

Monitoreo y validación del nivel del agua mediante altimetría radar satelital en el Lago Titicaca: evaluación de datos de Sentinel-3A y 3B

Adrian Wilson Mamani C. ^a, Jhon Chura Ch. ^a

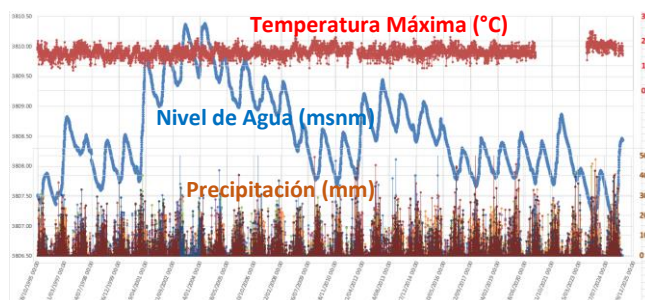
^o Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Estudios e Investigación Hidrológica, La Paz, Bolivia

Email: adrian.mamani@senamhi.gob.bo, jhon.chura@senamhi.gob.bo

Información	RESUMEN
Palabras clave Sentinel Altimetria Lago Titicaca	Este estudio tiene como objetivo explorar y validar el uso de la altimetría satelital como una alternativa innovadora para el monitoreo hidrológico, con énfasis en la estimación del nivel del agua en el lago Titicaca. Ante las limitaciones que presentan los métodos tradicionales de medición en regiones remotas o de difícil acceso, se propone aprovechar las capacidades de las misiones activas Sentinel-3A y Sentinel-3B, pertenecientes al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuyos recorridos orbitales cruzan directamente sobre el lago. Además, se destaca que Sentinel-3A y Sentinel-3B son actualmente las únicas misiones activas cuya órbita permite una repetitividad de 27 días sobre el mismo punto de la zona de estudio, lo que facilita la construcción de series temporales continuas y homogéneas, útiles para análisis hidrológicos de mediano y largo plazo. Para ello, se seleccionaron y analizaron un total de 11 estaciones virtuales altimétricas (seis correspondientes a Sentinel-3A y cinco a Sentinel-3B), así como datos provenientes de la Base de Datos de Series Temporales Hidrológicas de Aguas Continentales (DAHITI) y registros de una estación hidrométrica convencional Huatajata, utilizada como punto de referencia para la validación. El procedimiento metodológico comprendió varias etapas: la recolección de datos satelitales, el filtrado y selección de estaciones virtuales, la aplicación de correcciones geodésicas y temporales, el ajuste de las alturas mediante calibración con la estación in situ y el análisis estadístico de la correspondencia entre los distintos conjuntos de datos, utilizando el coeficiente de correlación (R^2). Este indicador permitió cuantificar el grado de correlación entre las mediciones satelitales y las observaciones de campo. Este análisis fue el único método aplicado debido a su mayor aplicabilidad dentro del presente estudio.
1. Introducción	agua. Las mediciones tradicionales, basadas en estaciones hidrométricas, presentan limitaciones notables debido a su cobertura espacial restringida y a la dificultad de acceso en ciertas zonas del lago, especialmente en áreas remotas o poco intervenidas. Desde una perspectiva ecológica, el Lago Titicaca alberga una biodiversidad excepcional, con altos niveles de endemismo, particularmente entre peces,

moluscos y anfípodos. No obstante, este ecosistema enfrenta presiones crecientes debido a múltiples factores antrópicos, entre ellos la contaminación por aguas residuales domésticas e industriales, la sobrepesca, el crecimiento urbano no planificado y, especialmente, los efectos del cambio climático. Este último se manifiesta en la reducción de las precipitaciones, el aumento de las temperaturas y la intensificación de la evaporación, lo que agrava la pérdida progresiva del nivel del agua.

La **Gráfica 1** presenta la relación dinámica entre las variables precipitación, temperatura máxima y nivel del río. Se observa un patrón de comportamiento interrelacionado entre estas tres variables, destacando que cuando la temperatura máxima aumenta, se tiende a registrar una disminución en el nivel del río, aunque con un cierto desfase temporal, de manera similar, los eventos de precipitación influyen en el aumento del nivel del río, también con un retardo temporal característico del proceso hidrológico de escorrentía y respuesta del cauce.



Gráfica 1: Relación Dinámica entre Variables Climáticas e Hidrológicas (Precipitación, Temperatura Máxima y Nivel de Río)

Los efectos de esta situación ya se evidencian tanto en observaciones in situ como en datos satelitales. Herramientas como la plataforma Global Surface Water que se muestra en la **figura 1** revelan una disminución sostenida en la extensión del espejo de agua en las últimas décadas, especialmente en zonas someras como el Lago Menor y las bahías de Puno. Estas imágenes satelitales, junto con mediciones Hidrométricas locales, confirman una tendencia

alarmante en la contracción del cuerpo de agua, lo que pone en riesgo no solo el equilibrio ecológico, sino también la sostenibilidad económica y social de las comunidades que dependen directamente del lago.

