

ARTÍCULO / ARTICLE

Investigación de la subsidencia antropogénica en Fremantle, Australia Occidental, mediante GPS, altimetría por satélite y datos de mareógrafos

Investigating anthropogenic subsidence in Fremantle, Western Australia, using GPS, satellite altimetry, and tide gauge data

Alberto Boretti

✉ 0000-0002-3374-0238
a.a.boretti@gmail.com

Recibido / Received: 19/02/2025

Aceptado / Accepted: 25/05/2025

Citación / Citation: Boretti, A. 2025. Investigación de la subsidencia antropogénica en Fremantle mediante GPS, altimetría por satélite y datos de mareógrafos. Bol. Invest. Mar. Cost., 54(2): 100-133

RESUMEN

La subsidencia antropogénica contribuye al aumento relativo del nivel del mar (RSLR) en ciudades costeras, causada por extracción de agua subterránea, minería y carga de infraestructuras. Este estudio analiza Fremantle, integrando datos de mareógrafos, GPS y altimetría satelital para evaluar la velocidad y aceleración del RSLR con ajustes lineales y parabólicos, capturando efectos eustáticos climáticos y subsidencia local. Los datos de GPS muestran una subsidencia de 1,56 mm/año en Fremantle; las tendencias históricas se derivan de modelos de Ajuste Isostático Glacial (GIA). Corregida la subsidencia, la velocidad del aumento absoluto del nivel del mar (ASLR) es mínima (+0,16 mm/año) con aceleración negativa (-0,0103 mm/año²). Un análisis de 153 registros globales de mareógrafos muestra correlación entre altas tasas de RSLR y subsidencia local, con velocidades de ASLR entre 0-2 mm/año; las aceleraciones son menos fiables. La subsidencia antropogénica, creciente desde finales del siglo XIX, es clave en el RSLR registrado. Sin corregir el movimiento del terreno, se sobreestima el aumento eustático climático. Integrar datos de GPS y GIA es esencial para evaluar tendencias del nivel del mar y diseñar estrategias de gestión costera.

Palabras clave: Teledetección; Sistema de Posicionamiento Global (GPS); Mareógrafos; Nivel del mar relativo; Nivel del mar absoluto.

ABSTRACT

Anthropogenic subsidence contributes to relative sea level rise (RSLR) in coastal cities, driven by groundwater extraction, mining, and infrastructure loading. This study analyzes Fremantle, integrating tide gauge, GPS, and satellite altimetry data to assess RSLR velocity and acceleration using linear and parabolic fits, capturing climate-driven eustatic effects and local subsidence. GPS data show a subsidence rate of 1.56 mm/yr in Fremantle; historical trends are derived from Glacial Isostatic Adjustment (GIA) models. After correcting for subsidence, Fremantle's absolute sea level rise (ASLR) velocity is minimal (+0.16 mm/yr) with a negative acceleration (-0.0103 mm/yr²). Analysis of 153 global tide gauge records reveals a correlation between high RSLR rates and significant local subsidence, with ASLR velocities between 0-2 mm/yr; accelerations are less reliable. Anthropogenic subsidence, increasing since the late 1800s, is a key driver of recorded RSLR. Without correcting for land motion, climate-driven eustatic rise is overestimated. Integrating GPS and GIA data is essential for accurately assessing sea level trends and designing coastal management strategies.

Key words: remote sensing, global positioning system, tide gauges, relative sea level, absolute sea level.





INTRODUCCIÓN

Comprender las tendencias a largo plazo y la aceleración del nivel del mar es crucial para monitorear el cambio climático, evaluar la vulnerabilidad costera e informar las estrategias de adaptación (Emery y Aubrey, 1989; Schlesinger y Ramankutty, 1994; Douglas, 1995, 1997; Chambers *et al.*, 2012). Los mareógrafos proporcionan registros observacionales esenciales y a largo plazo, pero miden el nivel del mar en relación con la tierra sobre la que se asientan. Por lo tanto, estos registros combinan intrínsecamente cambios en el volumen del agua oceánica (impulsados por la expansión térmica y el derretimiento del hielo) con el movimiento vertical de la tierra (VLM), incluyendo elevación o hundimiento (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011; Emery y Aubrey, 2012). Separar estos componentes es fundamental para determinar con precisión el cambio absoluto (geocéntrico) del nivel del mar.

La subsidencia del terreno, ya sea por procesos geológicos naturales como el ajuste isostático glacial (Peltier y Andrews, 1976; Peltier, 1999) o la actividad tectónica, o cada vez más por actividades antropogénicas, impacta significativamente en las mediciones del nivel relativo del mar. Las actividades humanas, incluyendo la extracción extensiva de aguas subterráneas, la producción de petróleo y gas, la minería, y la carga inducida por la urbanización, son factores bien documentados que aceleran la subsidencia en muchas regiones costeras a nivel mundial, a menudo donde se ubican los mareógrafos (Kolker *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2014; Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2017, 2018; Wu *et al.*, 2022). Sin embargo, la posible aceleración de la subsidencia del terreno en sí, que puede ser comparable en magnitud a la aceleración del aumento absoluto del nivel del mar (Antonov *et al.*, 2005; Marcos y Amores, 2014), a menudo ha sido pasada por alto en los análisis tradicionales de mareógrafos.

El advenimiento y la proliferación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y otros Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) han revolucionado la capacidad de monitorear el VLM con alta precisión y resolución temporal (Blewitt *et al.*, 2010; Blewitt y Hammond, 2018). Las mediciones continuas de GPS proporcionan datos cruciales para cuantificar las tasas contemporáneas de subsidencia o elevación en o cerca de las ubicaciones de los mareógrafos (Zervas *et al.*, 2013; Wöppelmann y Marcos, 2016). Corregir los registros de los mareógrafos

INTRODUCTION

Understanding long-term trends and acceleration in sea level is crucial for monitoring climate change, assessing coastal vulnerability, and informing adaptation strategies (Emery and Aubrey, 1989; Schlesinger and Ramankutty, 1994; Douglas, 1995, 1997; Chambers *et al.*, 2012). Tide gauges provide essential, long-term observational records, but they measure sea level relative to the land upon which they sit. Consequently, these records inherently combine changes in ocean water volume (driven by thermal expansion and ice melt) with vertical land motion (VLM), including uplift or subsidence (Wöppelmann *et al.*, 2007, 2011; Emery and Aubrey, 2012). Disentangling these components is critical for accurately determining absolute (geocentric) sea level change.

Land subsidence, whether from natural geological processes like glacial isostatic adjustment (Peltier and Andrews, 1976; Peltier, 1999) or tectonic activity, or increasingly from anthropogenic activities, significantly impacts relative sea level measurements. Human activities, including extensive groundwater extraction, oil and gas production, mining, and urbanization-induced loading, are well-documented drivers of accelerating subsidence in many coastal regions globally, often where tide gauges are located (Kolker *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2014; Erban *et al.*, 2014; Minderhoud *et al.*, 2017, 2018; Wu *et al.*, 2022). However, the potential acceleration of land subsidence itself, which can be comparable in magnitude to the acceleration of absolute sea level rise (Antonov *et al.*, 2005; Marcos and Amores, 2014), has often been overlooked in traditional tide gauge analyses.

The advent and proliferation of Global Positioning System (GPS) and other Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have revolutionized the ability to monitor VLM with high precision and temporal resolution (Blewitt *et al.*, 2010; Blewitt and Hammond, 2018). Continuous GPS measurements provide crucial data to quantify contemporary rates of subsidence or uplift at or near tide gauge locations (Zervas *et al.*, 2013; Wöppelmann and Marcos, 2016). Correcting tide gauge records using these precise VLM estimates allows for a more accurate determination of absolute sea level trends, reducing uncertainties in projections and improving our understanding of climate-driven sea level rise impacts (Dangendorf *et al.*, 2017). Integrating GPS with other techniques like InSAR and LiDAR further enhances

utilizando estas estimaciones precisas de VLM permite una determinación más precisa de las tendencias absolutas del nivel del mar, reduciendo las incertidumbres en las proyecciones y mejorando nuestra comprensión de los impactos del aumento del nivel del mar impulsado por el clima ([Dangendorf et al., 2017](#)). La integración del GPS con otras técnicas como InSAR y LiDAR mejora aún más la cobertura espacial y la comprensión de patrones complejos de VLM ([Tregoning y Watson, 2009](#); [Bock et al., 2011](#); [Higgins, 2016](#); [Harvey et al., 2021](#)).

Mientras que las técnicas geodésicas modernas ofrecen soluciones para el VLM contemporáneo, el análisis de las tendencias del nivel del mar a largo plazo enfrenta desafíos adicionales. La variabilidad climática natural, como las oscilaciones multidecenales, puede influir en las tasas observadas durante períodos más cortos. Además, los registros históricos de mareógrafos están sujetos a inconsistencias derivadas de cambios en la tecnología de los sensores (desde antiguos medidores mecánicos o de presión hasta modernos sistemas acústicos o de microondas) y reubicaciones de instrumentos, que pueden introducir sesgos y discontinuidades si no se documentan y corrigen cuidadosamente ([Wöppelmann et al., 2007, 2011](#)).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es evaluar meticulosamente las tendencias a largo plazo del nivel relativo del mar registradas por el mareógrafo en Fremantle, Australia Occidental. Al integrar datos contemporáneos de movimiento vertical de la tierra derivados de estaciones GPS cercanas y considerar estimaciones históricas, este trabajo busca aislar el componente de subsidencia del terreno y determinar las tendencias y aceleraciones correspondientes en el nivel absoluto (geocéntrico) del mar en esta ubicación.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es Perth, que posee el registro de mareógrafo más largo del océano Índico. Perth, la ciudad capital de Australia Occidental, fue establecida por Gran Bretaña como la Colonia del Río Swan en 1829. En 1850, la población de toda la colonia de Australia Occidental era de solo 5886 habitantes. En 1891, la población de Perth era de 8447. La población actual del área metropolitana de Perth es de 2143000.

spatial coverage and understanding of complex VLM patterns ([Tregoning and Watson, 2009](#); [Bock et al., 2011](#); [Higgins, 2016](#); [Harvey et al., 2021](#)).

While modern geodetic techniques offer solutions for contemporary VLM, analyzing long-term sea level trends faces additional challenges. Natural climate variability, such as multi-decadal oscillations, can influence observed rates over shorter periods. Furthermore, historical tide gauge records are subject to inconsistencies arising from changes in sensor technology (from older mechanical or pressure gauges to modern acoustic or microwave systems) and instrument relocations, which can introduce biases and discontinuities if not carefully documented and corrected ([Wöppelmann et al., 2007, 2011](#)).

Therefore, the primary aim of this study is to meticulously assess the long-term relative sea level trends recorded by the tide gauge in Fremantle, Western Australia. By integrating contemporary vertical land motion data derived from nearby GPS stations and considering historical estimates, this work seeks to isolate the component of land subsidence and determine the corresponding trends and accelerations in absolute (geocentric) sea level at this location.

STUDY AREA

The area of study is Perth, which hold the longest tide gauge record of the Indian Ocean. Perth, the capital city of Western Australia, was established by Britain as the Swan River Colony in 1829. In 1850, the population of the whole colony of Western Australia was only 5,886. In 1891, the population of Perth was 8,447. The current metro area population of Perth is 2,143,000.

To generalize the result for Perth, the case of Sydney will also be considered. Sydney, the capital city of New South Wales, started to develop earlier. In 1770, Lieutenant James Cook landed at Kurnell and in 1788 the British government decided to establish a convict settlement in Botany Bay. In 1851 the population of Sydney was only 39,000. In 1880, the population of Sydney was 224,900. The current metro area population of Sydney is 5,185,000.

While Australia is geologically stable, the relevance of mining and water withdrawal-induced subsidence is very well known. Water



Para generalizar el resultado para Perth, también se considerará el caso de Sídney. Sídney, la ciudad capital de Nueva Gales del Sur, comenzó a desarrollarse antes. En 1770, el teniente James Cook desembarcó en Kurnell y en 1786 el gobierno británico decidió establecer una colonia penitenciaria en Botany Bay. En 1851 la población de Sídney era de solo 39000. En 1880, la población de Sídney era de 224900. La población actual del área metropolitana de Sídney es de 5185000.

Aunque Australia es geológicamente estable, la subsidencia inducida por la minería y la extracción de agua es bien conocida. La subsidencia inducida por la extracción de agua está bien documentada en la cuenca de Perth, donde se encuentra el mareógrafo de Fremantle (Featherstone *et al.*, 2012; Parker *et al.*, 2017) y la subsidencia en el área de Sídney también está bien documentada (Garthwaite y Fuhrmann, 2020). La información sobre subsidencia para los últimos años está disponible en el Laboratorio Geodésico de Nevada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marco conceptual y antecedentes

El enfoque matemático utilizado en este estudio modela la velocidad de subsidencia de los instrumentos de mareógrafo asumiendo un perfil lineal durante la duración del registro del mareógrafo. Este modelo postula una velocidad vertical inicial al comienzo del registro (x_s), a menudo establecida en cero o basada en modelos de Ajuste Isostático Glacial (GIA) (Peltier y Andrews, 1976; Peltier, 1999). Esta velocidad inicial transita linealmente a la tasa de subsidencia contemporánea determinada a partir de datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que representa el movimiento vertical del terreno (VLM) en años recientes (Bell *et al.*, 2002; Burbey *et al.*, 2006; Abidin *et al.*, 2008; Baldi *et al.*, 2009; Blewitt *et al.*, 2009; Bock *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2014; Wang y Soler, 2015; Karegar *et al.*, 2016; Blewitt y Hammond, 2018; Hammond *et al.*, 2018; Rateb y Abotalib, 2020). Aspectos de esta metodología han sido previamente descritos y aplicados a registros de mareógrafos a largo plazo (Boretti, 2024a, 2024b).

El aumento relativo del nivel del mar (RSLR, por sus siglas en inglés) observado en las estaciones de mareas se entiende como una señal compuesta que surge de múltiples factores

withdrawal-induced subsidence is well documented in the Perth basin, where the Fremantle tide gauge is located (Featherstone *et al.*, 2012; Parker *et al.*, 2017) and subsidence in the Sydney area is also well documented (Garthwaite and Fuhrmann, 2020). Subsidence information for recent years is available from the Nevada Geodetic Laboratory.

MATERIALS AND METHODS

Conceptual framework and background

The mathematical approach utilized in this study models the subsidence velocity of tide gauge instruments by assuming a linear profile over the duration of the tide gauge record. This model posits an initial vertical velocity at the start of the record (x_s), often set to zero or informed by Glacial Isostatic Adjustment (GIA) models (Peltier and Andrews, 1976; Peltier, 1999). This initial velocity transitions linearly to the contemporary subsidence rate determined from Global Positioning System (GPS) data, which represents the vertical land motion (VLM) in recent years (Bell *et al.*, 2002; Burbey *et al.*, 2006; Abidin *et al.*, 2008; Baldi *et al.*, 2009; Blewitt *et al.*, 2009; Bock *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2014; Wang and Soler, 2015; Karegar *et al.*, 2016; Blewitt and Hammond, 2018; Hammond *et al.*, 2018; Rateb and Abotalib, 2020). Aspects of this methodology have been previously outlined and applied to long-term tide gauge records (Boretti, 2024a, 2024b).

Relative sea level rise (RSLR) observed at tide gauge stations is understood to be a composite signal arising from multiple factors (Parker, 2014). These include contributions from changes within the ocean body (“sea” contributors) like thermal expansion of seawater and meltwater input from land-based ice, alongside shifts in ocean circulation patterns. Equally important are “land” contributors, primarily vertical land motion encompassing various geological processes at the gauge site. Subsidence, the gradual or sudden sinking of the Earth’s surface, significantly influences RSLR. It can stem from natural phenomena (tectonic activity, erosion, natural compaction, hydro-compaction, karst processes) or anthropogenic activities (groundwater extraction, mining, oil and gas exploitation, infrastructure loading). Often, these natural and anthropogenic drivers interact, potentially amplifying the overall subsidence, as documented in regions like the Mekong Delta due to groundwater withdrawal and compaction (Erban *et al.*, 2014;

(Parker, 2014). Estos incluyen contribuciones marinas como la expansión térmica del agua de mar y el aporte de agua de deshielo proveniente del hielo terrestre, junto con cambios en los patrones de circulación oceánica. Igualmente importantes son las contribuciones terrestres, principalmente el movimiento vertical de la tierra que abarca varios procesos geológicos en el sitio del medidor. El hundimiento, la subsidencia gradual o repentina de la superficie terrestre, influye significativamente en el ANMR. Puede derivar de fenómenos naturales (actividad tectónica, erosión, compactación natural, hidrocompactación, procesos kársticos) o actividades antropogénicas (extracción de agua subterránea, minería, explotación de petróleo y gas, carga de infraestructura). A menudo, estos factores naturales y antropogénicos interactúan, potencialmente amplificando la subsidencia general, como se ha documentado en regiones como el delta del Mekong debido a la extracción de agua subterránea y la compactación (Erban et al., 2014; Minderhoud et al., 2017, 2018) y el Golfo de México vinculado a la extracción de petróleo y la compactación (Kolker et al., 2011; Chang et al., 2014). Mientras que el aumento absoluto del nivel del mar (ASLR, por sus siglas en inglés), impulsado por el incremento del volumen de agua oceánica debido al deshielo y la expansión térmica causada por el calentamiento global, a menudo se aproxima utilizando una función cuadrática del tiempo, el hundimiento en sí también podría representarse razonablemente mediante un modelo cuadrático en una escala temporal relevante.

El análisis fiable de tendencias a largo plazo y aceleraciones en el nivel relativo del mar (RSL) requiere registros de datos extensos, típicamente superiores a 100 años, para resolver adecuadamente señales como las oscilaciones quasi-60 años (Boretti, 2012, Parker, 2013a, 2013b, 2014). Sin embargo, los datos de subsidencia de alta precisión, principalmente de GPS, están disponibles predominantemente solo para las décadas recientes. Este desajuste temporal presenta un desafío significativo para integrar de manera integral los efectos de la subsidencia en la evaluación de los cambios del nivel del mar a largo plazo derivados de los registros históricos de mareógrafos.

Fuentes de Datos

Datos del nivel relativo del mar: Los datos mensuales promedio del nivel medio del mar se obtuvieron del repositorio en línea del Servicio Permanente para el Nivel Medio del Mar (PSMSL) (www.psmsl.org

Minderhoud et al., 2017, 2018>) and the Gulf of Mexico linked to oil extraction and compaction (Kolker et al., 2011; Chang et al., 2014). While absolute sea level rise (ASLR), driven by increasing ocean water volume from ice melt and thermal expansion due to global warming, is often approximated using a quadratic function of time, subsidence itself might also be reasonably represented by a quadratic model over relevant timescale.

Reliable analysis of long-term trends and accelerations in RSL necessitates long data records, typically exceeding 100 years, to adequately resolve signals such as quasi-60-year oscillations (Boretti, 2012, Parker, 2013a, 2013b, 2014). However, high-precision subsidence data, mainly from GPS, is predominantly available only for recent decades. This temporal mismatch presents a significant challenge in comprehensively integrating subsidence effects into the assessment of long-term sea level changes derived from historical tide gauge records.

Data Sources

Relative sea level data: Monthly average mean sea level data were obtained from the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) online repository (www.psmsl.org). PSMSL provides quality-controlled, long-term tide gauge records from a global network. The tide gauge data set from PSMSL (Holgate et al., 2013) for Fremantle is obtained from PSMSL (2024a) and the data from Sydney is obtained from PSMSL (2024b, 2024c).

