

Control de calidad de las observaciones GPS de la Red Geodésica Nacional Activa en México del periodo 2020-2023

Rafaela Mirasol Llanes-Hernández

Rosendo Romero-Andrade

Tiojari Dagoberto Guzmán-Galindo

Lizbeth Guadalupe Santiago-Sánchez

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio,
Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Richard Germán Serrano-Agila

Departamento de Geociencias,
Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n21p1](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n21p1)

Submitted: 19 June 2024

Accepted: 23 July 2024

Published: 31 July 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Llanes-Hernández, R. M., Romero-Andrade, R., Guzmán-Galindo, T. D., Santiago-Sánchez, L. G., & Serrano-Agila, R. G. (2024). *Control de calidad de las observaciones GPS de la Red Geodésica Nacional Activa en México del periodo 2020-2023*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (21), 1. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n21p1>

Resumen

Se realizó la propuesta de nuevos valores para el efecto multitrayectoria, relación señal-ruido, saltos de ciclo e integridad a través de estadística descriptiva con la finalidad de realizar el control de calidad de la Red Geodésica Nacional Activa en México para la constelación GPS. El análisis fue llevado a cabo mediante el software TEQC considerando los valores propuestos por el IGS, RVM y mediante la implementación de estadística descriptiva. Se analizaron las observaciones GPS de 32 estaciones de monitoreo continuo en el periodo 2020 al 2023. Los resultados demuestran que para el efecto multitrayectoria en la L1, 17 estaciones cumplen con el criterio, en el caso contrario para la L2 donde 27 estaciones superan el valor recomendado. Para la relación señal-ruido, solo dos estaciones presentan una potencia baja en ambas frecuencias. En relación con la integridad, solo 5 estaciones no cumplen con el valor propuesto, por su parte, para los saltos de ciclo, solo 5 estaciones no cumplen con el valor recomendado. Finalmente, se demuestra que las estaciones que pertenecen a la Red Geodésica Nacional

Activa cumplen con los valores recomendados, por lo que es posible utilizar las estaciones para monitoreo de la corteza terrestre y trabajos topógrafo-geodésicos conforme a la nueva actualización masiva de equipos y receptores derivado de los valores presentados.

Palabras clave: GPS; RGNA; Control de calidad; Efecto multitrayectoria; Relación señal-ruido; Saltos de ciclo; Integridad

Quality control of the GPS observations of the National Geodetic Active Network in Mexico for the period 2020-2024

Rafaela Mirasol Llanes-Hernández

Rosendo Romero-Andrade

Tiojari Dagoberto Guzmán-Galindo

Lizbeth Guadalupe Santiago-Sánchez

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio,
Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Richard Germán Serrano-Agila

Departamento de Geociencias,
Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

Abstract

Descriptive statistics were used to propose new values for quality control of Mexico's Active National Geodetic Network, specifically for the multipath effect, signal-to-noise ratio, cycle slips, and integrity of the GPS constellation. The analysis was carried out using the TEQC software considering the values proposed by the IGS, [RVM](#) and by implementing descriptive statistics. Based on the results, the proposed criteria are met by 17 stations for the multipath effect in L1, while for L2, the recommended value is exceeded by 27 stations. For the signal-to-noise ratio, only two stations have low power on both frequencies. Regarding integrity, only 5 stations do not comply with the proposed value. Meanwhile, for cycle slips, only 5 stations do not comply with the recommended value. Finally, it is demonstrated that the stations that belong to the Active National Geodetic Network can be used for monitoring the Earth's crust and topographic-geodetic work in accordance with the new massive update of equipment and receivers derived from the values presented.

Keywords: GPS, RGNA, Quality check, Multipath effect, Signal-to-noise ratio, cycle slips, integrity

Introducción

El avance tecnológico y de investigación de los Sistemas de Navegación Satelital (GNSS) permite que se realicen nuevas investigaciones relacionadas con la deformación de la corteza terrestre (Arias-Gallegos et al., 2023), el monitoreo de estructuras (Yigit et al., 2021), análisis ionosférico como precursor sísmico (Nayak et al., 2023; Sharma et al., 2024), son algunos ejemplos de los resultados obtenidos al hacer uso de los datos GNSS.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) forma parte de los GNSS y es el sistema más robusto dado el tiempo de operación, el cual cuenta con una cobertura global, aunque existen otras constelaciones como lo son: Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS) y Agencia del Sistema Mundial de Navegación por Satélite Europea (GALILEO). En este sentido, a nivel mundial existen organismos que gestionan información geoespacial o de redes geodésicas de operación continua que ayudan al desarrollo de trabajos científicos-técnicos de alta precisión que apoyan a la infraestructura geodésica como lo es el International GNSS Service (IGS, <https://igs.org/>), National Geodetic Survey (NGS, <https://geodesy.noaa.gov/>) Earth Scope Consortium (<https://www.earthscope.org/>) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, <https://www.inegi.org.mx/>), por citar algunos.

Es importante revisar la calidad de los archivos crudos y verificar el correcto funcionamiento de las estaciones que operan actualmente a nivel mundial, ya que está directamente relacionada con el posicionamiento preciso (Yeh et al., 2007). En el estado del arte existen resultados de investigaciones que realizaron un análisis o control de calidad de las observaciones, enfocándose en el efecto multitrayectoria, integridad de la información, saltos de ciclo y relación señal-ruido. Vázquez, et al., (2012) estudiaron la cantidad del efecto multitrayectoria en pseudo-distancias a partir de las observaciones GPS en la red TAMDEF (Montañas trans Antárticas) de un total de 33 estaciones de operación continua, determinando que el efecto multitrayectoria es uno de los principales degradadores de la señal. Souto, (2014) realizó el control de calidad de una estación de monitoreo permanente en Córdoba, Argentina, enfocándose en el número de observaciones, efecto multitrayectoria y saltos de ciclo, encontrando que la estación tiene un buen comportamiento basado en los resultados encontrados. Hu et al., (2016) investigaron la calidad de las observaciones de un total de 173 estaciones de campaña en el noroeste y norte de China, con un total de 4 días de observación, encontrando las afectaciones que pueden presentar las series temporales si no se considera el entorno de la estación al calcular la velocidad. Kamatham, (2018) determinó que el efecto multitrayectoria en algunos casos puede verse de forma inversamente proporcional a la relación señal-ruido. García-Armenteros, (2020) realizó una monitorización y control de calidad de las

estaciones de la red de Topo-Iberia-UJA en España, de un total de 10 años en promedio, considerando los indicadores del IGS, encontrando que la red geodésica es apta para estudios geodinámicos. Asimismo, García-Armenteros, (2023) analizó 12 años de observaciones continuas, siguiendo los indicadores del IGS y comprobando el impacto que tiene los residuales de fase del modelo libre de ionósfera en las observaciones, encontrando que al incrementar el ángulo de elevación se presenta un incremento en los saltos de ciclo y en el efecto multitrayectoria.