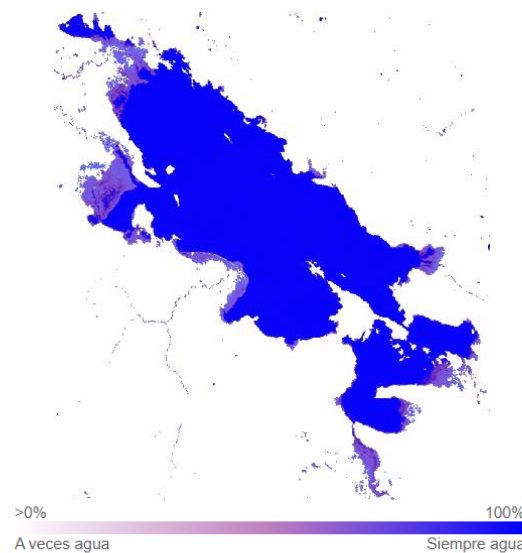


Figura 1: Recurrencia de aguas superficiales (Global Surface Water)

En particular, la misión Sentinel-3, del programa europeo Copernicus, lanzada por la Agencia Espacial Europea (ESA), proporciona datos valiosos para el monitoreo del nivel del agua. Equipados con el altímetro de radar SRAL (SAR Radar Altimeter), los satélites Sentinel-3A (lanzado en 2016) y Sentinel-3B (2018) ofrecen mediciones precisas de la altura de la superficie terrestre y oceánica. El SRAL opera en modo de radar de apertura sintética (SAR), lo que mejora significativamente la resolución espacial y la precisión de los datos altimétricos, incluso sobre superficies interiores como lagos y ríos.

Gracias a su repetitividad (con una frecuencia de 27 días por satélite, y 13.5 días con ambos en operación simultánea) y su cobertura global, Sentinel-3 permite generar series temporales detalladas del nivel del agua en el Lago Titicaca, detectando variaciones a escala centimétrica. Esta capacidad resulta crucial para analizar tendencias a largo plazo, eventos extremos (como sequías o lluvias intensas) y evaluar los efectos del cambio climático en el balance hídrico del lago. Además, los productos de Sentinel-3 están

disponibles de manera abierta y gratuita, lo que facilita su uso por parte de investigadores, tomadores de decisiones y agencias ambientales.

En la **Figura 2** se muestran los recorridos orbitales de los satélites Sentinel-3A y Sentinel-3B sobre la zona de estudio (Lago Titicaca).

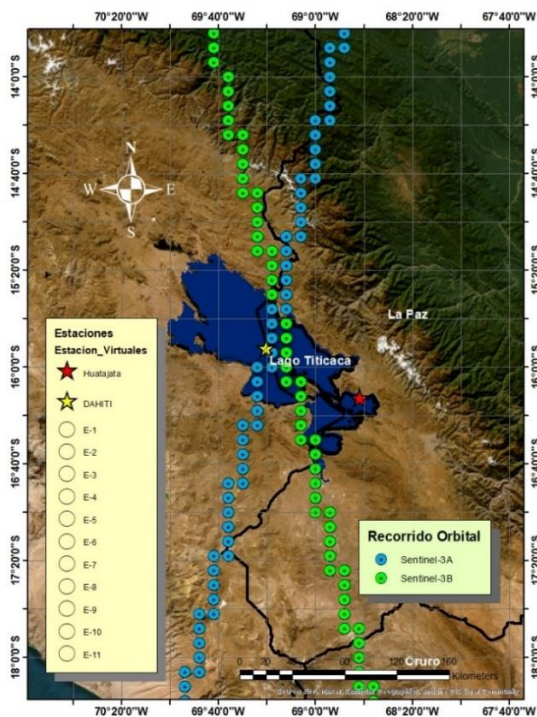


Figura 2: Recorridos orbitales de los satélites Sentinel-3A y 3B sobre la zona de estudio (Lago Titicaca).

2. Descripción de la zona de estudio

El área de estudio se centra en el Lago Titicaca, el cuerpo de agua navegable más alto del mundo, ubicado en la región altiplánica andina, en la frontera entre Perú y Bolivia, a una altitud aproximada de 3,810 metros sobre el nivel del mar. El lago cubre una superficie cercana a los 8,372 km² y se divide en dos sectores principales: el Lago Mayor y el Lago Menor.

Desde una perspectiva hidrológica, el Lago Titicaca se comporta como un sistema cuasi cerrado, donde más del 90 % de la pérdida de agua ocurre por evaporación, lo que lo hace particularmente sensible a la variabilidad climática. En años recientes, el lago ha experimentado una preocupante disminución en su

nivel. De acuerdo con los registros de la estación hidrométrica de Huatajata (Bolivia), el Lago Titicaca alcanzó sus niveles más bajos en noviembre y diciembre de los años 2023 (**figura 3**) y 2024, y nuevamente en enero de 2025, marcando una de las peores crisis hídricas registradas en décadas. Esta situación estuvo asociada a una combinación de escasas precipitaciones, temperaturas elevadas y procesos de evaporación intensificada. Sin embargo, a partir del primer trimestre de 2025, se observó una recuperación significativa en el nivel del agua, la cual ha superado los niveles alcanzados en 2023 y 2024, aunque aún se mantiene por debajo del promedio histórico.



Imagen 3: Preocupación en Bolivia por crítica bajante del Lago Titicaca 2023 (www.diariolatina.news)

3. Metodología

La metodología se estructura de la siguiente:

3.1 Ubicación y selección de estaciones

3.1.1 Identificación de estaciones virtuales:

A partir de las trayectorias de los satélites Sentinel-3A y Sentinel-3B que cruzan el Lago Titicaca, identificadas mediante el traslape con el área de estudio utilizando las plataformas Panoply, ArcGIS y QGIS, se seleccionaron 11 estaciones virtuales distribuidas entre el Lago Mayor y el Lago Menor, priorizando la cobertura espacial y la continuidad temporal de los datos. En la **Figura 4** se presentan la ubicación de las estaciones virtuales (Sentinel-3A y Sentinel-3B), junto con la estación DAHITI y la estación hidrométrica de Huatajata.