Vertical land motion data (GPS): Processed GPS data, specifically vertical station velocities and associated time series information, were acquired from the Nevada Geodetic Laboratory (NGL) data portal (geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations). NGL processes raw data from a vast global network of continuous GPS stations. Their solutions incorporate rigorous corrections for numerous potential error sources inherent in satellite geodesy. These corrections account for factors such as satellite orbital inaccuracies, satellite and receiver clock drifts, atmospheric delays (ionospheric and tropospheric), solid Earth tides, ocean tide loading, atmospheric pressure loading, and antenna phase center variations, among others. This extensive processing is crucial for deriving the high-precision station coordinates and velocities needed for VLM studies. The processing of GPS information is described in Blewitt and Hammond (2018).



psmsl.org). PSMSL proporciona registros de mareógrafos a largo plazo con control de calidad de una red global. Los datos del mareógrafo de PSMSL ([Holgate et al., 2013](#)) para Fremantle se obtienen de [PSMSL \(2024a\)](#) y los datos de Sídney se obtienen de [PSMSL \(2024b, 2024c\)](#).

Datos de movimiento vertical del terreno (GPS): Los datos de GPS procesados, específicamente las velocidades verticales de las estaciones y la información asociada de series temporales, se obtuvieron del portal de datos del Laboratorio Geodésico de Nevada (NGL) (geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations). NGL procesa datos sin procesar de una vasta red global de estaciones GPS continuas. Sus soluciones incorporan correcciones rigurosas para numerosas fuentes potenciales de error inherentes a la geodesia satelital. Estas correcciones tienen en cuenta factores como inexactitudes orbitales de los satélites, desviaciones de los relojes de los satélites y receptores, retrasos atmosféricos (ionosféricos y troposféricos), mareas terrestres sólidas, carga de mareas oceánicas, carga de presión atmosférica y variaciones del centro de fase de la antena, entre otros. Este procesamiento extenso es crucial para obtener las coordenadas y velocidades de estación de alta precisión necesarias para los estudios de VLM. El procesamiento de la información GPS se describe en [Blewitt y Hammond \(2018\)](#).

Tres ubicaciones GPS en Perth alrededor de la localidad de Fremantle a distancias relativamente grandes de unos pocos kilómetros desde el mareógrafo, [NGL \(2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f, 2014g, 2024h, 2024i\)](#) son consideradas para Fremantle. La serie temporal de GPS para Sídney está en la ubicación exacta del mareógrafo de Fort Denison, [NGL \(2024j\)](#).

Procesamiento y análisis de datos

Sea y la posición del nivel medio del mar medida por un mareógrafo, registrada durante un intervalo de tiempo desde $x_{s,y}$ hasta $x_{e,y}$. Sea z la posición vertical del instrumento del mareógrafo (o un punto de referencia representativo cercano) en un marco de referencia absoluto, determinado durante un intervalo de tiempo desde $x_{s,z}$ hasta $x_{e,z}$. Las series temporales tanto para RSL (y) como para VLM (z) pueden aproximarse utilizando ajustes polinómicos de segundo orden:

$$y = c_{2y} \times x^2 + c_{1y} \times x + c_{0y} \quad (1)$$

Three GPS locations in Perth around the Fremantle location at relatively large distances of a few kilometers from the tide gauge, [NGL \(2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f, 2014g, 2024h, 2024i\)](#) are considered for Fremantle. The GPS time series for Sydney is in the exact tide gauge location of Fort Denison, [NGL \(2024j\)](#).

Data processing and analysis

Let y be the position of the mean sea level measured by a tide gauge, recorded over a time interval from $x_{s,y}$ to $x_{e,y}$. Let z be the vertical position of the tide gauge instrument (or a representative nearby benchmark) in an absolute reference frame, determined over a time interval from $x_{s,z}$ to $x_{e,z}$. The time series for both RSL (y) and VLM (z) can be approximated using second-order polynomial fittings:

$$\begin{aligned} y &= c_{2y} \times x^2 + c_{1y} \times x + c_{0y} \quad (1) \\ z &= c_{2z} \times x^2 + c_{1z} \times x + c_{0z} \quad (2) \end{aligned}$$

where x represents time (typically in years), and $c_{2y}, c_{1y}, c_{0y}, c_{2z}, c_{1z}, c_{0z}$ are the respective fitting coefficients.

The average velocity of the relative sea level (v_y) and the tide gauge (v_z) over their respective fitting periods are calculated from these coefficients as:

$$v_y = c_{2y} \times (x_{e,y} + x_{s,y}) + c_{1y} \quad (3)$$

$$v_z = c_{2z} \times (x_{e,z} + x_{s,z}) + c_{1z} \quad (4)$$

Similarly, the average acceleration of the relative sea level (a_y) and the tide gauge (a_z) are:

$$a_y = 2 \times c_{2y} \quad (5)$$

$$a_z = 2 \times c_{2z} \quad (6)$$

Typically, y and z are expressed in mm, and x in years, resulting in velocities (v) in mm/yr and accelerations (a) in mm/yr².

Integrating RSL and VLM data

The conventional method of estimating ASLR by simply subtracting the VLM rate from the RSL rate ($v_y - v_z$) is only valid if both accelerations, a_y and a_z , are zero ([Wöppelmann et al., 2007, 2011](#)). Since accelerations are generally non-zero, this simple correction is often inaccurate. Applying the polynomial approach

$$z = c_{2z} \times x^2 + c_{1z} \times x + c_{0z} \quad (2)$$

donde x representa el tiempo (típicamente en años), y c_{2y} , c_{1y} , c_{0y} , c_{2z} , c_{1z} , c_{0z} son los respectivos coeficientes de ajuste.

La velocidad promedio del nivel relativo del mar (v_y) y del mareógrafo (v_z) durante sus respectivos períodos de ajuste se calcula a partir de estos coeficientes como:

$$v_y = c_{2y} \times (x_{e,y} + x_{s,y}) + c_{1y} \quad (3)$$

$$v_z = c_{2z} \times (x_{e,z} + x_{s,z}) + c_{1z} \quad (4)$$

De manera similar, la aceleración promedio del nivel relativo del mar (a_y) y del mareógrafo (a_z) son:

$$a_y = 2 \times c_{2y} \quad (5)$$

$$a_z = 2 \times c_{2z} \quad (6)$$

Típicamente, y y z se expresan en mm, y x en años, resultando en velocidades (v) en mm/año y aceleraciones (a) en mm/año².

Integrando datos de RSL y VLM

El método convencional de estimar ASLR simplemente restando la tasa de VLM de la tasa de RSL ($v_y - v_z$) solo es válido si ambas aceleraciones, a_y y a_z , son cero (Wöppelmann et al., 2007, 2011). Dado que las aceleraciones generalmente no son cero, esta simple corrección a menudo es inexacta. La aplicación del enfoque polinomial (Ecuaciones 1-6) produce resultados más fiables cuando los tiempos de inicio y finalización para y y z son idénticos ($x_{s,y} = x_{s,z}$ y $x_{e,y} = x_{e,z}$). Sin embargo, esta condición rara vez se cumple debido a las diferentes longitudes de los registros de mareógrafos y GPS.

Acoplar información de mareógrafos con monitoreo GPS es crucial para un análisis robusto de tendencias del nivel del mar (Boretti, 2022a, 2022b). Contabilizar adecuadamente la aceleración tanto de los niveles relativos del mar (a_y) como de la subsidencia (a_z) es obligatorio para obtener resultados precisos. Mientras que los movimientos geológicos lentos y a largo plazo como el GIA (Peltier y Andrews, 1976; Peltier, 1999) influyen principalmente en la velocidad base del VLM y pueden no afectar significativamente a la aceleración calculada durante la escala temporal de los registros típicos, los cambios abruptos del VLM (por ejemplo, debido a terremotos) y la subsiguiente deformación

(Ecuaciones 1-6) yields more reliable results when the start and end times for both y and z are identical ($x_{s,y} = x_{s,z}$ and $x_{e,y} = x_{e,z}$). However, this condition is rarely met due to the differing lengths of tide gauge and GPS records.

Coupling information from tide gauges with GPS monitoring is crucial for robust sea level trend analysis (Boretti, 2022a, 2022b). Properly accounting for the acceleration of both the relative sea levels (a_y) and the subsidence (a_z) is mandatory for accurate results. While long-term, slow geological movements like GIA (Peltier and Andrews, 1976; Peltier, 1999) primarily influence the baseline VLM velocity and may not significantly affect the computed acceleration over the timescale of typical records, abrupt VLM changes (e.g., due to earthquakes) and subsequent post-seismic deformation require specific, careful consideration (Parker et al., 2018).

A critical issue is the disparity in record lengths: while the end times are often comparable ($x_{e,y} \approx x_{e,z}$), the start time of the GPS record is typically much later than the tide gauge record ($x_{s,y} \ll x_{s,z}$). To address this, the following procedure is employed:

The long RSL time series (y) from PSMSL is processed using a parabolic fitting (Equation 1) to determine the coefficients c_{0y} , c_{1y} , and c_{2y} . These are then used to calculate v_y and a_y (Equations 3 and 5) over the full tide gauge record length ($x_{s,y}$ to $x_{e,y}$).

For the VLM (z), the contemporaneous linear velocity ($v_{z,GPSS}$) is obtained from the NGL processed GPS data (derived typically via linear fitting of the recent GPS position time series). The historical velocity at the start of the tide gauge record ($v_{z,GIA}$) is estimated from GIA models.

These two velocities are assumed to represent the instantaneous VLM velocity at the start ($x_{s,z} \approx x_{s,y}$) and end ($x_{e,z} \approx x_{e,y}$) of the modeled VLM period (which corresponds to the tide gauge period).

$$v_{z,GPSS} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} + c_{1z} \quad (7, \text{ interpretation of Eq. 4 at endpoint})$$

$$v_{z,GIA} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{s,z} + c_{1z} \quad (8, \text{ interpretation of Eq. 4 at startpoint})$$

Solving equations (7) and (8) simultaneously allows for the calculation of the VLM quadratic coefficients (c_{2z} and c_{1z}) that define the VLM model over the entire tide gauge period:

$$2 \times c_{2z} = (v_{z,GPSS} - v_{z,GIA}) / (x_{e,z} - x_{s,z}) \quad (9)$$



post-sísmica requieren una consideración específica y cuidadosa ([Parker et al., 2018](#)).

Un problema crítico es la disparidad en la longitud de los registros: mientras que los tiempos finales son a menudo comparables ($x_{e,y} \approx x_{e,z}$), el tiempo de inicio del registro GPS es típicamente mucho más tardío que el registro del mareógrafo ($x_{s,y} << x_{s,z}$). Para abordar esto, se emplea el siguiente procedimiento:

La larga serie temporal de RSL (y) de PSMSL se procesa utilizando un ajuste parabólico (Ecuación 1) para determinar los coeficientes c_{0y} , c_{1y} y c_{2y} . Estos se utilizan luego para calcular v_y y a_y (Ecuaciones 3 y 5) a lo largo de toda la longitud del registro del mareógrafo ($x_{s,y}$ a $x_{e,y}$).

Para el VLM (z), la velocidad lineal contemporánea (v_z, G_{PS}) se obtiene a partir de los datos GPS procesados por NGL (derivados típicamente mediante ajuste lineal de las series temporales de posición GPS recientes). La velocidad histórica al inicio del registro del mareógrafo (v_z, G_{IA}) se estima a partir de modelos de GIA. Se asume que estas dos velocidades representan la velocidad instantánea del VLM al inicio ($x_{s,z} \approx x_{s,y}$) y al final ($x_{e,z} \approx x_{e,y}$) del período modelado de VLM (que corresponde al período del mareógrafo).

$$v_z, G_{PS} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} + c_{1z} \quad (7, \text{interpretación de Ec. 4 en el punto final})$$

$$v_z, G_{IA} \approx 2 \times c_{2z} \times x_{s,z} + c_{1z} \quad (8, \text{interpretación de Ec. 4 en el punto inicial})$$

Resolver las ecuaciones (7) y (8) simultáneamente permite el cálculo de los coeficientes cuadráticos del VLM (c_{2z} y c_{1z}) que definen el modelo VLM durante todo el período del mareógrafo:

$$2 \times c_{2z} = (v_{z, GPS} - v_{z, GIA}) / (x_{e,z} - x_{s,z}) \quad (9)$$

$$c_{1z} = v_{z, GPS} - 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} \quad (10)$$

Con c_{1z} y c_{2z} determinados, la velocidad promedio del VLM (v_z) y la aceleración (a_z) durante el período completo ($x_{s,z}$ a $x_{e,z}$) pueden calcularse utilizando las Ecuaciones 4 y 6. Finalmente, se calculan la velocidad ASLR ($v_{yz} = v_y - v_z$) y la aceleración ($a_{yz} = a_y - a_z$). Al acoplar y y z, c_{0z} puede finalmente calcularse considerando el mismo punto de partida en $x_{s,z} = x_{s,y}$.

Calidad de los datos y consideraciones estadísticas

$$c_{1z} = v_{z, GPS} - 2 \times c_{2z} \times x_{e,z} \quad (10)$$

With c_{1z} and c_{2z} determined, the average VLM velocity (v_z) and acceleration (a_z) over the full period ($x_{s,z}$ to $x_{e,z}$) can be calculated using Equations 4 and 6. Finally, the ASLR velocity ($v_{yz} = v_y - v_z$) and acceleration ($a_{yz} = a_y - a_z$) are computed. When coupling y and z, c_{0z} can be finally computed by considering same starting point at $x_{s,z} = x_{s,y}$.

Data quality and statistical considerations

The reliability of the final results depends fundamentally on the quality of the input data. Optimal data quality is achieved when measurements (both tide gauge and GPS) are collected systematically and continuously over long periods, without significant gaps or perturbing events (like instrument changes, benchmark disturbances, or major earthquakes not specifically accounted for). While the goodness-of-fit of the polynomial regressions provides a measure of how well the model describes the data, the inherent accuracy and representativeness of the PSMSL sea level records and the NGL VLM estimates are paramount. Uncertainties associated with the input data and the assumptions of the linear transition model for VLM velocity influence the uncertainty of the final ASLR results.

Statistical error metrics

Robust analysis requires in principle reporting statistical error metrics. A full analysis using polynomial fitting should include goodness-of-fit statistics (e.g., R^2 , adjusted R^2) to indicate how well the model explains the variance in the data, standard errors for each coefficient (c_0 , c_1 , c_2). The standard error for c_2 is particularly important, as it allows testing the statistical significance of the acceleration term ($a = 2 \times c_2$), confidence intervals for the derived average velocities (v) and accelerations (a). This provides a range within which the true value likely lies. In the case of sea level studies, the fitting accuracy is however much less relevant than the reliability of the underlying data and it is mostly omitted.

RESULTS

The proposed method has been previously applied to the tide gauge location of Sydney Fort Denison ([Boretti, 2024c](#)) and it is

La fiabilidad de los resultados finales depende fundamentalmente de la calidad de los datos de entrada. La calidad óptima de los datos se logra cuando las mediciones (tanto del mareógrafo como del GPS) se recopilan de manera sistemática y continua durante largos períodos, sin brechas significativas o eventos perturbadores (como cambios de instrumentos, alteraciones en los puntos de referencia o terremotos importantes que no se hayan tenido en cuenta específicamente). Mientras que la bondad de ajuste de las regresiones polinómicas proporciona una medida de cuán bien el modelo describe los datos, la precisión inherente, la representatividad de los registros del nivel del mar del PSMSL y las estimaciones de VLM de NGL son primordiales. Las incertidumbres asociadas con los datos de entrada y las suposiciones del modelo de transición lineal para la velocidad de VLM influyen en la incertidumbre de los resultados finales de ASLR.

Métricas de error estadístico

El análisis robusto requiere en principio informar métricas de error estadístico. Un análisis completo utilizando ajuste polinómico debe incluir estadísticas de bondad de ajuste (por ejemplo, R^2 , R^2 ajustado) para indicar qué tan bien el modelo explica la varianza en los datos, errores estándar para cada coeficiente (c_0 , c_1 , c_2). El error estándar para c_2 es particularmente importante, ya que permite probar la significancia estadística del término de aceleración ($a = 2 \times c_2$), intervalos de confianza para las velocidades promedio derivadas (v) y aceleraciones (a). Esto proporciona un rango dentro del cual probablemente se encuentra el valor verdadero. En el caso de los estudios del nivel del mar, la precisión del ajuste es, sin embargo, mucho menos relevante que la fiabilidad de los datos subyacentes y generalmente se omite.

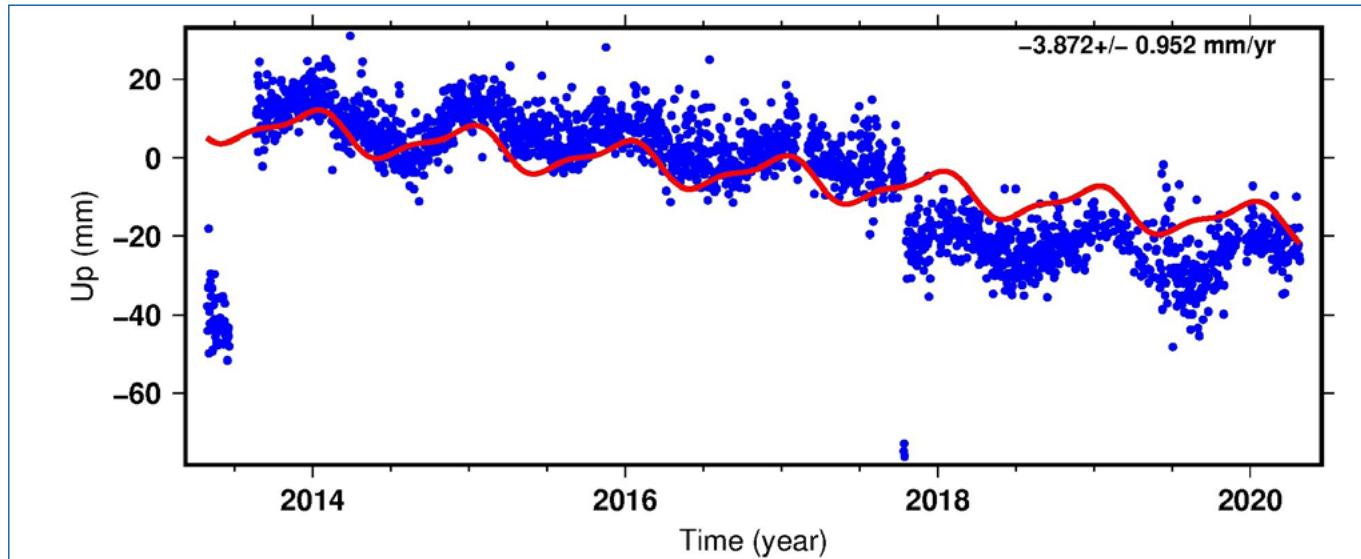
RESULTADOS

El método propuesto ha sido previamente aplicado a la ubicación del mareógrafo de Sydney Fort Denison (Boretti, 2024c) y ahora se aplica a la ubicación del mareógrafo de Fremantle. Sydney y Fremantle son los mareógrafos más antiguos y mejor mantenidos del Hemisferio Sur, en áreas mínimamente afectadas por el movimiento cortical a finales del siglo XIX cuando los dos mareógrafos comenzaron a registrar datos. La Figura 1 presenta la posición vertical absoluta de todas las cúpulas alrededor

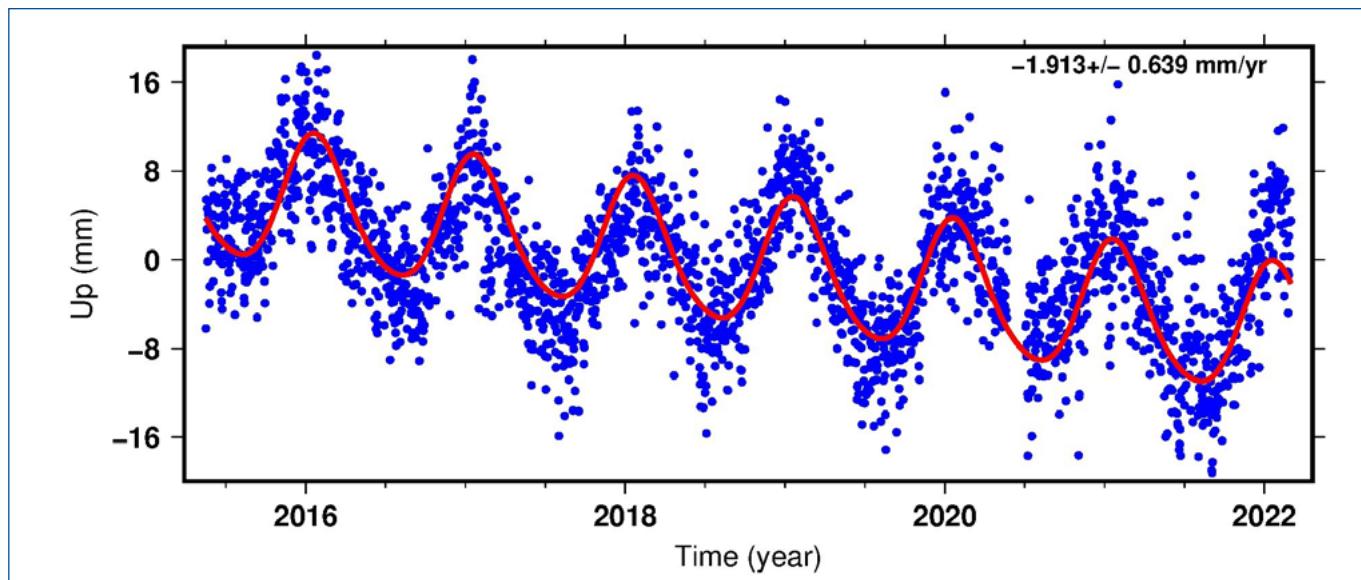
now applied to the tide gauge location of Fremantle. Sydney and Fremantle are the longest and better-maintained tide gauges of the Southern Hemisphere, in areas minimally affected by crustal motion at the end of the 1800s when the two tide gauges started recording. Figure 1 presents the absolute vertical position of all the domes around the Fremantle tide gauges with computation of the subsidence rate based on a sufficient number of years. Those results computed based on a longer time span are generally more reliable.

de los mareógrafos de Fremantle con el cálculo de la tasa de hundimiento basado en un número suficiente de años. Esos resultados calculados en base a un período de tiempo más largo son generalmente más confiables.