En México, existen organismos que gestionan redes geodésicas mencionados anteriormente, siendo la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI la más importante por las implicaciones normativas que representa para el país. Algunos estudios realizados en México han sido llevados a cabo por Vázquez et al., (2013) el cual estudiaron las estaciones de la RGNA y de libre acceso enfocándose únicamente en el efecto multitrayectoria en función de los diferentes equipos utilizados. Asimismo, Hernández-Andrade et al., (2020) analizaron las observaciones de las estaciones de monitoreo continuo GPS de libre acceso considerando todos los indicadores del IGS, demostrando que no todas las estaciones cumplen con los parámetros de calidad que recomienda el IGS. Finalmente, Hernández-Andrade et al., (2022) realizó un análisis profundo y propuso valores para determinar la calidad de las estaciones en México (RVM), ya que estas no cumplen con los criterios del IGS, demostrando que el análisis de calidad es un importante para los estudios de deformación de la corteza, ya que un exceso de ruido en el receptor generará que aumente la incertidumbre en las series temporales Hu et al., (2016).

Con base en lo anterior, y existiendo la necesidad debido al aumento de las estaciones y la actualización masiva de toda la Red Geodésica Nacional Activa y al no haber un estudio actualizado del control de calidad de las observaciones GPS, se presenta por primera vez el control de calidad de las observaciones GPS de la Red Geodésica Nacional Activa en México considerando los indicadores del IGS, RVM y la propuesta de nuevos parámetros de calidad para: integridad, saltos de ciclo, efecto multitrayectoria y relación señal-ruido.

Red Geodésica Nacional Activa en México (RGNA)

De acuerdo con las normativas mexicanas, el Sistema Geodésico Nacional establece que toda estación geodésica de un levantamiento horizontal deberá estar referido al Marco de Referencia Terrestre Internacional, definido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y de Sistemas de Referencia para el año 2008, referido a la época 2010.0. El cual es denominado ITRF08 época 2010.0, asociado al elipsoide de referencia GRS80, y solo será accesible mediante la RGNA.

En el año 2020 la RGNA contaba con 23 estaciones GPS y para el año 2021 incrementó el número de estaciones GPS a 31 debido a fallas presentadas en los equipos. En ese mismo año, se realizó una actualización de los equipos de la RGNA (Figura 1). Actualmente cuentan con el receptor ALLOY, GR10 y modelo de antena TRM115000.00 o LEIAR10 según el National Geodetic Survey (NGS); siendo la mayoría de las ubicaciones sobre azoteas de la dependencia de INEGI a lo largo del país (Figura 1 y 2).

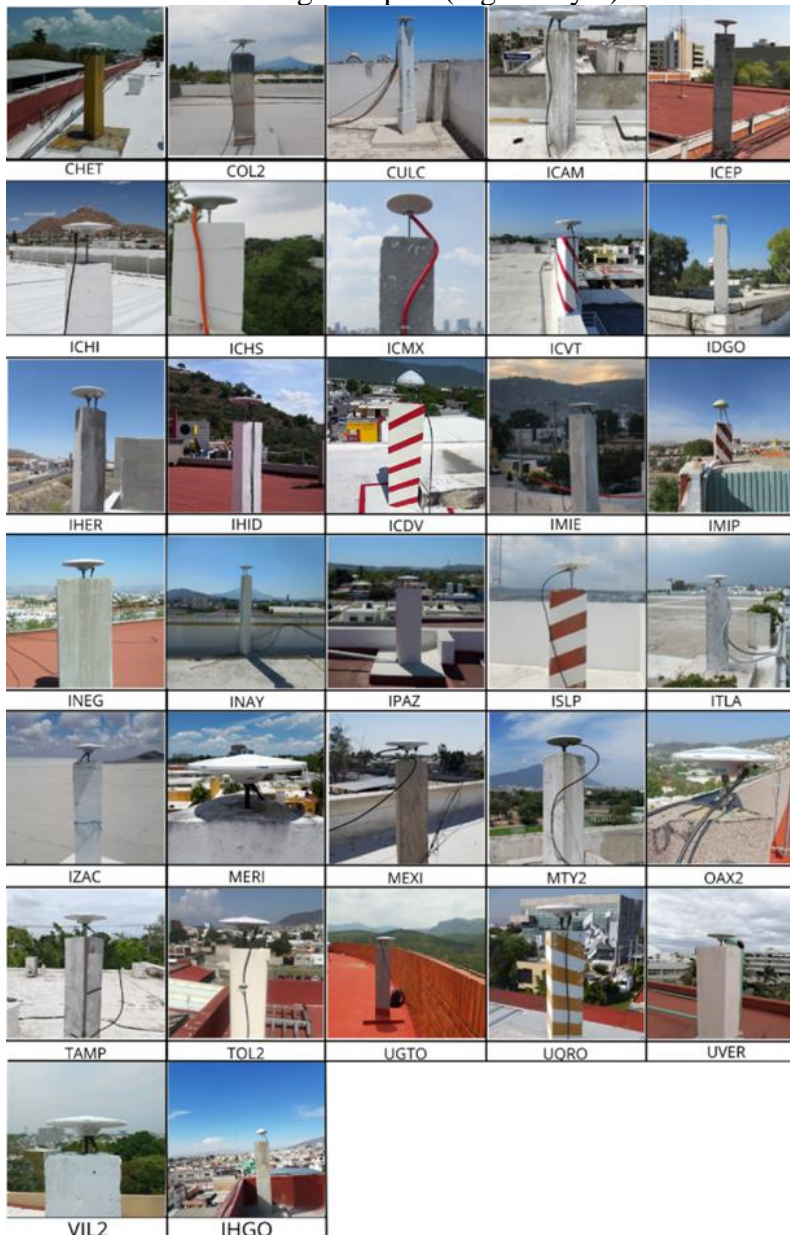


Figura 1. Antenas, receptores y monumentación de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA). Fuente: Imágenes cortesía de INEGI, con elaboración propia del diseño



