización RHCP. Mientras que la intensidad de la reflexión se obtiene de la siguiente manera.

$$P_r = P_d^R |X|^2 S^2 \quad (26)$$

Donde P_d^R , intensidad isotrópica de la señal directa incidente, $S^2 = \exp(-k^2 \cos^2 \theta)$, representa el factor de atenuación en términos de intensidad, donde, θ , es el ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie reflejante y $k = 2\pi/\lambda$, compuesta por la longitud de onda de la señal, mientras el termino X , es la suma de los coeficientes de reflexión de la antena y/o superficie reflejante para ambas polarizaciones (RHCP y LHCP), dicho termino se expresa como $X = X^R + X^L$, donde.

$$X^R = R^S \sqrt{G_r^R} \exp(l\phi_r^R) \quad (27)$$

$$X^L = R^X \sqrt{G_r^L} \exp(l\phi_r^R) \quad (28)$$

Donde G , intensidad de ganancia de la antena y ϕ fase de la antena, R^S y R^X , denotadas como variables complejas de la zona de reflectancia para la polarización cruzada y del mismo sentido (Nievinski & Larson, 2014a).

Con base en Nievinski & Larson, (2014a), el modelo directo basado en información *a priori* está compuesto de la siguiente manera.

$$SNR = P_d(1 + P_i + 2\sqrt{P_i} \cos \phi_i) / P_n + P_s^I / P_n \quad (29)$$

Donde ϕ_i , corresponde a la fase y se denota $\phi_i = \phi_X + 4\pi\lambda^{-1}H_A \sin(e) - \phi_d^R$ y la intensidad $P_i = |XS|^2 / G_d^R$.

Por otro lado, de acuerdo con Nievinski & Larson, (2014a), dada las características propia del modelo directo, se pueden presentar ciertos errores derivados de los parámetros físicos; rugosidad de la superficie y altura de la superficie reflectante, por mencionar algunos. Dichos errores son linealmente dependientes entre sí, es decir, no es posible la estimación de las correcciones por separado, por lo cual, se debe mantener los parámetros fijos en valores *a priori*. Los parámetros de estos errores se denotan como; P_n , representa la intensidad del ruido y su argumento de sesgo se expresa P_n/K , donde K es el sesgo de intensidad de ruido, este debe ser positivo ya que la optimización es expresa en decibels (dB). Con base en lo anterior, el sesgo es representado como un polinomio en términos de seno del ángulo de elevación.

$$K_{dB} = \sum_{j=0,1,\dots} K_{dB}^{(j)} \sin e = K_{dB}^{(0)} + K_{dB}^{(1)} \sin e + K_{dB}^{(2)} \sin^2 e + \dots \quad (30)$$

De modo que, se introduce un parámetro de sesgo complejo en dependencia del ángulo de elevación expresada como $B = |B| \exp(l\phi_B)$, con el objetivo de corregir los defectos del modelo de reflexión. Así mismo, se actualizan los parámetros de intensidad de reflexión ($P_r/|B|^2$) y de fase de reflexión ($\phi_i - \phi_B$), también, es necesario desarrollar un polinomio en el mismo término de seno anterior para el sesgo de intensidad y fase de reflexión ($B_{dB} = \sum_{j=0,1,\dots} B_{dB}^{(j)} \text{sen } e$ y $\phi_{dB} = \sum_{j=0,1,\dots} \phi_{dB}^{(j)} \text{sen } e$), sin embargo, los primeros coeficientes de intensidad de fase son necesarios, debido a que dichos términos son constantes, la constante $\phi_B^{(0)} = \phi_B$, representa un cambio de fase que tiene en cuenta los errores en el patrón de fase de la antena, mientras que, $\phi_B^{(1)}$ representa la fase lineal, el cual se representa como un coeficiente de superficie horizontal, equivalente a la altura de la señal reflejada (Nievinski & Larson, 2014a).

$$H_B = \lambda \phi_B^{(1)} / 4\pi \quad (31)$$

Considerando los nuevos sesgos, se obtiene el nuevo modelo SNR;

$$SNR = P_d(1 + P_i + 2\sqrt{P_i} \cos \phi_i) P_d K / P_n + P_S^I / P_n \quad (32)$$

Donde $P_i = |XS/B|^2 / G_d^R$ y $\phi_i = \phi_X + 4\pi\lambda^{-1} H \text{sen}(e) - \phi_B - \phi_B^{\wedge} - \phi_d^R$.

La altura total reflectora (H), se denota como $H = H_A - H_B$, es decir, la diferencia entre el valor *a priori* y el sesgo correspondiente.

2.7.2 Modelo inverso

El modelo inverso implica resolver un problema inverso, donde se ajustan los parámetros del modelo directo para que coincidan con las observaciones reales. Dicho modelo implementa dos modelos estadísticos; modelo funcional, dicho modelo utiliza una matriz denominada Jacobiana (Ecuación 33), esta representa la componente principal del modelo inverso, ya que compara la sensibilidad entre las observaciones obtenidas a través del modelo directo ($f(x)$) y las mediciones SNR (Nievinski & Larson, 2014a).

$$J(i, j) = \partial Y_i / \partial X_j \quad (33)$$

Donde; X , representa el vector de valores preliminares correspondientes a las incógnitas (φ_B, H_B, B y K), la derivada parcial es definida elemento por elemento. Si las observaciones de SNR fueran una senoide perfecta, las dos sensibilidades serían copias reflejadas entre sí, coincidiendo en el ángulo de elevación central. De acuerdo con Nievinski & Larson, (2014a), el modelo estocástico, emplea una matriz de covarianza (C_y), dicha matriz transforma la varianza homogénea de los residuales (y) en varianza heterogénea, esto con la finalidad de establecer un rango de incertidumbre y una correlación entre los residuales, por lo que, se utiliza el método denominado delta, cuya denotación es la siguiente.

$$\sigma_{yi}^2 = \sigma_{yidB}^2 (\partial Y_i / \partial Y_{idB})^2 \quad (34)$$

Donde ∂Y_{idB} , es la varianza residual homogénea en decibels, la cual se escala en proporción a la transformación de decibels a intensidad, denotando de la siguiente manera.

$$\partial Y_i / \partial Y_{idB} = SNR_i \ln(10)/10 \quad (35)$$

De la Ecuación (35) anterior, se tiene que, $SNR = 10^{SNR_{dB}/10}$.

En este sentido, es necesario crear una matriz de covarianza diagonal en función de los residuales ($C_y = diag \Sigma_y$), dado el vector de varianzas transformadas sobre cada dirección (n th) del satélite de la forma $\Sigma_y = [\sigma_{y1}^2, \sigma_{y2}^2, \dots]^T$, dicha transformación de datos se utiliza para hacer que las observaciones se ajusten a los supuestos del método estadístico. Así mismo, el modelo diezma las muestras espaciadas en función del seno del ángulo de elevación ($sen e$), con la finalidad de omitir las correlaciones, lo anterior, se considera para los casos donde las mediciones son espaciadas en el tiempo, lo que se traduce en un muestreo más escaso y denso respectivamente cerca del horizonte y cenit, ya que los satélites parecen detenerse momentáneamente en su punto culminante.

2.8 Retardo de Fase

El método de análisis por retardo de fase es utilizado en mareógrafos GNSS cuyo principio consta de dos antenas y dos receptores, una de ellas apuntando al cenit (RHCP), la cual registra las señales GNSS directas provenientes del satélite, mientras que, la segunda antena se encuentra orientada al nadir (LHCP) registrando las señales reflejadas en la superficie del mar, sin embargo, éstas presentan un retardo de fase (Löfgren & Haas, 2014). Las señales LHCP son perceptibles a partir de elevaciones satelitales de 8° y aumenta conforme el ángulo de elevación, siendo mayor su coeficiente de amplitud respecto a las señales RHCP. Así mismo, dado que las señales reflejadas presentan un aumento en la trayectoria recorrida, la antena orientada al nadir parecerá una antena virtual ubicada por debajo de la superficie, por lo tanto, la distancia entre la antena virtual y la superficie del mar será igual a la distancia entre la superficie del mar y la antena LHCP real (Löfgren & Haas, 2014). Con base en lo anterior, se puede deducir que a medida que cambia la superficie del mar, el aumento del trayecto en las señales reflejadas también cambia, lo cual hace parecer que la antena LHCP cambia de posición vertical.

De acuerdo con Martinez-Felix et al., (2022), la altura de la superficie del mar es directamente proporcional a la altura de la antena LHCP sobre la superficie (h_a), por lo que, la relación vertical entre la las dos antenas (Δv) (RHCP-LHCP) y el parámetro h_a , se expresa mediante geometría (Ecuación 21).

$$\Delta v = 2h_a + d \quad (36)$$

Donde d , es la distancia vertical entre los centros de fase de las antenas.

Con base en Löfgren & Haas, (2014), una de las principales formas de análisis por retardo de fase, es mediante la Ecuación (22) de observación de fase GNSS.

$$\lambda_i \Phi_A^j = \rho_A^j + c(\tau_A - \tau^j) + Z_A^j - I_A^j + \lambda_i N_A^j \quad (37)$$

Donde, λ_i es la longitud portadora de la señal GNSS, Φ_A^j es la fase portadora en ciclos completos, ρ_A^j es el alcance geométrico del satélite, c es la velocidad de la luz en el vacío, τ_A es el sesgo del reloj del receptor, τ^j es el sesgo en el reloj del satélite, Z_A^j retraso troposférico, I_A^j retraso ionosférico y N_A^j ambigüedad de la fase. Con base en la Ecuación anterior (22), se obtiene la Ecuación de fase (23) de diferencia única por época para dos satélites, denotados con subíndices A y B , ambos observando el mismo satélite j (Löfgren & Haas, 2014).

$$\lambda_i \Delta \Phi_{A,B}^j = \Delta \rho_{A,B}^j + c \Delta \tau_{A,B} + \Delta Z_{A,B}^j - \Delta I_{A,B}^j + \lambda_i \Delta N_{A,B}^j \quad (38)$$

Donde, Δ es la diferencia entre los dos receptores, por lo que, dada la diferencia respecto al mismo satélite, el término del sesgo del reloj se descarta, además, los efectos ionosféricos ($\Delta I_{A,B}^j$) y troposféricos ($\Delta Z_{A,B}^j$) no se consideran dada la distancia entre las dos antenas.

Dicho lo anterior, la Ecuación (24) para la diferencia geométrica ($\Delta\rho_{A,B}^j$) en línea de base corta se puede expresar en un sistema de coordenadas local, siendo dependiente del azimut (α) y el ángulo de elevación del satélite (θ) (Löfgren & Haas, 2014).

$$\Delta\rho_{A,B}^j = \Delta e \text{ sen } (\alpha^j) \cos(\theta^j) + \Delta n \cos (\alpha^j) \cos(\theta^j) + \Delta v \text{ sen } (\theta^j) \quad (39)$$

Donde, Δe , Δn , Δv son las componentes Este, Norte y Vertical de la línea base respectivamente. En este sentido, si la línea base horizontal es conocida, entonces, será descartada por lo que, los términos Este y Norte pueden ser considerados para ajustar la Ecuación 17 y reducir el número de incógnitas.

Así mismo , es posible obtener observación de fase por diferencias dobles por época, donde los parámetros de la ambigüedad se convierten en enteros y los términos de polarización del reloj se cancelan, sin embargo, para formar dicha Ecuación es necesaria una observación más, dado que se basa en el principio de dos receptores y dos satélites.

2.8 Prueba de hipótesis estadística

De acuerdo con Wackerly et al., (2008), una prueba estadística, es aquel procedimiento para determinar si los datos de una muestra cualquiera son consistentes con una hipótesis inicial. Además, permite la estimación de parámetros; varianza de referencia, estimación de valores atípicos en observaciones GNSS, determinación de intervalos de confianza, entre otros (Snow, 2002). Por lo general, la pruebas de hipótesis son utilizadas para la toma de decisiones sobre una afirmación o suposición, por lo que, cualquier tipo de prueba de hipótesis estadística contiene los mismos elementos necesarios para la formulación de esta; Hipótesis nula (H_0), representa una igualdad que indica que no existe diferencia en el valor de un conjunto de datos (valor esperado) respecto aun valor definido (valor real); Hipótesis alternativa (H_a), indica cierta diferencia, es decir, es el valor que se considera como aceptable

cuando se rechaza la hipótesis nula; Estadístico de prueba, es el estimador para determinar si es aceptada o rechazada la hipótesis nula, es decir, la decisión estadística está basada en el estadístico de prueba; Región de rechazo, establece el valor probabilístico (rango de valores) para el cual la hipótesis nula es rechazada y la hipótesis alternativa aceptada (Wackerly et al., 2008).

Sin embargo, se debe establecer una región de rechazo cuidadosamente, dado que, existen dos tipos de errores básicos en una decisión estadística; error tipo I y error tipo II, el primero hace referencia al rechazo de la hipótesis nula cuando en realidad cumple con las especificaciones necesarias, es decir, está dentro del rango de aceptación, mientras que el segundo se comete al aceptar la hipótesis nula cuando esta se encuentra en la zona de rechazo establecida (Snow, 2002). Sin embargo, solo es posible cometer uno de estos errores, generalmente se pretende evitar el error tipo I, ya que este, está en función del nivel de significancia establecido, por lo cual la probabilidad de cometer el error tipo I (α) y II (β) esta denotado de la siguiente manera (Tabla 5, Figura 12) (Ghilani, 2011).

Tabla 5. Relación estadística entre los errores tipo I y II (Ghilani, 2011).

Hipótesis	Decisión de la prueba	
	H_0 aceptada	H_0 rechazada
H_0 es verdadera	Decisión correcta: $P = 1 - \alpha$ (nivel de confianza)	Error tipo I: $P = \alpha$ (nivel de significancia)
H_0 es falso (H_a — aceptada)	Error tipo II: $P = \beta$	Decisión correcta: $P = 1 - \beta$ (potencia de la prueba)

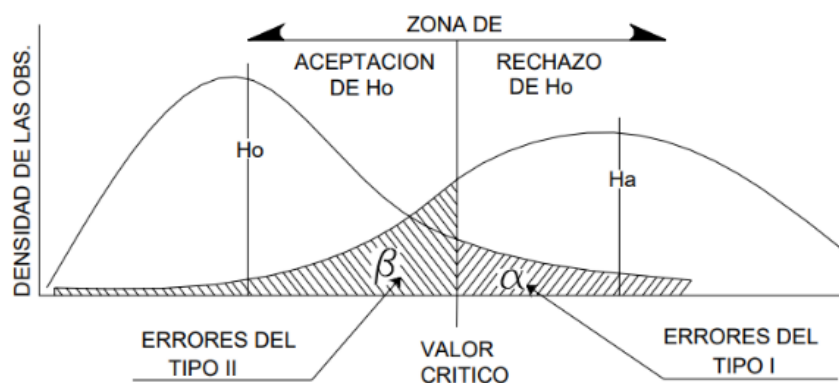


Figura 12. Interpretación gráfica de errores tipo I y II (Medina Olalde, 2007).

La Figura (12) anterior, muestra las distribuciones para cada tipo de error, la distribución izquierda representa los datos de los que se deriva la hipótesis nula, mientras que la derecha representa la distribución de datos para la hipótesis alternativa, también se observa que las observaciones válidas en la región α de la distribución izquierda se rechazan a un nivel de significancia de α . Por lo tanto, α representa la probabilidad de cometer un error de tipo I. Además, los datos de la distribución correcta se aceptan en un nivel de significancia β , la potencia de la prueba es $1 - \beta$ y corresponde a una alternativa verdadera (Ghilani, 2011).

Por otro lado, para llevar a cabo una prueba estadística se deben determinar las variables y el tipo de prueba a realizar, por lo que es posible desarrollar pruebas basadas en la media, la varianza y la razón de dos varianzas muestrales (Tabla 6), es decir, se utiliza la prueba o distribución T (T-Student) para la comparación de la media muestral respecto a una media poblacional, mientras que, la distribución X^2 (Chi-Cuadrada) se implementa para comparar una varianza muestral respecto a una poblacional y finalmente, la distribución F (Fisher), esta compara la varianza de dos conjuntos muestrales diferentes (Ghilani, 2011). En este sentido, de acuerdo a su distribución una prueba estadística puede ser de una o dos colas, cuando es de una cola puede estar del lado derecho o izquierdo de la distribución, mientras que la prueba de dos colas es muy parecida a un intervalo de confianza con el valor crítico dividido igualmente en ambos lados de la distribución.

Tabla 6. Variables de prueba y pruebas estadísticas.

Variable 1 (Estadística de prueba)	Variable 2 (Estadística de muestra)	Hipótesis nula	Prueba Estadística
Media poblacional (μ)	Promedio de la muestra ($\bar{y}$)	$H_0: \mu = \bar{y}$	T
Varianza poblacional (σ^2)	Promedio de la varianza (S^2)	$H_0: \sigma^2 = S^2$	X^2
La proporción de varianzas muestrales es igual a 1	S_1^2/S_2^2	$H_0: S_1^2/S_2^2 = 1$	F

De acuerdo con Ghilani, (2011) y Wackerly et al., (2008), se debe identificar una estadística de prueba adecuada así como el tipo de prueba a realizar, esto en función de los datos de la prueba, dado que estos se comparan con el valor crítico de la distribución.