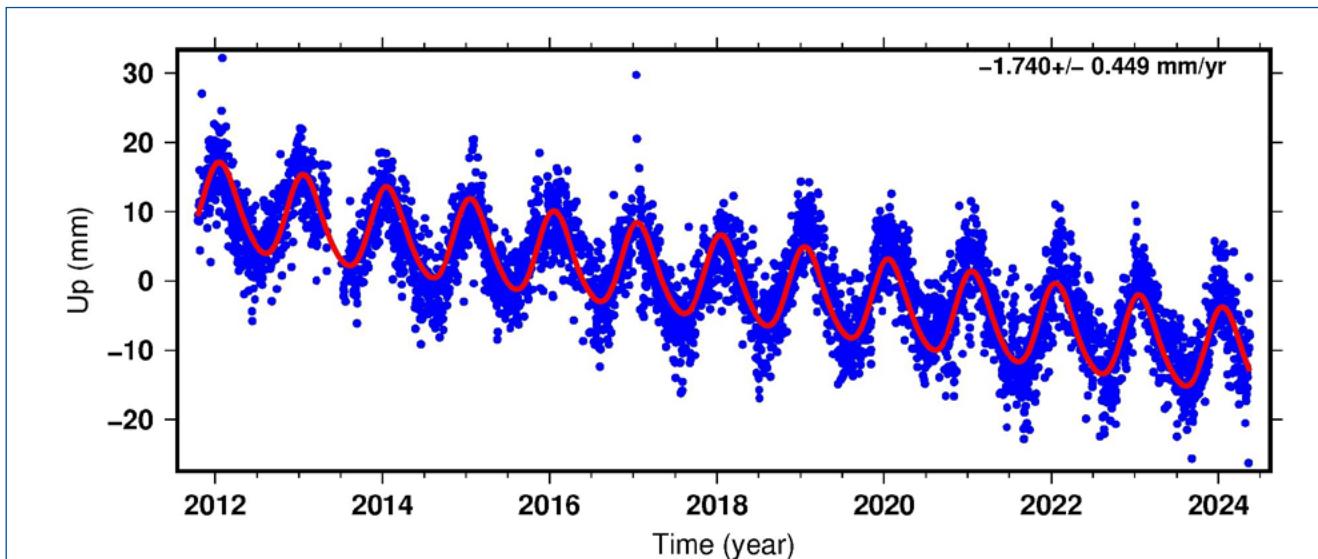
Los datos del GPS sugieren para el mareógrafo de Fremantle, un



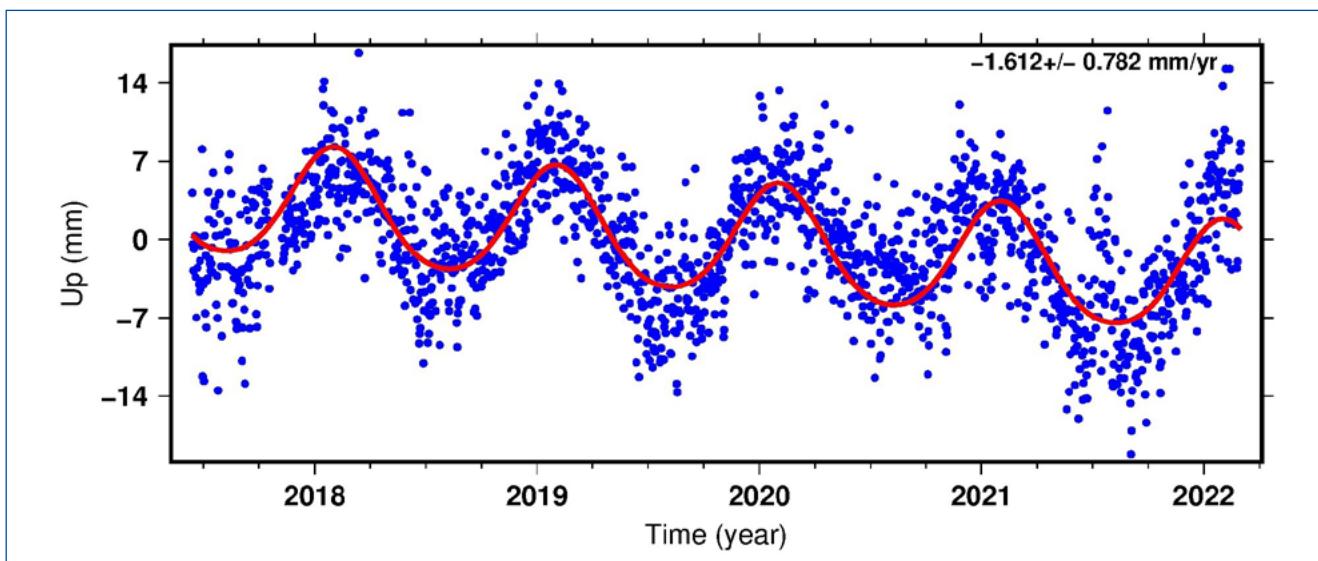
(a) WLT1



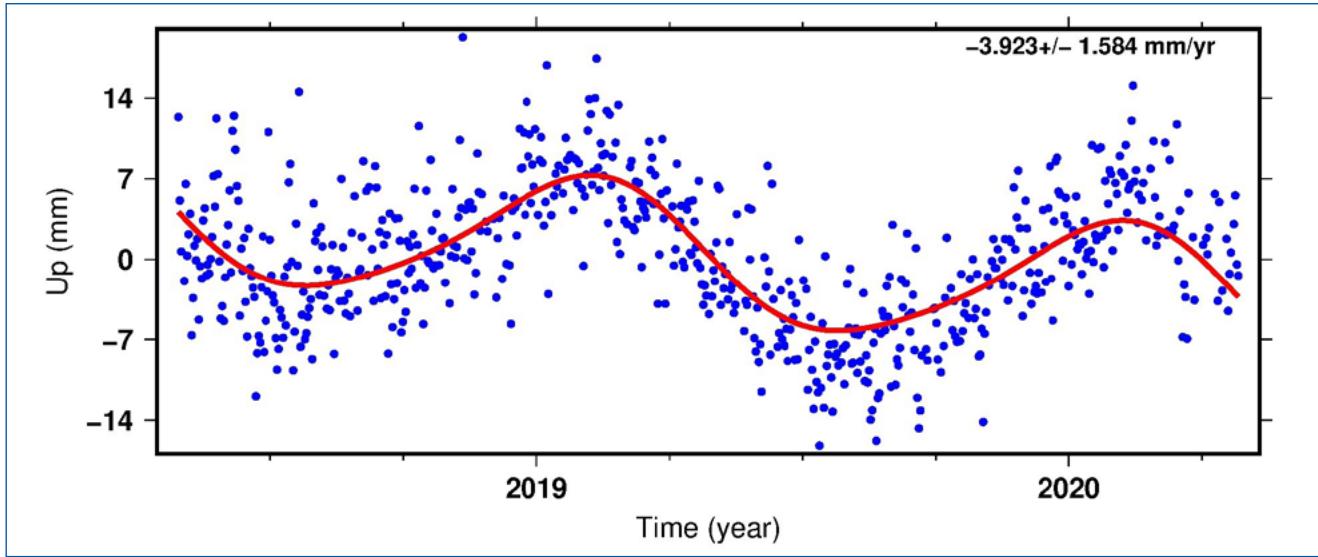
(b) SPA8



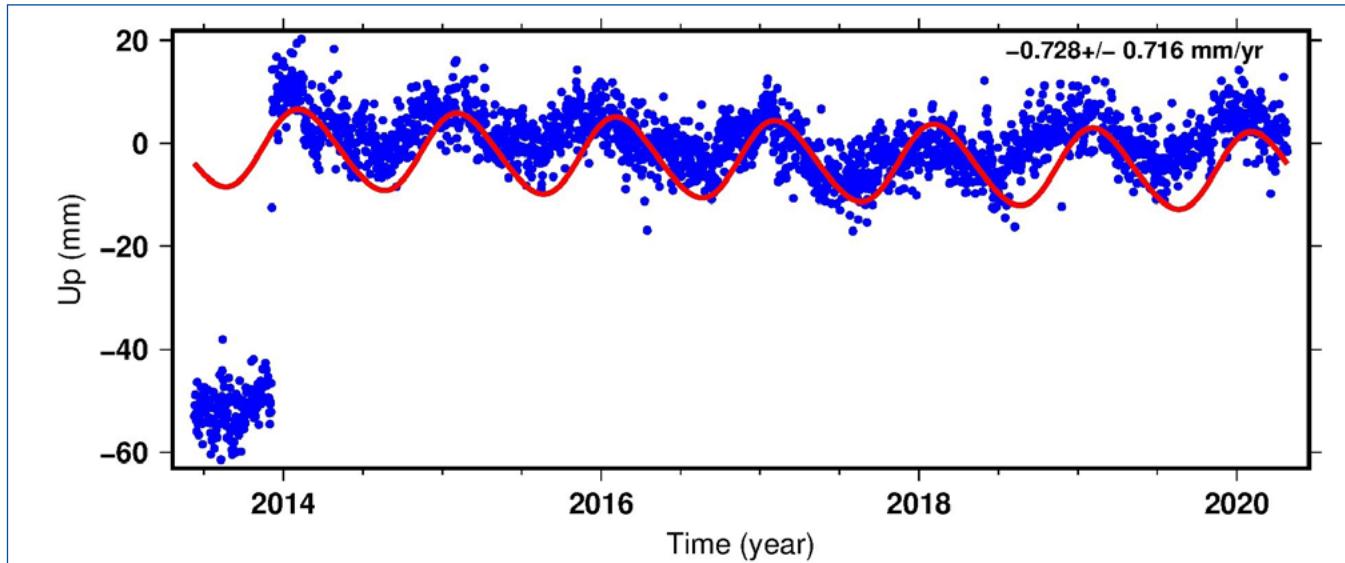
(c) CUTA



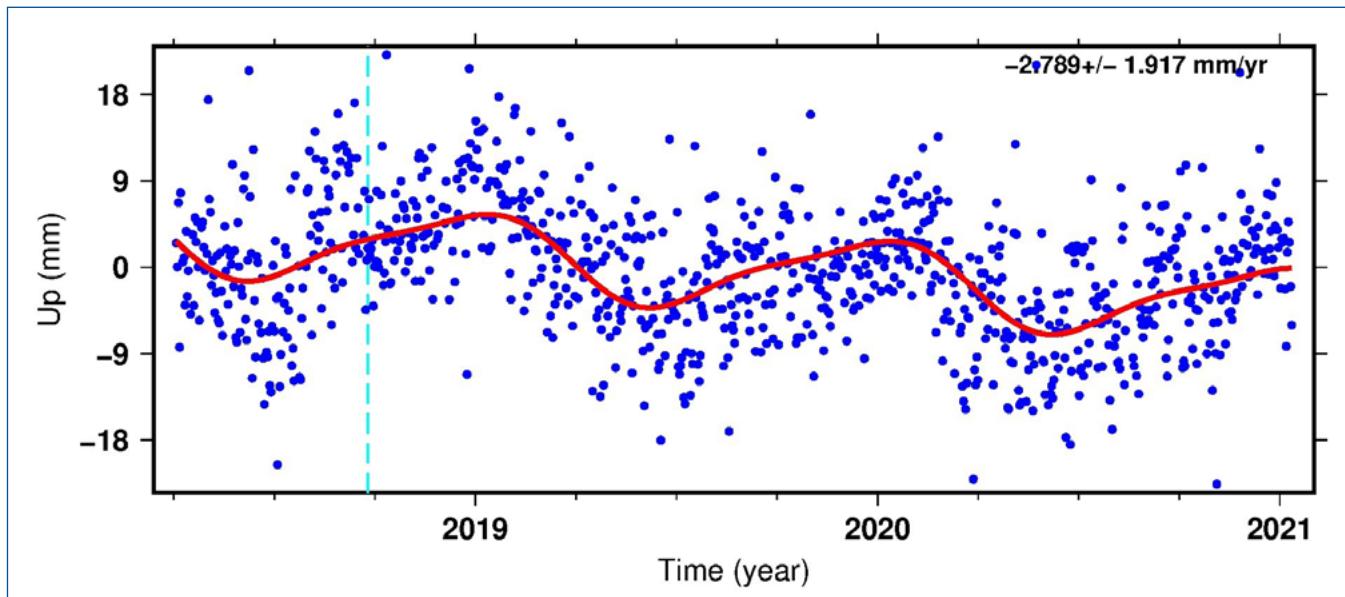
(d) UWA0



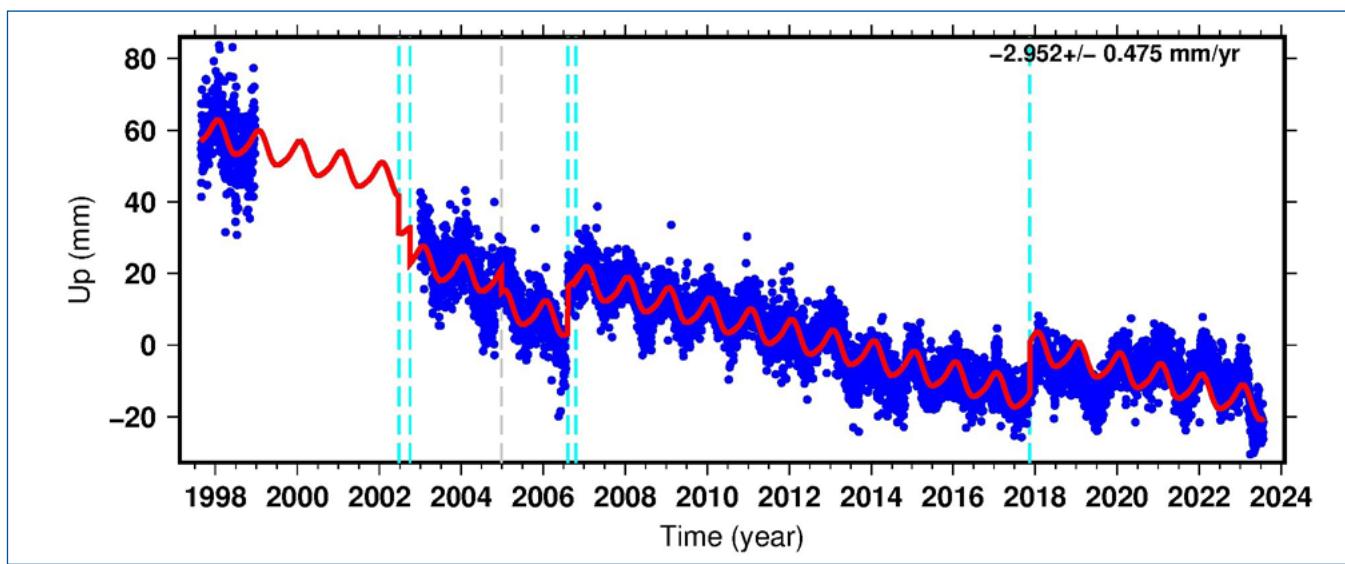
(e) HEN2



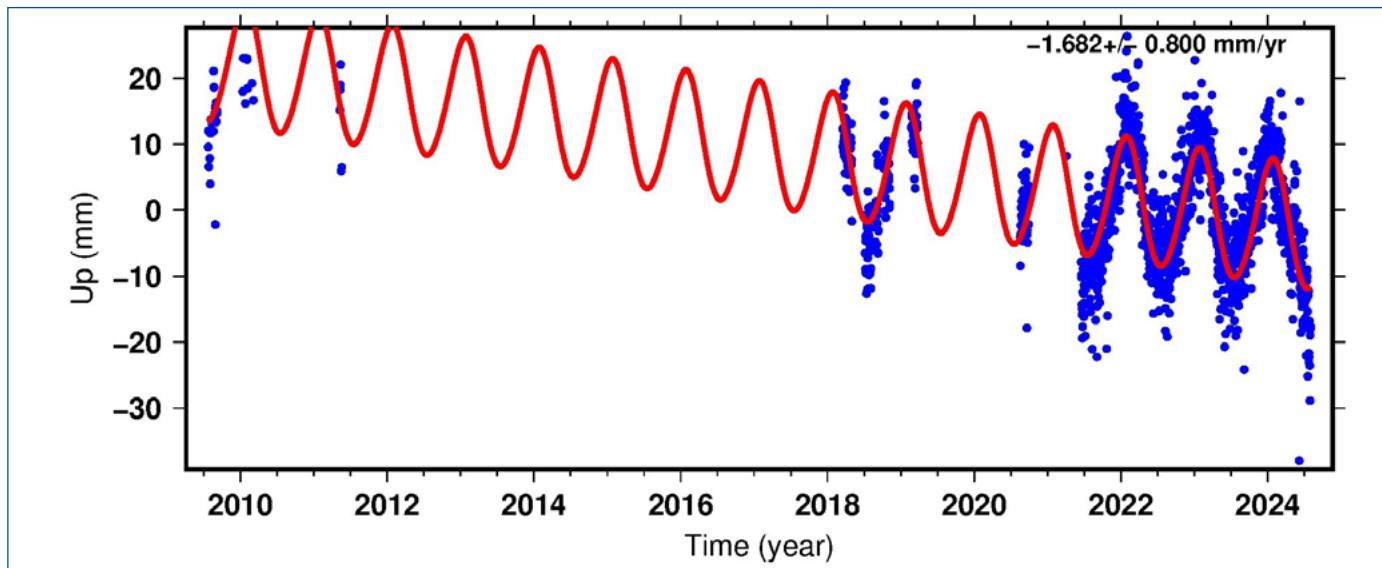
(f) BLMT



(g) BALC



(h) HIL1



(i) MIDL

Figura 1 – Series temporales de GPS para domos alrededor de Fremantle. Las posiciones de 24 horas utilizando órbitas finales se muestran en azul, y las órbitas rápidas en rojo. En el eje x está el tiempo en años (x), y en el eje y está la posición vertical en mm (z). En azul se muestran las posiciones de 24 horas utilizando órbitas finales y en rojo se utilizan las órbitas rápidas. Imágenes descargadas de geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations el 28 de enero de 2025. Crédito NGL.

hundimiento reciente de $v_z = -3,13 \text{ mm/año}$, que es mucho mayor que el hundimiento reciente en Fort Denison, estimado en $v_z = -1,60 \text{ mm/año}$. Vale la pena mencionar que los datos GPS de Fort Denison, Sidney, abarcan aproximadamente una década. En el caso de las cúpulas GPS alrededor de Fremantle, la cobertura temporal es menor, en promedio 4-5 años.