Figura 2. Distribución de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA). Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA).					
Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Altura geodésica (m)	Receptor	Antena
CHET	18°29'42.99641''	88°17'57.20961''	2.955	ALLOY	TRM115000.00
COL2	19° 14' 9.99474''	103° 42' 06.78208''	528.784		
CULC	24° 47' 42.30742''	107° 24' 45.34764''	36.138		
ICAM	19° 51' 12.44688''	90° 31' 38.90207''	2.578	GR10	LEIAR10
ICDV	23°44'20.94''	99°09'24.76''	325.7936		
ICEP	19° 01' 58.88475''	98° 11' 15.35143''	2150.327	ALLOY	TRM115000.00
ICHI	28° 38' 50.05040''	106° 03' 58.01000''	1405.717		
ICHS	16° 46' 14.32120''	93° 11' 35.30631''	635.182		
ICMX	19° 24' 20.30945''	99° 10' 15.07088''	2267.439		
ICVT	23° 46' 22.62078''	99° 08' 57.84894''	277.764		
IDGO	24° 04' 02.83116''	104° 36' 25.48267''	1863.116		
IHER	29° 04' 03.46672''	110° 57' 40.67655''	176.577		
IHGO	20°07'2516''	98°44'38.72''	2407.659	ALLOY	TRM115000.00
IHID	20° 06' 53.62216''	98°44' 17.77306''	2390.334		
IMIE	31° 51' 42.69707''	116° 36' 58.81264''	-22.222	ALLOY	TRM115000.00
IMIP	31° 44' 41.75718''	106° 26' 45.12587''	1113.428	GR10	LEIAR10
INAY	21° 30' 15.65925''	104° 53' 45.85918''	925.451		

INEG	21° 51' 22.15280"	102° 17' 03.13231"	1887.823	ALLOY	TRM115000. 00
IPAZ	24° 08' 42.97974"	110° 19' 50.67946"	-14.835		
ISLP	22° 08' 39.18986"	101° 00' 55.81688"	1910.286		
ITLA	19° 18' 32.86728"	98° 12' 56.28240"	2327.685		
IZAC	22° 46' 41.31955"	102° 36' 45.80515"	2427.673		
MERI	20° 58' 48.16346"	89° 37' 13.14324"	7.863		
MEXI	32° 37' 58.77103"	115° 28' 32.53523"	-22.427		
MTY2	25° 42' 55.82372"	100° 18' 46.46275"	521.741		
OAX2	17° 04' 42.02383"	96° 43' 00.26225"	1607.262		
TAMP	22° 16' 41.95540"	97° 51' 50.49882"	21.050		
TOL2	19° 17' 35.64347"	99° 38' 36.50048"	2651.730		
UGTO	21° 00' 09.75456"	101° 16' 17.99246"	2062.282		
UQRO	20° 35' 28.09773"	100° 24' 45.69377"	1817.973		
UVER	19° 09' 55.68003"	96° 06' 51.67505"	3.212		
VIL2	17° 59' 25.47838"	92° 55' 51.95484"	27.744		

Acorde con la información registrada por el INEGI, se analizó un total de 4 años continuos (Tabla 2) considerando que para analizar una serie temporal asociada a deformación de la corteza se requiere como mínimo 2.5 años de observaciones (Blewitt y Lavallée, 2002) así mismo, es necesario considerar aquellas estaciones que no están dentro del periodo mínimo recomendado, ya que estas proporcionan la tendencia del comportamiento de dicha estación.

Tabla 2. Cantidad de datos proporcionados por año por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Fuente: elaboración propia.

ESTACIÓN	AÑO				TOTAL (DÍAS)	TOTAL (AÑOS)
	2020	2021	2022	2023		
CHET	665	326	365	365	1421	3.893
COL2	365	365	365	365	1460	4
CULC	365	365	365	365	1460	4
ICAM	365	365	365	365	1460	4
ICDV	345	198	----	----	543	1.487
ICEP	365	365	365	365	1460	4
ICHI	365	365	365	365	1460	4
ICHS	365	365	365	365	1460	4
ICMX	365	365	365	365	1460	4
ICVT	----	138	365	365	868	2.378
IDGO	365	365	365	365	1460	4
IHER	365	365	365	365	1460	4
IHGO	295	----	----	----	295	0.808
IHID	41	364	365	365	1135	3.109
IMIE	362	365	361	365	1453	3.980
IMIP	358	362	365	365	1450	3.976
INAY	364	364	363	365	1456	3.989
INEG	364	224	365	365	1318	3.610
IPAZ	365	365	365	365	1460	4
ISLP	365	365	365	365	1460	4
ITLA	365	365	365	365	1460	4
IZAC	365	365	365	365	1460	4
MERI	365	364	365	365	1459	3.997
MEXI	365	365	365	364	1459	3.997

MTY2	365	365	365	352	1447	3.964
OAX2	364	365	365	365	1459	3.997
TAMP	361	365	365	362	1453	3.980
TOL2	303	365	365	365	1398	3.830
UGTO	365	365	365	365	1460	4
UQRO	365	365	365	365	1460	4
UVER	362	365	365	365	1457	3.991
VIL2	338	365	365	365	1433	3.926

Control de Calidad de las observaciones GPS

El control de calidad de las observaciones GPS se lleva a cabo para analizar el correcto funcionamiento de las estaciones de monitoreo continua (García-Armenteros, 2020; Hernández-Andrade et al., 2022; Souto, 2014), debido a la importancia para las realizaciones de los International Terrestrial Reference System (ITRF) ayudando a su actualización y refinamiento (Altamimi et al., 2016).

Actualmente, existen parámetros que son recomendados por el International GNSS Service (IGS) (<https://igs.org/documents/#guidelines>) para evaluar el buen funcionamiento de las estaciones de operación continua (IGS, 2015), siendo los indicadores: integridad, relación señal-ruido, saltos de ciclo y efecto multitrayectoria. Estos parámetros pueden ser extraídos mediante los softwares TEQC (Translate/Edit/Quality Check) (Estey y Wier, 2014), Anubis-G (Xiao et al., 2020), y RINGO (Kawamoto et al., 2023), entre otros; no obstante, los resultados son los mismos, siendo las únicas diferencias la cantidad de constelaciones que pueden procesar y la forma de mostrar los resultados (Puskas et al., 2019).