2.8.1 Distribución Chi-cuadrada (χ^2)

Como se mencionó anteriormente, este tipo de distribución compara la varianza calculada en función de un conjunto de observaciones de muestra respecto a la varianza esperada. Dicha distribución es denotada como χ^2 , en una muestra de n observaciones $y_1, y_2, \dots, y_n$, se selecciona de una población que tiene una distribución normal con media μ y varianza σ^2 , entonces, por definición, la distribución muestral χ^2 es (Ghilani, 2011).

$$\chi^2 = \frac{vS^2}{\sigma^2} \quad (40)$$

Donde v , son las mediciones en exceso, S^2 es la varianza de la muestra y σ^2 es la varianza de toda la población. Con base en lo anterior, la prueba de hipótesis se establece con forme la Tabla 7.

Tabla 7. Prueba de hipótesis para distribución χ^2 .

	De una cola	De dos colas
Hipótesis nula:	$H_0: S^2 = \sigma^2$	$H_0: S^2 = \sigma^2$
Hipótesis alternativa:	$H_a: S^2 > \sigma^2$ o $H_a: S^2 < \sigma^2$	$H_a: S^2 \neq \sigma^2$
Región de rechazo: la hipótesis nula se rechaza cuando se cumple el criterio de rechazo	$\chi^2 > \chi^2_{\alpha}$ o $\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha}$	$\chi^2 > \chi^2_{\alpha/2}$ o $\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha/2}$

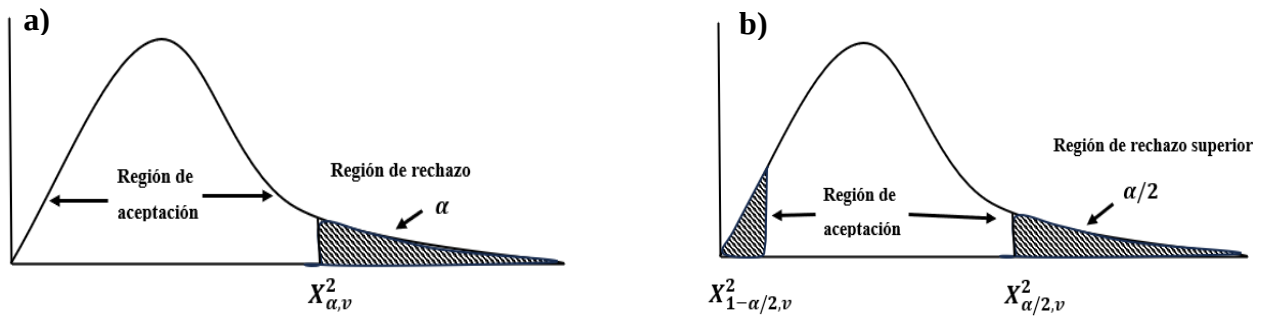


Figura 13. Interpretación gráfica de (a) pruebas de una y (b) de dos colas.

En la Figura 13 a, se muestra gráficamente una distribución de una cola donde la hipótesis nula es rechazada cuando el valor calculado de X^2 es mayor que el valor tabulado, cuando el valor de x^2 es menor que el tabulado se verifica la cola inferior, siendo la parte sombreada la zona de rechazo. Así mismo, en la parte derecha de la Figura (b) se muestra la prueba con dos colas, por lo que, la hipótesis nula H_0 se rechaza cuando el valor calculado es menor que $x^2_{1-\alpha/2}$ o mayor que $x^2_{\alpha/2}$. En comparación con la varianza poblacional, esto se asemeja a estar excluido del intervalo de confianza derivado de la varianza muestral. En una prueba de dos colas, la probabilidad asignada se divide equitativamente entre las colas superior e inferior de la distribución, resultando en una región de aceptación centrada en dicha distribución (Ghilani, 2011; Wackerly et al., 2008).

2.8.2 Distribución T-Student (t)

El tipo de distribución t de Student es utilizada comúnmente para la comparación de la media poblacional respecto a la media muestral, en función del número de redundancias (v) en el conjunto de muestra, dicha distribución se utiliza cuando el número de datos de la muestra es menor a 30 ($n < 30$). Por lo tanto, si z es una variable aleatoria normal estándar y x^2 es una variable aleatoria chi-cuadrado con v grados de libertad, y z y x^2 son ambos variables independientes, entonces su denotación sería la siguiente (Ghilani, 2011).

$$t = \frac{z}{\sqrt{x^2/v}} \quad (41)$$

Sin embargo, es necesario establecer los intervalos de confianza para la media poblacional, por lo tanto, el intervalo de esta en función del cálculo de la media muestral ($\bar{y}$) a partir de un conjunto de muestras de una distribución normal de la población que tiene una media de μ y una varianza de la media de σ^2/n . Entonces, sea $z = (\bar{y} - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})$ una variable aleatoria normal y sustituyendo términos en la Ecuación 41, la distribución t quedaría denotada de la siguiente manera.

$$t = \frac{z}{\sqrt{x^2/v}} = \frac{(\bar{y} - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})}{\sqrt{(vS^2/\sigma^2)/v}} = \frac{(\bar{y} - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})}{S/\sigma} = \frac{\bar{y} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (42)$$

Con base en lo anterior, la prueba de hipótesis estadística de la media poblacional se establece de la siguiente manera (Tabla 8).

Tabla 8. Prueba de hipótesis para distribución *t*.

	De una cola	De dos colas
Hipótesis nula:	$H_0: \mu = \bar{y}$	$H_0: \mu = \bar{y}$
Hipótesis alternativa:	$H_a: \mu > \bar{y}$ o $H_a: \mu < \bar{y}$	$H_a: \mu \neq \bar{y}$
Región de rechazo:	$t > t_\alpha$ o $t < t_\alpha$	$ t > t_{\alpha/2}$

En este sentido, la hipótesis nula H_0 para esta prueba puede tomar dos formas, es decir, puede ser de una o dos colas (Figura14) (Ghilani, 2011).

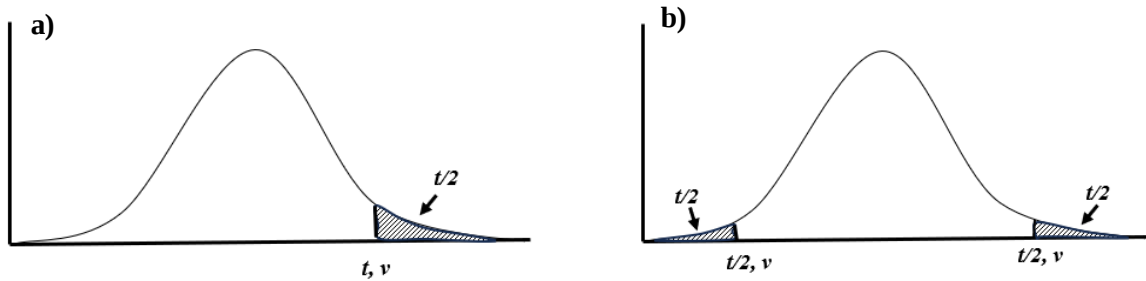


Figura 14. Representación gráfica de la distribución Student para una (a) y dos colas (b).

2.8.3 Distribución de Fisher (F)

La distribución de Fisher es utilizada para comparar dos varianzas calculadas de dos conjuntos diferentes, es decir, si x_1^2 y x_2^2 son dos variables aleatorias chi-cuadrado con v_1 y v_2 grados de libertad (Figura 15), respectivamente, y ambas variables son independientes, entonces su ecuación queda denotada de la siguiente manera.

$$F = \frac{x_1^2/v_1}{x_2^2/v_2} \quad (43)$$

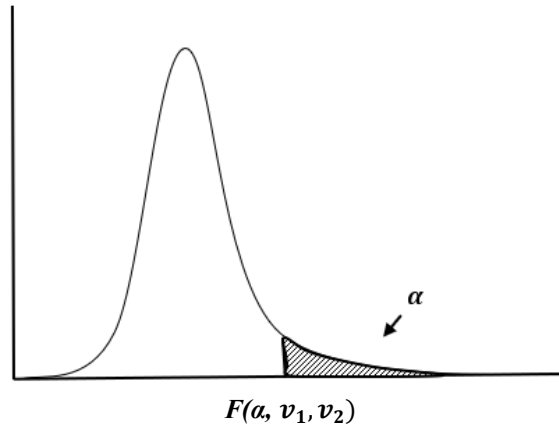


Figura 15. Representación gráfica de la distribución F de una cola.

Dado que la distribución F representa la razón de dos varianzas, se puede construir una prueba de hipótesis (Tabla 9) para saber si ambas varianzas provienen de la misma población (Ghilani, 2011; Medina Olalde, 2007).

Tabla 9. Formulación de la prueba de hipótesis para la distribución F (Ghilani, 2011).

	De una cola	De dos colas
Hipótesis nula:	$H_0: \frac{S_1^2}{S_2^2} = 1$ (es decir, $S_1^2 = S_2^2$)	$H_0: \frac{S_1^2}{S_2^2} = 1$ (es decir, $S_1^2 = S_2^2$)
Hipótesis alternativa:	$H_a: \frac{S_1^2}{S_2^2} > 1$ (es decir, $S_1^2 > S_2^2$) o $H_a: \frac{S_1^2}{S_2^2} < 1$ (es decir, $S_1^2 < S_2^2$)	$H_a: \frac{S_1^2}{S_2^2} \neq 1$ (es decir, $S_1^2 \neq S_2^2$)
Prueba estadística:	$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$ o $F = \frac{S_2^2}{S_1^2}$	$F = \frac{\text{varianza mayor}}{\text{varianza menor}}$
Región de rechazo: la hipótesis nula debe ser rechazada cuando se cumpla la siguiente afirmación.		
$F > F_\alpha$ o $F > F_{\alpha/2}$		

CAPÍTULO III

Metodología

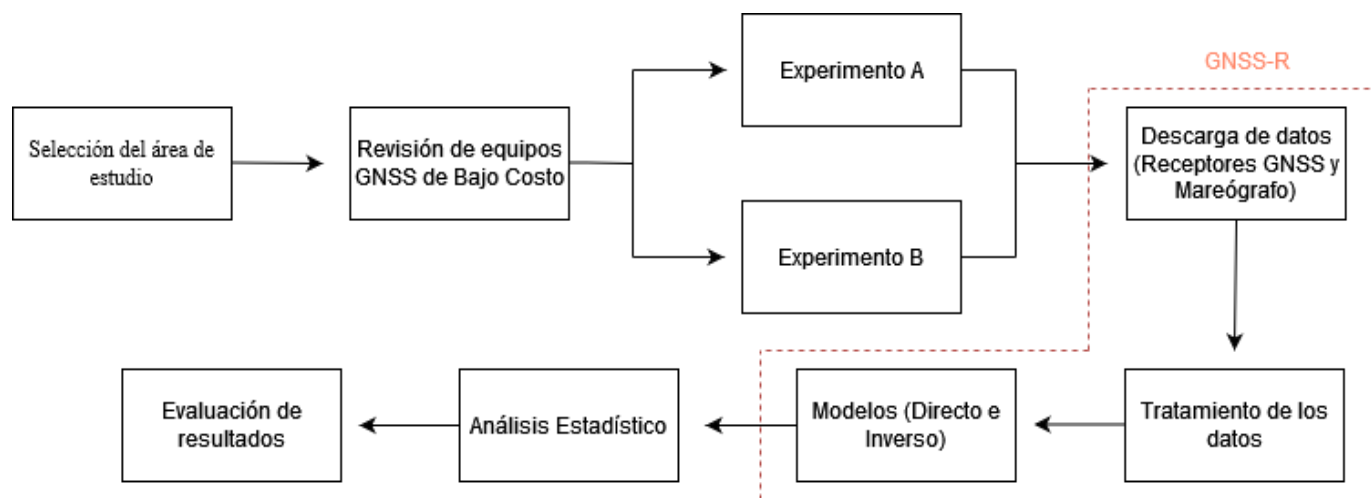


Figura 16. Metodología empleada para la realización de este trabajo.

En la Figura 16, se muestra el esquema metodológico utilizado para llevar a cabo el presente estudio, con el objetivo de evaluar el rendimiento de los receptores de bajo costo para el monitoreo del nivel mar costero, respecto a un instrumento diseñado para tal función como lo es, el Mareógrafo Convencional (MC). En este contexto, se realizó como primera etapa, la selección del área de estudio, considerando que cumpliera con los requisitos necesarios para el trabajo, es decir, que se encuentre en zona costera (< 100 m del mar), dado que el principal objetivo es la obtención de las señales reflejadas provenientes de la superficie del mar, también deberá contar con un mareógrafo relativamente cercano y con acceso a los datos de este, dado que, son necesarios para la comparación de resultados.

En segunda instancia, se comprobó el buen funcionamiento de los receptores GNSS de bajo costo, es decir, que estos generarán los archivos de observación (RINEX) necesarios para el estudio, mediante pruebas de medición GNSS-R. En la siguiente etapa se definieron los casos de estudio (Experimentos A y B) cuya descripción se encuentra más adelante, una

vez definida el área de estudio y los casos experimentales se procedió a la toma y descarga de los datos (observaciones) GNSS, en el caso de las observaciones mareográficas es necesario solicitarlas a la Secretaría de Marina (SEMAR) (<https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx>), dado que, no se encuentran de manera libre. Posteriormente, se realizó la conversión de los datos GNSS; para los receptores de bajo costo, se convirtieron los archivos de formato nativo UBX a formato RINEX versión 2.11 dejando únicamente la constelación GPS, mediante el software RTKLIB (Takasu, 2013), con el objeto de identificar si es posible obtener variaciones del nivel del mar mediante una única constelación.

En las siguientes etapas, se procesaron los datos mediante una versión de código abierto de Python denominado `gnssrefl`, cuya función es evaluar los parámetros de reflectometría GNSS (GNSS-R), en el cual se implementan los modelos tanto inverso como directo, dado que se basa en las señales SNR es necesario convertir los archivos RINEX en datos SNR, a partir de esta instancia se procede al análisis de las señales obtenidas. Así mismo, con el objetivo de evaluar la calidad de los resultados derivados del análisis anterior, se procedió a la obtención de los estadísticos comparativos entre las mediciones obtenidas mediante GNSS y mareógrafo convencional (MC) basado en la correlación lineal de dichos datos. Finalmente, se estableció una prueba estadística con la finalidad de validar los resultados obtenidos.

3.1 Casos de Estudio

Se establecieron dos casos experimentales denominados “A” y “B”, ambos casos se llevaron a cabo en el muelle ubicado en la zona costera de Altata, municipio de Navolato, Sinaloa (Figura 17). El experimento “A”, consta de dos antenas y dos receptores de bajo costo, las antenas se encuentran espalda con espalda, es decir, una cara hacia arriba (zenit) y otra cara hacia abajo (nadir), ambas antenas salen del muelle aproximadamente 50 cm hacia el mar, estas se encuentran en dos tornillos empotrados en una barra (solera) con longitud aproximada de 100 cm (Figura 18).

El experimento “B”, consta de una antena y un receptor de bajo costo, la antena se encuentra montada en una base nivelante centrada en un punto de referencia ubicado en la base izquierda del muelle, montados sobre un tripie, cabe señalar, que dicha barra se encuentra entre el tripie y la base nivelante, la cual actúa como soporte de la solera, con la finalidad de comparar resultados se colocó un receptor de orden geodésico en otro punto sobre la misma base del muelle a una distancia aproximada de 2 m del punto anterior.

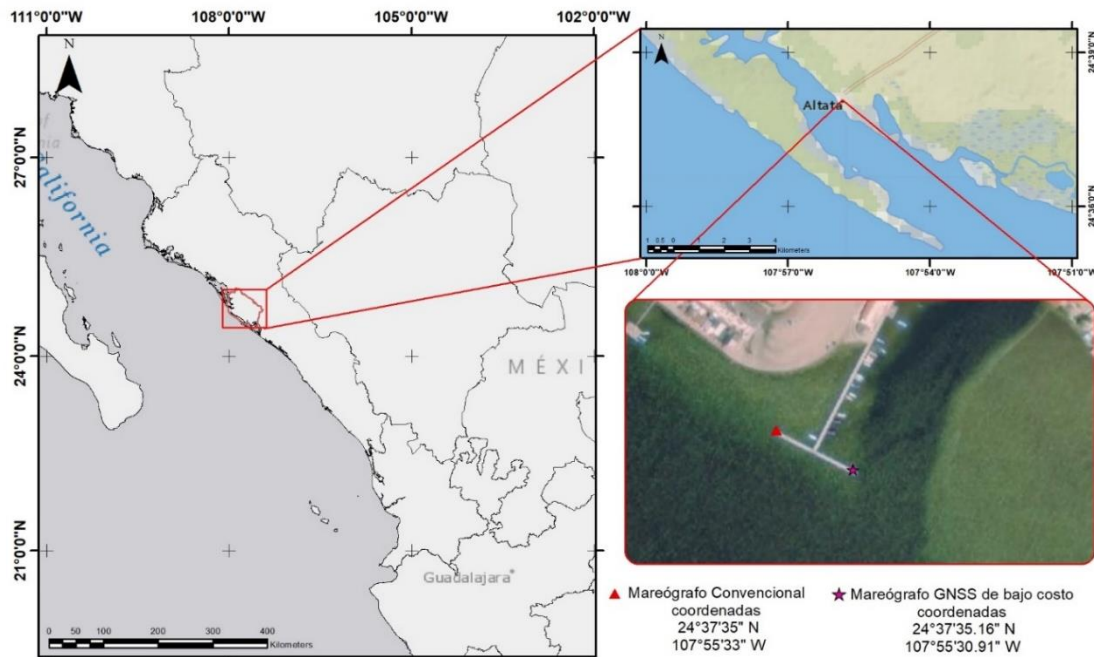
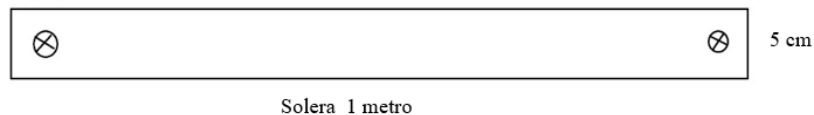


Figura 17. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

PLANTA



PERFIL

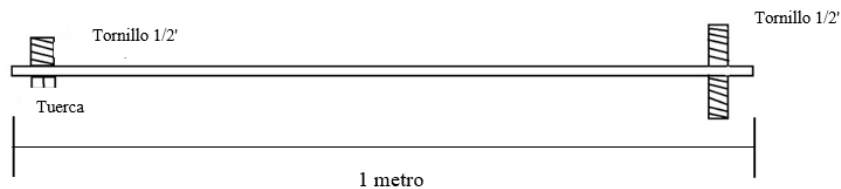


Figura 18. Representación esquemática de la solera (barra) para la toma de datos. Fuente: elaboración propia.

