

NOTA / NOTE

## Perspectivas adicionales a Valverde y Castillo (2024) sobre los cambios en el nivel del mar en la costa caribeña de Costa Rica

### Further insights into sea level changes along the Caribbean coast of Costa Rica beyond Valverde and Castillo (2024)

Alberto Boretti

 0000-0002-3374-0238

a.a.boretti@gmail.com

Independent Scientist, Wellington 6037, New Zealand

**Recibido / Received:** 06/07/2024

**Aceptado / Accepted:** 08/10/2024

**Citación / Citation:** Boretti, A. 2025. Perspectivas adicionales a Valverde y Castillo (2024) sobre los cambios en el nivel del mar en la costa caribeña de Costa Rica. Bol. Invest. Mar.Cost., 54(1): 185-195

#### RESUMEN

El estudio subraya la necesidad crítica de contar con registros de mareógrafos de alta calidad que abarquen más de 60 años para determinar con precisión las tasas de aumento relativo del nivel del mar, ya que las tendencias a corto plazo basadas en datos limitados pueden ser engañosas. También enfatiza la importancia de combinar las mediciones del nivel del mar relativo con datos sobre el movimiento absoluto de la tierra donde se encuentra el mareógrafo, ya que las tasas más altas de aumento relativo del nivel del mar a menudo coinciden con una subsidencia significativa del terreno. Al comparar los datos de nivel del mar relativo y de subsidencia absoluta de localidades en Costa Rica y Panamá, el estudio revela tasas variables de aumento del nivel del mar y de subsidencia, lo que ilustra la complejidad de interpretar las tendencias del nivel del mar. Esta contribución destaca la necesidad de considerar factores locales como la subsidencia al evaluar los impactos del cambio climático en las regiones costeras y al formular estrategias de adaptación efectivas.

**Palabras clave:** cambio climático, sistemas costeros, mareógrafos, altimetría satelital, subsidencia local.

#### ABSTRACT

This study underscores the critical need for high-quality tide gauge records spanning over 60 years to accurately determine relative sea level rise rates, as short-term trends based on limited data can be misleading. It also emphasizes the importance of pairing relative sea level measurements with data on the absolute motion of the land where the tide gauge is situated, as higher rates of relative sea level rise often coincide with significant land subsidence. By comparing relative sea level and absolute subsidence data from locations in Costa Rica and Panama, the study reveals varying rates of sea level rise and subsidence, illustrating the complexities involved in interpreting sea level trends. This contribution highlights the necessity of considering local factors like subsidence when assessing the impacts of climate change on coastal regions and formulating effective adaptation strategies.

**Keywords:** climate change, coastal systems, tide gauges, satellite altimetry, local subsidence.

Valverde y Barrantes (2024) investigan los cambios en el nivel del mar en los sistemas costeros debido al cambio climático, utilizando datos de la estación de mareógrafo en Limón, Costa Rica. Analizaron dos registros de mareógrafo diferentes mediante análisis de regresión lineal simple y descomposición de series temporales. Desde 1952 hasta 1968, las tasas de aumento del nivel del mar fueron de 2.32 mm/año y 3.41 mm/año, respectivamente. Desde 2009 hasta 2021, las tasas aumentaron a 4.18 mm/año y 4.28 mm/año. Los autores concluyen que estos resultados confirman una tendencia ascendente en los niveles del mar en la región estudiada, lo cual debe considerarse en estudios costeros, como la erosión costera identificada en partes de la zona del Caribe costarricense.

Los datos más antiguos fueron recolectados por el mareógrafo de Puerto Limón (PSMSL, 2024a; Latitud: 10, Longitud: -83.033333, Período de datos RLR: 1948 – 1968, Completitud RLR: 92 %, Período de datos métricos: 1948 – 1980, Completitud métrica: 79 %). Los datos más recientes fueron recolectados por el mareógrafo Limón B (PSMSL, 2024b; Latitud: 9.988333, Longitud: -83.02, Período de datos: 2009 – 2018, Completitud: 93 %). Los dos conjuntos de datos de mareógrafo son difíciles de combinar, y, por separado, son demasiado cortos para inferir una tendencia adecuada.

Se sabe que los niveles del mar presentan oscilaciones de hasta casi 60 años (Schlesinger y Ramankutty, 1994; Douglas, 1995; Chambers *et al.*, 2012). Por lo tanto, se necesitan más de 60 años de datos para calcular la tasa relativa de aumento del nivel del mar a partir de las series temporales de nivel relativo del mar, y casi el doble de esta longitud para calcular la aceleración del nivel relativo del mar. Así, inferir una tasa relativa de aumento del nivel del mar basada en 10 años de datos de Limón no está justificado. Del mismo modo, comparar dos análisis a corto plazo de datos recolectados en diferentes períodos, y probablemente ni siquiera en la misma ubicación con el mismo instrumento, tampoco está justificado.

Numerosos estudios, como los de Boretti (2012, 2024), han subrayado la necesidad crítica de contar con datos de alta calidad sobre el nivel relativo del mar que se extiendan bien más allá de los 60 años, complementados con información sobre subsidencia. Confiar en fluctuaciones a corto plazo en los niveles relativos del mar o descuidar la subsidencia puede ser particularmente engañoso para guiar la gestión oceánica y costera. La pregunta

Valverde and Barrantes (2024) investigate sea level changes in coastal systems due to climate change, using data from the tide gauge station in Limón, Costa Rica. They analyzed two different tide gauge records using simple linear regression analysis and time series decomposition. From 1952 to 1968, the sea level rise rates were 2.32 mm/yr and 3.41 mm/yr, respectively. From 2009 to 2021, the rates increased to 4.18 mm/yr and 4.28 mm/yr. The authors conclude that these results confirm a rising trend in sea levels in the studied region, which should be considered in coastal studies, such as the coastal erosion identified in parts of the Costa Rican Caribbean zone.