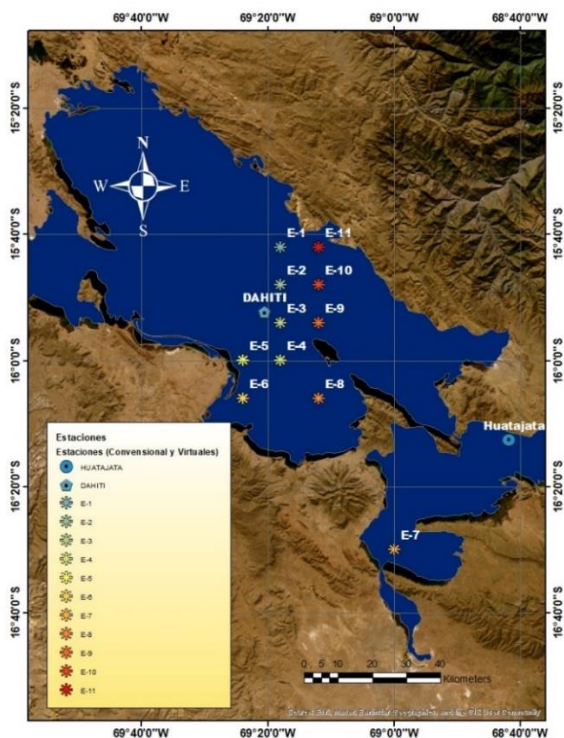
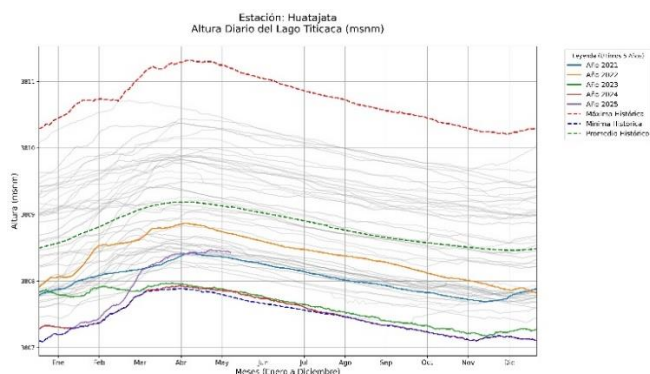


Figura 4: Ubicación de las Estaciones virtuales (Sentinel-3A y Sentinel-3B), DAHITI y la estación de Huatajata

3.1.1 Estaciones in situ de referencia:

Se recopilaron registros históricos diarios de niveles de agua de estaciones hidrométricas operadas por el SENAMHI (Bolivia). En la **Gráfica 1** se presenta la estación de Huatajata como referencia principal, destacando por su fiabilidad y continuidad en el periodo 1973–2025.



Gráfica 1: Niveles históricos (Máximos, Mínimos y Promedios anuales) (1973-2025) estación Huatajata (SENAMHI-BOLIVIA)

3.2 Obtención y procesamiento de datos altimétricos

3.2.1 Acceso a datos Sentinel-3:

Se descargaron datos de nivel 2 (L2) de los altímetros radar SRAL desde el portal Copernicus Open Access Hub (SciHub), EARTHDATA Y EUMETSAT, para los años 2019 a 2025.

3.2.2 Selección y preprocesamiento:

Los datos fueron filtrados en función de la ubicación geográfica correspondiente al área del Lago Titicaca, utilizando herramientas especializadas como el software VALS. Este programa permite realizar un preprocesamiento detallado que incluye la selección espacial y la corrección del efecto *hooking*, lo que contribuye a la depuración de valores atípicos y garantiza una mayor precisión en las mediciones altimétricas.

La **Figura 5** ilustra el procedimiento de procesamiento de los datos altimétricos considerando el efecto *hooking*.

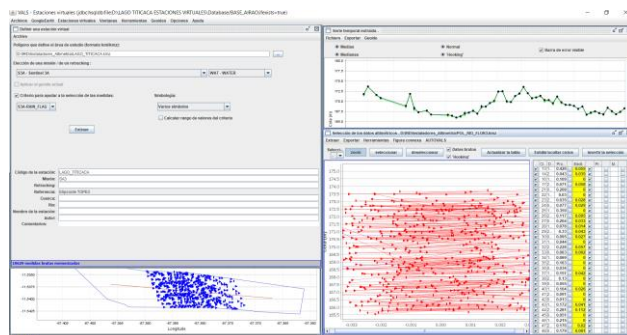
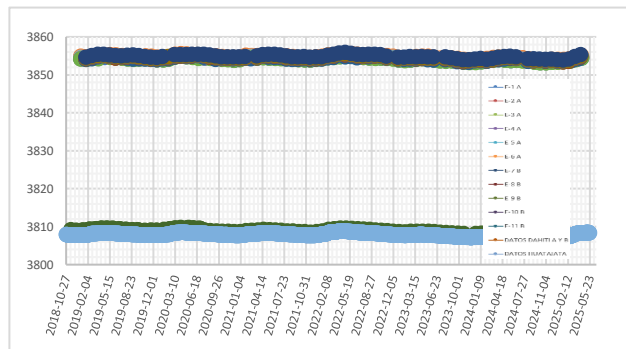


Figura 5: Procesamiento de datos Altimétricos con VALS

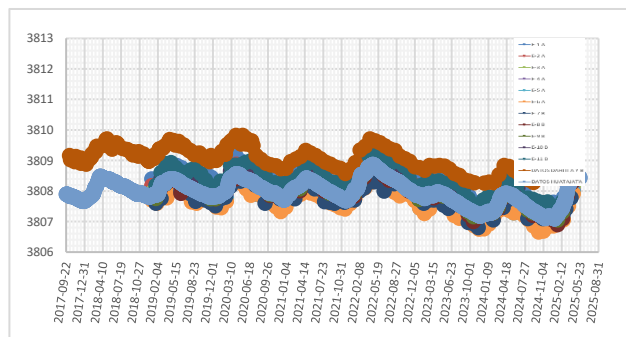
3.2.3 Correcciones de las Estaciones Virtuales:

Se aplicaron las correcciones necesarias a todas las estaciones virtuales tomando como referencia los datos in situ de la estación hidrométrica de Huatajata. Estas correcciones incluyeron el ajuste de cotas para las 11 estaciones virtuales seleccionadas y la base de datos de DAHITI.