Metodología

La metodología es presentada en la Figura 3. Para llevar a cabo el procesado mediante el software TEQC, fue necesario realizar una descompresión del formato de compresión HATANAKA (Hatanaka, 2008) a RINEX 2.11 (Gurtner y Estey, 2009) mediante la herramienta CRX2RNX (Hatanaka, 2008). Una vez en formato RINEX 2.11(Receiver Independent Exchange Format Version 2.11), se removieron las constelaciones GLONASS y GALILEO, para solo dejar GPS con la finalidad de analizar la constelación que da solución a la totalidad de los equipos en el país de México, lo anterior fue realizado con el software TEQC mediante implementaciones en Shell-C.

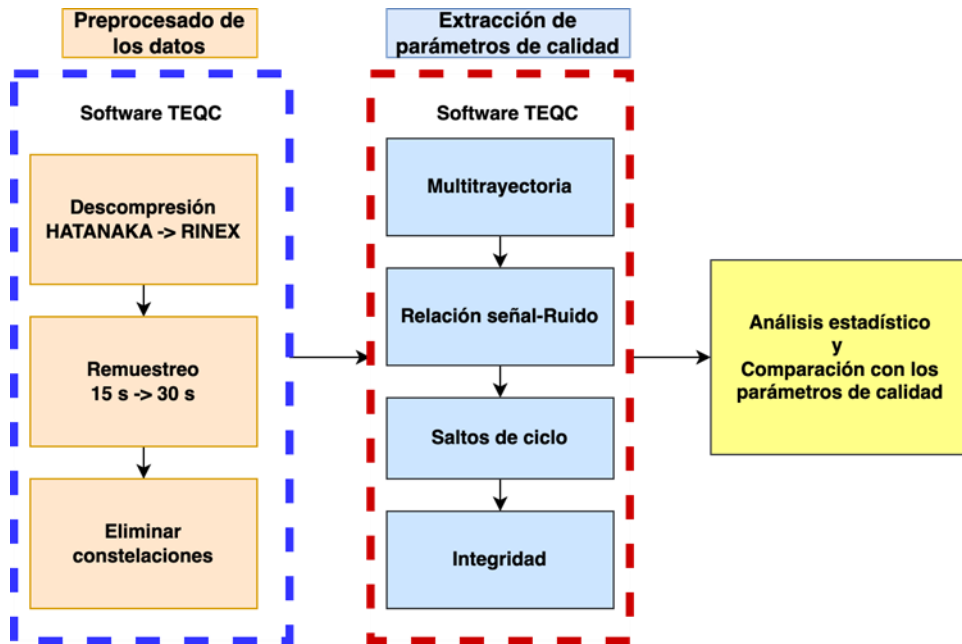


Figura 3. Metodología utilizada para el desarrollo de la investigación

Para la extracción y cálculo de los parámetros, es importante considerar que el efecto multitrayectoria (MP) es un efecto producido por la señal cuando llega de forma indirecta al receptor debido a la reflexión en una superficie reflejante cercana al receptor como un árbol, edificio, etc. Este efecto ocasiona que la señal realice un recorrido adicional, el cual degrada la precisión (Seeber, 2003). El cálculo del efecto multitrayectoria se basa en una combinación lineal del pseudorange y fase portadora en la L1 y L2 mediante una estimación del error medio cuadrático (Estey y Wier, 2014) en metros; acorde con el IGS el valor recomendado es <math><30\text{ cm}</math>.

La relación señal-ruido es expresada como SNR y según (Xiao et al., 2020) describe la potencia de la señal; la ganancia de la antena, estado del receptor y efecto multitrayectoria son los principales factores que alteran este parámetro, siendo el valor recomendado $\geq 36\text{ dBHz}$.

El porcentaje de las observaciones registradas respecto a las esperadas (integridad) es calculado al hacer referencia a los datos obtenidos respecto a los posibles expresado en porcentaje (Hernández-Andrade, 2021).

Los saltos de ciclo son las pérdidas en el seguimiento del satélite, siendo una discontinuidad en el número entero de ciclos de la fase, este es posible calcularlo como $CSR=1000/(o/slps)$, donde “o” es el número de observaciones registradas y “slps” es la cantidad de saltos de ciclo, siendo el valor recomendado por el IGS 1 por cada mil observaciones.

Algunos autores como García-Armenteros, (2020, 2023); Hernández-Andrade et al., (2020) han analizado el estado de las redes geodésicas

establecidas de estaciones de operación continua GNSS considerando los parámetros del IGS. No obstante, y conforme a lo expuesto por Hernández-Andrade et al., (2022), es necesario investigar la situación real de las estaciones basados en estadísticas de cada región. En este sentido, se hace la propuesta de los indicadores para la RGNA bajo el siguiente análisis estadístico:

Tabla 3. Valores recomendados en la literatura para los parámetros de calidad para una estación de referencia continua y los calculados.

	Multitrayectoria	Salto de Ciclo	Relación Señal-Ruido	Integridad
IGS	≤0.30 m	≤1 por cada 1000 observaciones	≥ 36 dBHz	≥ 95%
RVM	≤ 0.47 y 0.42 en L1 y L2 en m, respectivamente.	≤ 1.04 por cada 1000 observaciones	≥ 42.31 y ≥ 32.51 en L1 y L2 en dBHz, respectivamente.	≥ 98%
RGNAV	≤ 0.30 y ≤ 0.35 en L1 y L2 en m, respectivamente	≤.03 por cada 1000 observaciones	≥ 43.75 y ≥ 40.93 en L1 y L2 en dBHz, respectivamente.	≥ 99%

Actualmente en la RGNA solo una estación pertenece al IGS y no representa la realidad de las estaciones, se realiza un análisis estadístico basado en el estudio de todos los datos obtenidos de todas las estaciones de la RGNA con la finalidad de remover los valores atípicos y evitar sesgos en los indicadores calculados. En este sentido, el cálculo de los valores se lleva de la forma expresada en la ecuación (1) (Hernández-Andrade et al., 2022):

$$\underline{X}_{RGNA} = \sum_{i=1}^n x_i/n \quad (1)$$

Donde n es el número de estaciones GPS para analizar; x_i es el valor correspondiente al valor anual promedio para cada estación GPS en 4 años; \underline{X}_{RGNA} es el promedio de cada valor por un periodo de 4 años.