El análisis clásico del nivel relativo del mar para Sydney Fort Denison y Fremantle se puede encontrar en sealevel.info, sealevel.info (2024a, 2024b). El enfoque usado aquí es similar, basado en los mismos datos, pero diferente de llenar los vacíos interpolando meses vecinos.

En Fremantle, la velocidad del nivel relativo del mar es $v_y = +1,80 \text{ mm/año}$, y la aceleración del nivel relativo del mar $a_y = +0,01220 \text{ mm/año}^2$. En Sidney, la velocidad del nivel relativo del mar es $v_y = +0,80 \text{ mm/año}$ y la aceleración del nivel relativo del mar es $a_y = +0,0200 \text{ mm/año}^2$.

Como se discutió en la sección de métodos, Fremantle tiene un perfil lineal para la velocidad vertical, que crece desde 0 en el tiempo x_s del mareógrafo, hasta $-3,13 \text{ mm/año}$ en el tiempo x_e del mareógrafo. Dados $x_s = 1897.042$ y $x_e = 2022.958$, es:

$$v_z = -3.13/2 = -1.56 \text{ mm/año} \quad (11)$$

Figure 1 – GPS time series for domes around Fremantle. 24 hour positions using final orbits are in blue, and rapid orbits are in red. On the x-axis is the time in years (x), and on the y-axis is the vertical position in mm (z). In blue are the 24h positions using final orbits and red is used for rapid orbits. Images downloaded from geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations on January 28, 2025. Credit NGL.

The GPS data suggests for the Fremantle tide gauge, a recent subsidence $v_z = -3.13 \text{ mm/yr}$, which is much larger than the recent subsidence in Fort Denison, estimated at $v_z = -1.60 \text{ mm/yr}$. It is worth mentioning as the GPS data for Fort Denison, Sydney spans about a decade. In the case of the GPS domes around Fremantle, the time coverage is less, on average 4-5 years.

The classic relative sea level analysis for Sydney Fort Denison and Fremantle may be found in sealevel.info, sealevel.info (2024a, 2024b). My approach is similar, based on the same data, but different from filling the gaps interpolating neighboring months.

In Fremantle, the relative sea level velocity is $v_y = +1.80 \text{ mm/yr}$, and the relative sea level acceleration $a_y = +0.01220 \text{ mm/yr}^2$. In Sydney, the relative sea level velocity is $v_y = +0.80 \text{ mm/yr}$ and the relative sea level acceleration is $a_y = +0.0200 \text{ mm/yr}^2$.

As discussed in the methods section, Fremantle has a linear profile for the vertical velocity, growing from 0 at the time x_s of the tide gauge, to the -3.13 mm/yr at the time x_e of the tide gauge. Given $x_s = 1897.042$ and $x_e = 2022.958$, it is:

$$v_z = -3.13/2 = -1.56 \text{ mm/yr} \quad (11)$$

$$a_z = -3.13/(x_e - x_s) = -0.0249 \text{ mm/yr}^2 \quad (12)$$

$$a_z = -3.13/(x_e - x_s) = -0.0249 \text{ mm/año}^2 \quad (12)$$

Para Sídney, de manera similar, se asume un perfil lineal para la velocidad vertical, que crece desde 0 en el tiempo x_s del mareógrafo, hasta -1,6 mm/año en el tiempo x_e del mareógrafo.

Dado que $x_s=1886.042$ y $x_e=2022.958$,

$$v_z = -1.60/2 = -0.80 \text{ mm/año} \quad (13)$$

$$a_z = -1.60/(x_e - x_s) = -0.0117 \text{ mm/año}^2 \quad (14)$$

Aunque GIA puede ser utilizado en diferentes ubicaciones para estimar el movimiento vertical de la tierra en zonas donde se sabe que GIA es relevante, en áreas bien conocidas por ser tectónicamente estables como Australia, donde la subsidencia por extracción de agua subterránea es un proceso que solo comenzó a principios de 1900, es más apropiado tomar como cero la velocidad de la tierra tanto en Sydney como en Fremantle a finales de 1800. No hay mucha diferencia si considera como inicial en el momento x_s del mareógrafo las velocidades verticales del modelo GIA de Peltier, ya que son -0,09 mm/año y 0,00 mm/año en Sydney, y -0,02 mm/año y 0,04 mm/año en Fremantle, respectivamente en VM2 y VM4 (Peltier, 2004).

De manera similar, en Fremantle, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +1.72 - 1.56 = +0.16 \text{ mm/año} \quad (15)$$

sometido a una aceleración:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0146 - 0.0249 = -0.0103 \text{ mm/año}^2 \quad (16)$$

De manera similar, en Sídney, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +0.82 - 0.80 = +0.02 \text{ mm/año} \quad (17)$$

sometido a una aceleración:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0200 - 0.0117 = +0.0083 \text{ mm/año}^2 \quad (18)$$

La **Figura 2** presenta las series temporales para el nivel relativo del mar y_{TG} , el desplazamiento por subsidencia z_{GPS} y z_{model} , y el nivel absoluto del mar $y_{TG+z_{model}}$, para Fremantle y Sídney.

El creciente hundimiento en Fremantle, al igual que en Fort

For Sydney, similarly, I assume a linear profile for the vertical velocity, growing from 0 at the time x_s of the tide gauge, to the -1.6 mm/yr at the time x_e of the tide gauge. Since $x_s=1886.042$ and $x_e=2022.958$,

$$v_z = -1.60/2 = -0.80 \text{ mm/yr} \quad (13)$$

$$a_z = -1.60/(x_e - x_s) = -0.0117 \text{ mm/yr}^2 \quad (14)$$

While GIA may be used in different locations to estimate the vertical motion of the land in zones where GIA is known to be relevant, in zones well known to be tectonically stable such as Australia where subsidence from groundwater extraction is a process which only started in the early 1900s, it is more appropriate to take as zero the velocity of the land in both Sydney and Fremantle at the end of 1800s. There is not too much difference if we consider as initial at the time x_s of the tide gauge the vertical velocities from the Peltier GIA model, as they are -0.09 mm/yr and 0.00 mm/yr in Sydney, and -0.02 mm/yr and 0.04 mm/yr in Fremantle, respectively in VM2 and VM4 (Peltier, 2004).

Similarly, in Fremantle, the absolute sea levels have grown at a velocity:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +1.72 - 1.56 = +0.16 \text{ mm/yr} \quad (15)$$

subjected to an acceleration:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0146 - 0.0249 = -0.0103 \text{ mm/yr}^2 \quad (16)$$

Similarly, in Sydney, the absolute sea levels have grown at a velocity:

$$v_{yz} = v_y + v_z = +0.82 - 0.80 = +0.02 \text{ mm/yr} \quad (17)$$

subjected to an acceleration:

$$a_{yz} = a_y + a_z = +0.0200 - 0.0117 = +0.0083 \text{ mm/yr}^2 \quad (18)$$

Figure 2 presents the time series for relative sea level y_{TG} , the subsidence displacement z_{GPS} and z_{model} , and the absolute sea level $y_{TG+z_{model}}$, for Fremantle and Sydney.

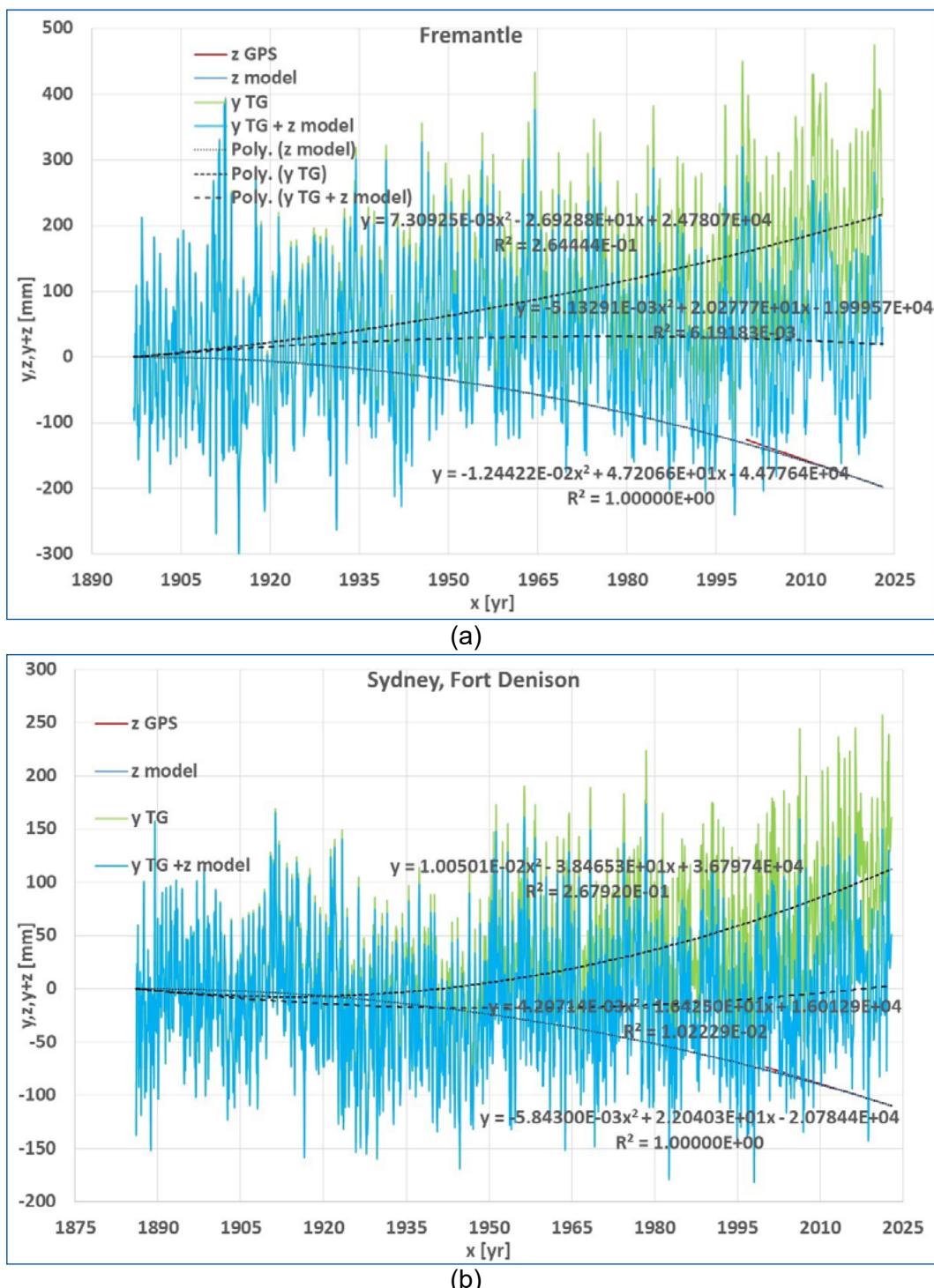


Figura 2. Niveles del mar medidas por el mareógrafo (y_{TG}), subsidencia modelada del mareógrafo (z_{model}), y su suma ($y+z$) para Fremantle (a) y Sydney Fort Denison (b) vs. tiempo. El gráfico también muestra la subsidencia medida para el mareógrafo (z_{GPS}). En el eje x está el tiempo en años (x), y en el eje y está la posición vertical en mm de los niveles del mar (y) y del mareógrafo (z).

Denison de Sídney, también está respaldado por los datos de altimetría satelital CCAR, ccar.colorado.edu/altimetry/. Más información sobre los niveles del mar de Sídney se propone en Boretti (2024c). Se propone un patrón similar a lo largo de las costas este y oeste de Australia, en los océanos Índico y Pacífico.

Figure 2. Sea levels measured by the tide gauge (y_{TG}), modeled subsidence of the tide gauge (z_{model}), and their sum ($y+z$) for Fremantle (a) and Sydney Fort Denison (b) vs. time. The graph also shows the subsidence measured for the tide gauge (z_{GPS}). On the x-axis is the time in years (x), and on the y-axis is the vertical position in mm of the sea levels (y) and the tide gauge (z).

The growing subsidence in Fremantle, same as Sydney Fort Denison, is also supported by CCAR satellite altimetry data , ccar.colorado.edu/altimetry/. Further information about the sea levels of Sydney is proposed in Boretti (2024c). A similar pattern is proposed along the east and west coast of Australia, in the

Al utilizar el explorador del nivel del mar de CCAR, frente al mareógrafo de Fremantle, el nivel absoluto del mar ha estado creciendo desde 1993 a una tasa de 2,8 mm/año, mientras que el nivel relativo del mar en el mareógrafo está creciendo a una tasa de 4,4 mm/año, lo que sugiere una tasa de subsidencia de 1,6 mm/año. Al utilizar CCAR, frente al mareógrafo de Fort Denison en Sídney, el nivel absoluto del mar ha estado creciendo desde 1993 a una tasa de 2,9 mm/año, mientras que el nivel relativo del mar en el mareógrafo está creciendo a una tasa de 3,4 mm/año, lo que sugiere una tasa de subsidencia de 0,5 mm/año. Estos valores están muy por debajo de los últimos valores de subsidencia inferidos por GPS basados en menos de 10 años de datos.

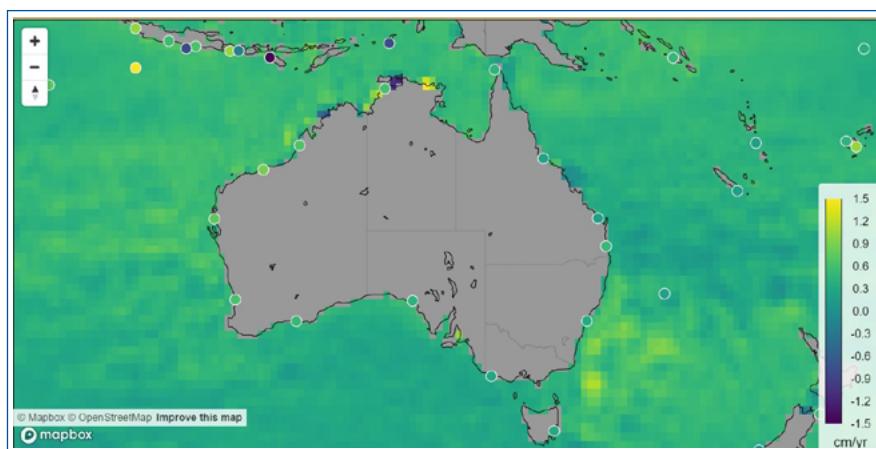
La Figura 3 compara los niveles del mar absolutos (cálculo apoyado por satélite) y relativos (mareógrafo) frente a Sídney y Fremantle desde 1993 (de CCAR). La comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Sídney muestra que la tasa relativa de elevación es mayor, 3,4 frente a 2,9 mm/año en el período corto, ya que podría ser el resultado de un hundimiento a una tasa de 0,5 mm/año. La comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Fremantle muestra que la tasa relativa de elevación es mayor, 4,4 frente a 2,8 mm/año, lo que podría ser el resultado de un hundimiento a una tasa de 1,6 mm/año. El análisis CCAR se basa en un registro corto que abarca solo 30 años, lo cual es inadecuado para evaluar las tasas de aumento del nivel del mar dada la presencia de oscilaciones cuasi-60 años. Esto explica la diferencia frente a la evaluación en la Figura 2. Estos resultados son consistentes, en lo que respecta a la subsidencia, con el análisis previo.

Indian and Pacific Oceans.

By using the sea level explorer by CCAR, in front of the Fremantle tide gauge the absolute sea level has been growing since 1993 at a rate of 2.8 mm/yr, while the relative sea level at the tide gauge is growing at a rate of 4.4 mm/yr, suggesting a subsidence rate of 1.6 mm/yr. By using CCAR, in front of the Sydney Fort Denison tide gauge the absolute sea level has been growing since 1993 at a rate of 2.9 mm/yr, while the relative sea level at the tide gauge is growing at a rate of 3.4 mm/yr, suggesting a subsidence rate of 0.5 mm/yr. These values are well below the latest values of GPS-inferred subsidence based on less than 10 years of data.

Figure 3 compares the absolute (satellite-supported computation) and relative (tide gauge) sea levels in front of Sydney and Fremantle since 1993 (from CCAR). The comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Sydney shows the relative rate of rise is larger, 3.4 vs. 2.9 mm/yr over the short window, as it could be the result of subsidence at a rate of 0.5 mm/yr. The comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Fremantle shows the relative rate of rise is larger, 4.4 vs. 2.8 mm/yr, as it could be the result of subsidence at a rate of 1.6 mm/yr. The CCAR analysis is based on a short record spanning only 30 yr, which are inadequate to assess sea level rates of rise given the presence of the quasi-60 years oscillations. This explains the difference vs. the assessment in Figure 2. These results are consistent, for what concerns subsidence, with the prior analysis.