Las **Gráficas 2 y 3** muestran los niveles y los niveles ajustados de las 11 estaciones virtuales, DAHITI y la estación de Huatajata, tomando esta última como referencia.



Gráfica 2: Niveles de las 11 Estaciones virtuales (Sentinel-3A y Sentinel-3B), DAHITI y la estación de Huatajata

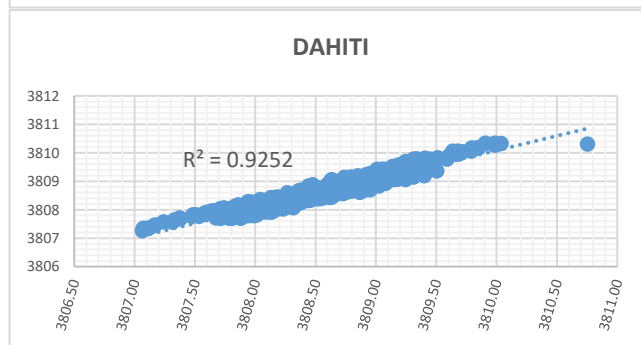
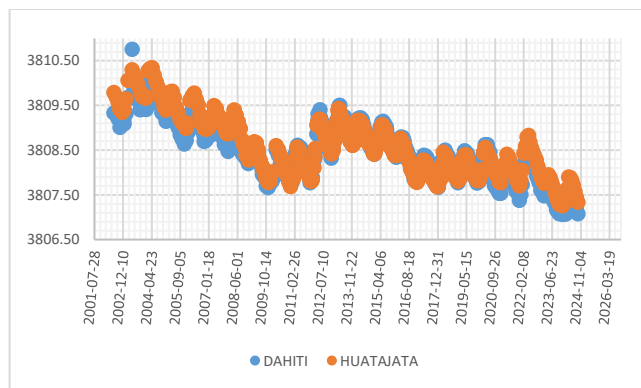


Gráfica 3: Niveles ajustados de las 11 Estaciones virtuales (Sentinel-3A y Sentinel-3B), DAHITI a partir de la estación Huatajata

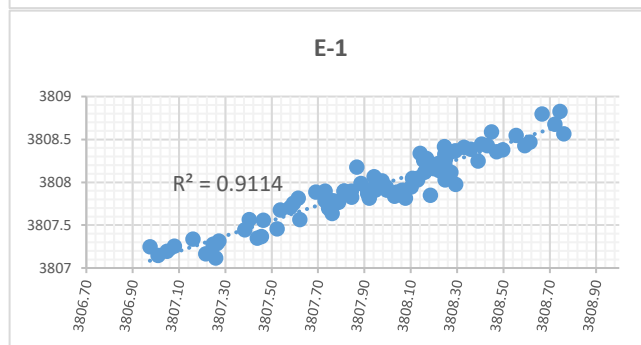
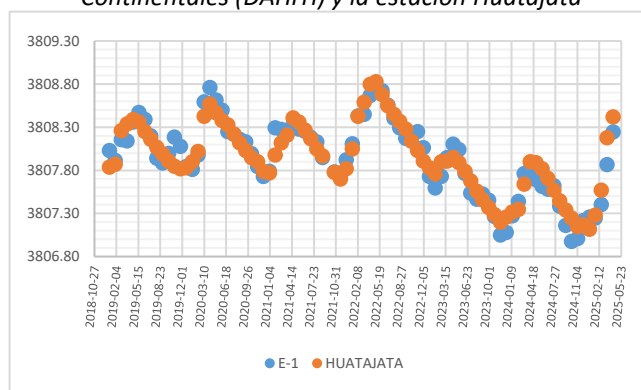
3.3 Comparación y Validación:

Para evaluar la precisión de los datos altimétricos satelitales, se validaron las series generadas por 11 estaciones virtuales de los satélites Sentinel-3A y 3B, comparándolas con los registros de la estación hidrométrica convencional de Huatajata (SENAMHI-Bolivia), durante el periodo 2019–2025. Como indicador de concordancia se utilizó el coeficiente de correlación R^2 .

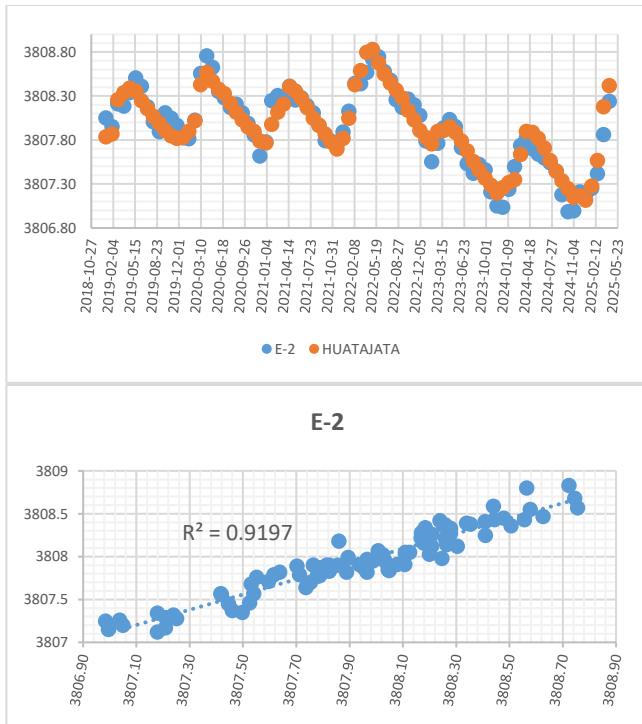
Las siguientes **gráficas** presentan los resultados de la comparación entre los niveles de agua medidos en las 11 estaciones virtuales y los registros in situ de la estación de Huatajata.