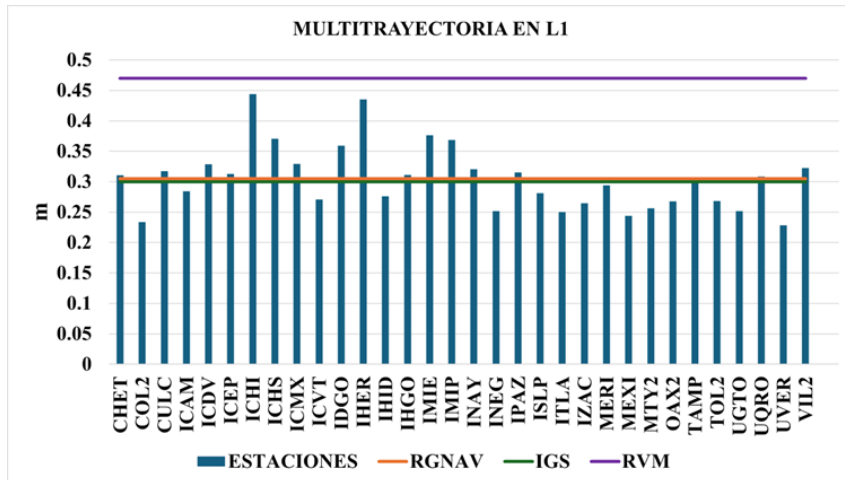
Resultados

Los resultados se muestran en las Figuras 4-6 de la estadística descriptiva aplicada para el cálculo de los 4 indicadores de calidad; efecto multitrayectoria (MP1 y MP2) en L1 y L2; relación señal-ruido (SNR1 y SNR2) en L1 y L2; saltos de ciclo (CSR) por cada mil observaciones y la integridad (INT) para todas las estaciones de la RGNA considerando los valores propuestos por el IGS y Hernández-Andrade et al., (2022).

Los valores promedio para el efecto multitrayectoria en L1 (Figura 4a) para las estaciones de la RGNA se encuentran por debajo de los indicadores calculados RVM. Para los indicadores recomendados por el IGS, 17 estaciones

lo superan, siendo solo 15 estaciones que no cumplen con el parámetro recomendado para el efecto multitrayectoria; en este mismo sentido, el valor calculado propuesto RGNAV es similar al recomendado por el IGS, con la misma cantidad de estaciones que cumplen con este indicador.

A)



B)

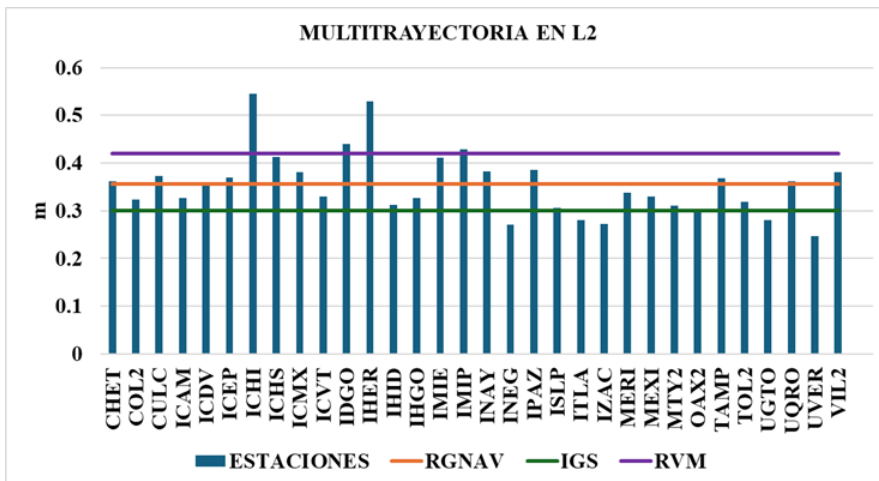
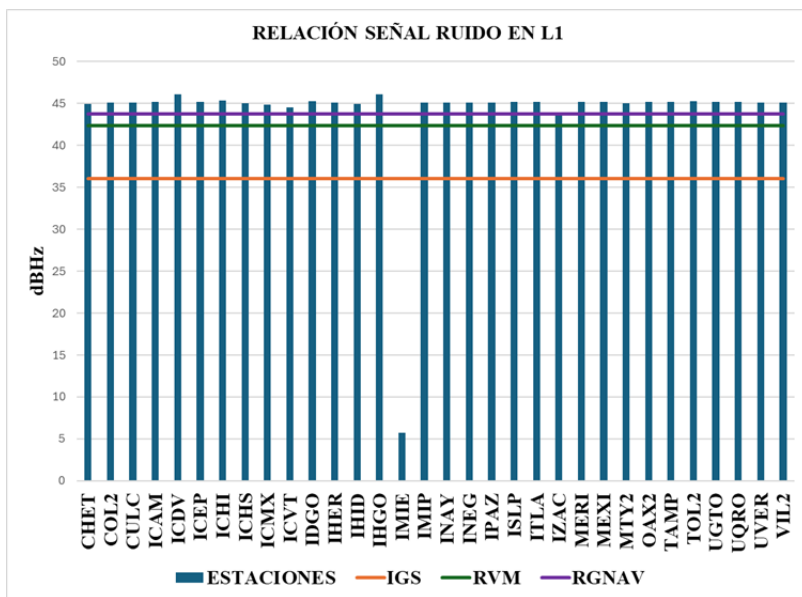


Figura 4. Efecto multitrayectoria

Para el caso del efecto multitrayectoria en L2 (Figura 4b) considerando el indicador del IGS, se puede observar que 27 estaciones superan lo recomendado; en este sentido aun cuando el valor recomendado RVM es más permisivo, 4 estaciones superan con más de 40 cm. Por último, el valor de RGNAV se ve superado en 15 estaciones. Este comportamiento acorde con lo descrito por Souto, (2014) puede ser un efecto relacionado por el software y hardware o bien, por el ambiente circundante a la estación, la cual cuenta con un tipo de suelo reflejante en la ubicación donde se encuentra.

En la Figura 5a se presenta la relación señal-ruido para la L1, donde solo la estación de IMIE no cumple con ninguno de los valores propuestos por el IGS, RVM o RGNAV, las demás estaciones presentan una potencia de hasta más de 42 dBHz. Para el caso de la relación señal-ruido para la L2 (Figura 5b), la estación IMIE no cumple con ningún valor propuesto, similarmente la estación IMIP, cumple con el valor del IGS y el RVM; no cumpliendo con el valor propuesto por el RGNAV donde se espera una potencia fuerte de la señal (mayor a 40 dBHz).