The older data were collected by the Port Limón tide gauge (PSMSL, 2024a; Latitude: 10, Longitude: -83.033333, Period of RLR data: 1948 – 1968, RLR completeness: 92 %, Period of metric data: 1948 – 1980, Metric completeness: 79 %). The newer data were collected by the Limón B tide gauge (PSMSL, 2024b; Latitude: 9.988333, Longitude: -83.02, Period of data: 2009 – 2018, Completeness: 93 %). The two sets of tide gauge data are difficult to combine, and individually, they are too short to infer a proper trend.

Sea levels are known to exhibit up to quasi-60-year oscillations (Schlesinger and Ramankutty, 1994; Douglas, 1995; Chambers *et al.*, 2012). Therefore, more than 60 years of data are needed to compute the relative rate of sea level rise from the relative sea level time series, and almost double this length is needed to compute the relative sea level acceleration. Thus, inferring a relative rate of sea level rise based on 10 years of data from Limón is not warranted. Similarly, comparing two short-term analyses for data collected in different periods, and likely not even in the same location with the same instrument, is also not warranted.

Numerous studies, such as those by Boretti (2012, 2024), have underscored the critical need for high-quality relative sea level data extending well beyond 60 years, complemented by subsidence information. Relying on short-term fluctuations in relative sea levels or neglecting subsidence can be particularly misleading for guiding ocean and coastal management. The research question addressed in this work is what are the differences in relative sea level trends between the Caribbean and Pacific coasts of Central America, and how does subsidence influence these differences.

de investigación abordada en este trabajo es: ¿Cuáles son las diferencias en las tendencias del nivel relativo del mar entre las costas del Caribe y del Pacífico de Centroamérica, y cómo influye la subsidencia en estas diferencias?

### Cambios en el nivel del mar a lo largo de la costa Caribe y Pacífica de Costa Rica y Panamá

La **Figura 1** muestra el área de estudio ampliada. El mapa de PSMSL ilustra la limitada cobertura de mareógrafos de largo plazo en América Central. Muestra que el único mareógrafo con un registro que supera los 100 años se encuentra en Panamá (indicado por un punto negro), mientras que todos los mareógrafos en Costa Rica tienen registros de menos de 30 años (marcados con puntos amarillos).

### Sea Level Changes Along the Caribbean and Pacific Coast of Costa Rica and Panama

**Figure 1** depicts the extended study area. The map from PSMSL highlights the sparse distribution of long-term tide gauges in Central America. It reveals that the sole tide gauge with a record exceeding 100 years is situated in Panama (marked by a black spot), whereas all tide gauges in Costa Rica have records of less than 30 years (denoted by yellow spots).



**Figura 1.** Área de estudio. El mapa de <https://psmsl.org/data/obtaining/map.html> ilustra la cobertura limitada de mareógrafos de largo plazo en América Central. Muestra que el único mareógrafo con un registro que se extiende más allá de los 100 años se encuentra en Panamá (indicado por un punto negro), mientras que todos los mareógrafos en Costa Rica tienen registros de menos de 30 años (marcados con puntos amarillos).

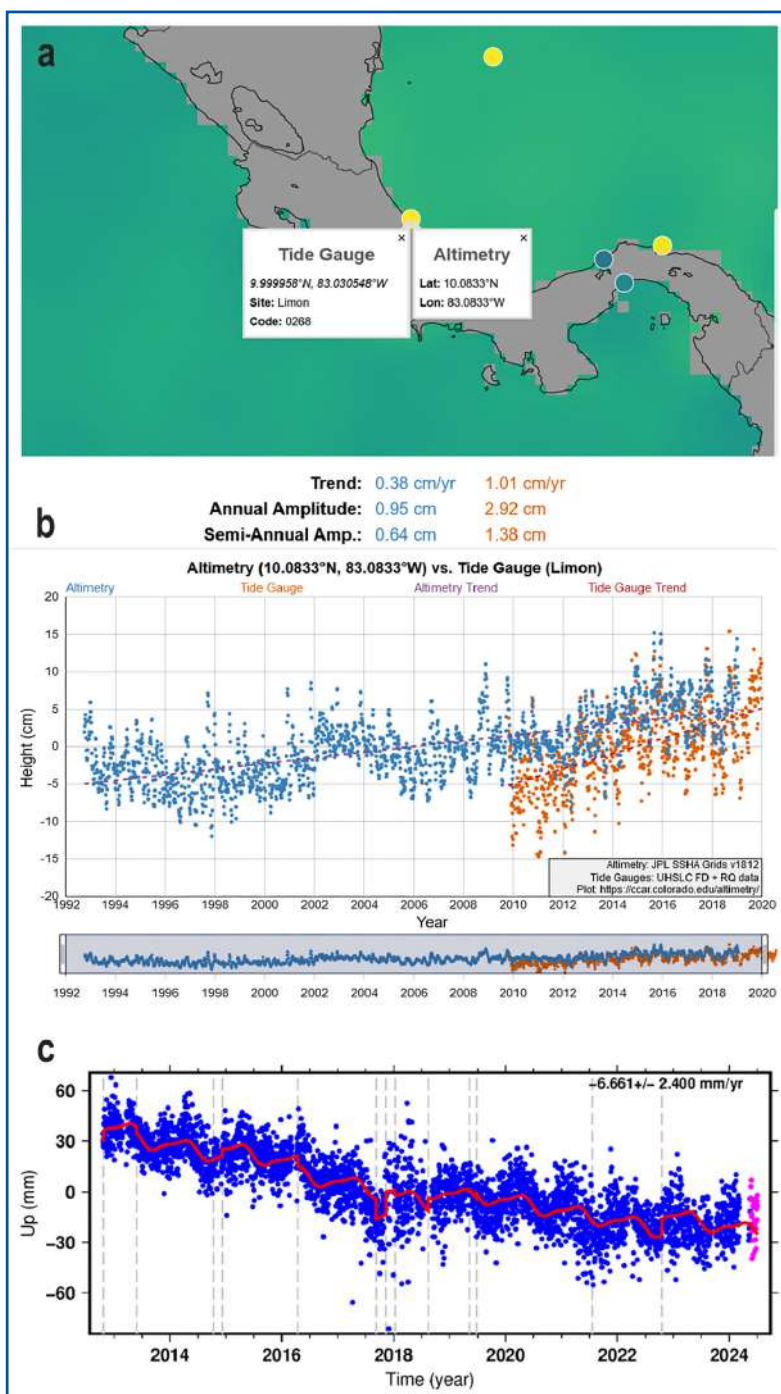
**Figure 1.** Study Area. The map from <https://psmsl.org/data/obtaining/map.html> illustrates the limited coverage of long-term tide gauges in Central America. It shows that the only tide gauge with a record extending beyond 100 years is located in Panama (indicated by a black spot), while all tide gauges in Costa Rica have records shorter than 30 years (marked by yellow spots).