(a)



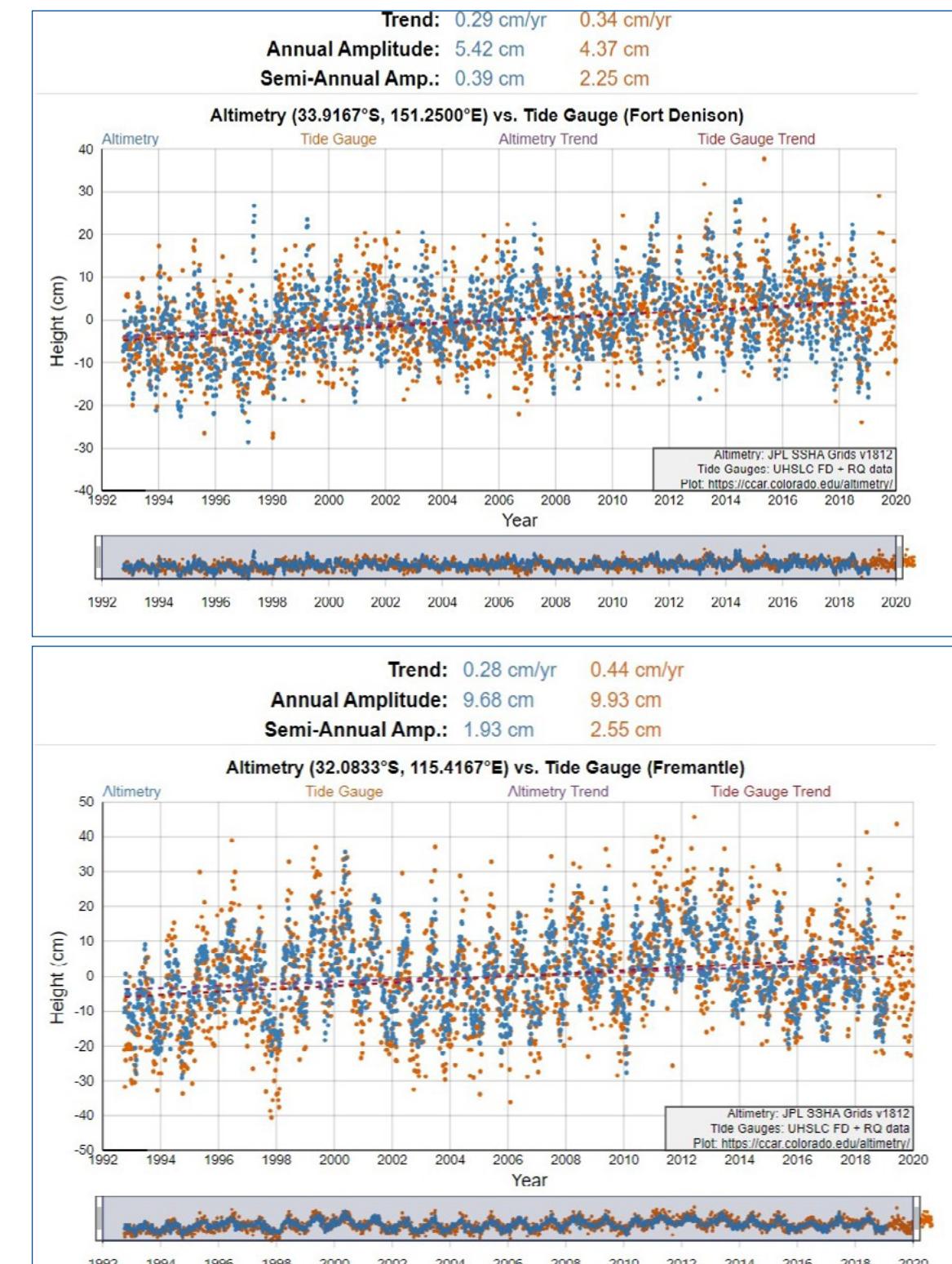


Figura 3. Comparación de los niveles del mar absolutos (cálculo apoyado por satélite) y relativos (mareógrafo) frente a Sídney y Fremantle desde 1993 (de CCAR, ccar.colorado.edu/altimetry/). (a) Mapa de las tasas absolutas de elevación a través de los océanos alrededor de Australia y ubicación de los mareógrafos de referencia. (b) Comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Sídney. (c) Comparación de las tasas absolutas de elevación frente a la costa y la tasa relativa de elevación en el mareógrafo de Fremantle. En el eje x está el tiempo en años (x), y en el eje y está la posición vertical en cm de los niveles del mar (y) medidos por mareógrafo y altimetría satelital. Crédito CCAR.

Figure 3. Comparison of absolute (satellite-supported computation) and relative (tide gauge) sea levels in front of Sydney and Fremantle since 1993 (from CCAR, ccar.colorado.edu/altimetry/). (a) Map of absolute rates of rise across the oceans around Australia and location of reference tide gauges. (b) Comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Sydney. (c) Comparison of absolute rates of rise off the coast and relative rate of rise at the tide gauge of Fremantle. On the x-axis is the time in years (x), and on the y-axis is the vertical position in cm of the sea levels (y) by tide gauge and satellite altimetry. Credit CCAR.

DISCUSIÓN

Fundamento del uso de ajustes cuadráticos en los análisis del nivel del mar

La elección de modelar el Aumento Absoluto del Nivel del Mar (ASLR, por sus siglas en inglés) como una función cuadrática del tiempo está bien establecida en la literatura y está impulsada principalmente por la necesidad de capturar la aceleración observada en el aumento del nivel del mar, particularmente durante los siglos XX y XXI. El calentamiento global conduce a un aumento en las tasas tanto de expansión térmica del agua oceánica como de derretimiento del hielo terrestre (glaciares y capas de hielo). Como la tasa de calentamiento en sí no ha sido constante, la tasa de elevación del nivel del mar también ha cambiado. Un modelo lineal simple ($y = mt + c$) asume una tasa constante de aumento (m), lo cual es inconsistente con las observaciones en escalas temporales de décadas a siglos. Un modelo cuadrático ($y = at^2 + bt + c$) incorpora un término de aceleración constante ($2a$), que representa la forma matemática más simple de explicar una tasa de aumento cambiante dentro del período observado. Numerosos estudios que analizan registros a largo plazo de mareógrafos y altimetría satelital han detectado una aceleración positiva estadísticamente significativa en el nivel medio global del mar, lo que justifica el uso de modelos cuadráticos o no lineales de orden superior (por ejemplo, Douglas, 1992; Church y White, 2006, 2011; Jevrejeva et al., 2008; Chambers et al., 2012; Dangendorf et al., 2017).

Aunque quizás menos universalmente aplicado que para ASLR, modelar la subsidencia con una función cuadrática puede ser razonable, especialmente cuando los factores antropogénicos dominan y se han intensificado con el tiempo. Como se señala en el texto de introducción proporcionado, factores como la extracción de aguas subterráneas, la explotación de recursos y la carga de infraestructura a menudo aumentan de manera no lineal durante períodos de desarrollo (por ejemplo, Kolker et al., 2011; Erban et al., 2014; Minderhoud et al., 2018). Si la tasa de estas actividades (y por lo tanto la tasa de subsidencia inducida) ha aumentado, un modelo cuadrático puede proporcionar un mejor ajuste empírico al movimiento resultante del terreno que un modelo lineal simple, capturando una aceleración (o desaceleración) en la tasa de subsidencia. El método específico en tu texto modela la velocidad linealmente, lo que implica una

DISCUSSION

Rationale behind the use of quadratic fittings in sea level analyses

The choice to model Absolute Sea Level Rise (ASLR) as a quadratic function of time is well-established in the literature and is primarily driven by the need to capture the observed acceleration in sea level rise, particularly during the 20th and 21st centuries. Global warming leads to increased rates of both thermal expansion of ocean water and melting of land-based ice (glaciers and ice sheets). As the rate of warming itself has not been constant, the rate of sea level rise has also changed. A simple linear model ($y = mt + c$) assumes a constant rate of rise (m), which is inconsistent with observations over multi-decadal to century timescales. A quadratic model ($y = at^2 + bt + c$) incorporates a constant acceleration term ($2a$), representing the simplest mathematical way to account for a changing rate of rise within the observed period. Numerous studies analyzing long-term tide gauge and satellite altimetry records have detected statistically significant positive acceleration in global mean sea level, justifying the use of quadratic or higher-order non-linear models (e.g., Douglas, 1992; Church and White, 2006, 2011; Jevrejeva et al., 2008; Chambers et al., 2012; Dangendorf et al., 2017).

While perhaps less universally applied than for ASLR, modeling subsidence with a quadratic function can be reasonable, especially when anthropogenic drivers dominate and have intensified over time. As noted in the introduction text provided, factors like groundwater extraction, resource exploitation, and infrastructure loading often increase non-linearly during periods of development (e.g., Kolker et al., 2011; Erban et al., 2014; Minderhoud et al., 2018). If the rate of these activities (and thus the rate of induced subsidence) has increased, a quadratic model can provide a better empirical fit to the resulting land motion than a simple linear model, capturing an acceleration (or deceleration) in the subsidence rate. The specific method in your text models the velocity linearly, which implies a quadratic function for the position (z), explicitly calculating a constant acceleration (az).

While processes driven by positive feedback loops can exhibit exponential growth, quadratic models are often preferred for analyzing geophysical time series like sea level for several

función cuadrática para la posición (z), calculando explícitamente una aceleración constante (az).

Mientras que los procesos impulsados por bucles de retroalimentación positiva pueden exhibir un crecimiento exponencial, los modelos cuadráticos suelen ser preferidos para analizar series temporales geofísicas como el nivel del mar por varias razones. Los modelos cuadráticos son el siguiente paso en complejidad después de los modelos lineales y proporcionan directamente un término de aceleración constante que es relativamente fácil de interpretar.

En las longitudes típicas de registros fiables de mareógrafos (décadas a ~150 años), una función cuadrática a menudo proporciona un ajuste estadísticamente robusto a la no linealidad observada sin sobreajustar. Detectar un crecimiento exponencial verdadero y sostenido a menudo requiere registros más largos y muy estables.

Mientras que los factores subyacentes (como las concentraciones de gases de efecto invernadero, GEI), podrían seguir tendencias casi exponenciales, los complejos sistemas oceánicos y de la cíosfera responden con inercia y múltiples procesos que interactúan entre sí. El cambio resultante en el nivel del mar durante los períodos de tiempo observados a menudo se aproxima bien mediante un polinomio que captura la tendencia dominante y la aceleración, en lugar de una función exponencial pura.

Los modelos polinomiales, particularmente los cuadráticos, son el enfoque estándar utilizado en muchos artículos seminales que evalúan la aceleración del nivel del mar a partir de mareógrafos ([por ejemplo, los artículos de Douglas y Church y White citados anteriormente](#)). Esto permite una mejor comparabilidad entre estudios. El uso generalizado en la literatura citada sobre el nivel del mar sirve en sí mismo como justificación.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) reconoce explícitamente la aceleración del aumento del nivel del mar. Sus informes de evaluación sintetizan la literatura científica, incluidos los estudios que utilizan ajustes cuadráticos u otros métodos estadísticos para cuantificar esta aceleración. Por ejemplo, el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, Grupo de Trabajo I (WGI) - La Base de la Ciencia Física, específicamente

reasons. Quadratic models are the next step up in complexity from linear models and directly provide a constant acceleration term that is relatively easy to interpret.

Over the typical lengths of reliable tide gauge records (decades to ~150 years), a quadratic function often provides a statistically robust fit to the observed non-linearity without overfitting. Detecting true, sustained exponential growth often requires longer, very stable records.

While underlying drivers (like GHG concentrations) might follow near-exponential trends, the complex ocean and cryosphere systems respond with inertia and multiple interacting processes. The resulting sea level change over observed timescales is often well-approximated by a polynomial capturing the dominant trend and acceleration, rather than a pure exponential function.

Polynomial models, particularly quadratic ones, are the standard approach used in many seminal papers assessing sea level acceleration from tide gauges ([e.g., the Douglas and Church and White papers cited above](#)). This allows for better comparability across studies. The widespread use in the cited sea level literature itself serves as justification.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) explicitly acknowledges the acceleration of sea level rise. Their assessment reports synthesize the scientific literature, including studies that use quadratic fits or other statistical methods to quantify this acceleration. For example, the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I (WGI) - The Physical Science Basis, specifically Chapter 9 ("Ocean, cryosphere and sea level change"), states clearly that the rate of global mean sea level (GMSL) rise has accelerated. It notes, "GMSL rise has accelerated since the late 1960s, with an average rate of ... 3.7 [2.8 to 4.6] mm yr⁻¹ over 2006–2018" compared to earlier periods (Summary for Policymakers, A.1.7).

The underlying chapter analyses rely on studies ([like those cited above, e.g., Dangendorf et al., 2017](#)) that often use statistical techniques capable of detecting acceleration, consistent with non-linear (including quadratic) trends. While the IPCC's future projections use complex climate models rather than simple extrapolation of quadratic trends, their assessment of historical sea level change confirms acceleration as a key feature, implicitly



el Capítulo 9 (“Océano, criofrontera y cambio del nivel del mar”), establece claramente que la tasa de aumento del nivel medio global del mar (GMSL) se ha acelerado. Señala que “la elevación del NMGM se ha acelerado desde finales de la década de 1960, con una tasa media de ... 3,7 [2,8 a 4,6] mm año⁻¹ durante 2006-2018” en comparación con períodos anteriores (Resumen para responsables de políticas, A.1.7).

Los análisis de los capítulos subyacentes se basan en estudios ([como los citados anteriormente, por ejemplo, Dangendorf et al., 2017](#)) que a menudo utilizan técnicas estadísticas capaces de detectar aceleración, consistentes con tendencias no lineales (incluidas las cuadráticas). Mientras que las proyecciones futuras del IPCC utilizan modelos climáticos complejos en lugar de una simple extrapolación de tendencias cuadráticas, su evaluación del cambio histórico del nivel del mar confirma la aceleración como una característica clave, respaldando implícitamente el uso de modelos que pueden captarla.

En resumen, el uso de modelos cuadráticos es una práctica estándar y justificada para analizar series temporales del nivel del mar con el fin de capturar la aceleración observada, respaldada por numerosos estudios y reconocida por el IPCC. Mientras que los modelos exponenciales son una alternativa para representar el crecimiento acelerado, los modelos cuadráticos suelen preferirse por su simplicidad, interpretabilidad y buen ajuste empírico durante las escalas temporales de observación típicas en este campo específico.

Generalización de resultados

El modelo propuesto puede aplicarse a muchas otras ubicaciones costeras. [Boretti \(2024a\)](#) presenta una tabla resumen con los valores de v_y , v_z , v_{yz} , y a_y , a_z , a_{yz} para 153 mareógrafos de largo plazo, con una longitud de registro variable entre 81 y 215 años, un promedio de 115 años. Al calcular la tasa de subsidencia en el momento en que comenzaron los registros como el promedio de los valores pasados de los modelos GIA VM2 y VM4 de Peltier, utilizando para la tasa de subsidencia al final del registro los últimos valores de NGL, solo cuando están respaldados por suficientes mediciones y no entran en conflicto con estimaciones anteriores, la estadística resumida para los mareógrafos restantes es la propuesta en la [Anexo 1](#). Este es un trabajo en progreso, ya que las estimaciones de subsidencia

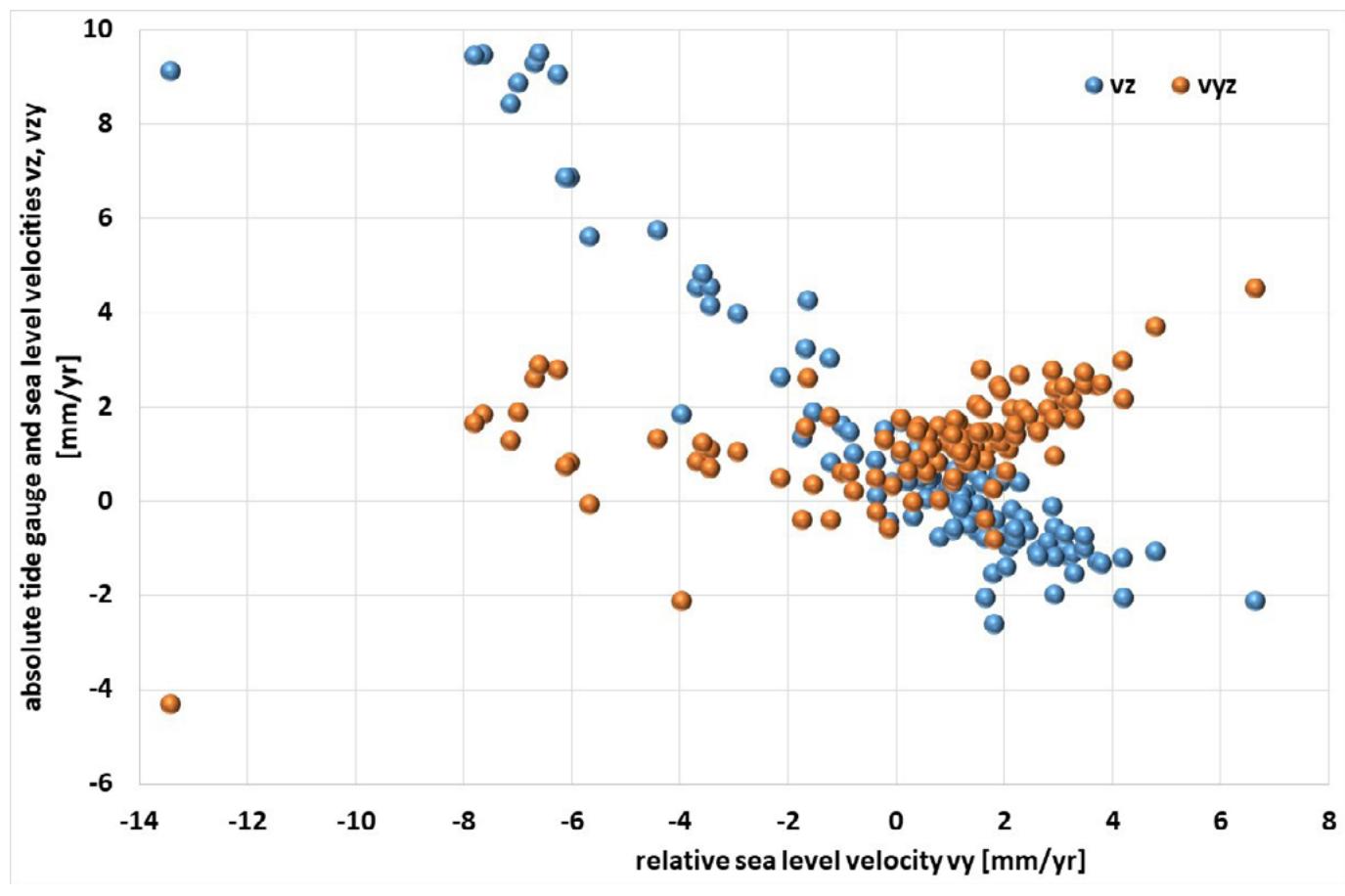
supporting the use of models that can capture it.

In summary, the use of quadratic models is a standard and justified practice for analyzing sea level time series to capture observed acceleration, supported by numerous studies and acknowledged by the IPCC. While exponential models are an alternative for representing accelerating growth, quadratic models are often preferred for their simplicity, interpretability, and good empirical fit over typical observational timescales in this specific field.