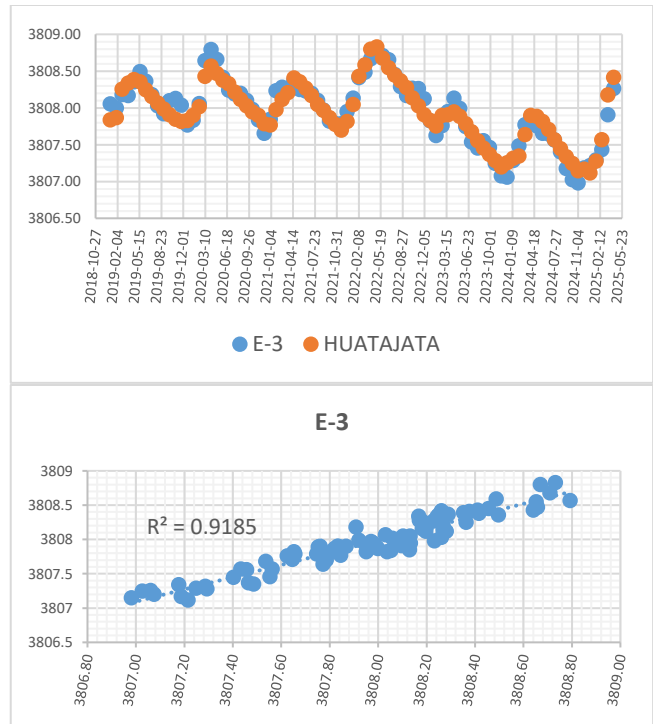
Gráfica 4: Resultados de la comparación entre la Base de Datos de Series Temporales Hidrológicas de Aguas Continentales (DAHITI) y la estación Huatajata



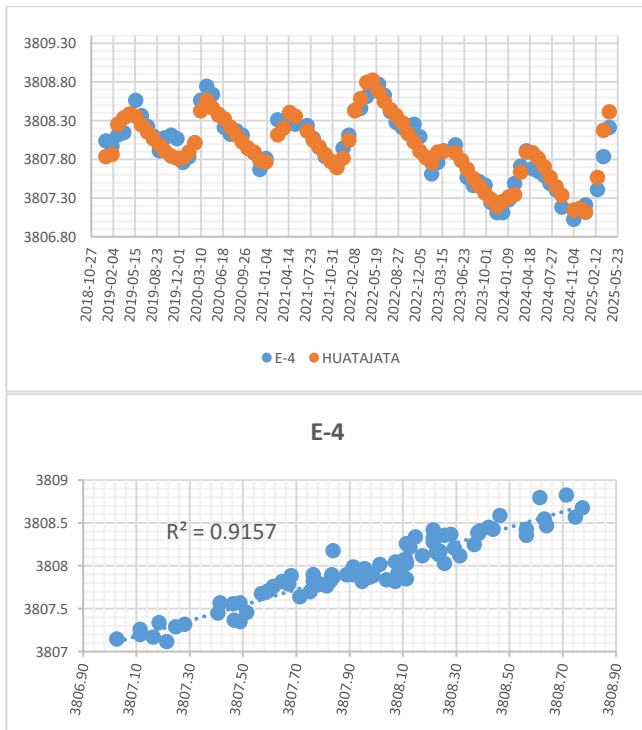
Gráfica 5: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-1 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



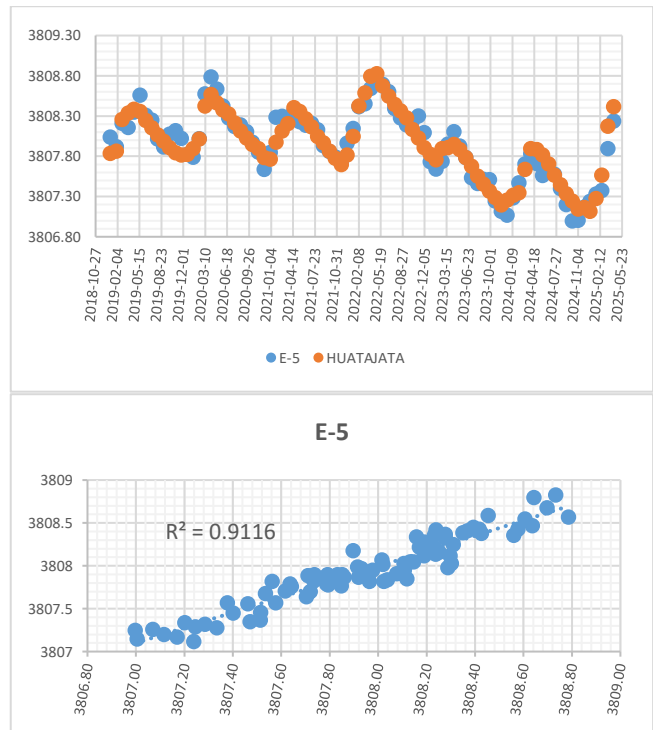
Gráfica 6: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-2 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