La tendencia a corto plazo durante los últimos 30 años se puede estimar mejor considerando los niveles absolutos del mar medidos por altimetría satelital. El nivel absoluto del mar refleja los cambios en el volumen de las aguas oceánicas debido a la expansión térmica y la adición de masa por el derretimiento de hielo terrestre, mientras que el nivel relativo del mar también incluye la subsidencia del instrumento. Utilizando el explorador de nivel

The short-term trend over the last 30 years can be better estimated by considering the absolute sea levels measured by satellite altimetry. The absolute sea level reflects changes in the volume of ocean waters due to thermal expansion and mass addition from the melting of land ice, while the relative sea level also includes the subsidence of the instrument. Using the sea level explorer (Colorado University, 2024), the absolute sea levels

del mar (Universidad de Colorado, 2024), los niveles absolutos del mar frente a la costa de Limón han estado aumentando a una tasa de 3.8 mm/año desde 1993. El nivel relativo del mar está aumentando mucho más rápido en Limón, probablemente debido a la subsidencia (Figuras 2a y 2b).

off the coast of Limón have been rising at a rate of 3.8 mm/yr since 1993. The relative sea level is rising much faster in Limón, likely due to subsidence (Figures 2a and 2b).



**Figura 2.** Limón (costa Caribe de Costa Rica). **a)** Ubicación del mareógrafo y punto de cuadrícula del altímetro satelital. **b)** Niveles medios relativos y absolutos del mar. **c)** Subsidencia a menos de 20 km tierra adentro de Limón. Imágenes a y b de la Universidad de Colorado (2024). Explorador de nivel del mar (ccar.colorado.edu/altimetry/). Imagen c del Laboratorio Geodésico de Nevada (2024). Red GPS. geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html

**Figure 2.** Limón (Costa Rica Caribbean coast). **a)** location of the tide gauge and satellite altimeter grid point. **b)** Relative and absolute mean sea levels. **c)** Subsidence less than 20 km inland from Limón. Images a and b from Colorado University (2024). Sea level explorer (ccar.colorado.edu/altimetry/). Image c from Nevada geodetic laboratory (2024). GPS net. geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html