La estación mareográfica convencional (Figura 19) se encuentra en el muelle a una longitud aproximada de 80 m, es decir, los puntos experimentales y la estación mareográfica se encuentran de extremo a extremo del muelle, dicha estación se instaló en agosto del año 2016 por la Secretaria de Marina (SEMAR) con intervalos de muestreo a 1 minuto, para la medición del nivel del mar, tomando como referencia el banco de nivel ubicado en tierra, así mismo, dicha estación es capaz de medir temperatura y densidad del mar. Actualmente se encuentra en funcionamiento, sin embargo, los datos no se encuentran de manera libre, dado que aún no cuenta con el tiempo necesario (17.8 años) para la generación del modelo de comportamiento del nivel del mar.



Figura 19. Estación mareográfica Altata (ALTA043). Fuente: Altata, Sin. (semar.gob.mx).

3.2 Adquisición de los datos

Para la obtención de los datos en ambos experimentos, se utilizaron tres receptores de bajo costo modelo ZED-F9P (Figura 3 - sección 2.2) del fabricante U-Blox, la experimentación se divide en cinco campañas con un periodo de ~ 24 horas, los receptores se configuraron a un intervalo de muestreo de 1 s (Tabla 5), para capturar los cambios en las variaciones de la marea detalladamente. Para el caso experimental “A”, se utilizaron dos antenas de parche modelo ANN-M-00 conectadas a dos receptores diferentes, orientadas una al cenit (RHCP) y la otra al nadir (LHCP), con el objetivo de comparar la recuperación de señales reflejadas

y las señales directas, mientras que, para el caso “B” se utilizó una antena modelo BT-170 (Beitian) de manera vertical al cenit, conecta a un receptor F9P (Figura 20).

Tabla 10. Fechas de medición por campaña para ambos casos (A y B).

Modulo Zed-F9P		
Campaña	Casos A-B	Periodo
1	16/10/2023	24 horas
2	09/11/2023	24 horas
3	23/11/2023	24 horas
4	07/12/2023	24 horas
5	15/01/2024	24 horas



Figura 20. Arquitectura para la toma de datos GNSS con receptores y antenas de bajo costo.

Los receptores de bajo costo son manipulados mediante el software U-Center del mismo fabricante (U-Blox), el cual es un software con las herramientas necesarias para la evaluación y configuración de los módulos antes mencionados, con interfaz para el sistema operativo Windows (www.u-blox.com). De acuerdo con las especificaciones del fabricante U-blox, (2019), el software interactúa de manera sencilla con los módulos de bajo costo permitiendo la visualización de las observaciones GNSS en tiempo real, el número de satélites observados, tiempo y seguimiento de estos.

CAPÍTULO IV

Resultados

4.1 Zona de Reflectancia y análisis de la relación señal-ruido (SNR)

Para el cálculo de la zonas de reflectancia, es necesario (Zona Fresnel) conocer las coordenadas (Latitud, Longitud y Altura elipsoidal) de las estaciones GPS, los acimuts (mínimo y máximo) y la altura promedio de la superficie reflejante (RH), dichas zonas pueden ser calculadas mediante el módulo *gnssrefl.refl_zones*, el cual crea una serie de elipses independientes para cada ángulo de elevación (5°, 10° y 15°), dando como salida un archivo *.KML*, además, es posible ejecutar dicho modulo en la aplicación web [GNSS-IR](#) .

En este sentido, se calcularon las zonas de reflectancia para las antenas o estaciones definidas en este trabajo, denotadas como; ABAJ- nadir (LHCP), ARRI- zenit (RHCP), BETI- zenit (Figura 21).

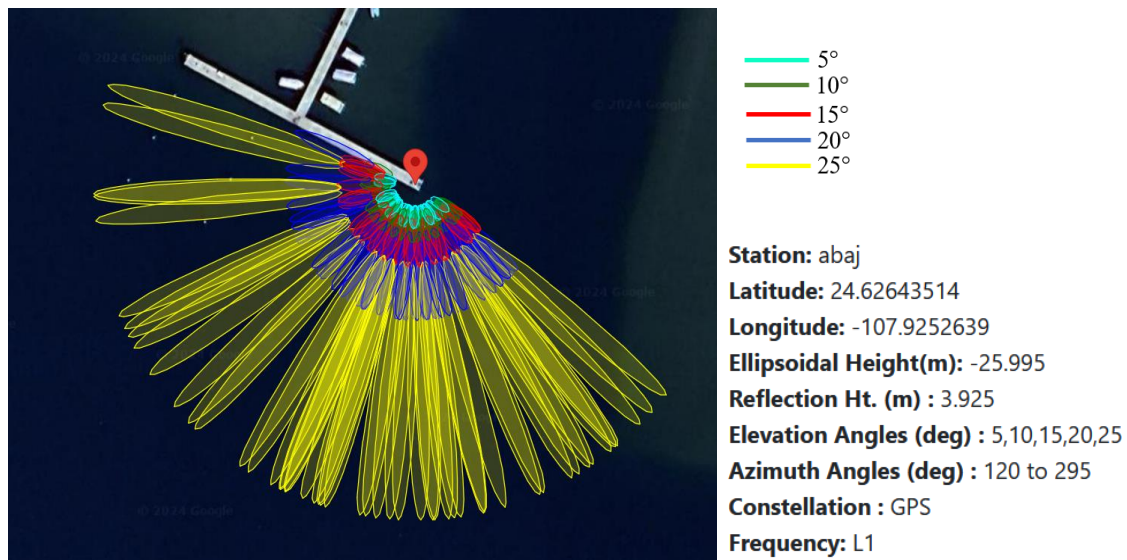


Figura 21. Zona de Reflectancia para la estación ABAJ/ARRI, vista satelital – Google Earth.

En la Figura 21, se puede apreciar la localización de las antenas de bajo costo, así mismo es posible observar el entorno de esta, el cual cuenta con una vista libre, es decir, no hay

obstáculos que interfieran con las señales reflejadas en un azimut de 120° a 295° para GPS en la frecuencia L1, tomando en cuenta ángulos de elevación entre 5° y 25° . Cabe señalar que este análisis abre pauta para la selección de las observaciones, ya que cualquier obstrucción dentro de dicha zona puede atenuar la calidad de las señales GNSS lo que degradaría la de precisión de los datos. Por otro lado, dado que las estaciones se encuentran de manera muy cercana es posible analizar la misma zona reflectancia para las antenas de bajo costo, mientras que para el receptor de orden geodésico es necesario modificar los azimuts y las coordenadas, manteniendo la misma configuración.

Con base en lo anterior, se analizan las señales correspondientes a la zona de reflectancia en términos de SNR, en función de los azimuts establecidos, generalmente las señales SNR reflejadas presentan una forma sinusoidal, la amplitud de cada senoide decrece a medida que incrementa el ángulo de elevación satelital, formando un arco satelital, incrementando nuevamente su amplitud al decrecer la posición del satélite respecto al tiempo, obteniendo señales directas e indirectas. Con base en ello, es necesario eliminar las señales directas (con un polinomio de bajo orden) y convertir la potencia de la señal (dBHz) en unidades lineales (volts/volts) ya que esto permite un mejor análisis espectral de los datos, una vez realizado este proceso se obtiene el conjunto de datos a analizar, dando como salida un periodograma SNR asociado (Figura 22).

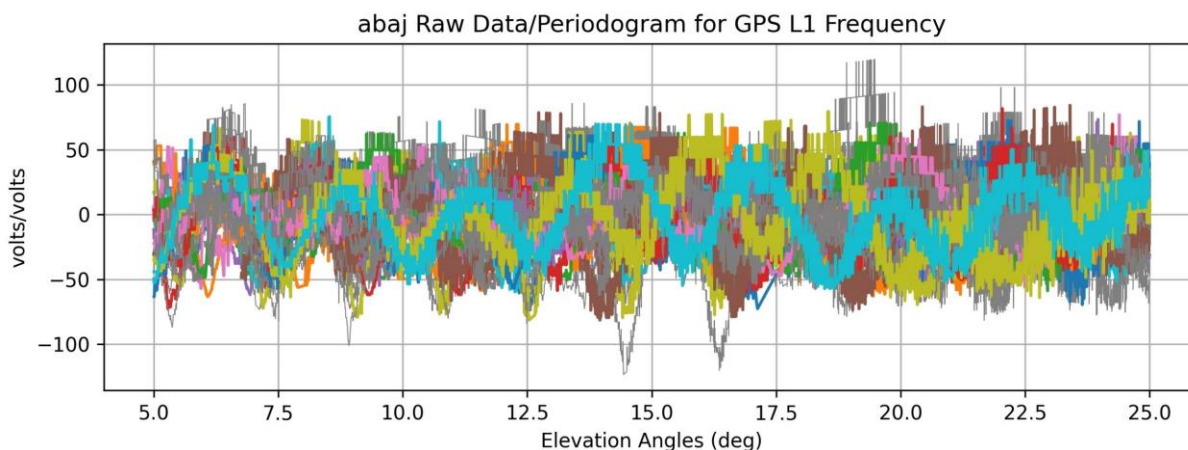


Figura 22. Periodograma SNR; representación gráfica sinusoidal de las señales GPS reflejas para en L1, estación: ABAJ.

La Figura 23, muestra el comportamiento de la señal SNR para GPS en la frecuencia L1 en función del seno del ángulo de elevación, asociando cada arco de satélite a un tiempo y azimut en específico, esta señal es generada por los reflejos en el mar, catalogada como buena señal ya que presenta sinusoides mayores a siete picos (Martínez, 2020).

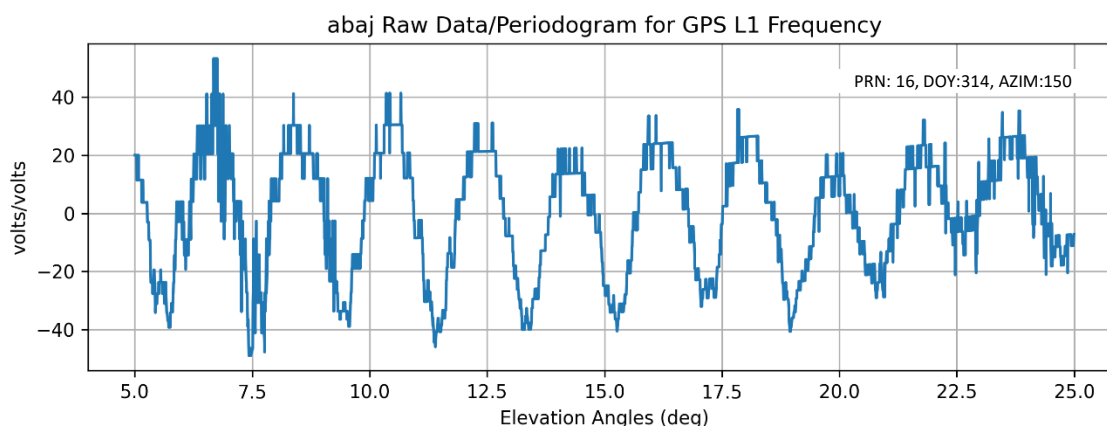


Figura 23. Ejemplo de señal SNR para GPS en L1, para el día 314, estación ABAJ, acimut de 150°.

4.2 Análisis de los datos SNR

Para el procesamiento de los datos se utilizó [GNSSREFL](#), el cual es una versión de código abierto de Python utilizado en reflectometría interferométrica (GNSS-R). Dicho código toma de entrada los archivos Rinex 2.11, extrae los datos SNR en las frecuencias L1, L2C y L5 (en caso de contar con ello) y los guarda en un nuevo archivo con extensión .snr66 (para ángulos menores a 30°). Posteriormente, se analizaron los datos SNR resultantes para la estimación de la altura de la superficie reflectante (RH).

Con base en lo anterior, se calcula la altura RH inicial en función de la constelación (GPS) respecto al azimut y máscara de elevación, eliminando valores atípicos y ajustando mediante una línea sinusoidal (spline). Posteriormente se calculan las correcciones RHdot (corrección a la altura/tiempo) para estimar nuevamente RH. De acuerdo con Larson et al., (2013), para una superficie plana en movimiento con variaciones de marea mayores a 7 m en periodos de 24 horas, el modelo SNR para superficies planas ($d = 2H \sin e$) no cumple con la solución,

ya que GPS mide la distancia entre la antena y la superficie reflectora, por lo que las frecuencias de las señales reflejadas no están correlacionadas con las mediciones obtenidas por un mareógrafo. Por lo tanto, para superficies planas en movimiento/tiempo, la corrección está dada por (Chen et al., 2023);

$$\Delta H_R = \dot{H} \frac{\tan e}{\dot{e}} \quad (44)$$

Donde, ΔH_R es la corrección a las altura, $\dot{H}$ y $\dot{e}$ son las derivas del tiempo de la altura de la superficie reflectante y el ángulo de elevación del satélite respectivamente. Considerando la superficie plana como constante se obtienen los valores de $\dot{H}$ y $\dot{e}$ mediante interacción, una vez obtenidas las correcciones se aplican a las observaciones iniciales para obtener la nueva observación del nivel del mar (RH) para cada estación en cada campaña de medición.

La Tabla 11, muestra los estadísticos para las frecuencias L1 y L2C denotadas en el código como 1 y 20 respectivamente para la constelación GPS, así mismo, es posible observar los sesgos de Inter-frecuencia (IF) y los RMS para las observaciones iniciales con/sin corrección RHdot.

Tabla 11. Estadísticas para las frecuencias L1 (1), L2C (20) y RMS para cada estación con/sin corrección a la tasa de altura.

Estación	Freq	Bias (m)	Sigma (m)	RMS no RHdot correction (m)	RMS w/ Rhdot correction(m)	campana
ABAJ	1	0	0.394	0.484	0.482	1
	20	-0.01	0.424			
ARRI	1	0	0.336	0.368	0.351	
	20	-0.042	0.287			
ABAJ	1	0	0.493	0.488	0.472	2
	20	0.128	0.504			
ARRI	1	0	0.284	0.325	0.317	
	20	-0.054	0.263			
BETI	1	0	0.285	0.295	0.292	3
	20	-0.122	0.269			
ABAJ	1	0	0.197	0.278	0.273	
	20	0.025	0.205			
ARRI	1	0	0.252	0.274	0.268	
	20	-0.054	0.263			
BETI	1	0	0.185	0.283	0.276	
	20	-0.123	0.209			

ABAJ	1	0	0.153	0.198	0.196	4
	20	0.086	0.147			
ARRI	1	0	0.186	0.214	0.209	
	20	-0.041	0.199			
BETI	1	0	0.196	0.259	0.254	
	20	-0.111	0.191			
ABAJ	1	0	0.215	0.308	0.301	5
	20	0.26	0.204			
ARRI	1	0	0.154	0.286	0.283	
	20	0.05	0.169			

Finalmente, el código elimina los sesgos Inter-frecuencia y aplica las correcciones RHdot para calcular nuevamente la línea de ajuste obteniendo el RMS para las nuevas alturas (Tabla 12).

Tabla 12. RMS por estación; corrección RHdot/IF.