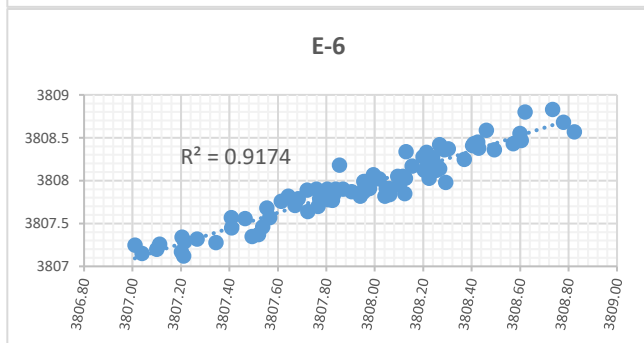
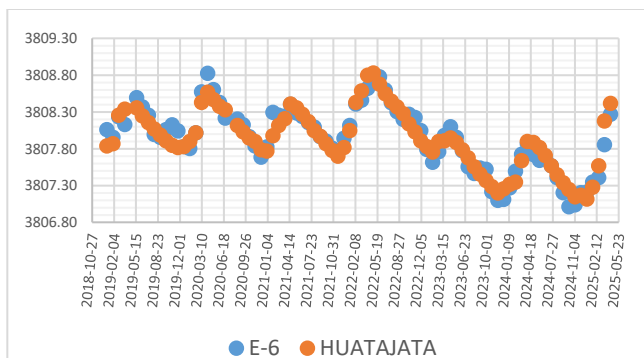
Gráfica 7: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-3 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



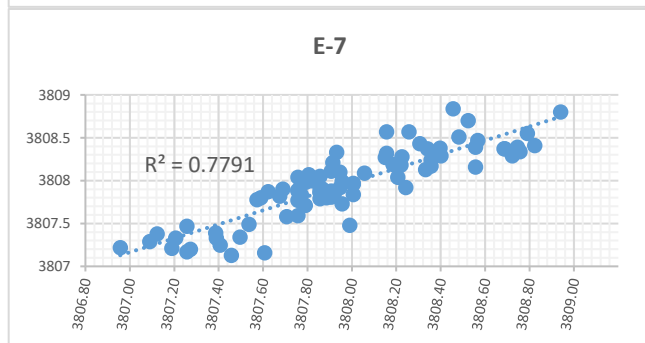
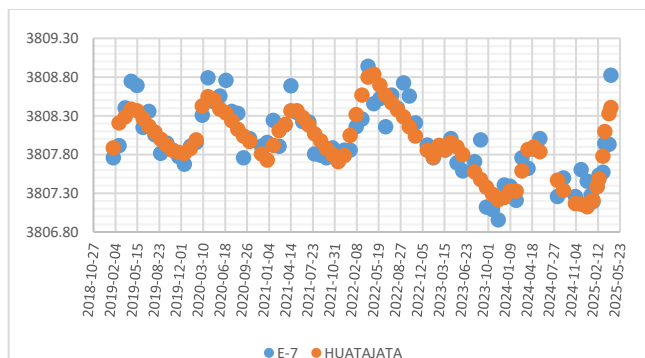
Gráfica 8: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-4 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



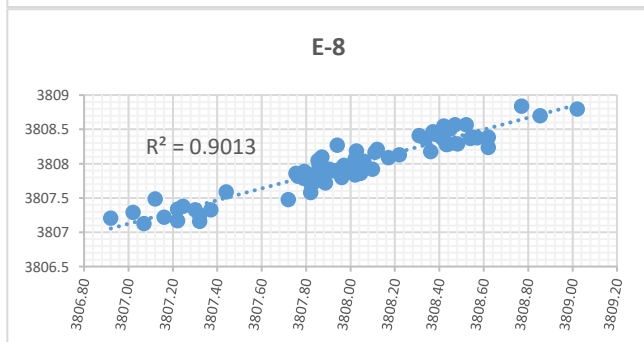
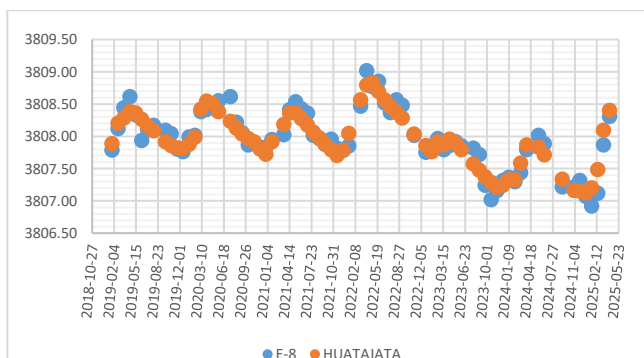
Gráfica 9: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-5 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



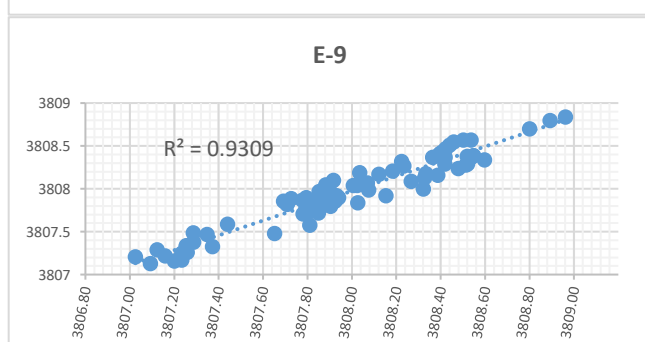
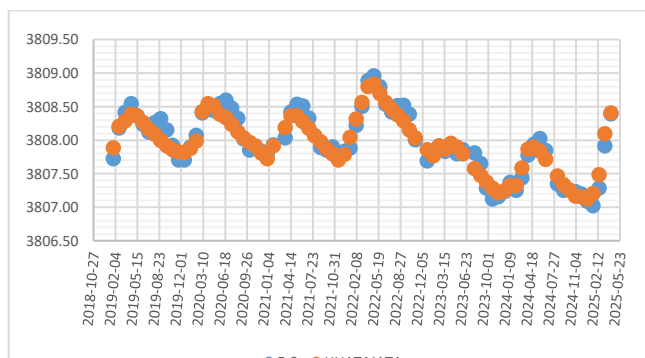
Grafica 10: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-6 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