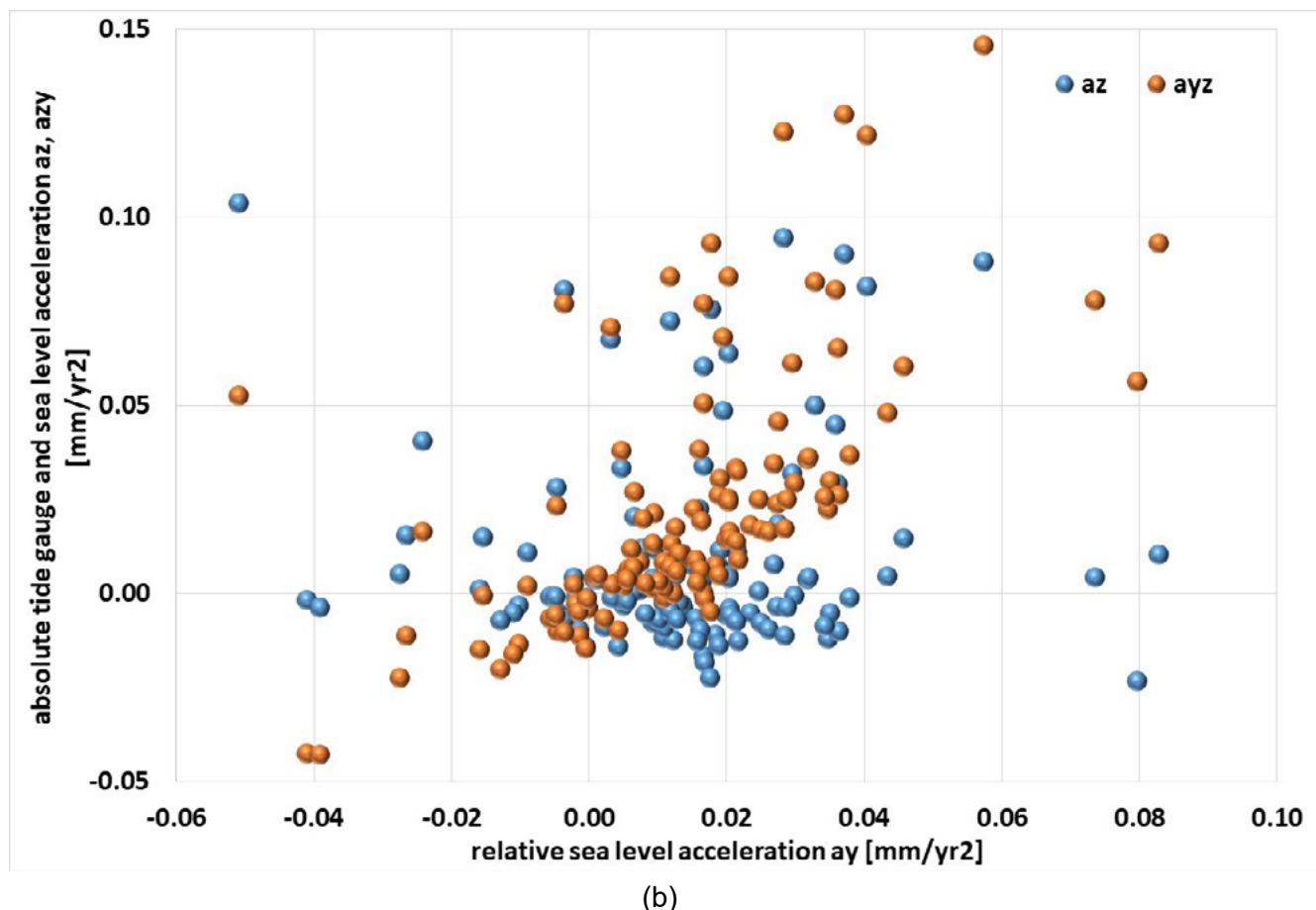
Generalization of results

The proposed model can be applied to many other coastal locations. [Boretti \(2024a\)](#) presents a summary table with the values of v_y , v_z , v_{yz} , and a_y , a_z , a_{yz} for 153 long-term tide gauges, having record length variable between 81 and 215 yr, an average of 115 yr. By computing the subsidence rate at the time the records started as the average of Peltier's GIA VM2 and VM4 models past values, using for the subsidence rate at the end of the record the latest NGL values, only when supported by enough measurements and not conflicting with prior estimations, the summary statistic for the remaining tide gauges is the one proposed in [Anex 1](#). This is a work in progress, as the estimations of subsidence are changing, depending on the availability of more data. [Figure 4](#) presents the v_{yz} and v_z vs. v_y (a) and a_{yz} and a_z vs. a_y (b) for the long-term, high-quality tide gauges reported in [Anex 1](#). It is immediately noted that higher rates of relative sea level rise are often associated with locations suffering from subsidence, while lower (negative) values of relative sea level rise are often associated with locations experiencing uplift. The rate of rise of the absolute sea levels is mostly in the range of 0 to 2 mm/yr. Opposite, no clear trend is shown for the accelerations, which suffer from inaccuracies much more than the velocities.

están cambiando, dependiendo de la disponibilidad de más datos. La Figura 4 presenta el v_{yz} y v_z vs. v_y (a) y a_{yz} y a_z vs. a_y (b) para los mareógrafos de alta calidad y largo plazo reportados en el Anexo 1. Se observa inmediatamente que las tasas más altas de elevación relativa del nivel del mar a menudo están asociadas con ubicaciones que sufren subsidencia, mientras que los valores más bajos (negativos) de elevación relativa del nivel del mar a menudo están asociados con ubicaciones que experimentan levantamiento. La tasa de aumento de los niveles absolutos del mar se encuentra principalmente en el rango de 0 a 2 mm/año. Por el contrario, no se muestra una tendencia clara para las aceleraciones, que sufren de inexactitudes mucho más que las velocidades.



(a)



(b)

Figura 4. (a) velocidad vertical del mareógrafo (v_z) y velocidad del nivel absoluto del mar (v_{yz}) frente a la velocidad del nivel relativo del mar (v_y). (b) aceleración vertical del mareógrafo (v_z) y aceleración del nivel absoluto del mar (a_{yz}) frente a la aceleración del nivel relativo del mar (v_y). Datos para los mareógrafos de alta calidad y largo plazo reportados en el Anexo 1.

Fiabilidad de los resultados

La fiabilidad de los resultados propuestos en el Anexo 1 es variable, dependiendo de muchos factores. Por ejemplo, no todos los mareógrafos tienen una cúpula GPS cercana como en Sídney. En algunos casos, las cúpulas GPS están ubicadas muy lejos del mareógrafo, y por lo tanto su posición no es una estimación precisa de la posición del mareógrafo. En el caso de Fremantle, esto no es un problema, ya que el mareógrafo está rodeado por muchas cúpulas GPS con subsidencia similar, pero en otros casos las diferencias pueden ser sustanciales.

Además, las series temporales de GPS suelen ser demasiado cortas y con demasiados puntos de ruptura para proporcionar información fiable. La velocidad GPS de diferentes proveedores para una misma ubicación varía, y a menudo las estimaciones posteriores de los mismos proveedores también son

Figure 4. (a) vertical velocity of the tide gauge (v_z) and absolute sea level velocity (v_{yz}) vs. the relative sea level velocity (v_y). (b) vertical acceleration of the tide gauge (v_z) and absolute sea level acceleration (a_{yz}) vs. the relative sea level acceleration (v_y). Data for the long-term, high-quality tide gauges reported in Annex 1.

Reliability of results

The reliability of the results proposed in Annex 1 is variable, depending on many factors. For example, not all the tide gauges have a close-by GPS dome as in Sydney. In some cases, GPS domes are located very far from the tide gauge, and therefore their position is not an accurate estimation of the tide gauge position. In the case of Fremantle, this is not a problem, being the tide gauge surrounded by many GPS domes of similar subsidence, but in other cases differences can be substantial.

Additionally, the GPS time series are often too short and with too many breakpoints to provide reliable information. The GPS velocity by different providers for one same location varies, and often subsequent estimations by the same providers are also significantly different. In the case of The Battery, New York, as proposed by SONEL (2024).

significativamente diferentes. En el caso de The Battery, Nueva York, según lo propuesto por [SONEL \(2024\)](#).

La cúpula GPS de NYBP está sujeta a una tasa de subsidencia de -1,84 mm/año según SONEL ULR7A, -2,25 mm/año según SONEL ULR6B, -2,19 mm/año según NGL 14, -2,08 mm/año según NGL 08, o -3,63 mm/año según GFZ GT3. El NGL 14 actualizado es entonces -2,69 mm/año según [NGL \(2024k\)](#).

Esto demuestra lo difícil que sigue siendo evaluar la velocidad vertical de una cúpula fija en un marco de referencia absoluto. La diferencia en la velocidad de subsidencia para NYBP por diferentes o los mismos proveedores en diferentes momentos, a pesar de estar basada en más de una década de datos, es pequeña en comparación con casos donde el período de datos es mucho menor, por ejemplo, solo un par de años, como desafortunadamente es común en muchas otras ubicaciones. Esta es una fuente importante de inexactitud que requiere un examen caso por caso del resultado del GPS, posiblemente con la ayuda de información adicional como la comparación de los niveles absolutos del mar obtenidos por satélite y el nivel relativo del mar medido por mareógrafos, como se hace en la [Figura 3](#). Este otro enfoque también tiene problemas, ya que los niveles absolutos del mar por satélite no son una medida directa sino más bien una especie de producto computacional, y como tal, no se espera que sean muy precisos.

Las estimaciones del modelo GIA para la subsidencia pasada tampoco se espera que sean muy precisas, y especialmente en áreas sujetas a importantes movimientos corticales, los valores de subsidencia o elevación pueden ser poco realistas. Además, los registros del mareógrafo pueden tener problemas ya que a menudo son registros “segmentados” obtenidos al componer los resultados de múltiples sensores, a veces también ubicados en diferentes lugares, y a veces con un datum no bien documentado. Aunque los datos espurios siempre deben eliminarse, las series temporales con vacíos son difíciles de utilizar para estimaciones fiables de velocidades y aceleraciones del nivel relativo del mar.

Problemas que pasan por alto la subsidencia antropogénica

Aunque el modelo propuesto no siempre es fiable, no obstante indica que existe la necesidad de tener en cuenta la subsidencia antropogénica no menos que el aumento eustático del nivel

The GPS dome of NYBP is subjected to a subsidence rate of -1.84 mm/yr according to SONEL ULR7A, -2.25 mm/yr according to SONEL ULR6B, -2.19 mm/yr according to NGL 14, -2.08 mm/yr according to NGL 08, or -3.63 mm/yr according to GFZ GT3. The updated NGL 14 is then -2.69 mm/yr by [NGL \(2024k\)](#).

This demonstrates how difficult it is still to assess the vertical velocity of a fixed dome in an absolute reference frame. The difference in the subsidence velocity for NYBP by different or same providers at different times, despite being based on more than a decade of data, is small when compared to cases where the period of data is much less, for example just a couple of years, as unfortunately is common in many other locations. This is a major source of inaccuracy that necessitates a case-by-case examination of the GPS result, with possibly the help of additional information such as the comparison of absolute sea levels from satellite and relative sea level by tide gauge as done in [Figure 3](#). This other approach also has issues, as the satellite absolute sea levels are not a direct measure but more a sort of computational product, and as such, are not expected to be very accurate.

GIA model estimations for past subsidence are also not expected to be very accurate, and especially in areas subjected to major crustal movements, subsidence or uplift values may be unrealistic. Also, the tide gauge records may have issues as they are often “segmented” records obtained composing the results from multiple sensors, sometimes also located in different locations, and sometimes with a not well-documented datum. While spurious data should always be removed, time series with gaps are difficult to use for reliable estimations of relative sea level velocities and accelerations.

Issues overlooking anthropogenic subsidence

While the proposed model is not always reliable, nevertheless it indicates that there is a need to account for anthropogenic subsidence not less than anthropogenic eustatic sea level rise. It is well accepted that many coastal cities throughout the world are affected by subsidence, as it is also well accepted that this subsidence has anthropogenic origins, having grown considerably since the end of the 1800s, phased with groundwater withdrawal, mining, and loading by infrastructure and buildings, it is time to acknowledge that the sea level velocity and acceleration in tide gauge signals may have a significant contribution by the growing



del mar antropogénico. Es ampliamente aceptado que muchas ciudades costeras en todo el mundo se ven afectadas por la subsidencia, así como también es ampliamente aceptado que esta subsidencia tiene orígenes antropogénicos, habiendo crecido considerablemente desde finales del siglo XIX, en fases con la extracción de aguas subterráneas, la minería y la carga por infraestructura y edificios, es hora de reconocer que la velocidad del nivel del mar y la aceleración en las señales de los mareógrafos pueden tener una contribución significativa debido a la creciente subsidencia. Los resultados anteriores demostraron que las reconstrucciones del nivel medio del mar global basadas en mareógrafos, como la de CSIRO (CSIRO, N.A.), asumen erróneamente la estabilidad de la posición del mareógrafo cuando, por el contrario, la mayoría de las ubicaciones se ven afectadas por una subsidencia creciente, sobreestimando así el efecto eustático.

Explicación de la Oscilación Cuasi-60-Años

El término “oscilación cuasi-60 años” describe fluctuaciones notables en los registros del nivel del mar que ocurren durante varias décadas, típicamente superpuestas a la tendencia a largo plazo del aumento del nivel del mar. La designación “cuasi” refleja que estas variaciones no son perfectamente regulares en período o amplitud, diferenciándose de un ciclo sinusoidal estricto. No obstante, esta variabilidad multidecadal es una característica bien documentada en muchos registros de mareógrafos largos a nivel mundial. Su presencia complica el análisis de las tendencias y aceleraciones del nivel del mar, ya que los registros significativamente más cortos que esta escala temporal característica (por ejemplo, menos de 60-80 años) pueden producir resultados sesgados por la fase particular de la oscilación capturada ([Chambers et al., 2012](#)).

Esta variabilidad multidecadal se atribuye principalmente a modos naturales de variabilidad climática a gran escala, que involucran procesos acoplados océano-atmósfera en las principales cuencas oceánicas. Hay varios mecanismos clave que mencionar.

La Variabilidad Multidecadal del Atlántico (AMV) / Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) se considera un contribuyente importante. El AMV/AMO representa fluctuaciones en toda la cuenca de las temperaturas de la superficie del mar (SST) del

subsidence. The above results demonstrated as tide gauge-based reconstructions of global mean sea level such as the CSIRO one (CSIRO, N.A.), which wrongly assume the stability of the tide gauge position when opposite most of the locations are affected by increasing subsidence, thus overrating the eustatic effect.

Explanation of the Quasi-60-Year Oscillation

The term “quasi-60-year oscillation” describes noticeable fluctuations in sea level records that occur over several decades, typically superimposed on the long-term trend of sea level rise. The designation “quasi” reflects that these variations are not perfectly regular in period or amplitude, differing from a strict sinusoidal cycle. Nonetheless, this multi-decadal variability is a well-documented feature in many long tide gauge records globally. Its presence complicates the analysis of sea level trends and accelerations, as records significantly shorter than this characteristic timescale (e.g., less than 60-80 years) can yield results biased by the particular phase of the oscillation captured ([Chambers et al., 2012](#)).

This multi-decadal variability is primarily attributed to natural, large-scale modes of climate variability, which involve coupled ocean-atmosphere processes in major ocean basins. There are several key mechanisms to mention.

The Atlantic Multidecadal Variability (AMV) / Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) is considered a major contributor. The AMV/AMO represents basin-wide fluctuations in North Atlantic sea surface temperatures (SSTs) with characteristic timescales often cited between 50 and 80 yr ([Schlesinger and Ramankutty, 1994](#); [Enfield et al., 2001](#)). These SST changes influence sea level regionally through Thermosteric Effects and Dynamic Effects. Warmer water during positive phases expands, raising sea level, while cooler water contracts during negative phases. Associated salinity changes (halosteric effects) can also contribute. The AMV/AMO is linked to changes in atmospheric circulation (like the North Atlantic Oscillation) and ocean currents, particularly the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). Variations in AMOC strength and associated wind patterns alter the distribution of water masses and heat, causing dynamic sea level adjustments, especially along the North American and European coastlines ([Knight et al., 2005](#); [McCarthy et al., 2015](#)).

Atlántico Norte con escalas temporales características que a menudo se citan entre 50 y 80 años ([Schlesinger y Ramankutty, 1994](#); [Enfield et al., 2001](#)). Estos cambios en la TSM influyen en el nivel del mar regionalmente a través de Efectos Termostéricos y Efectos Dinámicos. El agua más cálida durante las fases positivas se expande, elevando el nivel del mar, mientras que el agua más fría se contrae durante las fases negativas. Los cambios de salinidad asociados (efectos halostéricos) también pueden contribuir. El AMV/AMO está vinculado a cambios en la circulación atmosférica (como la Oscilación del Atlántico Norte) y las corrientes oceánicas, particularmente la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC). Las variaciones en la intensidad de la AMOC y los patrones de viento asociados alteran la distribución de las masas de agua y el calor, causando ajustes dinámicos del nivel del mar, especialmente a lo largo de las costas de América del Norte y Europa ([Knight et al., 2005](#); [McCarthy et al., 2015](#)).

La Variabilidad Decadal del Pacífico (por ejemplo, la Oscilación Decadal del Pacífico - PDO) también es importante. Los patrones climáticos a gran escala en el Pacífico también contribuyen significativamente a la variabilidad del nivel del mar en escalas multidecadales. La PDO, caracterizada por anomalías de la TSM en el Pacífico Norte, tiene fases dominantes que típicamente duran de 20 a 30 años, pero existe evidencia de una modulación de frecuencia más baja cercana al rango de 50-70 años ([Mantua et al., 1997](#)). Al igual que en el Atlántico, las fases de la PDO influyen en el nivel del mar a través de Efectos Termostéricos y Efectos Dinámicos. Los cambios en la TSM del Pacífico conducen a la expansión o contracción regional de la columna de agua. El PDO afecta el estrés del viento (por ejemplo, a través de la Baja de las Aleutianas), influyendo en la circulación del giro oceánico y en el afloramiento/hundimiento costero, causando así cambios dinámicos en el nivel del mar, particularmente notables a lo largo de la costa oeste de América del Norte ([Mantua et al., 1997](#)).

Estos modos climáticos a gran escala interactúan y su influencia combinada crea patrones complejos de variabilidad del nivel del mar a nivel mundial. Mientras que el impacto es a menudo más fuerte a nivel regional, estas oscilaciones naturales contribuyen con ruido y patrones cíclicos al registro del nivel medio global del mar, haciendo que la detección de la aceleración a largo plazo sea más difícil, particularmente con períodos de datos limitados ([Chambers et al., 2012](#)). La evaluación precisa de las tendencias

The Pacific Decadal Variability (e.g., Pacific Decadal Oscillation - PDO) is also important. Large-scale climate patterns in the Pacific also contribute significantly to multi-decadal sea level variability. The PDO, characterized by SST anomalies in the North Pacific, has dominant phases typically lasting 20-30 yr, but evidence exists for lower-frequency modulation closer to the 50-70 yr range ([Mantua et al., 1997](#)). Similar to the Atlantic, PDO phases influence sea level through Thermosteric Effects and Dynamic Effects. Changes in Pacific SST lead to regional expansion or contraction of the water column. The PDO affects wind stress (e.g., via the Aleutian Low), influencing ocean gyre circulation and coastal upwelling/downwelling, thereby causing dynamic sea level changes, particularly noticeable along the North American west coast ([Mantua et al., 1997](#)).

These large-scale climate modes interact and their combined influence creates complex patterns of sea level variability globally. While the impact is often strongest regionally, these natural oscillations contribute noise and cyclical patterns to the global mean sea level record, making the detection of long-term acceleration more challenging, particularly with limited data spans ([Chambers et al., 2012](#)). Accurately assessing anthropogenic sea level trends requires accounting for or averaging over these natural multi-decadal cycles.

Conclusions

GPS is as a transformative tool for geophysical research. For subsidence velocity computation, GPS data offer unmatched accuracy, spatial coverage, and temporal resolution, making it indispensable for understanding the land contribution to relative sea level rise. By harnessing GPS networks, researchers can better isolate climate-driven sea level changes, improve the calibration of tide gauge records, and enhance the reliability of long-term sea level rise predictions. This integration is particularly critical for coastal planning, infrastructure development, and formulating adaptive strategies to address the combined effects of subsidence and climate change.

This study demonstrates that the velocity and acceleration of relative sea levels measured by tide gauges are significantly influenced by both eustatic effects and subsidence of the tide gauge instruments. The results indicate that subsidence, largely anthropogenic in origin, has been increasing since the late



del nivel del mar antropogénicas requiere tener en cuenta o promediar estos ciclos naturales multidecenales.