Estación	RMS with Rhdot/IF correction(m)	Campaña
ABAJ	0.317	1
ARRI	0.319	
ABAJ	0.285	2
ARRI	0.305	
BETI	0.285	
ABAJ	0.264	3
ARRI	0.259	
BETI	0.273	
ABAJ	0.187	4
ARRI	0.203	
BETI	0.246	
ABAJ	0.295	5
ARRI	0.278	

En este sentido, la Figura 24, muestra las diferencias medias cuadráticas (RMS) para cada estación en cada campaña. Los RMS de las estimaciones iniciales para las aturas de manera general oscilan entre 0.198 m y 0.488 m. Para la campaña uno (C-1) se registra un RMS inicial de 0.484 m y 0.351 m para las estaciones ABAJ y ARRI respectivamente, obteniendo una mejora significativa después de las correcciones (RHdot/IF) con un RMS de 0.0317 m/ABAJ y 0.319 m/ARRI, lo que nos indica la variabilidad de los datos respecto a la línea de ajuste. Para las campañas posteriores, se presenta un RMS inicial relativamente grande

(0.488 m) en la estación ABAJ-campaña 2 (C-2), mejorando considerablemente al aplicar las correcciones a la tasa de altura e Inter-frecuencia dejando como resultado un RMS de 0.285 m. El mejor ajuste se obtuvo en la estación ABAJ en la cuatro (C-4), con valores de RMS sin corrección de 0.198 m y un RMS de 0.187 m una vez aplicadas las correcciones.

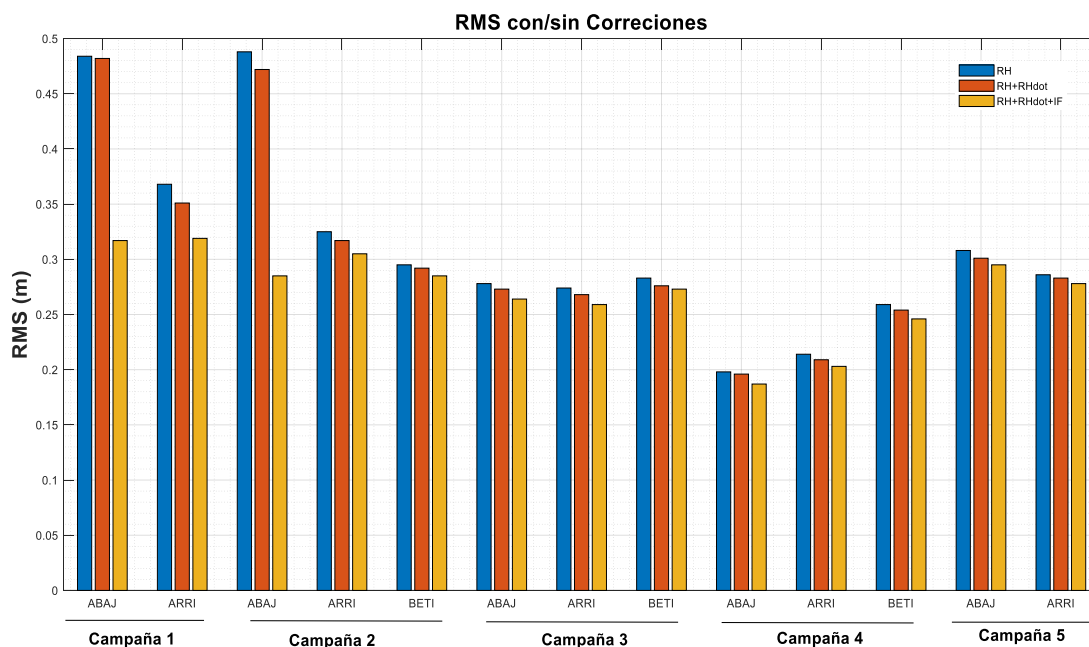


Figura 24. RMS de las alturas estimadas por estación; RH- altura inicial estimada, RH+RHdot- altura inicial con corrección a la tasa de altura, RH+RHdot/IF – altura estima con corrección de tasa de altura e Inter-frecuencia.

Con base en lo anterior, las precisiones obtenida a partir del ajuste sinusoidal son relativamente grandes, sin embargo, para evaluar el rendimiento de los instrumentos es necesario comparar los datos obtenidos (alturas finales) después del ajuste, con los datos derivados a través de un mareógrafo convencional (MC). En este sentido, se comparó cada una de las mediciones, es decir, por estación/campaña, en el mismo periodo de tiempo (GPS), con la finalidad de observar si estos siguen la tendencia de las mareas observadas por el MC. Así mismo, se lleva a cabo un análisis de correlación entre ambas alturas (GNSS y mareográficas) (Tabla 13).

Tabla 13. Estadística de la comparativa de alturas GNSS y mareográficas por campaña.

Estación	Correlación	RMSE (m)	Campaña
RH-ABAJ	0.85	0.17	1
RH-ARRI	0.83	0.18	
ABAJ	0.97	0.07	2
ARRI	0.90	0.13	
BETI	0.96	0.08	
ABAJ	0.95	0.08	3
ARRI	0.91	0.11	
BETI	0.92	0.10	
ABAJ	0.80	0.11	4
ARRI	0.61	0.21	
BETI	0.65	0.19	
ABAJ	0.97	0.07	5
ARRI	0.94	0.10	

La Figura 25, muestra las series temporales del nivel del mar tanto GNSS-R como mareográficas para C-1, en la cual puede apreciarse que las mediciones GNSS-R de las estaciones ARRI y ABAJ siguen la misma tendencia de las mediciones relativas obtenidas a través del mareógrafo convencional, así mismo, se observan segmentos rectos los cuales equivalen a la perdida de datos por periodos cortos de tiempo, debido a la perdida de energía en el sistema de almacenamiento.

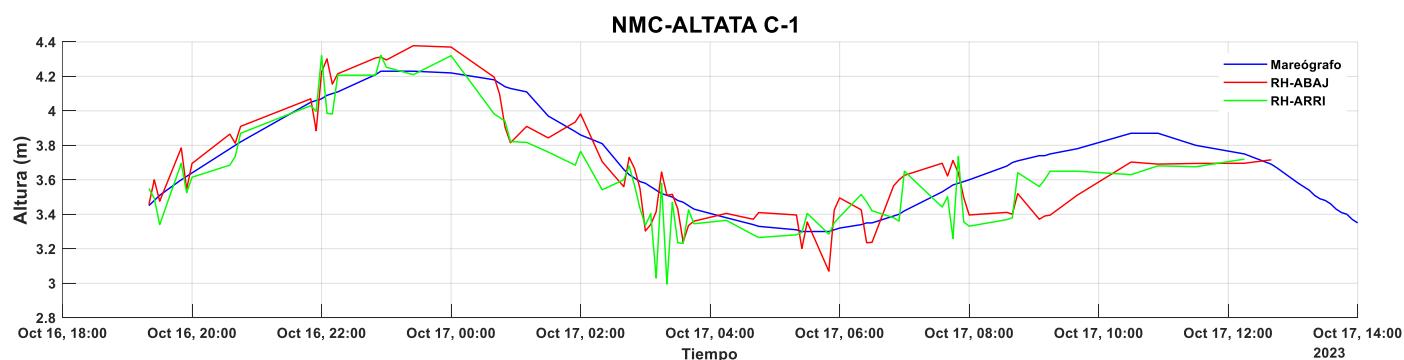


Figura 25. Comparativa de tendencia de alturas GNSS/Mareográficas respecto al tiempo, campaña uno.

En este sentido, se lleva a cabo un contraste estadístico de precisión entre las alturas del nivel del mar (GNSS-R), mediante correlación lineal para cada estación respecto al mareógrafo convencional (Figura 26), deduciendo que en ambas estaciones la dispersión de

los datos se encuentra en la misma dirección de la diagonal, con una correlación de 0.83 (83%) para la estación ARRI y un error medio cuadrático (RMSE) de 0.18 m. Mientras que para la estación ABAJ la correlación entre las mediciones es igual a 0.85 con un RMSE de 0.17 m.

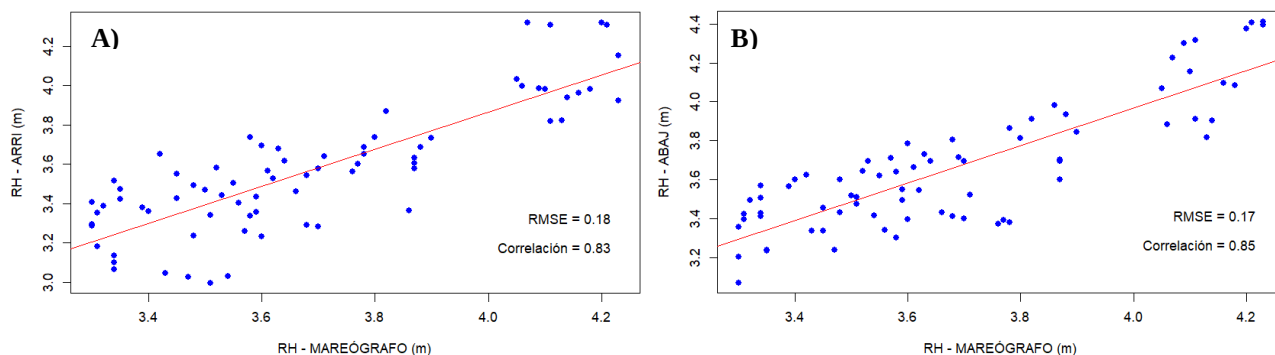


Figura 26. Correlación lineal de las mediciones del nivel de mar bajo la técnica GNSS-R respecto al mareógrafo convencional para la campaña uno, A) estación ARRI, B) estación ABAJ.

La tendencia de las mediciones para las campañas C2-5, se muestran en las Figuras 27, 29, 31 y 33 respectivamente. Se hace notar que en dichas campañas las mediciones del nivel del mar GNSS-R siguen la misma tendencia que las alturas registradas por el MC.

En la Figura 27, se aprecia el comportamiento de las mediciones mediante receptores de bajo costo, en la cual puede percibir que las tres estaciones siguen la tendencia mareográfica, sin embargo, se observan segmentos de sesgo para la estación BETI de ~ 3 h, esto debido a la desconexión entre el receptor y sistema de almacenamiento, pudiendo ser atribuidos a errores en el software de manipulación. En este contexto, en la campaña C-2 (Figura 28), se tiene una correlación de $R = 0.97$, $R = 0.90$ y $R = 0.96$, en las estaciones ABAJ, ARRI y BETI respectivamente y errores medios cuadráticos de 0.07 m correspondientes a la estación ABAJ, 0.13 m para ARRI y 0.08 m para BETI.

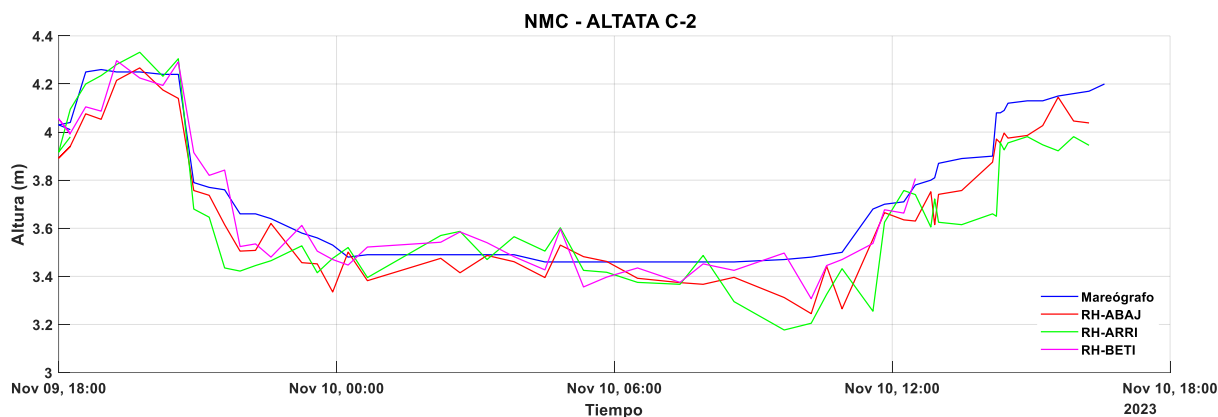


Figura 27. Tendencia de mediciones relativas del nivel del mar mediante GNSS-R y MC para la campaña dos.

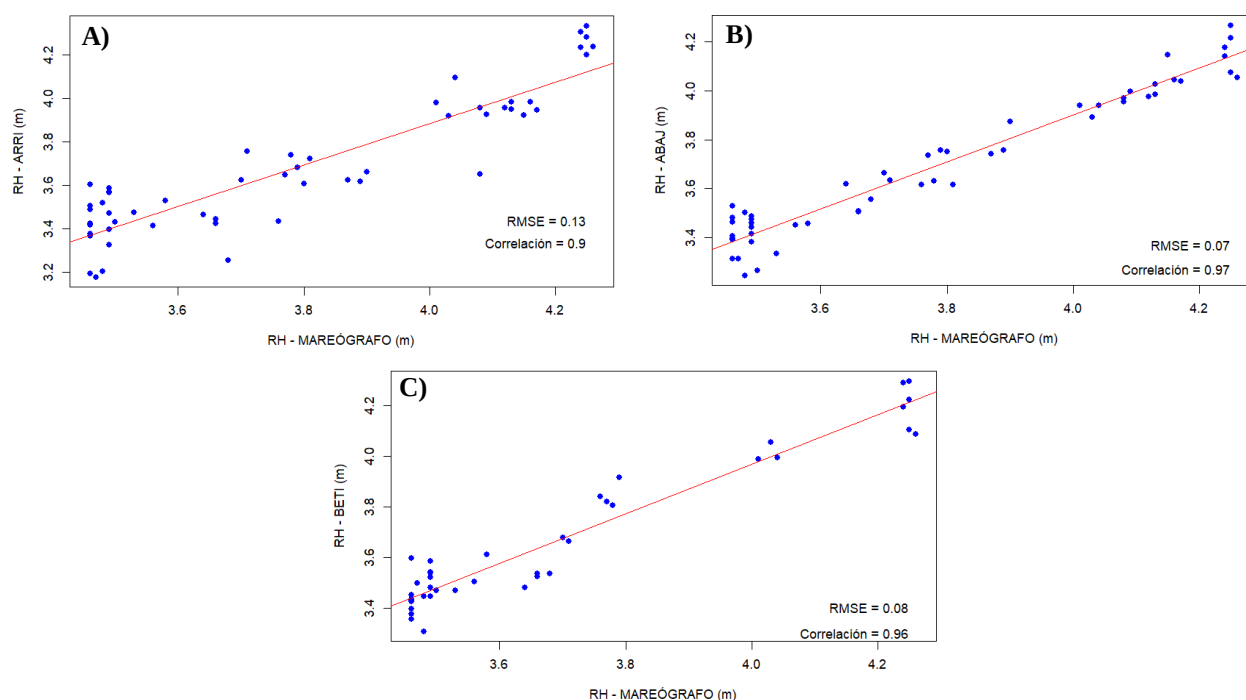


Figura 28. Correlación lineal de las mediciones del nivel de mar bajo la técnica GNSS-R respecto al mareógrafo convencional para la campaña dos, A) estación ARRI, B) estación ABAJ y C) estación BETI.

La Figura 29, muestra gráficamente la tendencia de las observaciones respecto al tiempo, siendo similar a la tendencia mareográfica, en esta, se puede observar que las variaciones entre estaciones son relativamente pequeñas, quedando demostrado en la estadística de

correlación lineal (Figura 30), con valores de $R= 0.95$, $R= 0.91$ y $R= 0.92$ para ABAJ, ARRI y BETI correspondientemente, y con errores medios cuadráticos (RMSE) de 0.08 m, 0.11 m y 0.10 m respectivamente.

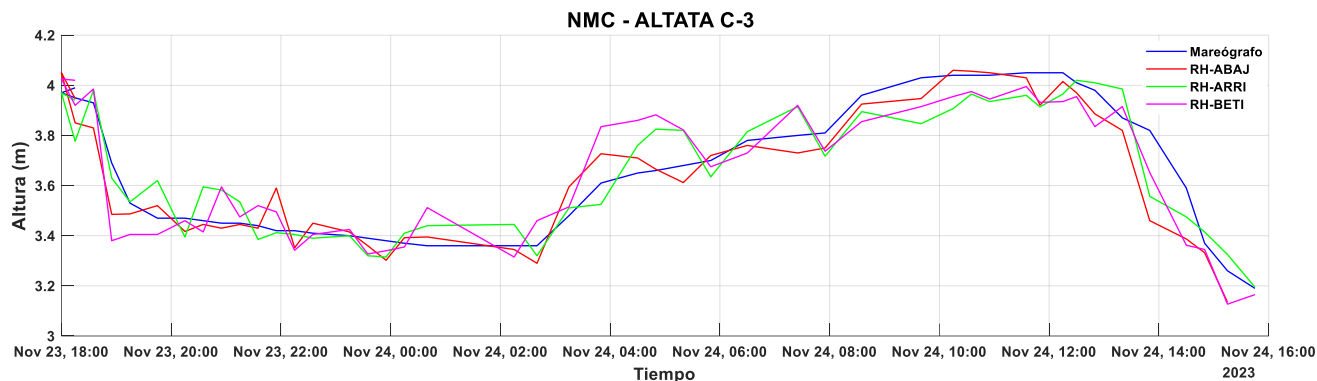


Figura 29. Tendencia de mediciones relativas del nivel del mar mediante GNSS-R y MC para la campaña tres.