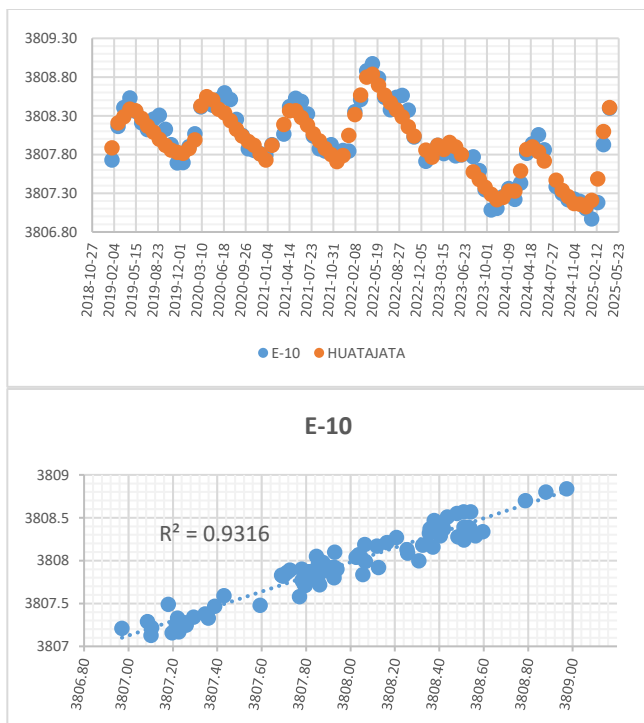
Grafica 11: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-7 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



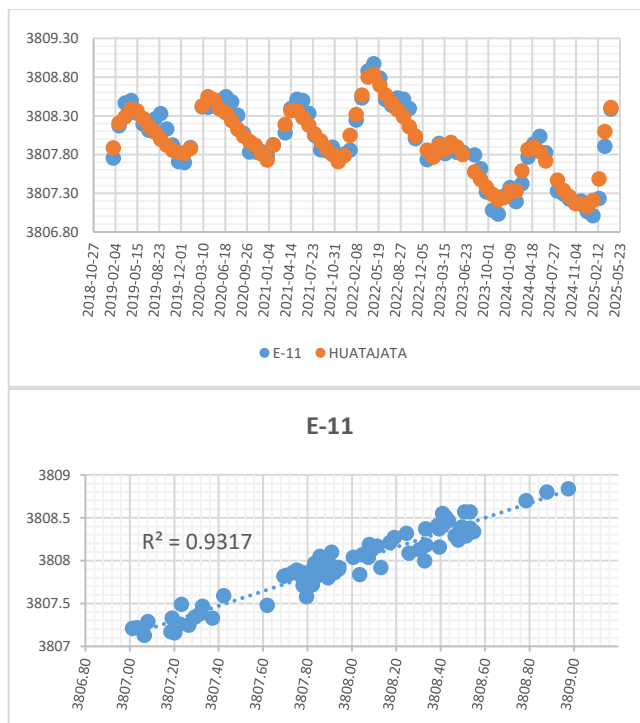
Grafica 12: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-8 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



Grafica 13: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-9 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



Gráfica 14: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-10 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata



Gráfica 15: Resultados de la comparación entre los niveles de agua basados en la altimetría E-11 de Sentinel-3A y los in situ de la estación Huatajata

4. Resultados de la validación

Se realizó la validación de los niveles de agua obtenidos mediante altimetría satelital Sentinel-3A y 3B, comparándolos con los registros in situ de la estación hidrométrica de HUATAJATA para el período 2019–2025. La comparación se centró en 11 estaciones virtuales distribuidas en el Lago Titicaca, y se evaluó la correlación mediante el coeficiente de determinación (R^2).

La **Figura 6** ilustra la distribución espacial de las 11 estaciones virtuales y su coeficiente de correlación (R^2) respecto a la estación hidrométrica de Huatajata, permitiendo visualizar cómo se relacionan los niveles de agua estimados por los satélites con los registros in situ. Complementariamente, la **Tabla 1** presenta los valores de R^2 entre cada estación virtual y los datos medidos directamente en Huatajata, proporcionando una medida cuantitativa de la concordancia entre ambos conjuntos de datos.

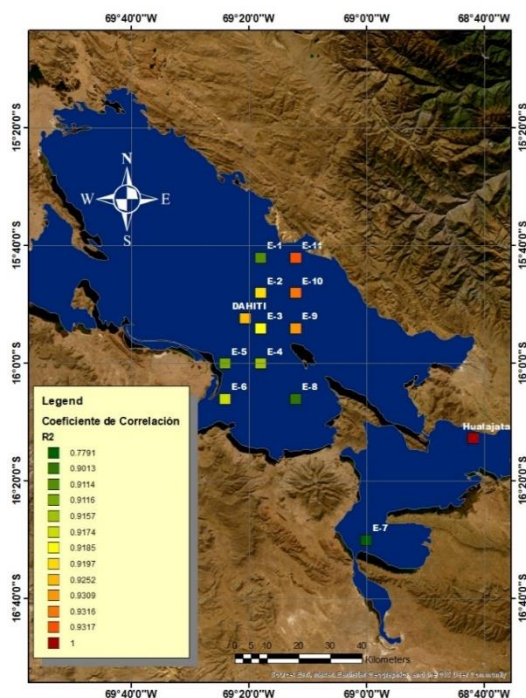


Figura 6: Distribución espacial de estaciones virtuales y su coeficiente de correlación (R^2) con respecto a la estación hidrométrica de Huatajata