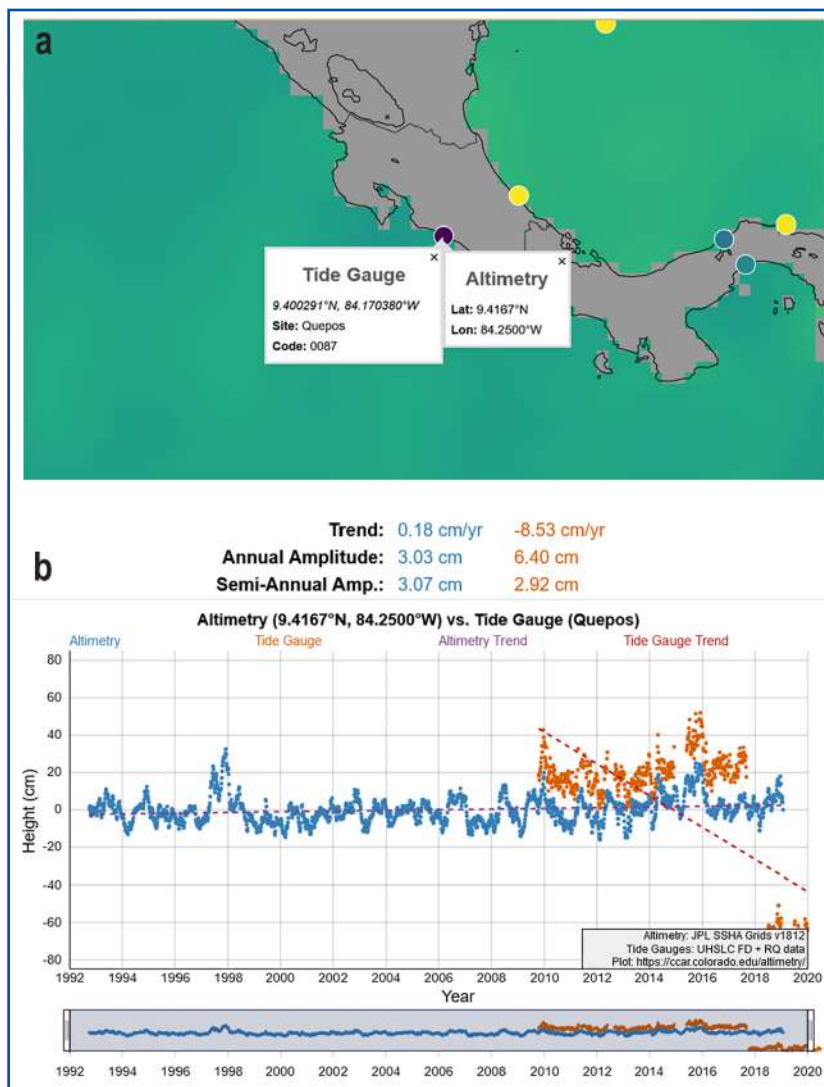


En cuanto a la subsidencia, el monitoreo del sistema de posicionamiento global (Laboratorio Geodésico de Nevada, 2024) proporciona algunas pistas. En Limón, hay una cúpula GPS, pero la señal es demasiado pobre para inferir alguna tendencia. En el interior de Limón, a menos de 20 km de distancia, una serie temporal de subsidencia confiable de 14 años sugiere una subsidencia significativa de 6.66 mm/año (Figura 2c).

Hay otra información disponible para el área. A lo largo de la costa del Pacífico de Costa Rica, en Quepos, los datos del mareógrafo son aún menos confiables que en Limón (Figuras 3a y 3b), pero los niveles absolutos del mar están aumentando a una tasa de 1.8 mm/año. No hay información GPS disponible para Quepos que permita entender la contribución de la subsidencia a este resultado.

Regarding subsidence, the global positioning system monitoring (Nevada Geodetic Laboratory, 2024) provides some hints. In Limón, there is a GPS dome, but the signal is too poor to infer any trend. Inland from Limón, less than 20 km away, a 14-year-long reliable subsidence time series suggests significant subsidence of 6.66 mm/yr (Figure 2c).

Other information is available for the area. Along the Pacific coast of Costa Rica, in Quepos, the tide gauge data are even less reliable than in Limón (Figures 3a and 3b), but the absolute sea levels are rising at a rate of 1.8 mm/yr. No GPS information is available for Quepos to understand the contribution of subsidence to this result.