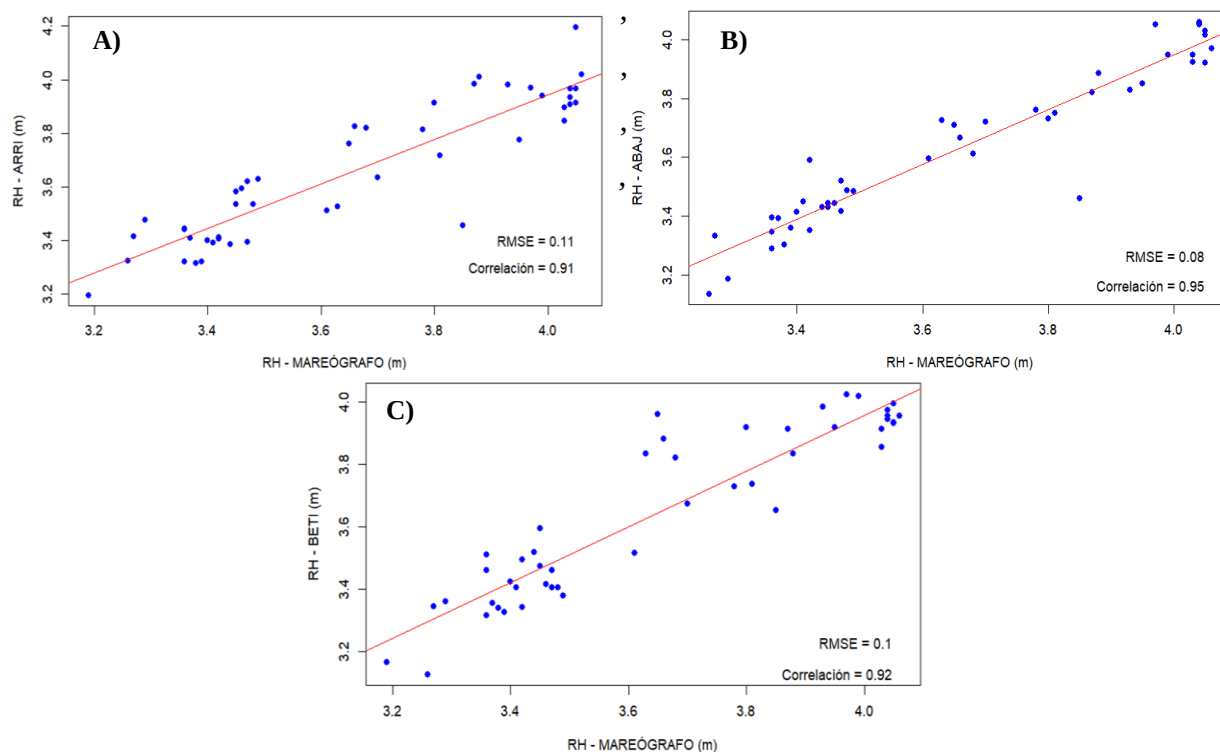


Figura 30. Correlación lineal de las mediciones del nivel de mar bajo la técnica GNSS-R respecto al mareógrafo convencional para la campaña tres, A) estación ARRI, B) estación ABAJ y C) estación BETI.

Por otro lado, la campaña C-4 tiene la mayor inconsistencia entre las mediciones especialmente en la estación ARRI, dado que esta presenta variaciones abruptas y sesgos entre intervalos de medición, provocados por alteraciones en el entorno de la antena. Por consiguiente, las estaciones restantes se comportaron de manera similar, presentando diferencias significativas entre mediciones, ya que las antenas se encuentran en la misma ubicación, sin embargo, estas siguen la tendencia mareográfica de referencia, lo cual puede observarse en la Figura 31.

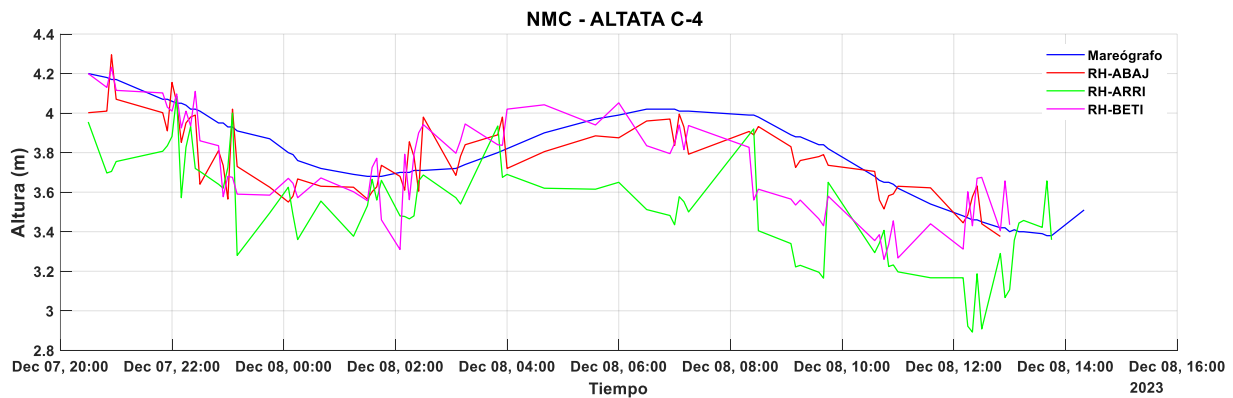


Figura 31. Tendencia de mediciones relativas del nivel del mar mediante GNSS-R y MC para la campaña cuatro.

Así mismo, las métricas de correlación entre mediciones pueden verse representadas en la Figura 32. En la cual se puede percibir que con respecto al mareógrafo la estación ARRI tiene un índice de correlación igual a 0.61 y un RMSE de 0.21 m, viéndose reflejado el comportamiento de las mediciones anteriormente descrito, mientras que las estaciones ABAJ y BETI presentan valores de $R = 0.80$ y $R = 0.65$ individualmente, con errores medios cuadráticos de 0.11 m y 0.19 m respectivamente. Los resultados anteriores pueden ser atribuidos al entorno, ya que las embarcaciones de pesca pasan relativamente cerca de las antenas lo que causa oleaje y variaciones pronunciadas y a su vez ruido en las mediciones.

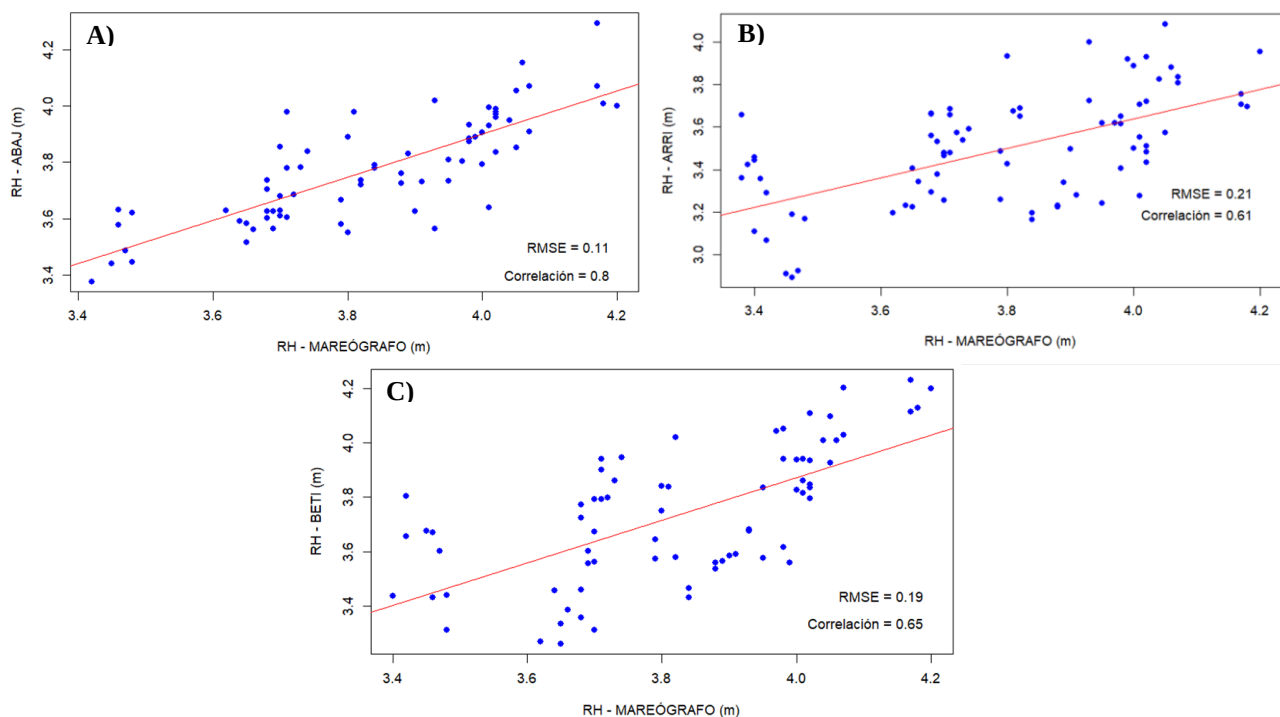


Figura 32. Correlación lineal de las mediciones del nivel de mar bajo la técnica GNSS-R respecto al mareógrafo convencional para la campaña cuatro, A) estación ARRI, B) estación ABAJ y C) estación BETI.

Por otro lado, las alturas de la campaña cinco (Figura 33), mostraron seguir la tendencia de las alturas mareograficas, sin embargo, en ambas estaciones (ARRI y ABAJ) se presentan sesgos entre los datos, estos pueden identificarse en las secciones donde se cambia abruptamente de altura.

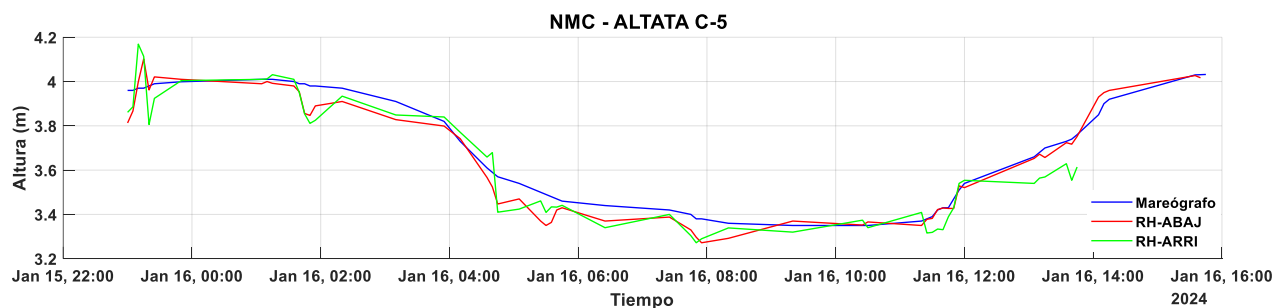


Figura 33. Tendencia de mediciones relativas del nivel del mar mediante GNSS-R y MC para la campaña cuatro.

En este sentido, se realizó el estadístico de correlación, se pueden observar las variaciones para las estaciones ABAJ con correlación igual a $R = 0.96$ y un error medio cuadrático de RMSE 0.07 m (Figura 34 A) y ARRI con $R = 0.91$ y RMSE 0.08 m (Figura 34 B). Quedando en evidencia la pérdida de datos de ~ 6 h, esto debido a un corte de energía en el sistema de almacenamiento (computadora).

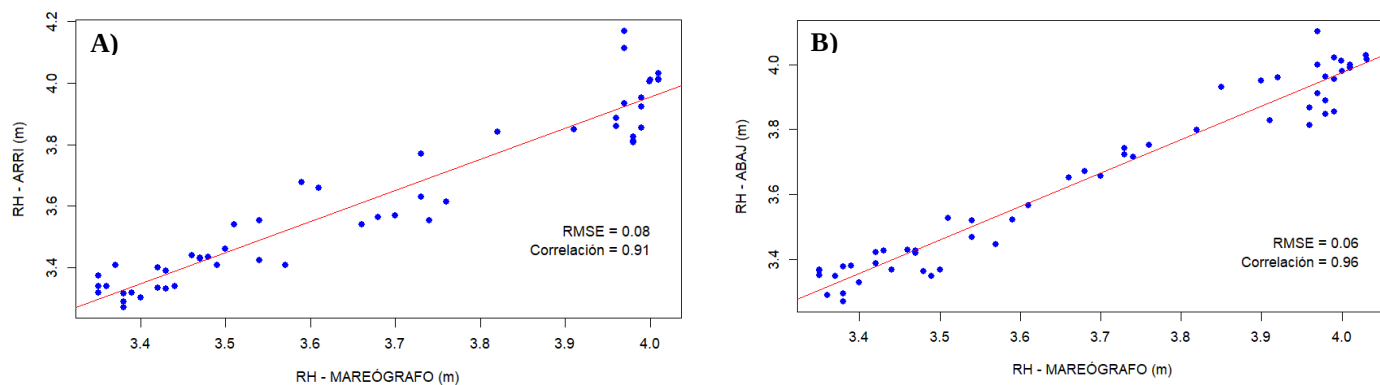


Figura 34. Correlación lineal de las mediciones del nivel de mar bajo la técnica GNSS-R respecto al mareógrafo convencional para la campaña cinco, A) estación ARRI, B) estación ABAJ.

4.3 Prueba Estadística

Una vez realizada la comparativa entre mediciones, se evalúa los cambios o variaciones del nivel del mar entre observaciones, es decir, si las variaciones son significativamente diferentes respecto a la tendencia mareográfica, esto con el objetivo de validar los resultados anteriores. Con base en lo anterior, se plantea la prueba estadística para la razón de las varianzas de las mediciones, por lo tanto, la prueba de hipótesis para comparar las proporción de las varianza para dos conjuntos de datos está dada por:

$$H_0 : \frac{S_1^2}{S_2^2} = 1 \quad (45)$$

$$H_a : \frac{S_1^2}{S_2^2} \neq 1 \quad (46)$$

Donde, H_0 es la hipótesis nula, H_a hipótesis alternativa, S_1^2 y S_2^2 son las varianzas de los dos conjuntos de datos a comparar. La prueba estadística ($F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$) es aplicada para cada una de las estaciones en cada campaña. La hipótesis nula se acepta si cumple con la siguiente afirmación:

$$F_i < F_{(\alpha/2, v_{1i}, v_{2i})} \quad (47)$$

Donde, F_i es el valor del estadístico para cada estación y $F_{(\alpha/2, v_{1i}, v_{2i})}$ es el valor de F ubicado en el área $\alpha/2$ con grados de libertad en el numerador v_{1i} y v_{2i} en el denominador obtenido de la tabla de distribución de Fisher, donde α corresponde al nivel de significancia. Con base en lo anterior, se establecen los intervalos de confianza (IC) $(1 - \alpha)$ con el objetivo de evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos, los cuales están dados de la siguiente manera (Ghilani, 2011):

$$\frac{1}{F_{\alpha/2, v_1, v_2}} \frac{S_1^2}{S_2^2} < \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} < \frac{S_1^2}{S_2^2} F_{\alpha/2, v_2, v_1} \quad ; \text{ donde, } \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1 \quad (48)$$

En este contexto se llevó a cabo la prueba estadística para cada estación por campaña, para determinar si existe una diferencia significativa entre las varianzas de los dos conjuntos de medición con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La Tablas 14, muestra las estadísticas generales del conjunto de mediciones GNSS-R y mareográficas por campaña.

Tabla 14. Estadísticas generales para los conjuntos de mediciones por campaña.

Estadísticas por estación/campaña				
Estación	Media ($\bar{y}$)	Varianza (S_t^2)	stDev (S)	Campaña
MAREÓGRAFO	3.652873563	0.07302048	0.2717895	1
RH-ABAJ	3.663135135	0.1006715	0.3194535	
RH-ARRI	3.565739726	0.10188033	0.3213959	
MAREÓGRAFO	3.791272727	0.08498565	0.2942099	2
RH-ABAJ	3.692814815	0.08156497	0.2882775	
RH-ARRI	3.677277778	0.09316768	0.3080999	
RH-BETI	3.6732	0.08158936	0.2892774	
MAREÓGRAFO	3.654042553	0.07670068	0.279943	
RH-ABAJ	3.63673913	0.07010158	0.2676927	3
RH-ARRI	3.655957447	0.06460868	0.2569304	
RH-BETI	3.649361702	0.07151427	0.2703127	
MAREÓGRAFO	3.787125	0.05225548	0.2300368	
RH-ABAJ	3.77484507	0.03501233	0.1884476	4
RH-ARRI	3.494468354	0.06828574	0.2629852	
RH-BETI	3.73390411	0.06052263	0.247716	
MAREÓGRAFO	3.710344828	0.06676195	0.26064	
RH-ABAJ	3.641842105	0.08724452	0.2979974	5
RH-ARRI	3.615173077	0.07743872	0.2809931	

Así mismo, la Tabla 15 evidencia los resultados obtenidos para la campaña C-1 , en la cual se observa que el estadístico $F = 0.72$ calculado para la estación ABAJ (Figura 35) cumple con el criterio de aceptación ya que el valor calculado es menor que su valor tabulado ($0.72 < 1.565$), en el mismo sentido, se obtuvo para la estación ARRI con $F = 0.71$ (Figura 37), siguiendo el mismo criterio de aceptación ($0.71 < 1.569$). Sin embargo, para la decisión de la prueba es necesario calcular el valor de P en función de la distribución acumulativa inversa de la distribución F, ya que evalúa la H_0 , bajo el siguiente criterio:

$P > \alpha$: se acepta la hipótesis nula

$P \leq \alpha$: se rechaza la hipótesis nula

Dado que, los valores de P obtenidos son mayores al nivel de significancia establecido, en ambas estaciones se acepta la hipótesis nula (H_0), porque no hay razón estadística que demuestre que las varianzas de las mediciones GNSS-R sean significativamente diferentes a la varianza de referencia de los datos mareográficos con un 5% de probabilidad de cometer el error tipo I.