Estación Virtual	Satélite	Longitud	Latitud	R ²
HUATAJATA		-68.70	-16.21	1
DAHITI		-69.34	-15.87	0.9252
E-1	Sentinel-3A	-69.3	-15.7	0.9114
E-2	Sentinel-3A	-69.3	-15.8	0.9197
E-3	Sentinel-3A	-69.3	-15.9	0.9185
E-4	Sentinel-3A	-69.3	-16	0.9157
E-5	Sentinel-3A	-69.4	-16	0.9116
E-6	Sentinel-3A	-69.4	-16.1	0.9174
E-7	Sentinel-3B	-69	-16.5	0.7791
E-8	Sentinel-3B	-69.2	-16.1	0.9013
E-9	Sentinel-3B	-69.2	-15.9	0.9309
E-10	Sentinel-3B	-69.2	-15.8	0.9316
E-11	Sentinel-3B	-69.2	-15.7	0.9317

Tabla 1: Coeficiente de determinación (R²) entre estaciones virtuales y registros in situ de la estación Huatajata

5.4 Análisis y discusión

La validación de las 11 estaciones virtuales de Sentinel-3A y 3B mostró una fuerte concordancia con la estación hidrométrica de Huatajata, con la mayoría de valores de $R^2 > 0.91$, lo que confirma la alta precisión de los datos altimétricos para el Lago Titicaca.

Las estaciones con mejor desempeño fueron:

E-11, E-10, E-9, E-8 (Sentinel-3B) y E-1, E-2, E-3, E-4 y E-5 (Sentinel-3A), todas con $R^2 > 0.9$, ubicadas en el sector norte y central del Lago Mayor, donde las condiciones hidrológicas son más estables y adecuadas para la observación satelital.

La estación E-7 ($R^2 = 0.7791$), situada en el Lago Menor, presentó la correlación más baja. Esto se debe a sus características particulares: menor profundidad, más sensible a los cambios del clima, durante las sequías, puede quedar parcialmente aislada del resto del lago mayor. Sin embargo, su valor es significativo, ya que es la única estación que monitorea esa zona del Lago Menor, la cual ha mostrado alta sensibilidad a eventos extremos recientes como las sequías de 2023–2025.

Base de Datos de Series Temporales Hidrológicas de Aguas Continentales (DAHITI) también presentó una excelente correlación ($R^2 = 0.9252$), validando su utilidad como referencia.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

La validación de los datos altimétricos de 11 estaciones virtuales mostró una alta concordancia con los registros in situ de la estación hidrométrica de Huatajata, con coeficientes de determinación $R^2 > 0.90$ en la mayoría de los casos.

Las estaciones con mejor desempeño (E-11, E-10, E-9, E-8, E-1, E-2, E-3, E-4 y E-5) están ubicadas en el Lago Mayor, donde las condiciones hidrológicas son más estables, lo cual favorece la precisión de las mediciones satelitales.

La estación virtual E-7, ubicada en el Lago Menor, presentó un valor de R^2 inferior a 0.9. No obstante, su aporte sigue siendo relevante, ya que proporciona información valiosa sobre esta zona del Lago Titicaca.

La base de datos de DAHITI también mostró excelente desempeño ($R^2 = 0.9252$), lo que confirma la confiabilidad de los productos altimétricos ya procesados por centros especializados y respalda su uso en estudios hidrológicos.

En conjunto, los resultados confirman que la altimetría satelital es una herramienta confiable y efectiva para el monitoreo hidrológico del Lago Titicaca, especialmente útil ante la limitada cobertura de estaciones convencionales.

6.2. Recomendaciones

Usar la altimetría satelital como apoyo para complementar los datos de la red hidrométrica convencional, especialmente en casos donde no se logren registrar mediciones debido a fallas técnicas u otros problemas. Además, estos datos satelitales

pueden servir como referencia para evaluar la calidad de las mediciones in situ y así ayudar en la calibración de las estaciones. Esto fortalecería el seguimiento continuo y la capacidad de alerta temprana ante eventos extremos como sequías prolongadas o aumentos críticos en el nivel del lago.

Fomentar la aplicación de este tipo de estudios en otros cuerpos de agua, como el Lago Poopó, represas o ríos de difícil acceso, donde las condiciones geográficas y logísticas dificultan la instalación y mantenimiento de estaciones in situ. Este enfoque puede ofrecer soluciones efectivas para el monitoreo hidrológico en regiones remotas y vulnerables.

7. Referencias

- Sakaros Bogning, Frédéric Frappart, Fabien, Fernando Niño, Gil Mahé, Jean-Pierre Bricquet, Frédérique Seyler, Raphaël Onguéné, Jacques Etamé, Marie-Claire Paiz and Jean-Jacques Braun. *Monitoring Water Levels and Discharges Using Radar Altimetry in an Ungauged River Basin: The Case of the Ogooué*. (2018).
- Cecile M. M. Kittel, Liguang Jiang, Christian Tøttrup, and Peter Bauer-Gottwein. *Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring – a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B*. (2021)
- *Manual del Usuario vals - Definición y actualización de estaciones virtuales* (noviembre de 2022)
- *Agencia Nacional de Aguas e Saneamiento Básico (ANA), Rafael de Araujo, ALTIMETRIA POR SATÉLITE*
- *EUMETSAT, Sentinel-3 altimetry level 2 data guide, 18 de Oct 2024*
- <https://www.diariolatina.news/nota-preocupacion-en-bolivia-por-critica-bajante-del-lago-titicaca-63946>