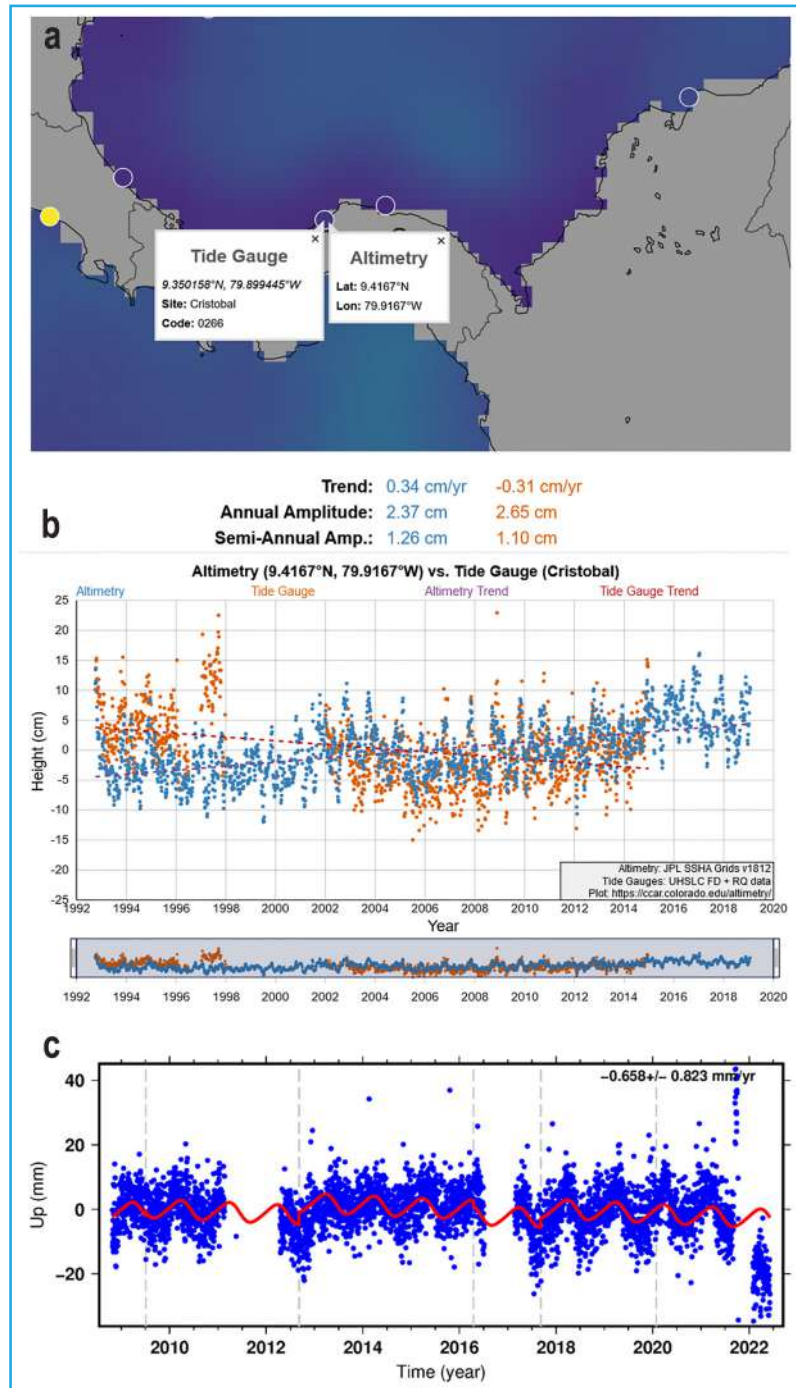


**Figura 3.** Quepos (costa pacífica de Costa Rica). **a)** Ubicación del mareógrafo y punto de cuadrícula del altímetro satelital. **b)** Niveles medios relativos y absolutos del mar. Imágenes a y b de la Universidad de Colorado (2024). Explorador de nivel del mar ([ccar.colorado.edu/altimetry/](https://ccar.colorado.edu/altimetry/)).

**Figure 3.** Quepos (Costa Rica Pacific coast). **a)** Location of the tide gauge and satellite altimeter grid point. **b)** Relative and absolute mean sea levels. Images a and b from Colorado University (2024). Sea level explorer ([ccar.colorado.edu/altimetry/](https://ccar.colorado.edu/altimetry/)).

Se pueden obtener más perspectivas al analizar datos similares para Cristóbal (costa caribeña de Panamá) y Balboa (costa pacífica de Panamá). En Cristóbal (Figure 4), la tasa absoluta de aumento del nivel del mar desde 1993 es de aproximadamente 3.4 mm/año. La tasa relativa de aumento no es muy confiable y muestra una

Further insights can be gained by analyzing similar data for Cristóbal (Panama Caribbean coast) and Balboa (Panama Pacific coast). In Cristóbal (Figure 4) the absolute rate of sea level rise since 1993 is about 3.4 mm/yr. The relative rate of rise is not very reliable and shows a negative trend, with a small subsidence rate

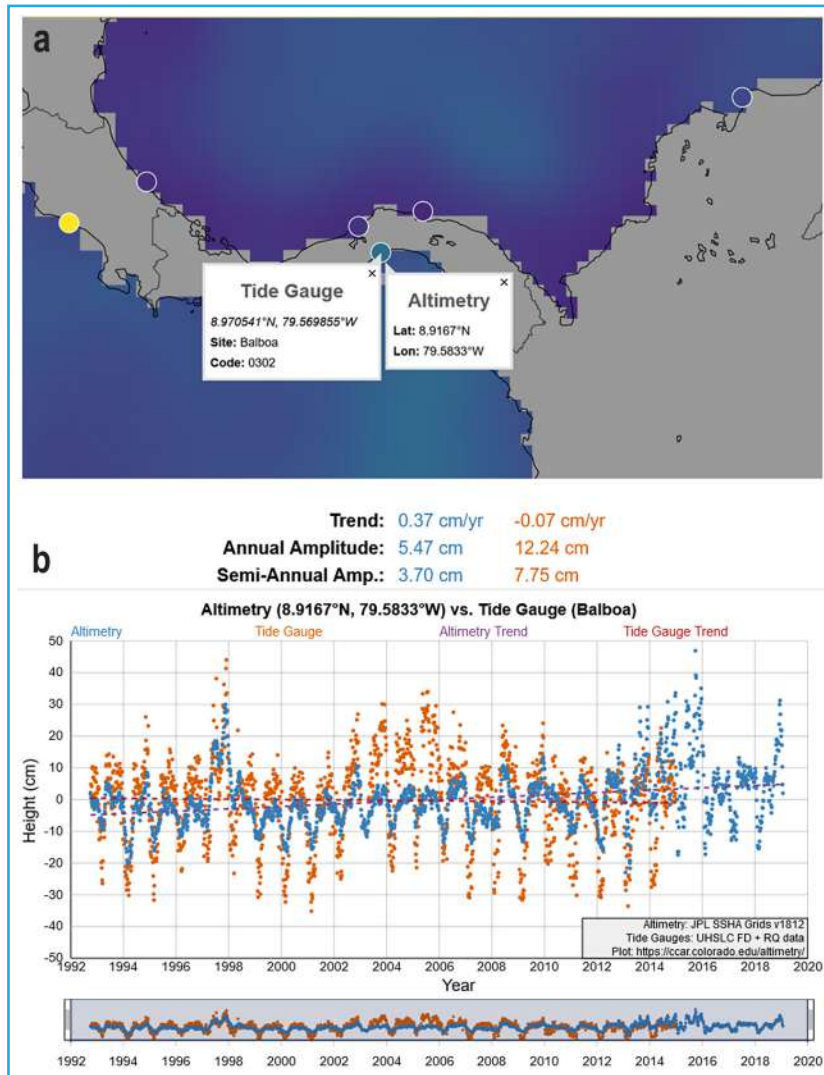


**Figura 4.** Cristóbal (costa Caribe de Panamá). **a)** Ubicación del mareógrafo y punto de cuadrícula del altímetro satelital. **b)** Niveles medios relativos y absolutos del mar. **c)** Subsistencia a menos de 2 km de Cristóbal. Imágenes a y b de la Universidad de Colorado (2024). Explorador de nivel del mar (ccar.colorado.edu/altimetry/). Imagen c del Laboratorio Geodésico de Nevada (2024). Red GPS. geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html