Tabla 15. Resultados de la prueba estadística para la campaña uno.

Estación	F (tabulado)	F (calculado)	IC-Inferior	IV-Superior	P- Value	Desición	Campaña
RH-ABAJ	1.56582408	0.7253342	0.46228	1.1242	0.149	Se acepta H_0	1
RH-ARRI	1.56906625	0.71672794	0.4557	1.1121	0.1362	Se acepta H_0	

Con base en los intervalos de confianza anteriores podemos afirmar que la relación de las varianzas está dentro del rango $(1/F_{\alpha/2, v_1, v_2} \cdot S_1^2/S_2^2 < 1 < S_1^2/S_2^2 \cdot F_{\alpha/2, v_2, v_1})$, con un nivel de confianza del 95%, para ambas estas estaciones.

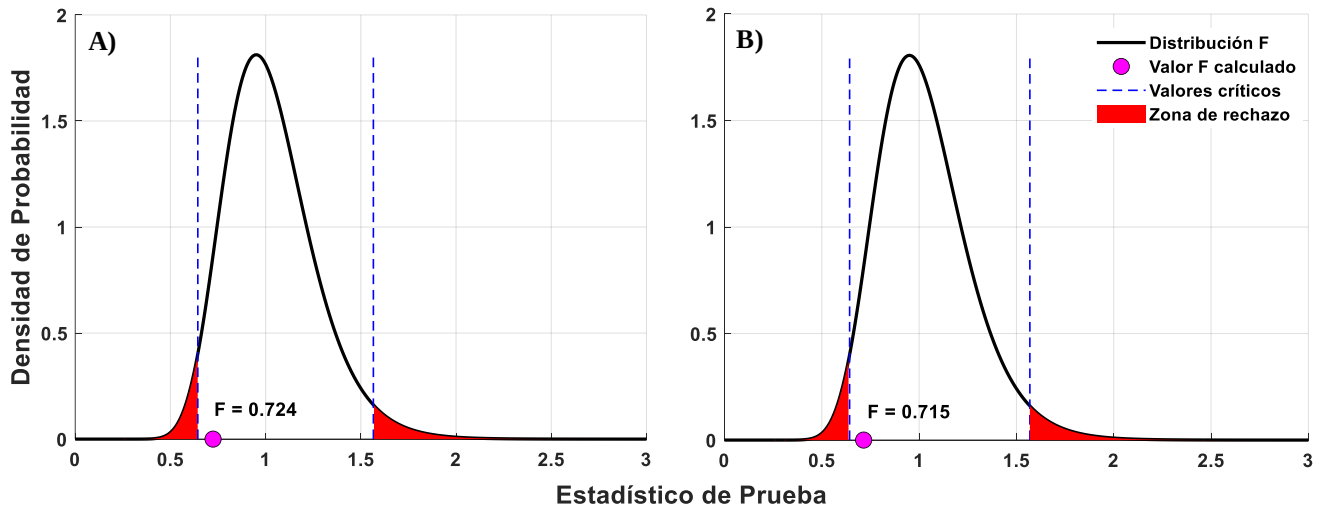


Figura 35. Representación gráfica del estadístico de prueba para la campaña uno, A) estación ABAJ y B) estación ARRI.

Para la campaña dos (C-2), el estadístico de prueba confirma consistencias entre las varianzas, dado que estas no son significativamente diferentes, es decir, no hay evidencia estadística suficiente para rechazar las hipótesis nulas para cada estación, con valores para F_i de 1.04, 0.91 y 1.04 para las estaciones ABAJ, ARRI y BETI respectivamente (Figura 36).

La Tabla 16, contiene los valores del estadístico de prueba así como, los valores obtenidos para los intervalos de confianza a un 95% de confiabilidad. En este sentido, se observa que F_i se encuentra dentro del rango de aceptación, y el valor de P es mayor que el nivel de significancia, el cual nos indica que los datos son consistentes con la H_0 .

Tabla 16. Resultados de la prueba estadística para la campaña dos.

Estación	F	F_i	IC-Inferior	IC-Superior	P	Decisión	Campaña
RH-ABAJ	1.7201	1.0416	0.605	1.789	0.882	Se acepta H_0	2
RH-ARRI	1.7201	0.9118	0.53	1.566	0.736	Se acepta H_0	
RH-BETI	1.8297	1.0344	0.565	1.839	0.922	Se acepta H_0	

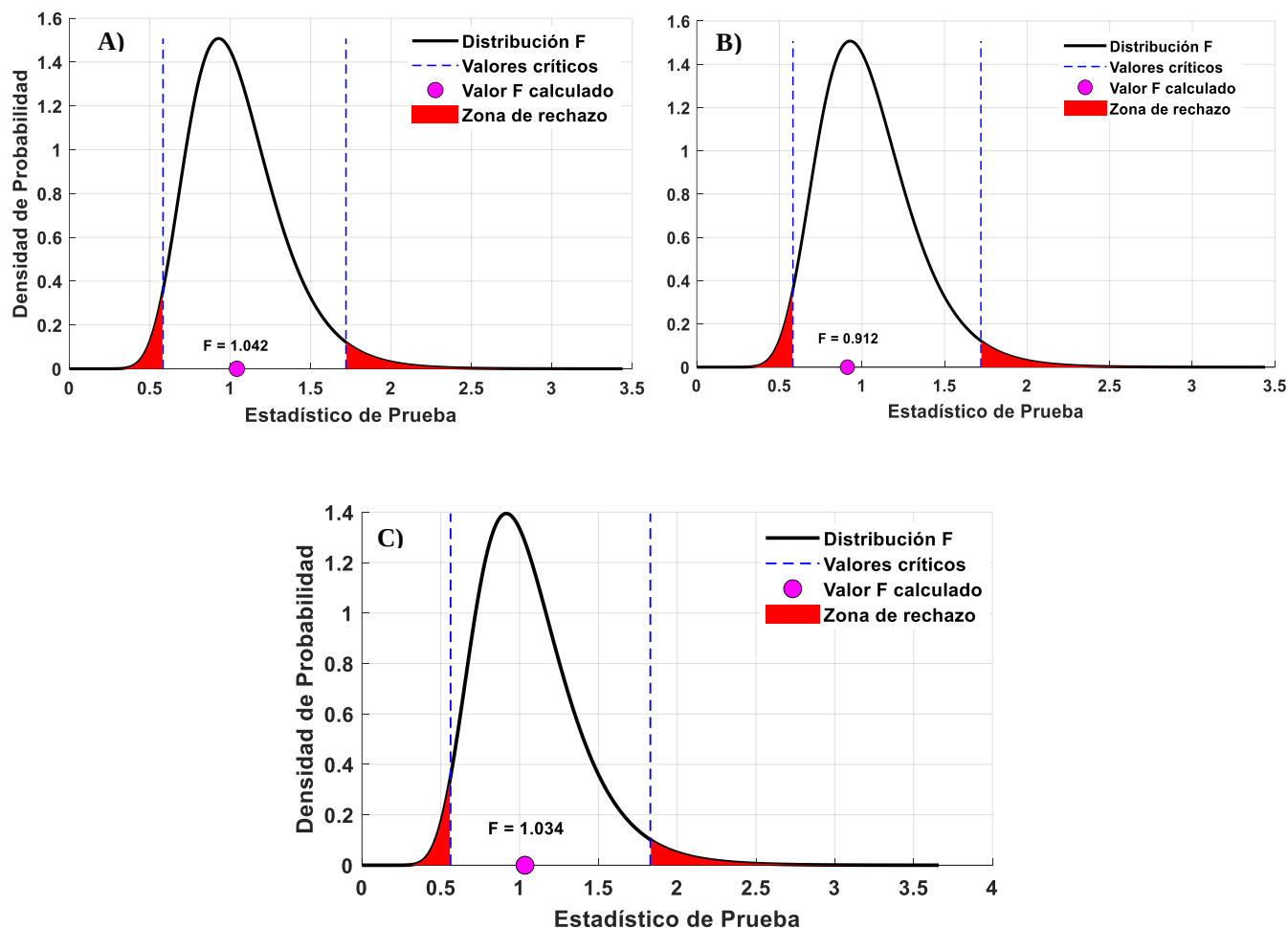


Figura 36. Representación gráfica del estadístico de prueba para la campaña dos, A) estación ABAJ, B) estación ARRI y C) estación BETI.

En las campañas posteriores, tres (C-3), cuatro (C-4) y cinco (C-5), se aplicó estadístico de prueba bajo las mismas condiciones de aceptación para la hipótesis nula, obteniendo resultados de $F_i < F$ para C-3 (Figura 37) de 1.096, 1.18 y 1.07 para las estaciones ABAJ, ARRI y BETI, respectivamente y valores de P superiores al nivel de significancia, así mismo, se comprobó que el valor del estadístico se encuentra dentro de los intervalos de confianza ($[IC\text{-inferior} < F_i < IC\text{-superior}]$) para cada estación, por lo tanto la H_0 es aceptada (Tabla 17).

Tabla 17. Resultados de la prueba estadística para la campaña tres.

Estación	F	F_i	IC-Inferior	IC-Superior	P	Decisión	Campaña
RH-ABAJ	1.803	1.094	0.605	1.968	0.764	Se acepta H_0	3
RH-ARRI	1.795	1.187	0.661	2.131	0.563	Se acepta H_0	
RH-BETI	1.795	1.072	0.597	1.925	0.813	Se acepta H_0	

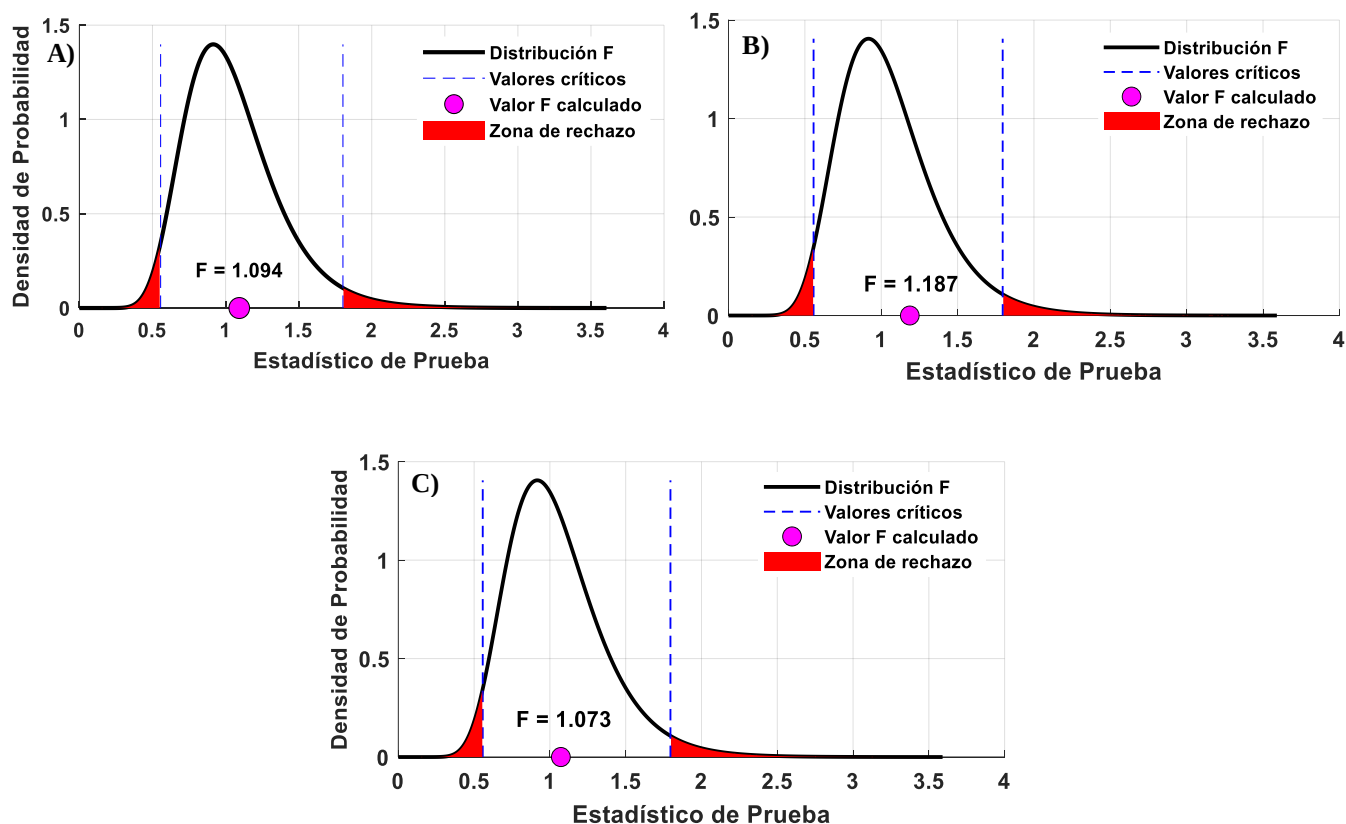


Figura 37. Representación gráfica del estadístico de prueba para la campaña tres, A) estación ABAJ, B) estación ARRI y C) estación BETI.

La Figura 38, muestra los resultados para la campaña C-4, con valores estadísticos para la estación ABAJ de $F = 1.49$, ARRI $F = 0.76$ y BETI con $F = 0.86$, siendo estos menores que su valor tabulado, por lo que se encuentra en la región de aceptación, además, $P > \alpha$ para las tres estaciones y el estadístico de prueba se encuentra en el rango de los intervalos de confianza (Tabla 18), por lo tanto, no existen pruebas suficientes para rechazar la hipótesis nula, ya que las varianzas no son significativamente diferentes.

Tabla 18. Resultados de la prueba estadística para la campaña cuatro.

Estación	F	F_i	IC-Inferior	IC-Superior	P	Decisión	Campaña
RH-ABAJ	1.586	1.490	0.939	2.349	0.09	Se acepta H_0	4
RH-ARRI	1.562	0.765	0.489	1.194	0.237	Se acepta H_0	
RH-BETI	1.580	0.863	0.545	1.356	0.519	Se acepta H_0	

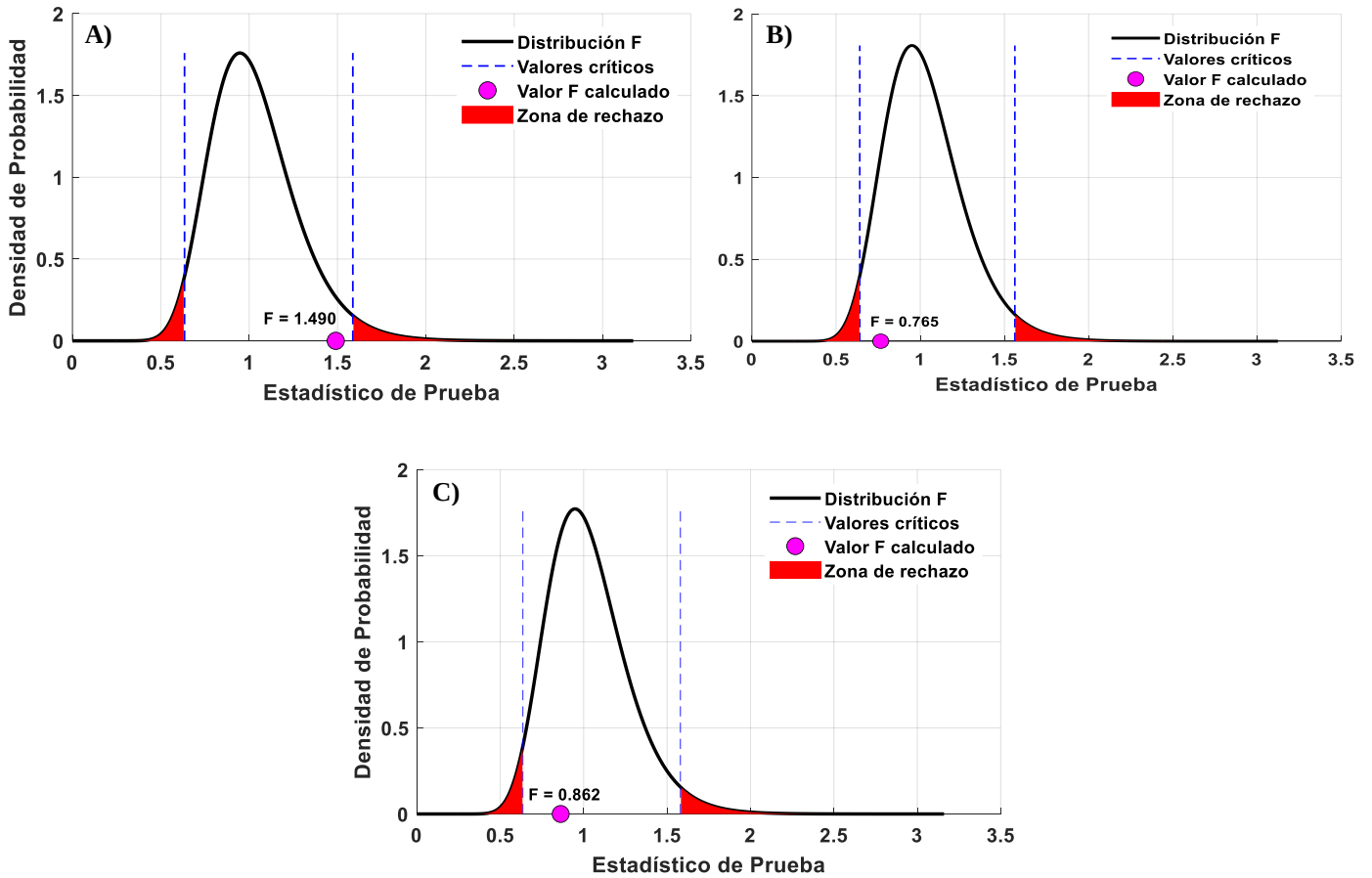


Figura 38. Representación gráfica del estadístico de prueba para la campaña cuatro, A) estación ABAJ, B) estación ARRI y C) estación BETI.