A)



B)

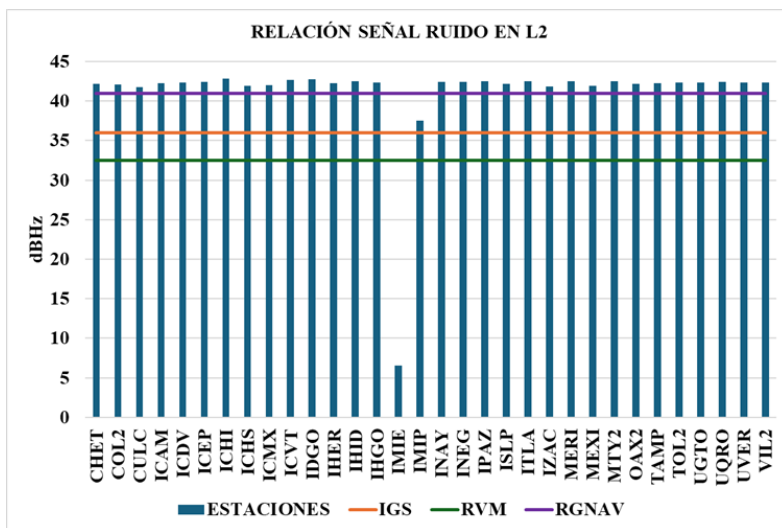
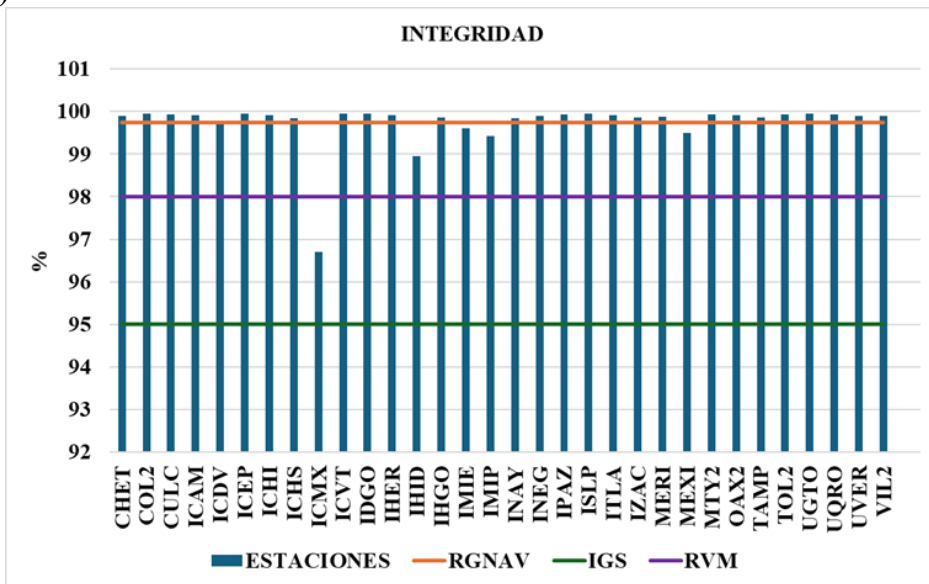


Figura 5. Relación señal-ruido

Para el caso de la integridad (Figura 6a), todas las estaciones superan el valor recomendado por el IGS. Para el caso del valor propuesto del RVM, solo 1 estación no cumple, no obstante, es un valor considerablemente alto. Finalmente, para 5 estaciones no cumplen con el valor propuesto del RGNAV, siendo el indicador más rigorista.

A)



B)

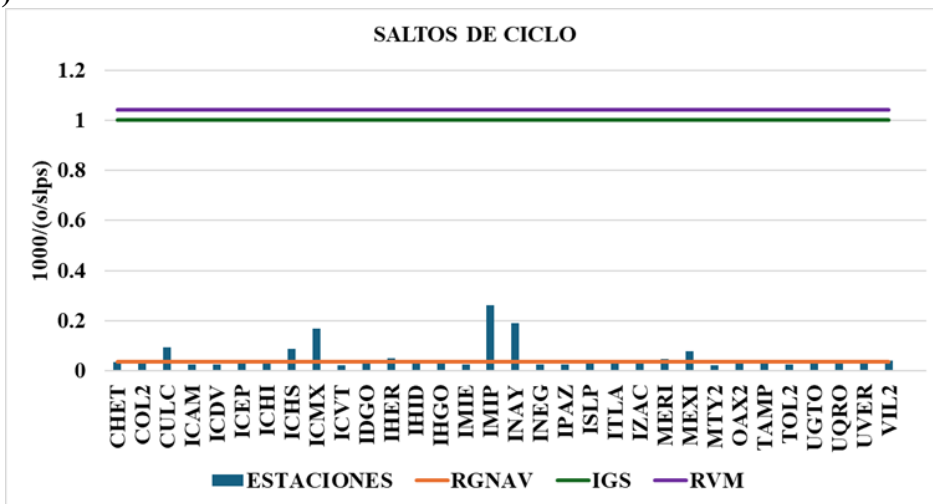


Figura 6. Integridad y saltos de ciclo

Tabla 4. Resultados de análisis estadístico para la Red Geodésica Nacional Activa.