**Figure 4.** Cristóbal (Panama Caribbean coast). **a)** Location of the tide gauge and satellite altimetry grid point. **b)** Relative and absolute mean sea levels. **c)** Subsidence less than 2 km from Cristóbal. Images a and b from Colorado University (2024). Sea level explorer (ccar.colorado.edu/altimetry/). Image c from Nevada geodetic laboratory (2024). GPS net. geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html

tendencia negativa, con una pequeña tasa de subsidencia de 0.658 mm/año. En Balboa (Figura 5), la tasa absoluta de aumento del nivel del mar desde 1993 es de aproximadamente 3.7 mm/año, con una tasa relativa de aumento insignificante. La información sobre la subsidencia en Balboa es poco confiable.

of 0.658 mm/yr. In Balboa (Figure 5), the absolute rate of sea level rise since 1993 is about 3.7 mm/yr, with a negligible relative rate of rise. The subsidence information for Balboa is unreliable.



**Figura 5.** Balboa (costa pacífica de Panamá). **a)** Ubicación del mareógrafo y punto de cuadrícula del altímetro satelital. **b)** Niveles medios relativos y absolutos del mar. Imágenes a y b de la Universidad de Colorado (2024). Explorador de nivel del mar ([ccar.colorado.edu/altimetry/](https://ccar.colorado.edu/altimetry/)).

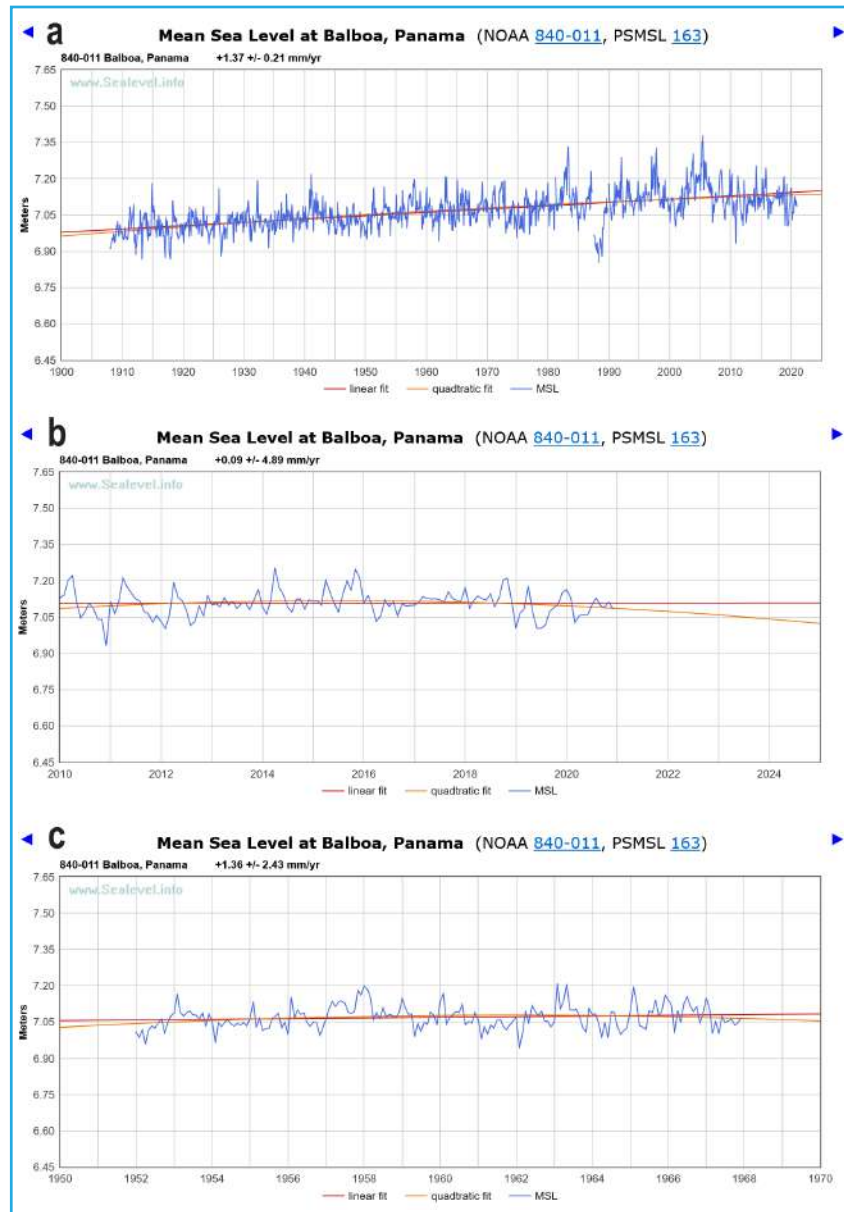
**Figure 5.** Balboa (Panama Pacific coast). **a)** Location of the tide gauge and satellite altimeter grid point. **b)** Relative and absolute mean sea levels. Images a and b from Colorado University (2024). Sea level explorer ([ccar.colorado.edu/altimetry/](https://ccar.colorado.edu/altimetry/)).