Por consiguiente, en la campaña C-5, es posible identificar que el estadístico F_i de cada estación es menor que el valor tabulado en la distribución F (Figura 39), y estos se encuentran dentro de los rangos de los IC indicando que no hay diferencia significativa entre las varianzas comparadas a un 95% de confiabilidad. Con base en lo anterior, la Tabla 19 contiene los resultados de la prueba estadística, misma que, acepta la hipótesis nula, ya que cumple con los criterios de aceptación, dado que, el valor de P es superior al nivel de significancia, sin embargo, la estación ABAJ presenta el valor más pequeño con $P = 0.09$, esto puede indicar que a pesar de que se acepta H_0 , puede ser un resultado ambiguo dependiendo de la naturaleza de los datos, es decir se puede atribuir al azar.

Tabla 19. Resultados de la prueba estadística para la campaña cinco.

Estación	F	F_i	IC-Inferior	IC-Superior	P	Decisión	Campaña
RH-ABAJ	1.694	0.764	0.451	1.294	0.316	Se acepta H_0	5
RH-ARRI	1.722	0.860	0.499	1.470	0.579	Se acepta H_0	

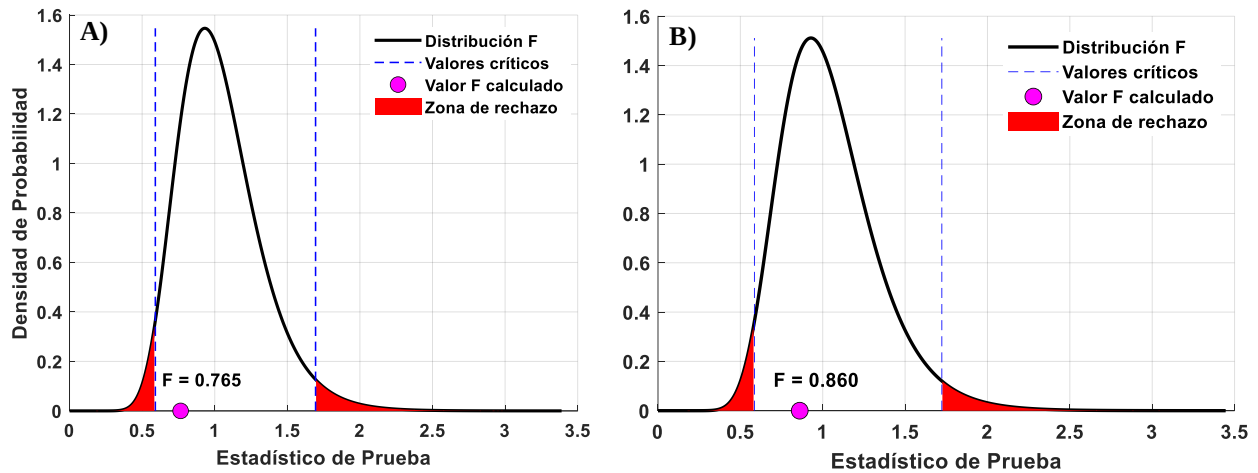


Figura 39. Representación gráfica del estadístico de prueba para la campaña cinco, A) estación ABAJ, B) estación ARRI.

CAPÍTULO V

Discusión y conclusión

Con base en el análisis de los datos obtenidos mediante las mediciones del nivel del mar costero a través de receptores GNSS de bajo costo, se ha evaluado la factibilidad de uso de dichos receptores, bajo la técnica de reflectometría GNSS (GNSS-R) basada en el análisis de las señales reflejadas sobre la superficie reflectante (mar), estas señales son consideradas como ruido en el posicionamiento geodésico, sin embargo, dada su naturaleza oscilatoria proporcionan información sobre la potencia y característica de la intensidad de las señales recibidas por las antenas GNSS (Larson et al., 2017). En este sentido, se obtuvieron datos de tres antenas receptoras, conectadas individualmente a tres diferentes receptores denominados de bajo costo (Low-Cost), llevando a cabo el análisis únicamente para la constelación GPS.

Dada la arquitectura tradicional de un mareógrafo GPS, se diseñaron dos casos experimentales, el primero consta de dos antenas de parche orientadas al zenit (RHCP) y al nadir (LHCP), con el objetivo de captar las señales directas y señales reflejadas, el segundo se diseñó únicamente con una antena de bajo costo orientada al zenit (RHCP), cuyos componentes internos se encuentran dentro de las especificaciones recomendadas por el servicio GNSS internación (IGS, 2015). Derivado de lo anterior, se analizaron datos de cinco campañas diferentes con un periodo de medición de 24 horas con la finalidad de evaluar la consistencia de las mediciones, limitando la recuperación de señales a una máscara de elevación $\sim 25^\circ$, a diferencia del estudio realizado por Purnell et al., (2021) en el cual utiliza ángulos de elevación de hasta $\sim 50^\circ$, en este contexto, los datos muestran la tendencia sinusoidal respecto al tiempo, con una zona de reflectancia en un rango de azimut de 120° a 295° ya que cuando la marea se encuentra en su punto más bajo deja expuesta la arena, lo que puede ocasionar un ruido significativo en las mediciones. En este sentido, se obtienen los RMS de las alturas iniciales, los cuales se encuentran significativamente grandes, con valores de hasta 0.48 m para las campaña C-1 y C-2, bajando considerablemente después del ajuste y una vez aplicadas las correcciones a la tasa de altura, así como de Inter-frecuencia dejando como resultado RMS aproximados de entre 2 cm y 3.1 cm, este último obtenido en campaña C-1.

Las alturas finales se compararon con las observaciones obtenidas mediante un mareógrafo convencional, cuyo intervalo de muestreo es de 1min, sin embargo, los datos proporcionados por la secretaria de marina (SEMAR) están diezmados a 5 min, mientras que la tasa de muestreo de los receptores de bajo costo es 1 seg, por lo que fue necesario diezmar las observaciones, esto representa una pérdida de datos considerable que puede influir en las estadísticas de variación, es decir en la pérdida de precisión. Los resultados muestran correlaciones aceptables con una mínima de 0.61 en la campaña C-4 y una máxima de 0.97 en la campaña C-2, los RMSE oscilan entre 0.07 cm y los 2.1 cm, siendo congruentes con los resultados obtenidos por Purnell et al., (2021), el cual evaluó el uso de tres antenas de bajo costo situadas en el mismo lugar, comparando los resultados con un mareógrafo estándar, obteniendo RMSE de entre ~ 0.69 cm y 1.16 cm, así mismo, Fagundes et al., (2021) evaluó un año de mediciones GNSS-R con un dispositivo de bajo costo, teniendo como resultado una correlación de 0.98 y un RMSE de 2.9 cm respecto a un mareógrafo de radar.

En relación a las antenas de bajo costo, se demuestra que en combinación con receptores de bajo costo son capaces de seguir la tendencia de las mediciones del nivel del mar proporcionadas por un MC. En este sentido, Purnell et al., (2021) demuestra que en el contexto de reflectometría, las antenas de bajo costo tienen mejor rendimiento a comparación de las antenas de orden geodésico, ya que es posible obtener mediciones de la altura del nivel del mar en máscaras de elevación $> 30^\circ$, además, se muestran como una alternativa a las antenas de geodésicas, dado su costo, portación y manipulación. Por otro lado, con la finalidad de validar los resultados obtenidos y destacar la presencia de errores sistemáticos en las observaciones, se llevó a cabo una prueba estadística, la cual plantea como hipótesis nula (H_0) la igualdad entre las varianzas de las mediciones (GNSS-R y mareográficas), para ello se usó la prueba F de Fisher, ya que se cumple con las condiciones necesarias, es decir, los datos provienen de muestras independientes y presentan una distribución normal. Los resultados de las pruebas confirman la calidad de los datos GNSS-R, ya que para todas las campañas se aceptan las hipótesis nulas con un nivel de confianza del 95%. Dado que, los datos se encuentran en las zonas de aceptación es decir el valor de estadístico F calculado es menor que su valor F tabulado.

Por lo tanto, con base a los resultados anteriores se puede concluir que, los receptores de bajo costo son capaces de recuperar mediciones del nivel del mar con precisiones en el orden de ~ 3 cm, siguiendo la tendencia de las mediciones mareográficas bajo la técnica de reflectometría GNSS, implementando la metodología planteada, mientras que en estudios anteriores en el estado del arte se alcanzan precisiones de hasta 50 cm con receptores orden geodésico. Así mismo, se comprueba que las antenas de bajo costo se muestran como una alternativa a las antenas de orden geodésico, ya que son capaces de captar las señales reflejadas en diferentes ángulos de elevación. En este sentido, se cumplen con los objetivos planteados al inicio del trabajo:

1. **Evaluación del rendimiento de los receptores de bajo costo:** se confirma que los receptores de bajo costo son capaces de obtener alturas relativas del nivel del mar bajo la técnica de reflectometría GNSS, además, las diferencias entre las variaciones de las mediciones de entre las antenas de parche son mínimas de ~ 2 mm.
2. **Comparación de resultados respecto al mareógrafo convencional (MC):** se realizó la comparativa entre las soluciones generadas mediante GNSS de bajo costo como las de un mareógrafo convencional, obteniendo resultados favorables, es decir, se obtuvieron variaciones en el orden centimétrico entre ambas técnicas, presentándose la mayor variación en la campaña de medición cuatro con una correlación de 0.61 y un error medio cuadrático de 2.1 cm.
3. **Evaluación de resultados mediante pruebas de hipótesis:** para la validación de resultados se llevó a cabo una prueba de hipótesis para cada estación en cada campaña de medición, utilizando la distribución F de Fisher con un nivel de significancia de 0.05, en dichas pruebas se establece la igualdad o desigualdad estadística entre las varianzas de los conjuntos de datos teniendo como decisión, la aceptación de dichas pruebas ya que estas cumplen con el criterio de aceptación a un 95 % de confiabilidad.

4.1 Trabajo futuro

Con base en nuestros resultados, se plantean nuevos trabajos a futuro, como lo son:

1. Implementación y colocación de un mareógrafo GNSS de bajo costo con los componentes necesarios para obtener periodos de medición ininterrumpidos, es decir, obtención de series temporales superiores a los 10 meses, con el objetivo de implementar un modelo de predicción de mareas.
2. Realizar mediciones del nivel del mar para un ciclo lunar completo, esto con la finalidad de realizar análisis y cálculos de armónicos de mareas para una mayor descripción del comportamiento estas.
3. Análisis de mareas mediante la obtención de datos simultáneos de antenas de bajo costo situadas en puntos diferentes, comparando los resultados con la técnica de altimetría satelital (SAR), entre otros.

4.2 Productos generados

Congresos

Unión Geofísica Mexicana (RAUGM 2022) - reunión anual 2022. Participación modalidad cartel “Evaluación del posicionamiento preciso a través de receptores GPS LEA-6T, NEO-M8T y ZED-F9P de bajo costo” (31/10/2022).

Congreso Nacional de Estudiantes de Geomática, Geodésia y Geoinformática 7^{ma} edición. Participación modalidad cartel “Evaluación del posicionamiento relativo utilizando diferentes modelos GNSS de bajo costo: NEO-M8T, NEO-6T Y ZED-F9P” (22/05/2024).

Artículo

Bojórquez-Pacheco N, Romero-Andrade R, Trejo-Soto ME, Hernández-Andrade D, Nayak K, Vidal-Vega AI, Arana-Medina AI, Sharma G, Acosta-González LE, Serrano-Agila R (2023). Performance evaluation of single and double-frequency low-cost GNSS receivers in static relative mode. Geod Vestn 67(02):235–248.<https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2023.02.235-248>



OCENA DELOVANJA ENO IN DVOFREKVENČNIH NIZKOCENOVNIH SPREJE- MNIKOV GNSS V STATIČNEM RELATIVNEM NAČINU

PERFORMANCE EVALUATION OF SINGLE AND DOUBLE- FREQUENCY LOW-COST GNSS RECEIVERS IN STATIC RELATIVE MODE

Naciel Bojorquez-Pacheco, Rosendo Romero-Andrade, Manuel Edwiges Trejo-Soto, Daniel Hernández-Andrade, Karan Nayak, Ana Isela Vidal-Vega, Anibal Israel Arana-Medina, Gopal Sharma, Luis Enrique Acosta-Gonzalez, Richard Serrano-Agila

UDK: 528.28:528.3:528.5
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.04
Prispelo: 20. 8. 2022
Sprejeto: 30. 5. 2023

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2023.02.235-248
PROFESSIONAL ARTICLE
Received: 20. 8. 2022
Accepted: 30. 5. 2023

IZVLEČEK

Z napredkom nizkocenovnih sprejemnikov GNSS z vgrajenimi sodobnimi zmogljivostmi se je odprlo še eno okno za raziskovanje učinkovitosti različnih nizkocenovnih sprejemnikov s pregledi njihove zmogljivosti in primernosti za različne geodetske namene. Glavni cilj te študije je oceniti učinkovitost določanja položaja eno- in dvofrekvenčnih sprejemnikov GNSS v kombinaciji z geodetskimi antenami v statičnem relativnem načinu glede na mehiške predpise. Zabeležena opazovanja so bila obdelana s statično relativno metodo z navezavo na permanentno postajo mehiškega nacionalnega instituta za statistiko in geografijo INEGI. Rezultati raziskave, izvedene na razdalji 4 in 33 kilometrov od permanentne postaje, kažejo podobno natančnost za vse nizkocenovne sprejemnike. Za nizkocenovne sprejemnike GNSS NEO-M8T, NEO-6T in ZED-F9P so dobljene rešitve dosegle milimetre horizontalne natančnosti z uporabo geodetske antene. Z modelom ZED-F9P je mogoče doseči visoko natančnost na večjih oddaljenostih od permanentne postaje. Pri vertikalni komponenti pa se pokaže, da je v vseh primerih slabša kot pri uporabi geodetskih sprejemnikov. Če se ne zahteva višja natančnost od petih centimetrov, lahko uporabimo tudi nizkocenovne sprejemnike GNSS.

ABSTRACT

The advancement of low-cost GNSS receivers with modern built-up characteristics has opened a new window to investigate the performance of various low-cost receivers with an outlook on their performance and suitability for varied geodetic purposes. The main objective of this study is to evaluate the positioning performance of single and double-frequency GNSS receivers in combination with geodetic antennas in static relative mode regarding Mexican regulations. The recorded observations were processed by a static relative method including the CORS station from the National Institute of Statistics and Geography in Mexico (INEGI). The results of the survey conducted at a distance of 4 and 33 km from CORS station show similar accuracy for all low-cost receivers. For low-cost GNSS receivers NEO-M8T, NEO-6T, and ZED-F9P the solutions that were obtained reached mm in horizontal precision using a geodetic grade antenna. Similarly, the ZED-F9P model was proved at a long distance from the CORS station and presents high precision. Regarding the vertical component, in all cases where the GGM10 model was included, the vertical component is not allowed to use for topography or geodetic works, however, the horizontal component where mm precision was achieved is allowed for different highly precision survey works.

KLJUČNE BESEDE

statična relativna metoda, GNSS, nizkocenovni sprejemniki

KEY WORDS

static relative method; GNSS; low-cost receivers

Naciel Bojorquez-Pacheco, Rosendo Romero-Andrade, Manuel Edwiges Trejo-Soto, Daniel Hernández-Andrade, Karan Nayak, Ana Isela Vidal-Vega, Anibal Israel Arana-Medina, Gopal Sharma, Luis Enrique Acosta-Gonzalez, Richard Serrano-Agila | OCENA DELOVANJA ENO IN DVOFREKVENČNIH NIZKOCENOVNIH SPREJE-MNIKOV GNSS V STATIČNEM RELATIVNEM NAČINU | PERFORMANCE EVALUATION OF SINGLE AND DOUBLE-FREQUENCY LOW-COST GNSS RECEIVERS IN STATIC RELATIVE MODE | 235-248 |

Taller

Curso taller en Congreso Nacional de Estudiantes de Geomática, Geodésia y Geoinformática
7^{ma} edición. “Uso y manejo de equipos de bajo costo GNSS”.