Estación	Integridad (%)	MP1(m)	MP2 (m)	Salto de ciclo <(1000/ o/slips)	Relación señal ruido en L1 (dHBZ)	Relación señal ruido en L2 (dHBZ)
CHET	99.90	0.31	0.36	0.03	44.95	42.15
COL2	99.95	0.23	0.32	0.03	45.05	42.10
CULC	99.92	0.31	0.37	0.09	45.08	41.74
ICAM	99.91	0.28	0.32	0.02	45.19	42.23
ICDV	99.77	0.32	0.35	0.02	46.07	42.37
ICEP	99.94	0.31	0.36	0.03	45.21	42.44
ICHI	99.91	0.44	0.54	0.02	45.36	42.79
ICHS	99.84	0.37	0.41	0.08	44.98	41.92
ICMX	96.69	0.32	0.38	0.16	44.88	41.96
ICVT	99.95	0.27	0.32	0.02	44.53	42.64
IDGO	99.94	0.35	0.43	0.04	45.28	42.78
IHER	99.91	0.43	0.52	0.05	45.08	42.27
IHID	98.95	0.27	0.31	0.03	44.89	42.51
IHGO	99.86	0.31	0.32	0.03	46.06	42.35
IMIE	99.61	0.37	0.41	0.02	5.72	6.56
IMIP	99.43	0.36	0.42	0.26	45.09	37.53
INAY	99.83	0.32	0.38	0.18	45.06	42.37
INEG	99.89	0.25	0.27	0.02	45.08	42.39
IPAZ	99.94	0.31	0.38	0.02	45.12	42.48
ISLP	99.95	0.28	0.30	0.02	45.14	42.16
ITLA	99.90	0.24	0.28	0.03	45.17	42.50
IZAC	99.86	0.26	0.27	0.03	43.64	41.82
MERI	99.88	0.29	0.33	0.04	45.14	42.46
MEXI	99.49	0.24	0.33	0.07	45.14	41.91
MTY2	99.93	0.25	0.31	0.02	44.98	42.48
OAX2	99.91	0.26	0.30	0.03	45.15	42.18
TAMP	99.85	0.30	0.36	0.02	45.17	42.27
TOL2	99.93	0.26	0.31	0.02	45.24	42.33
UGTO	99.94	0.25	0.28	0.03	45.16	42.31
UQRO	99.93	0.30	0.36	0.03	45.20	42.42
UVER	99.89	0.22	0.24	0.02	45.08	42.34
VIL2	99.89	0.32	0.38	0.04	45.07	42.33

Referente a los saltos de ciclo (Figura 6b) y en la Tabla 4, para los valores recomendados del RGNV solo 12 estaciones no se apegan a este indicador, siendo más rigorista en comparación con el RVM e IGS en los cuales todas las estaciones se apegan. En este sentido, las estaciones que

presentan mayores saltos de ciclo (ICHS, ICMX, IMIP e INAY), son estaciones con un entorno con superficies reflejantes y obstrucciones en la zona circundante a la antena.

Discusión

Se analizaron un total de 32 estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa en México, considerando la última actualización de las estaciones, derivado de un cambio total de receptores y antenas, pasando al receptor ALLOY con una antena TRM11500. Evidentemente las estaciones muestran una mejora con forme a los resultados presentados por Vázquez-Becerra et al., (2013) en el cual se evalúan 53 estaciones en un periodo de tiempo de 1994-2012 de distintos organismos; en este sentido, las estaciones de la RGNA analizadas en este estudio reportan valores de hasta 40 cm para el efecto multitrayectoria (único parámetro estudiado por los autores), superando los valores propuestos por el IGS. Esto es derivado de la ubicación y el tipo de receptor y antena usado (Trimble 5700 en conjunto con antena TRM41249.00 en su mayoría). Conforme a la actualización reciente de todas las estaciones a receptores ALLOY con antena TRM115000 se muestra una disminución de los valores del efecto multitrayectoria apegándose al indicador del IGS.

De acuerdo con los datos analizados por García-Armenteros (2022) la red CGPS Topo-Iberia-UJA y en el estudio realizado para la RGNA se encuentran resultados similares en el comportamiento de ambas redes aún cuando CGPS Topo-Iberia-UJA fue diseñada analizar la corteza terrestre, mientras que la RGNA es para control topógrafo-geodésico. En este sentido, los resultados demuestran que es posible utilizar las observaciones generadas para estudios de la corteza terrestre.

Conforme a la actualización realizada y al análisis presentado por Hernández-Andrade et al., (2020), (2022) es notorio que los datos de la RGNA son de mayor calidad, ya que los reportados en el estudio previo, se encuentra que existen estaciones que no forman parte de la RGNA que superan los 40 cm de efecto multitrayectoria, mostrando un efecto inversamente proporcional en la potencia de la señal en ambas bandas derivado del ruido en la señal por obstrucciones cercanas a las estaciones. Por otro lado, si se aplica el parámetro estimado RGNV a los valores reportados en Hernández-Andrade et al., (2020), (2022), las estaciones no se apegarían a ningún índice, ya que el RGNV es más rigorista derivado de la calidad de las estaciones con la nueva actualización presentada en todas las estaciones.

Las estaciones IMIP e IMIE no cumplen con los valores propuestos por ningún índice, esto es derivado del lugar de localización de la antena, asimismo, ambas estaciones cuentan con un receptor GR10 y antena LEIAR10, encontrándose que, en función del firmware, los valores tienden a ser altos Hernández-Andrade et al., (2020); Herrada et al., (2010).

En función al desempeño mostrado, se puede utilizar estas estaciones para el monitoreo de la corteza terrestre, ya que no presentan valores atípicos fuera de los valores recomendados por el IGS, RVM o RGNAV, como los reportados por Hu et al., (2016) donde la estaciones presentan un alto contenido de efecto multitrayectoria, el cual hace que se sobre estime la velocidad vista en la serie temporal.

Conclusiones

Por primera vez en México se realizó el control de calidad de las observaciones GPS de la Red Geodésica Nacional Activa considerando los parámetros de calidad (efecto multitrayectoria, relación señal-ruido, saltos de ciclo por cada mil observaciones, e integridad) del IGS, RVM y una propuesta de nuevos valores a la cual denominamos RGNAV, pudiendo concluir lo siguiente:

- Los valores propuestos (RGNAV) para los indicadores son más rigurosos que los valores RVM e IGS, esto es derivado de la alta calidad que presenta los valores de la RGNA, lo cual tendría un impacto en la calidad de la información y en el uso de la topografía y geodesia.
- De las 32 estaciones analizadas, solo 30 cumplen con los valores propuestos RGNAV. Las dos estaciones que no cumplen no presentan una actualización en software y firmware, además de utilizar una antena y receptor de modelo antiguo. Esto concuerda con estudios previos por diferentes autores.
- Las estaciones dados los resultados presentados y los requisitos para pertenecer al IGS, cumplen satisfactoriamente con los criterios para ser incluidas al menos 30 estaciones.
- Se demuestra que el efecto multitrayectoria es el indicador más importante para establecer y analizar estaciones de referencia continua, ya que, en función del entorno de la estación, será el contenido de ruido en la estación.

Finalmente, se demuestra que dada la última actualización que es viable utilizar la RGNA en estudios para la deformación de la corteza y trabajos topógrafo-geodésico.