Dado que Balboa tiene un registro de mareógrafo a largo plazo (que comenzó en 1910), es posible calcular la aceleración del nivel del mar y la tasa de aumento adecuados, descontando las oscilaciones multidecadales (Figura 6). Para el rango de fechas 1908 a 2020, la tendencia lineal es de  $1.370 \pm 0.208$  mm/año, y la aceleración es de  $-0.01026 \pm 0.01416$  mm/año<sup>2</sup> (negativa). Para el rango de fechas 2010 a 2020, la tendencia lineal es de  $0.091 \pm 4.894$  mm/año,

Since Balboa has a long-term tide gauge record (starting in 1910), it is possible to compute the proper sea level acceleration and rate of rise, cleared of the multidecadal oscillations (Figure 6). For the date range 1908 to 2020, the linear trend is  $1.370 \pm 0.208$  mm/yr, and the acceleration is  $-0.01026 \pm 0.01416$  mm/yr<sup>2</sup> (negative). For the date range 2010 to 2020, the linear trend is  $0.091 \pm 4.894$  mm/yr, and the acceleration is  $-2.088 \pm 3.389$  mm/yr<sup>2</sup>. Finally, for the date

y la aceleración es de  $-2.088 \pm 3.389$  mm/año<sup>2</sup>. Finalmente, para el rango de fechas 1952/1 a 1967/12, la tendencia lineal es de  $1.358 \pm 2.433$  mm/año y la aceleración es de  $-0.721 \pm 1.166$  mm/año<sup>2</sup>. Estas tendencias a corto plazo, incluso si se basan en mediciones del mismo mareógrafo, tienen una significancia muy limitada.

range 1952/1 to 1967/12, the linear trend is  $1.358 \pm 2.433$  mm/yr and the acceleration is  $-0.721 \pm 1.166$  mm/yr<sup>2</sup>. These short-term trends, even if based on measurements from the same tide gauge, have very limited significance.



**Figura 6.** Análisis de la tendencia del nivel del mar para Balboa desde 1910 **a)** y 2010 **b)**, o 1952 a 1968 **c)**. Imágenes a, b y c de sealevel.info 2024. sealevel.info/MSL\_graph.php?id=840-011

**Figure 6.** Sea level trend analyses for Balboa since 1910 **a)** and 2010 **b)**, or 1952 to 1968 **c)**. Images a, b, and c are from sealevel.info 2024. sealevel.info/MSL\_graph.php?id=840-011

En conclusión, es imposible comprender las tendencias en los niveles relativos del mar en cualquier ubicación sin registros de mareógrafos de alta calidad que abarquen más de 60 años y sin datos precisos sobre la subsidencia del instrumento de mareógrafo. Para inferir con precisión estas tendencias y diferenciar entre el

In conclusion, understanding the trends in relative sea levels at any location is impossible without high-quality tide gauge records spanning more than 60 years and accurate data on the subsidence of the tide gauge instrument. To accurately infer these trends and differentiate between thermosteric sea level



aumento termostérico del nivel del mar y la subsidencia, es esencial ampliar el área de observación para incluir registros de mareógrafos de alta calidad, complementados con mediciones de subsidencia absoluta a través de posicionamiento GPS. La altimetría satelital también puede ayudar a comprender el papel de la subsidencia.

El nivel absoluto del mar a lo largo de la costa caribeña de Costa Rica, frente a la costa de Limón, ha estado aumentando desde 1993 a una tasa aparente de 3.8 mm/año, considerando las oscilaciones conocidas del nivel del mar. Una tasa relativa de aumento más alta probablemente se deba a la subsidencia. En un marco temporal más largo, las tasas relativas y absolutas de aumento son probablemente más bajas (como se observa en Panamá y Quepos, Costa Rica). Si bien los niveles del mar están influenciados por la expansión térmica debido al calentamiento global y la subsidencia terrestre, el área de Limón parece estar significativamente afectada por la subsidencia, con un efecto termostérico similar al de otras áreas como Cristóbal, Panamá.

El estudio revela varios puntos críticos sobre los cambios en el nivel del mar a lo largo de las costas del Caribe y del Pacífico de Costa Rica y Panamá. El aumento absoluto del nivel del mar en Limón, Costa Rica, desde 1993 es de 3.8 mm/año, lo que se alinea con los patrones globales de aumento del nivel del mar cuando se tienen en cuenta las oscilaciones conocidas del nivel del mar. Sin embargo, el aumento significativamente mayor del nivel del mar relativo observado en Limón en comparación con Quepos, Cristóbal y Balboa sugiere que la subsidencia local juega un papel importante. Esto es particularmente evidente ya que el aumento del nivel del mar relativo en Limón es notablemente mayor, indicando que la subsidencia probablemente está exacerbando el aparente aumento en los niveles del mar. La discrepancia en las tasas de aumento del nivel del mar relativo entre estos sitios resalta la importancia de considerar tanto los factores globales como locales, incluida la subsidencia, al evaluar los cambios en el nivel del mar.

El análisis subraya la necesidad de registros de mareógrafos de alta calidad y a largo plazo para evaluar con precisión las tendencias del nivel del mar. Los datos a corto plazo, como los de las décadas recientes, proporcionan perspectivas limitadas debido a la variabilidad natural significativa. Los registros a largo plazo, especialmente aquellos que superan los 60 años, y la información absoluta sobre la subsidencia son cruciales para distinguir entre el aumento termostérico del nivel del mar y los efectos locales de subsidencia.

rise and subsidence, it is essential to broaden the observation area to include tide gauge records of high quality, complemented by absolute subsidence measurements from GPS positioning. Satellite altimetry may also help in understanding the role of subsidence.

The absolute sea level along the Caribbean coast of Costa Rica, off the coast of Limón, has been rising since 1993 at an apparent rate of 3.8 mm/yr, accounting for known sea-level oscillations. A higher relative rate of rise is likely due to subsidence. Over a longer time frame, the relative and absolute rates of rise are likely lower (as seen in Panama and Quepos, Costa Rica). While sea levels are influenced by thermal expansion due to global warming and land subsidence, the Limón area appears to be significantly affected by subsidence, with a thermosteric effect similar to other areas such as Cristóbal, Panama.