Conclusiones

El GPS es una herramienta transformadora para la investigación geofísica. Para el cálculo de la velocidad de subsidencia, los datos GPS ofrecen una precisión, cobertura espacial y resolución temporal inigualables, lo que los hace indispensables para comprender la contribución terrestre al aumento relativo del nivel del mar. Al aprovechar las redes GPS, los investigadores pueden aislar mejor los cambios del nivel del mar impulsados por el clima, mejorar la calibración de los registros de mareógrafos y aumentar la fiabilidad de las predicciones de la subida del nivel del mar a largo plazo. Esta integración es particularmente crítica para la planificación costera, el desarrollo de infraestructura y la formulación de estrategias adaptativas para abordar los efectos combinados de la subsidencia y el cambio climático.

Este estudio demuestra que la velocidad y aceleración de los niveles relativos del mar medidos por los mareógrafos están significativamente influenciados tanto por efectos eustáticos como por el hundimiento de los instrumentos mareográficos. Los resultados indican que la subsidencia, en gran parte de origen antropogénico, ha ido aumentando desde finales del siglo XIX y debe ser considerada en las evaluaciones del aumento del nivel del mar. Al aplicar el modelo a los datos del mareógrafo, el estudio destaca la necesidad de integrar datos de subsidencia, derivados tanto de modelos históricos de GIA como de mediciones recientes de GPS, en los análisis de las tendencias del nivel del mar. En Sídney, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad despreciable, $v_{yz}=+0,02$ mm/año, sometidos a una pequeña aceleración positiva $a_{yz}=+0,0083$ mm/año². De manera similar, en Fremantle, los niveles absolutos del mar han crecido a una velocidad insignificante, $v_{yz}=+1.72-1.56=+0.16$ mm/año, sometido a una pequeña aceleración negativa, $a_{yz}=-0,0103$ mm/año². La lista resumida que considera los niveles del mar relativos y absolutos, teniendo en cuenta la subsidencia variable en 153 ubicaciones de mareógrafos a largo plazo, muestra que la tasa de aumento de los niveles absolutos del mar se encuentra principalmente en el rango de 0 a 2 mm/año. Por el contrario, no se muestra una tendencia clara para las aceleraciones, que sufren de inexactitudes mucho más que las velocidades.

1800s and must be considered in sea level rise assessments. By applying the model to tide gauge data, the study highlights the necessity of integrating subsidence data, derived from both historical GIA models and recent GPS measurements, into analyses of sea level trends. In Sydney, the absolute sea levels have grown at a negligible velocity, $v_{yz}=+0.02$ mm/yr, subjected to a small positive acceleration $a_{yz}=+0.0083$ mm/yr². Similarly, in Fremantle, the absolute sea levels have grown at a negligible velocity, $v_{yz}=+1.72-1.56=+0.16$ mm/yr, subjected to a small negative acceleration, $a_{yz}=-0.0103$ mm/yr². The summary list considering relative and absolute sea levels accounting for variable subsidence in 153 long-term tide gauges location shows the rate of rise of the absolute sea levels is mostly in the range of 0 to 2 mm/yr. Opposite, no clear trend is shown for the accelerations, which suffer from inaccuracies much more than the velocities.

The approach proposed in this work provides a more accurate understanding of sea level dynamics and underscores the critical need to address subsidence in coastal management and climate change mitigation strategies.

El enfoque propuesto en este trabajo proporciona una comprensión más precisa de la dinámica del nivel del mar y subraya la necesidad crítica de abordar la subsidencia en la gestión costera y las estrategias de mitigación del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA/LITERATURE CITED

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D. and Gamal, M. (2007). Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys. *GPS Solutions*, 12(1), pp. 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0061-0>.
- Antonov, J.I., Levitus, S. and Boyer, T.P. (2005). Thermoceric sea level rise, 1955–2003. *Geophysical Research Letters*, 32(12), L12602. <https://doi.org/10.1029/2005GL023112>.
- Baldi, P., Casula, G., Cenni, N., Loddo, F. and Pesci, A. (2009). GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2), pp. 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.023>.
- Bell, J.W., Amelung, F., Ramelli, A.R. and Blewitt, G. (2002). Land subsidence in Las Vegas, Nevada, 1935–2000: New geodetic data show evolution, revised spatial patterns, and reduced rates. *Environmental & Engineering Geoscience*, 8(3), pp. 155–174. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.8.3.155>.
- Blewitt, G. and Hammond, W. (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science. *Eos*, 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- Blewitt, G., Hammond, W.C., Kreemer, C., Plag, H.P., Stein, S. and Okal, E. (2009). GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems. *Journal of Geodesy*, 83(3-4), pp. 335–343. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0260-6>.
- Blewitt, G., Altamimi, Z., Davis, J., Gross, R., Kuo, C.Y., Lemoine, F.G., Moore, A.W., Neilan, R.E., Plag, H.P., Rothacher, M. and Shum, C.K. (2010). Geodetic observations and global reference frame contributions to understanding sea-level rise and variability. In: *Understanding Sea-Level Rise and Variability*. Wilson (eds.), Oxford: Blackwell Publishing Ltd., pp. 256–284. <https://doi.org/10.1002/9781444323283.ch9>.
- Bock, Y., Melgar, D. and Crowell, B.W. (2011). Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), pp. 2904–2925. <https://doi.org/10.1785/0120110007>.
- Bock, Y., Wdowinski, S., Ferretti, A., Novali, F. and Fumagalli, A. (2012). Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(3), Q03023. <https://doi.org/10.1029/2011GC003976>.
- 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?* *Coastal Engineering*, 64, pp. 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.01.006>.
- Boretti, A. (2022a). A revised procedure to analyze the time series of monthly average mean sea levels corrected for non-linear subsidence. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(22), p 1667. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10847-8>.
- Boretti, A. (2022b). A revised procedure to compute future land losses in the delta of the Mekong River. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(17), 1440. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10683-8>.
- Boretti, A. (2024a). Absolute sea levels at tide gauge locations accounting to variable subsidence. In: *Nonlinear Approaches in Engineering Application*. R.N. Jazar and L. Dai (eds.), Cham: Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53712-7_10.
- Boretti, A. (2024b). Accelerating subsidence in the analysis of tide gauge records. In: *Nonlinear Approaches in Engineering Application*. R.N. Jazar and L. Dai (eds.), Nonlinear Approaches in Engineering Application. Cham: Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53712-7_11.
- Boretti, A. (2024c). *Relative sea level and subsidence in Sydney (Version 1)*. Sidney. Mendeley Data. <https://doi.org/10.17632/4gy2dmvk2y.1>.
- Burbey, T.J., Warner, S.M., Blewitt, G., Bell, J.W. and Hill, E. (2006). Three-dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, part 1: Analysis of field data. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), pp. 123–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.028>.
- Chambers, D.P., Merrifield, M.A. and Nerem, R.S. (2012). Is there a 60-year oscillation in global mean sea level? *Geophysical Research Letters*, 39(18), L18607. <https://doi.org/10.1029/2012GL052885>.
- Chang, C., Mallman, E. and Zoback, M. (2014). Time-dependent subsidence associated with drainage-induced compaction in Gulf of Mexico shales bounding a severely depleted gas reservoir. *AAPG Bulletin*, 98(6), pp. 1145–1159. <https://doi.org/10.1306/11111313020>.
- CSIRO (n.d.). Sea level data. Available at: https://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html (Accessed: 27 May 2025).
- Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Conrad, C.P., Frederikse, T. and Riva, R. (2017). Reassessment of 20th century global mean sea level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(23), pp. 5946–5951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616007114>.
- Douglas, B.C. (1995). Global sea level change: Determination and interpretation. *Reviews of Geophysics*, 33(S2), pp. 1425–1432. <https://doi.org/10.1029/95RG00379>.
- Douglas, B.C. (1997). Global sea rise: A redetermination. *Surveys in Geophysics*, 18(2-3), pp. 279–292. <https://doi.org/10.1023/A:1006544227856>.
- Emery, K.O. and Aubrey, D.G. (1989). Tide gauges of India. *Journal of Coastal Research*, 5(3), pp. 489–501. Available at: <https://www.jstor.org/stable/4297556> (Accessed: 27 May 2025).
- Emery, K.O. and Aubrey, D.G. (2012). *Sea Levels, Land Levels, and Tide Gauges*. New York: Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8081-6>.



- Erban, L.E., Gorelick, S.M. and Zebker, H.A. (2014). Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084010>.
- Featherstone, W., Filmer, M., Penna, N., Morgan, L. and Schenk, A. (2012). Anthropogenic land subsidence in the Perth Basin: Challenges for its retrospective geodetic detection. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 95(1), pp. 53–62.
- Garthwaite, M.C. and Fuhrmann, T. (2020). *Subsidence monitoring in the Sydney Basin, New South Wales: Results of the Camden Environmental Monitoring Project*. Geoscience Australia. Available at: https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/144247/144247_00_1.pdf (Accessed: 27 May 2025).
- Hammond, W.C., Burgette, R.J., Johnson, K.M. and Blewitt, G. (2018). Uplift of the western transverse ranges and Ventura area of Southern California: A four-technique geodetic study combining GPS, InSAR, leveling, and tide gauges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), pp. 836–858. <https://doi.org/10.1002/2017JB014499>.
- Harvey, T.C., Hamlington, B.D., Frederikse, T., Nerem, R.S., Piecuch, C.G., Hammond, W.C., Blewitt, G., Thompson, P.R., Bekaert, D.P.S., Landerer, F.W. and Reager, J.T. (2021). Ocean mass, sterodynamic effects, and vertical land motion largely explain US coast relative sea level rise. *Communications Earth & Environment*, 2(1), p. 233. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00310-8>.
- Higgins, S.A. (2016). Advances in delta-subsidence research using satellite methods. *Hydrogeology Journal*, 24(3), pp. 587–600. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1330-7>.
- Holgate, S.J., Matthews, A., Woodworth, P.L., Rickards, L.J., Tamisiea, M.E., Bradshaw, E., Foden, P.R., Gordon, K.M., Jevrejeva, S. and Pugh, J. (2013). New data systems and products at the Permanent Service for Mean Sea Level. *Journal of Coastal Research*, 29(3), pp. 493–504. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1>.
- Karegar, M.A., Dixon, T.H. and Engelhart, S.E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. *Geophysical Research Letters*, 43(7), pp. 3126–3133. <https://doi.org/10.1002/2016GL068015>.
- Khan, S.D., Huang, Z. and Karacay, A. (2014). Study of ground subsidence in northwest Harris county using GPS, LiDAR, and InSAR techniques. *Natural Hazards*, 73(3), pp. 1143–1173. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1125-7>.
- Kolker, A.S., Allison, M.A. and Hameed, S. (2011). An evaluation of subsidence rates and sea-level variability in the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 38(21), L21404. <https://doi.org/10.1029/2011GL049458>.
- Marcos, M. and Amores, A. (2014). Quantifying anthropogenic and natural contributions to thermosteric sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 41(7), pp. 2502–2507. <https://doi.org/10.1002/2014GL059766>.
- Minderhoud, P.S., Erkens, G., Pham, V.H., Bui, V.T., Erban, L., Kooi, H. and Stouthamer, E. (2017). Impacts of 25 years of groundwater extraction on subsidence in the Mekong delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7146>.
- Minderhoud, P.S.J., Coumou, L., Erban, L.E., Middelkoop, H., Stouthamer, E. and Addink, E.A. (2018). The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta. *Science of the Total Environment*, 634, pp. 715–726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.372>.
- Mörner, N.A. (1979). The northwest European “sea-level laboratory” and regional Holocene eustasy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 29, pp. 281–300. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(79\)90086-5](https://doi.org/10.1016/0031-0182(79)90086-5)
- Mörner, N.A. (2004). Estimating future sea level changes from past records. *Global and Planetary Change*, 40(1-2), pp. 49–54. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00097-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00097-3).
- Mörner, N.A. (2010a). Sea level changes in Bangladesh new observational facts. *Energy & Environment*, 21(3), pp. 235–249. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.21.3.235>.
- Mörner, N.A. (2010b). Some problems in the reconstruction of mean sea level and its changes with time. *Quaternary International*, 221(1-2), pp. 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.10.030>.
- Mörner, N.A. (2013). Sea level changes past records and future expectations. *Energy & Environment*, 24(3-4), pp. 509–536. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.24.3-4.509>.
- Mörner, N.A. (2017). Coastal morphology and sea-level changes in Goa, India during the last 500 years. *Journal of Coastal Research*, 33(2), pp. 421–434. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00015.1>.
- Parker, A. (2013a). Sea level trends at locations of the United States with more than 100 years of recording. *Natural Hazards*, 65(1), pp. 1011–1021. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0400-8>.
- Parker, A. (2013b). Oscillations of sea level rise along the Atlantic coast of North America north of Cape Hatteras. *Natural Hazards*, 65(1), pp. 991–997. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0357-7>.
- Parker, A. (2014). Minimum 60 years of recording are needed to compute the sea level rate of rise in the Western South Pacific. *Nonlinear Engineering*, 3(1), pp. 1–10. <https://doi.org/10.1515/nleng-2014-0001>.
- Parker, A. and Ollier, C.D. (2016). Coastal planning should be based on proven sea level data. *Ocean & Coastal Management*, 124, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ocemoaman.2016.02.005>.
- Parker, A. and Ollier, C.D. (2017). California sea level rise: Evidence based forecasts vs. model predictions. *Ocean & Coastal Management*, 149, pp. 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.ocemoaman.2017.10.013>.
- Parker, A., Saleem, M.S. and Lawson, M. (2013). Sea-level trend analysis for coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 73, pp. 63–81. <https://doi.org/10.1016/j.ocemoaman.2012.12.005>.
- Parker, A.L., Filmer, M.S. and Featherstone, W.E. (2017). First results from Sentinel-1A InSAR over Australia: Application to the Perth Basin. *Remote Sensing*, 9(3), p. 299. <https://doi.org/10.3390/rs9030299>.
- Parker, A., Mörner, N.A. and Matlack-Klein, P. (2018). Sea level acceleration caused by earthquake induced subsidence in the Samoa Islands. *Ocean & Coastal Management*, 161, pp. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.ocemoaman.2018.04.017>.
- Peltier, W.R. (1999). Global sea level rise and glacial isostatic adjustment. *Global and Planetary Change*, 20(2-3), pp. 93–123. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00064-2).
- Peltier, W.R. (2004). Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, pp. 111–149. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359>.
- Peltier, W.R. and Andrews, J.T. (1976). Glacial-isostatic adjustment, I. The

- forward problem. *Geophysical Journal International*, 46(3), pp. 605–646. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1976.tb01251.x>.
- Rateb, A. and Abotalib, A.Z. (2020). Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019. *Science of the Total Environment*, 729, 138868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138868>.
- Schlesinger, M.E. and Ramankutty, N. (1994). An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, 367(6465), pp. 723–726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>.
- Tregoning, P. and Watson, C. (2009). Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B9), B09403. <https://doi.org/10.1029/2009JB006344>.
- Wang, G. and Soler, T. (2015). Measuring land subsidence using GPS: Ellipsoid height versus orthometric height. *Journal of Surveying Engineering*, 141(2), 05014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000137).
- Wöppelmann, G. and Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54(1), pp. 64–92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>.
- Wöppelmann, G., Miguez, B.M., Bouin, M.N. and Altamimi, Z. (2007). Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change*, 57(3-4), pp. 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.02.002>.
- Wöppelmann, G., Testut, L. and Créach, R. (2011). La montée du niveau des océans par marégraphie et géodésie spatiale: Contributions françaises à une problématique mondiale. *Annales Hydrographiques*, 6ème Ser., 8(777), pp. 11–14. Available at: https://refmar.shom.fr/sites/default/files/2024-02/Wöppelmann_etal_2011.pdf (Accessed: 27 May 2025).
- Wu, P.C., Wei, M. and D'Hondt, S. (2022). Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR. *Geophysical Research Letters*, 49(7), e2022GL098477. <https://doi.org/10.1029/2022GL098477>.
- Zervas, C., Gill, S. and Sweet, W. (2013). Estimating vertical land motion from long-term tide gauge records. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 065. Available at: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/26077> (Accessed: 27 May 2025).



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

Annex 1 - Values of v_y , v_z , a_y , a_z , a_{yz} for long-term tide gauges.

This is a revised version of Table 1 in Boretti (2024a) obtained improving subsidence estimations and updating tide gauge data, with also removal of lower quality results. / Valores de v_y , v_z , a_y , a_z , a_{yz} para mareógrafos a largo plazo. Esta es una versión revisada de la Tabla 1 en Boretti (2024a) obtenida mejorando las estimaciones de subsidencia y actualizando los datos de los mareógrafos, con la eliminación también de resultados de menor calidad.

Annex 1 - Values of v_y , v_z , a_y , a_z , a_{yz} for long-term tide gauges.

This is a revised version of Table 1 in Boretti (2024a) obtained improving subsidence estimations and updating tide gauge data, with also removal of lower quality results. / Valores de v_y , v_z , a_y , a_z , a_{yz} para mareógrafos a largo plazo. Esta es una versión revisada de la Tabla 1 en Boretti (2024a) obtenida mejorando las estimaciones de subsidencia y actualizando los datos de los mareógrafos, con la eliminación también de resultados de menor calidad.