Agradecimientos: Agradecer al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) por brindar los datos de las estaciones de operación continua bajo solicitud debidamente fundamentada. A los revisores que ayudaron a mejorar el trabajo significativamente. A la Universidad Técnica Particular de Loja, en Ecuador y la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio en México por brindar el soporte técnico para realizar la experimentación.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada mediante el proyecto “Uso y procesamiento de datos GNSS del Ecuador para investigaciones en Geociencias” a través de la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador y el por Cuerpo Académico de Ciencias Geodésicas (CA-UAS-23) de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en México.

Conflictos de intereses: Los Autores no declaran ningún conflicto de interés.

Disponibilidad de datos: Todos los datos son propiedad de la dependencia gubernamental Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los cuales fueron solicitados a través de las autoridades.

References:

1. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., y Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131. <https://doi.org/doi:10.1002/2016JB013098>
2. Arias-Gallegos, A., Borque-Arancón, M. J., y Gil-Cruz, A. J. (2023). Present-Day Crustal Velocity Field in Ecuador from cGPS Position Time Series. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(6). <https://doi.org/10.3390/s23063301>
3. Blewitt, G., & Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7).
4. Estey, L., y Wier, S. (2014). *Teqc Tutorial: basics of Teqc use and Teqc products* (Issue June).
5. García-Armenteros, J. A. (2020). Monitorización Y Control De Calidad De Las Estaciones De La Red Cgps Topo-Iberia-UJA. *European Scientific Journal*, 16(24). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n24p1>
6. García-Armenteros, J. A. (2023). Quality assessment of the Topo-Iberia CGPS stations and data quality's effects on postfit ionosphere-free phase residuals. *Geodesy and Geodynamics*, 15(2), 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.07.006>
7. Gurtner, W., y Estey, L. (2009). *Rinex (The Receiver Independent Exchange Format) Version 3.01. Available at ftp://igs.org/pub/data/format/rinex301.pdf. June.*
8. Hatanaka, Y. (2008). *A compression format and tools for GNSS observation data.*
9. 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.* Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
10. Hernández-Andrade, D., Romero-Andrade, R., Cabanillas-Zavala, J. L., Ávila-Cruz, M., Trejo-Soto, M. E., y Vega-Ayala, A. (2020). Análisis de calidad de las observaciones GPS en estaciones de operación continua de libre acceso en México. *European Scientific Journal*, 16(33). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p332>
 11. Hernández-Andrade, D., Romero-Andrade, R., Sharma, G., Trejo-Soto, M. E., y Cabanillas-Zavala, J. L. (2022). Quality assessment of Continuous Operating Reference Stations (CORS) - GPS stations in Mexico. *Geodesy and Geodynamics*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.12.003>
 12. Herrada, A., Miranda, S., Fuentes, C., Torres Lobato, O., Pintos, H., y Smalley (Jr), R. (2010). Monitoreo de la calidad de datos GPS continuo: la estación UNSJ (San Juan, Argentina). *Geoacta*, 35(1), 55–62.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1852-77442010000100006
 13. Hu, Y., Cheng, L., y Wang, X. (2016). Quality analysis of the campaign GPS stations observation in Northeast and North China. *Geodesy and Geodynamics*, 7(2), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.03.008>
 14. IGS, 2015. (2015). IGS Site Guidelines. *Organization*, April, 1–9.
 15. Kamatham, Y. (2018). Estimation, analysis and prediction of multipath error for static GNSS applications. *2018 Conference on Signal Processing And Communication Engineering Systems, SPACES 2018, 2018-Janua*, 62–65. <https://doi.org/10.1109/SPACES.2018.8316317>
 16. Kawamoto, S., Takamatsu, N., y Abe, S. (2023). RINGO: A RINEX pre-processing software for multi-GNSS data. *Earth, Planets and Space*, 75(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01811-w>
 17. Nayak, K., Romero-Andrade, R., Sharma, G., Cabanillas-Zavala, J. L., López-Urias, C., Trejo-Soto, M. E., y Aggarwal, S. P. (2023). A combined approach using b-value and ionospheric GPS-TEC for large earthquake precursor detection: a case study for the Colima earthquake of 7 . 7M w, Mexico. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s40328-023-00430-x>
 18. Puskas, C. M., Meertens, C. M., Phillips, D. A., Blume, F., Rost, M., y UNAVCO. (2019). Introduction to Anubis software for GNSS quality control in the GAGE Facility and NOTA. In *UNAVCO*. UNAVCO.

19. Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy. In *Walter de Gruyter GmbH & Co. KG 10785 Berlin* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1080/00050326.1969.10440171>
20. Sharma, G., Nayak, K., Romero-Andrade, R., Mohammed Aslam, M. A., y Sarma, K. K. (2024). Low Ionosphere Density Above the Earthquake Epicentre Region of Mw 7 . 2 , El Mayor – Cucapah Earthquake Evident from Dense CORS Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01837-x>
21. Souto, M. S. (2014a). Análisis de calidad y preprocesamiento de datos GNSS de la estación permanente UCOR (Córdoba, Argentina). *Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1), 91.
22. Souto, M. S. (2014b). Análisis de calidad y preprocesamiento de datos GNSS de la estación permanente UCOR (Córdoba, Argentina). *Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1), 91. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6971>
23. Vázquez, G. E. B., y Grejner-Brzeziska, D. A. (2012). A case of study for pseudorange multipath estimation and analysis: TAMDEF GPS network. *Geofísica Internacional*, 51(1), 63–72. <https://doi.org/doi:null>
24. Vázquez, G. E., Bennett, R., y Spinler, J. (2013). Assessment of Pseudorange Multipath at Continuous GPS Stations in Mexico. *Positioning*, 04(03), 253–265. <https://doi.org/10.4236/pos.2013.43025>
25. Xiao, Y., Yao, M. H., Tang, S. H., Liu, H. F., Xing, P. W., y Zhang, Y. (2020). Data Quality Check and Visual Analysis of Cors Station Based on Anubis Software. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W10(November 2019), 1295–1300. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w10-1295-2020>
26. Yeh, T. K., Wang, C. S., Chao, B. F., Chen, C. S., y Lee, C. W. (2007). Automatic data-quality monitoring for continuous GPS tracking stations in Taiwan. *Metrologia*, 44(5), 393–401. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/5/016>
27. Yigit, C. O., El-mowafy, A., Dindar, A. A., Bezcioglu, M., y Tiryakioglu, I. (2021). Investigating Performance of High-Rate GNSS-PPP and PPP-AR for Structural Health Monitoring : Dynamic Tests on Shake Table. *Journal of Surveying Engineering*, 147(1), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000343)