Referencias

- Alejandro Egidio, Matthieu Delas, Miquel Garcia, & Marco Caparrini. (2009). *Non-space applications of gnss-r: from research to operational services. examples of water and land monitoring systems*. IEEE.
- Alonso-Arroyo, A., Camps, A., Park, H., Pascual, D., Onrubia, R., & Martín, F. (2015). Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R interference pattern technique: Results from a three-month field campaign. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3198–3209. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2371540>
- Antonov, J. I., Levitus, S., & Boyer, T. P. (2002). Steric sea level variations during 1957-1994: Importance of salinity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(12). <https://doi.org/10.1029/2001jc000964>
- Awange, J., & Kiema, J. (2019). *GNSS Reflectometry and Applications* (pp. 359–369). https://doi.org/10.1007/978-3-030-03017-9_24
- Bellone, T., Dabove, P., Manzano, A. M., & Taglioretti, C. (2016). Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 458–470. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.966867>
- Biagi, L., Grec, F., & Negretti, M. (2016). Low-cost GNSS receivers for local monitoring: Experimental simulation, and analysis of displacementsxs. *Sensors (Switzerland)*, 16(12). <https://doi.org/10.3390/s16122140>
- Broekman, A., & Gräbe, P. J. (2021). A low-cost, mobile real-time kinematic geolocation service for engineering and research applications. *HardwareX*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00203>
- Brown, J. M., Hibbert, A., Bricheno, L. M., Bradshaw, E., & Becker, A. E. (2022). Tides at a coast. En *A Journey Through Tides* (pp. 247–281). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90851-1.00019-4>

- Cartwright, D. E. (2000). *Tides : a scientific history*. Cambridge University Press.
- Cazenave, A., & Nerem, R. S. (2004). Present-day sea level change: Observations and causes. *Reviews of Geophysics*, 42(3). <https://doi.org/10.1029/2003RG000139>
- Chen, L., Chai, H., Zheng, N., Wang, M., & Xiang, M. (2023). Feasibility and performance evaluation of low-cost GNSS devices for sea level measurement based on GNSS-IR. *Advances in Space Research*, 72(11), 4651–4662. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.031>
- Chuvieco, E., & Salinero, E. C. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp. <https://books.google.com.mx/books?id=eJNLSgAACAAJ>
- Cina, A., & Piras, M. (2015). Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 497–514. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.889046>
- Cipollini, P., Calafat, F. M., Jevrejeva, S., Melet, A., & Prandi, P. (2017). Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges. En *Surveys in Geophysics* (Vol. 38, Número 1, pp. 33–57). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9392-0>
- Comisión Colombiana del Océano. (2016). *El océano en las ciencias naturales y sociales: Vol. Tercera edición* (3a ed.). www.cco.gov.co
- Eduardo Huerta, Mangiaterra Aldo, N. G. (2005). GPS Posicionamiento Satelital. En *Gustavo Noguera - 1a. ed. - Rosario: UNR Editora - Universidad Nacional de Rosario, 2005*.
- Fagundes, M. A. R., Mendonça-Tinti, I., Iescheck, A. L., Akos, D. M., & Geremia-Nievinski, F. (2021). An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: design and long-term validation towards sea-level altimetry. *GPS Solutions*, 25(2). <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01087-1>

- GeoMax, A. (2015). *Receptor GNSS Serie Zenith25 Pro Serie Zenith25 Pro*.
www.geomax-positioning.com
- Geremia-Nievinski, F., Hobiger, T., Haas, R., Liu, W., Strandberg, J., Tabibi, S., Vey, S., Wickert, J., & Williams, S. (2020). SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign. *Journal of Geodesy*, 94(8). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01387-3>
- Ghilani, C. D. (2011). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis* (Vol. 5).
- Gío-Argáez, R. (1999). *la formación de recursos humanos para la oceanografía y las ciencias del mar raúl gío-argáez*. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10401512.pdf>
- Gleason, S., Gommenginger, C., & Cromwell, D. (2010). Fading statistics and sensing accuracy of ocean scattered GNSS and altimetry signals. *Advances in Space Research*, 46(2), 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.023>
- Gong, X., Zhang, W., Wang, Q., Wang, F., Li, X., Sang, J., & Liu, W. (2022). Precise real-time navigation of the small TJU-1 satellite using GPS, GLONASS and BDS. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112090>
- GPS. (2020). *Global positioning system standard positioning service performance standard*.
- GPS. (2023). *Space Segment*. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations>
- Grenerczy, G., Kenyeres, A., & Fejes, I. (2000). Present crustal movement and strain distribution in Central Europe inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9), 21835–21846. <https://doi.org/10.1029/2000jb900127>
- Hamza, V., Stopar, B., & Sterle, O. (2021). *Receivers and Antennas*.

- Hauer, M. E., Evans, J. M., & Mishra, D. R. (2016). Millions projected to be at risk from sea-level rise in the continental United States. *Nature Climate Change*, 6(7), 691–695. <https://doi.org/10.1038/nclimate2961>
- Hegarty, C. J. (2012). *International Frequency Control Symposium Proceedings - GNSS signals*. doi:10.1109/FCS.2012.6243707
- Hernández-Andrade, D. (2021). *Análisis de calidad de las observaciones GPS y su impacto en el posicionamiento preciso. caso de estudio: redes geodésicas GNSS de libre acceso en México*. 1–17.
- Hernández-Andrade, D., Romero-Andrade, R., Cabanillas-Zavala, J. L., Ávila-Cruz, M., Trejo-Soto, M. E., & Vega-Ayala, A. (2020). Análisis de calidad de las observaciones GPS en estaciones de operación continua de libre acceso en México. *European Scientific Journal ESJ*, 16(33). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p332>
- Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., & Orús, R. (2007). Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(8). <https://doi.org/10.1029/2006JB004707>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite System GPS, GLONASS, Galileo and more*. Springer Wien New York.
- Hwang, C., Guo, J., Deng, X., Hsu, H. Y., & Liu, Y. (2006). Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: Improvement, limitation and the role of airborne gravity data. *Journal of Geodesy*, 80(4), 204–216. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0052-x>
- Ichikawa, K., Ebinuma, T., Konda, M., & Yufu, K. (2019). Low-cost GNSS-R altimetry on a UAV for water-level measurements at arbitrary times and locations. *Sensors (Switzerland)*, 19(5). <https://doi.org/10.3390/s19050998>

- IGS. (2015). IGS Site Guidelines. *Organization, July*, 1–9. <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>
- Isaí Robles Bravo (Instituto Nacional de Astrofísica, Ó. y, & Electrónica). (2020). *Interoperabilidad GNSS usando la Red Geodésica Activa*.
- Sanz Subirana J., J.M. Juan Zornoza, & M. Hernández-Pajares. (2011). *Transformaciones entre las coordenadas ECEF y ENU*. European Space Agency Fundameltal. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates
- Julio Capdevila. (2012). *El Sistema de Posicionamiento Global GPS*. <http://hdl.handle.net/11086.1/1258>
- Knight, P. J., Bird, C. O., Sinclair, A., & Plater, A. J. (2020b). A low-cost GNSS buoy platform for measuring coastal sea levels. *Ocean Engineering*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107198>
- Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W., & Nievinski, F. G. (2009). Can we measure snow depth with GPS receivers? *Geophysical Research Letters*, 36(17). <https://doi.org/10.1029/2009GL039430>
- Larson, K. M., Löfgren, J. S., & Haas, R. (2013a). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in Space Research*, 51(8), 1301–1310. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>
- Larson, K. M., & Nievinski, F. G. (2013). GPS snow sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solutions*, 17(1), 41–52. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7>
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G., & Freymueller, J. T. (2013). The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from kachemak bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5), 1200–1204. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>

- Larson, K. M., Ray, R. D., & Williams, S. D. P. (2017). A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(2), 295–307. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>
- Lofgren, J. S., Haas, R., & Johansson, J. M. (2010). *High-rate local sea level monitoring with a gnss-based tide gauge*. IEEE.
- Löfgren, J. S., & Haas, R. (2014). Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations. En *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. <http://asp.eurasipjournals.com/content/2014/1/50>
- Löfgren, J. S., Haas, R., Scherneck, H. G., & Bos, M. S. (2011). Three months of local sea level derived from reflected GNSS signals. *Radio Science*, 46(6). <https://doi.org/10.1029/2011RS004693>
- Lowe, S. T., LaBrecque, J. L., Zuffada, C., Romans, L. J., Young, L. E., & Hajj, G. A. (2002). First spaceborne observation of an Earth-reflected GPS signal. *Radio Science*, 37(1), 7-1-7–28. <https://doi.org/10.1029/2000rs002539>
- Martínez, C. (2020). *Monitoreo de Cambios del Nivel del Agua en una Región Costera Utilizando Reflectometría GNSS y Altimetría Satelital*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Martinez-Felix, C. A., Vazquez-Becerra, G. E., Geremia-Nievinski, F., Millan-Almaraz, J. R., Franco-Ochoa, C., Melgarejo-Morales, A., & Gaxiola-Camacho, J. R. (2022). Tidal measurements in the Gulf of Mexico: intercomparison of coastal tide gauge, insular GNSS reflectometry and SAR altimetry. *GPS Solutions*, 26(1). <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01207-x>
- Martin-Neira, M. (1993). A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry. *ESA*, 17(4), 331–355.
- Martin-Neira, M., Caparrini, M., Font-Rossello, J., Lannelongue, S., & Vallmitjana, C. S. (2001). The paris concept: an experimental demonstration of sea surface

- altimetry using gps reflected signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 142–150. <https://doi.org/10.1109/36.898676>
- Medina Olalde, J. A. (2007). *Análisis de la Confiabilidad Interna y Externa de una red GPS Geodésica Local*. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Michael, P. (2006). *Surface area of our planet covered by oceans and continents*. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8o.html>.
- Nerem, R. S., Leuliette, É., & Cazenave, A. (2006). Present-day sea-level change: A review. En *Comptes Rendus - Geoscience* (Vol. 338, Números 14–15, pp. 1077–1083). <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.09.001>
- Nievinski, F. G., & Larson, K. M. (2014a). Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation - Part I: Formulation and simulations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10), 6555–6563. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297681>
- Nievinski, F. G., & Larson, K. M. (2014b). Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation-Part II: Application and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10), 6564–6573. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297688>
- Núñez Gómez, J. C., Ramos Reyes, R., Barba Macías, E., Espinoza Tenorio, A., & Gama Campillo, L. M. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigaciones Geograficas*, 2016(91), 70–85. <https://doi.org/10.14350/rig.50172>
- Ostini, L., Sementina, von T., Rolf Dach, P., & Beutler, G. (2012). *Analysis and Quality Assessment of GNSS-Derived Parameter Time Series*.
- Paziewski, J., Fortunato, M., Mazzoni, A., & Odolinski, R. (2021). An analysis of multi-GNSS observations tracked by recent Android smartphones and smartphone-only relative positioning results. *Measurement: Journal of the International*

- Measurement Confederation*, 175(February), 109162.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109162>
- Pozo Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema De Posicionamiento Global (Gps): Descripción, Análisis De Errores, Aplicaciones Y Futuro. *ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga*, 174.
<http://www.oocities.org/es/forogps/infografia/gps5.pdf>
- Pugh, D. (1987). *Tides, surges, and mean sea-level*. J. Wiley.
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-Level Science*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>
- Purnell, D. J., Gomez, N., Minarik, W., Porter, D., & Langston, G. (2021). Precise water level measurements using low-cost GNSS antenna arrays. *Earth Surface Dynamics*, 9(3), 673–685. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-673-2021>
- Romero-Andrade, R., Cabanillas-Zavala, J. L., Hernández-Andrade, D., Trejo-Soto, M. E., & Monjardin-Armenta, S. A. (2020). Análisis Comparativo Del Posicionamiento GNSS Utilizando Receptor De Bajo Costo U-Blox De Doble Frecuencia Para Aplicaciones Topógrafo-Geodésicas. *European Scientific Journal ESJ*, 16(27), 289–312. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n27p289>
- Romero-Andrade, R., Zamora-Maciel, A., Uriarte-Adrián, J. D. J., Pivot, F., & Trejo-Soto, M. E. (2019). Comparative analysis of precise point positioning processing technique with GPS low-cost in different technologies with academic software. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.100>
- Rover, S., & Vitti, A. (2019). GNSS-R with low-cost receivers for retrieval of antenna height from snow surfaces using single-frequency observations. *Sensors (Switzerland)*, 19(24). <https://doi.org/10.3390/s19245536>

- Sharma, R. K., & Hablani, H. B. (2014). High-accuracy GPS-based aircraft navigation for landing using pseudolites and double-difference carrier phase measurements. En *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 3, Número PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00224>
- Small, E. E., Larson, K. M., & Braun, J. J. (2010). Sensing vegetation growth with reflected GPS signals. *Geophysical Research Letters*, 37(12). <https://doi.org/10.1029/2010GL042951>
- SMN. (2022). *Qué es la marea*. <http://www.mareografico.unam.mx>
- Snow, K. B. (2002). *Applications of Parameter Estimation and Hypothesis Testing to GPS Network Adjustments*. <https://earthsciences.osu.edu/sites/earthsciences.osu.edu/files/report-465.pdf>
- Srimal, F., Megha, G., Sharon, J., & Marco, D. (2018). *El océano Índico y su papel en el fortalecimiento de la seguridad de India The Indian Ocean and its Role in Strengthening India's Security*. <https://www.brookings.edu/opinions/indian-ocean-region->
- Stewart, R. (2009). *Introduction to Physical Oceanography*. http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files...
- Strandberg, J., Hobiger, T., & Haas, R. (2017). Coastal Sea Ice Detection Using Ground-Based GNSS-R. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(9), 1552–1556. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2722041>
- Syatiawan, A., Wijaya, D. D., & Meilano, I. (2021). Quality control in GNSS reflectometry method for tide observations. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(6), 1935–1947. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v19i6.21670>
- Takasu, T. (2013). *RTKLIB 2.4.2 Manual*. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf
<http://www.rtklib.com/%0Acom/rtklib.htm>

- Team, G. P. (2014). *Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance Analysis Report*.
http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN85_0414.pdf
- Teunissen, P. J. G. , & Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems II*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_1
- Tsakiri, M., Sioulis, A., & Piniotis, G. (2017). Compliance of low-cost, single-frequency GNSS receivers to standards consistent with ISO for control surveying. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8.
<https://doi.org/10.1051/ijmqe/2017006>
- Tsakiri, M., Sioulis, A., & Piniotis, G. (2018). The use of low-cost, single-frequency GNSS receivers in mapping surveys. *Survey Review*, 50(358), 46–56.
<https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1222344>
- U-blox. (2019). *u-center User Guide*. 71. www.u-blox.com
- Ublox. (2023). *High precision GNSS module Professional grade Data sheet*. www.u-blox.com
- UNAM. (2022, diciembre 20). *GNSS Modernization*.
- Vignudelli, S., Kostianoy, A. G., Cipollini, P., & Benveniste, J. (2011). Coastal altimetry. En *Coastal Altimetry*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0>
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>
- Wackerly, D. D., William Mendenhall III, & Richard L. Scheaffer. (2008). *Estadística matemática con aplicaciones* (Vol. 7).

- Wen, Q., Geng, J., Li, G., & Guo, J. (2020). Precise point positioning with ambiguity resolution using an external survey-grade antenna enhanced dual-frequency android GNSS data. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 157, 107634. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107634>
- Williams, S. D. P., Bell, P. S., Mccann, D. L., Cooke, R., & Sams, C. (2020). Demonstrating the Potential of Low-Cost GPS Units for the Remote Measurement of Tides and Water Levels Using Interferometric Reflectometry. *Revista de Tecnología Atmosférica y Oceánica*, 37, 1925–1935. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20>
- Wolanski, E., & Elliott, M. (2016). Estuarine sediment dynamics. En *Estuarine Ecohydrology* (pp. 77–125). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63398-9.00003-9>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. En *Reviews of Geophysics* (Vol. 54, Número 1, pp. 64–92). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>
- Xiao, Y., Yao, M. H., Tang, S. H., Liu, H. F., Xing, P. W., & Zhang, Y. (2020). DATA QUALITY CHECK and VISUAL ANALYSIS of CORS STATION BASED on ANUBIS SOFTWARE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3/W10), 1295–1300. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-1295-2020>
- Zamora Maciel, A., Romero-Andrade, R., Moraila-Valenzuela, C. R., & Pivot, F. (2020). Evaluación de receptores GPS de bajo costo de alta sensibilidad para trabajos geodésicos. Caso de estudio: línea base geodésica. *CIENCIA ergo sum*, 27(1), e73. <https://doi.org/10.30878/ces.v27n1a5>
- Zamora-Maciel. (2018). *Análisis y evaluación de una línea base geodésica implementando receptores de alta sensibilidad y receptores geodésicos*.

- Zhang, N., Zhang, S., He, Y., & Zhang, Q. (2017). *Characteristic of GPS SNR and Its Application for Snow Depth Monitoring Analysis. I.* <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4588-2>
- Zimmermann, F., Schmitz, B., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2019). GPS multipath analysis using fresnel zones. *Sensors (Switzerland)*, 19(1). <https://doi.org/10.3390/s19010025>