Station	sealevel.info						Este modelo						
	VM2past			Peltier			Velocidad vertical NGL			Domo GPS NGL			
	t_s	t_e	$(t_e - t_s)$	v_y	a_y	$v_{z,s}$	$v_{z,e}$	$v_{z,s}$	$v_{z,e}$	v_z	a_z	b_{yz}	ayz
			years	mm/yr	mm/yr ²	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr	mm/yr ²	mm/yr
Brest, France	1807.04	2022.46	215.42	1.04	0.0134	-0.31	-0.18	-0.25	-1.02	BRST	-0.63	-0.0029	0.41
Swinoujcie, Poland	1811.04	2021.38	210.34	0.95	0.0119	0.37	0.01	0.19	0.35	SWIN	0.27	0.0013	1.22
Maassluis, Netherlands	1848.04	2022.96	174.92	1.69	0.0051	-0.05	-0.02	-0.04	-1.05	DLFT	-0.54	-0.0031	1.15
Cuxhaven 2, Germany	1843.04	2022.96	179.92	2.13	-0.0020	-0.35	-0.57	-0.46	0.09	TGCU	-0.19	-0.0010	1.95
Wismar 2, Germany	1848.54	2021.79	173.25	1.44	0.0047	0.05	-0.24	-0.10	-0.54	D779	-0.32	-0.0018	1.13
San Francisco, CA, USA	1854.54	2023.96	169.42	1.51	0.0137	-0.68	-0.05	-0.37	-0.93	UCSF	-0.65	-0.0038	0.86
The Battery, NY, USA	1856.04	2023.96	167.92	2.93	0.0108	-1.67	-0.87	-1.27	-2.69	NYBP	-1.98	-0.0118	0.95
Warnemunde 2, Germany	1855.29	2022.79	167.50	1.29	0.0074	0.12	-0.24	-0.06	0.36	WARN	0.15	0.0009	1.44
Vlissingen, Netherlands	1862.04	2022.96	160.92	1.49	0.0298	0.04	0.09	0.07	-0.25	VLS	-0.09	-0.0006	1.40
Aberdeen I, UK	1862.04	2022.96	160.92	0.77	0.0126	0.85	0.77	0.81	0.79	ABER	0.80	0.0050	1.57
Hoek Van Holland, Netherlands	1864.04	2022.96	158.92	2.41	-0.0002	-0.06	-0.04	-0.05	-1.15	HHOL	-0.60	-0.0038	1.81
Delfzijl, Netherlands	1865.04	2022.96	157.92	1.81	0.0166	-0.37	-0.5	-0.44	-4.81	DZYL	-2.62	-0.0166	-0.81
IJmuiden, Netherlands	1871.37	2022.96	151.59	1.66	0.0234	-0.18	-0.19	-0.19	-1.42	IJMU	-0.80	-0.0053	0.85
Oscarsborg, Norway	1872.12	2022.96	150.84	-1.64	-0.0048	4.18	2.99	3.59	4.92	OSLS	4.25	0.0282	2.61
													0.0234

Trieste, Italy	1875.04	2021.96	146.92	1.32	0.0046	0.21	0.34	0.28	-0.57	TRIE	-0.15	-0.0010	1.18	0.0035
Helsinki, Finland	1879.04	2022.96	143.92	-2.15	0.0275	2.31	0.55	1.43	3.82	SG02, SG40, METS	2.63	0.0183	0.48	0.0458
Bergen, Norway	1883.04	2022.96	139.92	0.08	0.0214	1.47	0.68	1.08	2.26	BERH	1.67	0.0119	1.75	0.0333
Väasa / Vasa, Finland	1883.71	2022.96	139.25	-7.14	0.0166	8.86	6.51	7.69	9.16	VAA2, VAAS	8.42	0.0605	1.29	0.0771
Marseille, France	1885.12	2023.21	138.09	1.31	-0.0017	-0.02	0.07	0.03	-0.91	MARS	-0.44	-0.0032	0.87	-0.0049
Sydney, Fort Denison 2, Australia	1886.96	2022.96	136.00	0.80	0.0200	0.12	0.03	0.08	-1.62	FTDN	-0.77	-0.0057	0.03	0.0143
Olands Norra Udde, Sweden	1887.04	2022.96	135.92	-1.01	0.0094	1.51	0.29	0.90	2.30	OBOD	1.60	0.0118	0.59	0.0212
Kungsholmsfort, Sweden	1887.04	2022.96	135.92	0.10	0.7	-0.16	0.27	1.67	KUNO	0.97	0.0071	1.07	0.0224	
Stockholm, Sweden	1889.04	2022.96	133.92	-3.69	4.13	2.39	3.26	5.81	0KTH, 0HDG	4.54	0.0339	0.84	0.0506	
Liverpool Georges and Princes Piers, UK	1858.04	1983.96	125.92	1.14	0.29	0.36	0.33	0.75	LIVE	0.54	0.0043	1.68	0.0245	
Oulu / Uleaborg, Finland	1889.04	2022.96	133.92	-6.26	10.25	8.01	9.13	8.97	OUL2, OULL	9.05	0.0676	2.79	0.0707	
Aarhus, Denmark	1888.71	2017.96	129.25	0.65	0.13	-0.51	-0.19	1.22	SKEL, TA01	0.51	0.0040	1.16	0.0133	
Esbjerg, Denmark	1889.04	2017.96	128.92	1.25	-0.52	-0.97	-0.75	0.07	ESBC	-0.34	-0.0026	0.91	0.0082	
Kopenhagen, Denmark	1889.04	2017.96	128.92	0.58	0.34	-0.31	0.02	0.71	BUDD, BUDP	0.36	0.0028	0.94	0.0192	
Ratan, Sweden	1892.04	2022.96	130.92	-7.65	9.49	7.16	8.33	10.61	RATO	9.47	0.0723	1.82	0.0841	
Fredericia, Denmark	1889.62	2017.96	128.34	1.10	-0.2	-0.72	-0.46	0.42	SMID	-0.02	-0.0001	1.09	0.0053	
North Shields, UK	1895.04	2022.29	127.25	1.89	0.38	0.36	0.37	0.74	NSTG	0.56	0.0044	2.45	0.0022	
Hirtshals, Denmark	1892.04	2017.96	125.92	-0.22	1.43	0.54	0.99	2.04	HIRS	1.51	0.0120	1.29	0.0199	
Gedser, Denmark	1892.04	2017.96	125.92	1.20	0.09	-0.33	-0.12	0.36	GESR	0.12	0.0010	1.32	0.0067	
Saint John, N.B., Canada	1896.46	2021.96	125.50	2.14	-0.74	-0.47	-0.61	-0.72	SIPA	-0.66	-0.0053	1.48	-0.0099	
Fremantle, Australia	1897.04	2022.96	125.92	1.80	0.06	-0.01	0.03	-3.13		-1.55	-0.0123	0.24	-0.0001	
Landsort, Sweden	1887.04	2006.63	119.59	-2.94	3.24	1.63	2.44	5.51	0NYN	3.97	0.0332	1.04	0.0380	
Halifax, Canada	1895.87	2014.54	118.67	3.19	-1.25	-0.7	-0.98	-1.37	HLFX	-1.17	-0.0099	2.01	-0.0113	
Seattle, WA, USA	1899.04	2023.96	124.92	2.08	-1.28	-0.46	-0.87	-1.10	SEAT	-0.99	-0.0079	1.10	0.0014	
Philadelphia, PA, USA	1900.54	2023.96	123.42	3.11	-1.51	-0.66	-1.09	-0.87	PAPH	-0.98	-0.0079	2.13	0.0171	
Dunedin II, New Zealand	1900.04	2016.96	116.92	1.37	0.33	0.26	0.30	-1.24	DUND, DUNT	-0.47	-0.0040	0.90	0.0164	
Baltimore, MD, USA	1902.46	2023.96	121.50	3.26	-1.22	-0.35	-0.79	-1.47	SA15	-1.13	-0.0093	2.13	0.0016	



Genova, Italy	1884.04	2021.96	137.92	1.28	0.13	0.24	0.19	-0.48	GENO	-0.15	-0.0011	1.13	0.0022
Klaipeda, Lithuania	1898.04	2018.96	120.92	1.49	0.57	-0.17	0.20	0.91	KLPD	0.56	0.0046	2.05	0.0480
Cascais, Portugal	1882.04	1993.96	111.92	1.27	0.01	-0.03	-0.01	-0.57	CASC	-0.29	-0.0026	0.98	0.0105
Honolulu, HI, USA	1905.04	2023.96	118.92	1.53	0.29	0.16	0.23	-0.48	HNLC	-0.13	-0.0011	1.41	-0.0014
San Diego, CA, USA	1906.04	2023.96	117.92	2.21	-0.44	-0.1	-0.27	-1.35	P475	-0.81	-0.0069	1.40	0.0031
Galveston Pier 21, TX, USA	1908.37	2023.96	115.59	6.64	-0.61	-0.19	-0.40	-3.84	TXGA	-2.12	-0.0183	4.52	-0.0015
Balboa, Panama	1908.04	2020.96	112.92	1.37	0.18	0.05	0.12	-0.86	IGN1	-0.37	-0.0033	1.00	-0.0136
Prince Rupert, Canada	1909.04	2021.96	112.92	1.09	0.46	0.84	0.65	0.63	BCPT	0.64	0.0057	1.73	0.0118
Victoria, Canada	1909.2	2021.96	112.76	0.75	-1	-0.23	-0.62	0.74	ALBH	0.06	0.0006	0.81	0.0069
Tofino, Canada	1909.79	2021.96	112.17	-1.22	-1.04	-0.27	-0.66	2.29	TFNO	0.82	0.0073	-0.40	0.0262
Vancouver, Canada	1909.87	2021.96	112.09	0.55	-0.11	0.53	0.21	-0.11	BCVC	0.05	0.0004	0.60	0.0251
Atlantic City, NJ, USA	1911.71	2023.96	112.25	4.19	-1.67	-0.72	-1.20	-1.24	NUGT	-1.22	-0.0108	2.97	0.0075
Smogen, Sweden	1911.04	2022.96	111.92	-1.68	2.81	1.72	2.27	4.21	SMOO	3.24	0.0289	1.56	0.0651
Portland, ME, USA	1912.04	2023.96	111.92	1.94	-0.49	-0.13	-0.31	1.14	MEEL	0.42	0.0037	2.36	0.0045
Charlottetown, Canada	1911.29	2021.96	110.67	3.28	-2.25	-1.98	-2.12	-0.99	PETI	-1.55	-0.0140	1.73	-0.0098
Mantyluoto, Finland	1910.62	2022.96	112.34	5.68	6.75	4.53	5.64	5.59	OLKI	5.62	0.0050	-0.06	0.0829
Aberdeen II, UK	1862.04	1965.96	103.92	0.58	0.85	0.77	0.81	0.79	ABER	0.80	0.0077	1.38	0.0346
Key West, FL, USA	1913.04	2023.96	110.92	2.61	-0.36	-0.16	-0.26	-1.87	CHIN	-1.07	-0.0096	1.55	0.0164
Cedar Key, FL, USA	1914.29	2023.96	109.67	2.33	-0.54	-0.08	-0.31	-0.44	FLCK	-0.38	-0.0034	1.96	0.0240
Nedre Söderfjärde, Sweden	1869.04	1970.96	101.92	-3.44	4.03	2.34	3.19	5.09	OSDE	4.14	0.0406	0.70	0.0164
Newlyn, UK	1915.37	2022.96	107.59	1.93	-0.35	-0.2	-0.28	-1.15	NEWL	-0.71	-0.0066	1.22	0.0089
Pietarsaari / Jakobstad, Finland	1914.46	2022.96	108.50	-6.99	9.44	7.08	8.26	9.47	VAASt, PYHA	8.87	0.0817	1.87	0.1220
Furugrund, Sweden	1916.04	2022.96	106.92	-7.80	9.74	7.48	8.61	10.28	SKE8, SKED	9.45	0.0883	1.64	0.1456
Bluff (Southland Harbour), New Zealand	1917.71	2022.79	105.08	1.83	0.26	0.2	0.23	-1.02	BLUF	-0.40	-0.0038	1.43	0.0250
Tuapse, Russia	1917.04	2022.96	105.92	2.29	0.11	0.23	0.17	0.60	TUAP	0.39	0.00	2.67	0.00
Ketchikan, AK, USA	1919.04	2023.96	104.92	-0.36	0.13	0.5	0.32	-0.09	AL56	0.11	0.0011	-0.25	-0.0148
Lewes, DE, USA	1919.12	2023.96	104.84	3.71	-1.47	-0.5	-0.99	-1.57	DELUW, CHL1	-1.28	-0.0122	2.44	0.0225
Stavanger, Norway	1919.04	2022.96	103.92	0.42	1.24	0.49	0.87	1.43	STAS	1.15	0.0110	1.57	0.0325
Auckland II, New Zealand	1903.87	2000.38	96.51	1.29	0.38	0.29	0.34	-1.31	AUKT	-0.49	-0.0051	0.80	-0.0162
Boston, MA, USA	1921.04	2023.96	102.92	2.93	-1.35	-0.75	-1.05	-0.08	MAMI	-0.57	-0.0055	2.37	0.0026

Charleston, SC, USA	1921.79	2023.96	102.17	3.48	-0.82	-0.09	-0.46	-1.56	SCCC	-1.01	-0.0099	2.47	0.0063
West-Terschelling, Netherlands	1921.04	2022.96	101.92	1.33	-0.45	-0.54	-0.50	-0.55	TER _S	-0.52	-0.0051	0.80	0.0299
Kemi, Finland	1920.04	2022.96	102.92	-6.69	10.49	8.28	9.39	9.20	OHAP	9.29	0.0903	2.60	0.1274
Ystad, Sweden	1887.04	1981.96	94.92	0.59	0.41	-0.24	0.09	0.92	OYST	0.50	0.0053	1.09	-0.0223
Varberg, Sweden	1887.04	1981.96	94.92	-0.87	1.3	0.38	0.84	2.10	OVAR	1.47	0.0155	0.60	-0.0111
Pensacola, FL, USA	1923.37	2023.96	100.59	2.69	-0.72	-0.18	-0.45	-1.60	PCLA	-1.03	-0.0102	1.67	0.0261
Port Lyttelton, New Zealand	1923.04	2022.96	99.92	2.81	0.37	0.28	0.33	-2.06	LYTT, MQZG	-0.87	-0.0087	1.94	0.0256
Turku / Abo, Finland	1922.04	2022.96	100.92	-3.44	4.28	2.27	3.28	5.78	TU02, TUOR	4.53	0.0449	1.09	0.0807
Los Angeles, CA, USA	1923.96	2023.96	100.00	1.07	-0.45	-0.07	-0.26	-0.92	CRHS	-0.59	-0.0059	0.48	0.0146
Raahe / Brähestad, Finland	1922.54	2022.96	100.42	-6.61	10.31	8	9.16	9.85	PYHA	9.50	0.0946	2.89	0.1228
La Jolla, CA, USA	1924.87	2023.96	99.09	2.03	-0.43	-0.09	-0.26	-2.56	SPW2	-1.41	-0.0142	0.62	-0.0147
Venezia (Punta Della Salute), Italy	1909.04	2000.96	91.92	2.44	0.21	0.34	0.28	-1.53	VEN1	-0.63	-0.0068	1.81	-0.0105
Astoria, OR, USA	1925.12	2023.96	98.84	-0.14	-1.78	-0.81	-1.30	0.40	TPW2	-0.45	-0.0045	-0.59	0.0072
Washington, DC, USA	1924.96	2023.96	99.00	3.47	-1.12	-0.23	-0.68	-0.81	USN8	-0.74	-0.0075	2.73	0.0138
Lagos, Portugal	1908.79	1999.12	90.33	1.61	-0.04	-0.09	-0.07	-0.24	LAGO	-0.15	-0.0017	1.46	-0.0427
Fogio / Degerby, Aland Islands	1923.96	2022.96	99.00	-3.59	4.59	2.6	3.60	6.04	DGE	4.82	0.0487	1.23	0.0681
Nedre Gavle, Sweden	1896.04	1986.88	90.84	-6.04	6.58	4.65	5.62	8.10	4GAV, IGAT	6.86	0.0755	0.82	0.0932
Tonoura, Japan	1894.04	1984.21	90.17	0.31	0.83	0.75	0.79	-1.46	G209	-0.34	-0.0037	-0.03	-0.0429
Hilo, HI, USA	1927.04	2023.96	96.92	3.12	0.3	0.18	0.24	-1.64	HIL0	-0.70	-0.0072	2.42	-0.0202
Sewells Point, VA, USA	1927.62	2023.96	96.34	4.79	-1.02	-0.05	-0.54	-1.64	SPVA	-1.09	-0.0113	3.70	0.0172
Mayport, FL, USA	1928.37	2023.96	95.59	2.89	-0.63	-0.09	-0.36	0.12	KREG	-0.12	-0.0013	2.77	0.0366
Tregde, Norway	1927.79	2022.96	95.17	0.37	1.06	0.27	0.67	1.51	TGDE	1.09	0.0114	1.45	0.0304
Annapolis, MD, USA	1928.71	2023.96	95.25	3.80	-1.2	-0.3	-0.75	-1.90	ANP6	-1.33	-0.0139	2.48	0.0049
Heimsjo, Norway	1928.04	2022.96	94.92	-1.23	2.24	1	1.62	4.41	TRDS	3.01	0.0318	1.79	0.0613
Quarry Bay, Hong Kong	1929.37	2022.96	93.59	1.59	0.68	0.6	0.64	0.08	HKQT	0.36	0.0038	1.95	0.0355
Newport, RI, USA	1930.79	2023.96	93.17	2.92	-1.83	-1.07	-1.45	-0.92	NPRI	-1.19	-0.0127	1.74	0.0090
Klagshamn, Sweden	1929.96	2022.96	93.00	0.42	0.34	-0.29	0.03	0.90	1MAL	0.46	0.0050	0.88	0.0252
Wajima, Japan	1930.04	2022.96	92.92	0.21	0.8	0.71	0.76	0.05	G111	0.40	0.0043	0.62	0.0779
Hosojima, Japan	1930.04	2022.96	92.92	-0.07	0.77	0.72	0.75	0.05	J094	0.40	0.0043	0.33	0.0362



Kings Pt/Willetts Pt, NY, USA	1931.62	2023.96	92.34	2.63	-1.69	-0.9	-1.30	-1.06	NYQN	-1.18	-0.0128	1.46	0.0030
Björn, Sweden	1892.04	1976.96	84.92	-6.12	6.48	4.48	5.48	8.23	OHNA	6.86	0.0807	0.74	0.0771
Polyarniy, Russia	1906.54	1990.96	84.42	-1.53	0	0	0.00	3.77	MUR3	1.89	0.0223	0.36	0.0383
Sandy Hook, NJ, USA	1932.87	2023.96	91.09	4.20	-1.71	-0.87	-1.29	-2.81	SHK5	-2.05	-0.0225	2.15	-0.0049
Pointe-Au-Père, Canada	1900.04	1933.96	83.92	-0.37	0.55	-1.4	-0.98	2.69	PPER	0.86	0.0102	0.49	0.0930
St Georges Island Esso Pier, Bermuda	1932.87	2023.96	91.09	2.19	-1.07	-0.47	-0.77	-0.86	BRMU	-0.82	-0.0089	1.38	-0.0067
Crescent City, CA, USA	1933.04	2023.96	90.92	-0.79	-0.9	0.01	-0.45	2.43	CACC	0.99	0.0109	0.20	0.0019
Santa Monica, CA, USA	1933.04	2023.96	90.92	1.52	-0.44	-0.04	-0.24	0.10	UCLP	-0.07	-0.0008	1.45	-0.0065
Buenos Aires, Argentina	1905.04	1987.96	82.92	1.57	0.94	0.76	0.85	1.58	IGM1	1.22	0.0147	2.79	0.0604
Southend, UK	1933.04	2015.96	82.92	1.23	0.04	0.12	0.08	-0.23	SHOE	-0.08	-0.0009	1.16	-0.0058
Friday Harbor, WA, USA	1934.04	2023.96	89.92	1.18	-0.8	-0.07	-0.44	0.09	SC02	-0.17	-0.0019	1.01	0.0036
Unalaska, AK, USA	1934.04	2023.96	89.92	-3.96	0.46	0.49	0.48	3.19	AV/19	1.83	0.0204	-2.13	0.0270
Neah Bay, WA, USA	1934.62	2023.96	89.34	-1.73	-1.37	-0.56	-0.97	3.64	NEAH	1.34	0.0150	-0.39	-0.0004
Rauma / Raumo, Finland	1933.04	2022.96	89.92	-4.42	5.97	3.81	4.89	6.59	OLKI	5.74	0.0638	1.32	0.0841
Juneau, AK, USA	1936.04	2023.96	87.92	-13.42	1.38	1.7	1.54	16.69	JNU1	9.12	0.1037	-4.31	0.0527
Cebu, Philippines	1935.37	2022.96	87.59	1.65	0.67	0.64	0.66	-4.74	PCEB	-2.04	-0.0233	-0.39	0.0563
St John's, Nfld., Canada	1935.62	2021.96	86.34	2.20	-1.12	-0.43	-0.78	-0.44	STJO	-0.61	-0.0070	1.59	0.0057
Sassnitz, Germany	1935.87	2022.79	86.92	1.03	0.3	-0.16	0.07	0.65	SASS	0.36	0.0041	1.39	0.0244
Mínimo			82.92	-13.42	-2.25	-1.98	-2.1150	-4.8100		-2.62	-0.0233	-4.31	-0.0429
Máximo			6.64	10.49	8.28	9.3850	16.6900	9.50		0.1037	4.52	0.1456	
Promedio			115.35	0.32	0.91	0.68	0.7980	1.1138		0.96	0.0091	1.27	0.0227