The study reveals several critical insights into sea level changes along the Caribbean and Pacific coasts of Costa Rica and Panama. The absolute sea level rise in Limón, Costa Rica, since 1993 is 3.8 mm/yr, which aligns with global sea level rise patterns when accounting for known sea-level oscillations. However, the significantly higher relative sea level rise observed in Limón compared to Quepos, Cristóbal, and Balboa suggests that local subsidence plays a substantial role. This is particularly evident as the relative sea level rise in Limón is notably higher, indicating that subsidence is likely exacerbating the apparent rise in sea levels. The discrepancy in relative sea level rise rates between these sites highlights the importance of considering both global and local factors, including subsidence, when assessing sea level changes.

The analysis underscores the necessity for long-term, high-quality tide gauge records to accurately assess sea level trends. Short-term data, such as those from recent decades, provide limited insights due to the significant natural variability. Long-term records, especially those exceeding 60 years, and absolute subsidence information are crucial for distinguishing between thermosteric sea level rise and local subsidence effects.

Understanding the differences in sea level trends and the impact of subsidence is essential for coastal management and adaptation strategies. The findings from Limón and other locations stress the need for integrated approaches that account for both global sea level rise and local factors such as subsidence. Coastal planning

Comprender las diferencias en las tendencias del nivel del mar y el impacto de la subsidencia es esencial para la gestión costera y las estrategias de adaptación. Los hallazgos de Limón y otras ubicaciones subrayan la necesidad de enfoques integrados que tengan en cuenta tanto el aumento global del nivel del mar como los factores locales, como la subsidencia. La planificación y los esfuerzos de adaptación costera deben incorporar estas perspectivas para abordar eficazmente los desafíos específicos que enfrentan las diferentes regiones.

La investigación futura debería centrarse en expandir el conjunto de datos para incluir períodos de tiempo más extensos y ubicaciones adicionales con datos fiables sobre subsidencia. La integración de altimetría satelital con registros de mareógrafos y mediciones de GPS podría mejorar la precisión de las evaluaciones del aumento del nivel del mar y proporcionar una imagen más clara de las variaciones regionales. Además, investigar la interacción entre los efectos termostéricos y la subsidencia local será crucial para desarrollar estrategias de adaptación al cambio climático más específicas.

En conclusión, este estudio resalta la importancia crítica de combinar datos de nivel del mar de alta calidad y a largo plazo con mediciones precisas de subsidencia para entender las verdaderas tendencias en el aumento del nivel del mar. Las variaciones regionales observadas en las costas del Caribe y del Pacífico de Costa Rica y Panamá subrayan la necesidad de enfoques integrales para la gestión costera y la adaptación al cambio climático, adaptados a las características y desafíos específicos de cada área.

and adaptation efforts must incorporate these insights to address the specific challenges faced by different regions effectively.

Further research should focus on expanding the dataset to include more extensive time periods and additional locations with reliable subsidence data. The integration of satellite altimetry with tide gauge records and GPS measurements could enhance the accuracy of sea level rise assessments and provide a clearer picture of regional variations. Additionally, investigating the interplay between thermosteric effects and local subsidence will be crucial for developing targeted climate adaptation strategies.

In conclusion, this study highlights the critical importance of combining high-quality, long-term sea level data with accurate subsidence measurements to understand the true trends in sea level rise. The regional variations observed in the Caribbean and Pacific coasts of Costa Rica and Panama underscore the need for comprehensive approaches to coastal management and climate adaptation, tailored to the specific characteristics and challenges of each area.

## BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Boretti, A. 2012. Is there any support in the long term tide gauge data to the claims that parts of Sydney will be swamped by rising sea levels? *Coast. Eng.*, 64: 161-167.
- Boretti, A. 2024. Sea level patterns around Korea and Japan. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, p.103720.
- Chambers, D.P., M.A. Merrifield and R.S. Nerem. 2012. Is there a 60 year oscillation in global mean sea level? *Geophys. Res. Lett.*, 39(18). doi.org/10.1029/2012GL052885
- Colorado University. 2024. Sea level explorer. [ccar.colorado.edu/altimetry/](http://ccar.colorado.edu/altimetry/)
- Douglas, B.C. 1995. Global sea level change: determination and interpretation. *Reviews of Geophysics*, 33(S2):1425-1432. doi.org/10.1029/95RG00355
- Nevada Geodetic Laboratory. 2024. GPS net. [geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html](http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html)
- PSMSL 2024a. Puerto Limón. [psmsl.org/data/obtaining/stations/552.php](http://psmsl.org/data/obtaining/stations/552.php)
- PSMSL 2024b. Limón B. [psmsl.org/data/obtaining/stations/2191.php](http://psmsl.org/data/obtaining/stations/2191.php)
- Sealevel.info. 2024. Sea level analysis. [sealevel.info/MSL\\_graph.php?id=840-011](http://sealevel.info/MSL_graph.php?id=840-011)
- Schlesinger, M.E. and N. Ramankutty. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367(6465): 723-726. doi.org/10.1038/367723a0
- Valverde, J. and G. Barrantes. 2024. Variación del nivel del mar en el Caribe de Costa Rica, Centroamérica. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 53(2): 85-102. doi.org/10.25268/bimc.invemar.2024.53.2.1317



Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia  
CC Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual /  
This is an open Access article under the CC BY-NC-SA