

# Contribución del aumento del nivel medio del Río de la Plata en los cambios observados en las ondas de tormenta positivas

M. Florencia de Azkue<sup>1,2</sup> y Enrique E. D'Onofrio<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Servicio de Hidrografía Naval, Departamento Oceanografía, Av. M. Montes de Oca 2124, CABA, Argentina

<sup>2</sup>Universidad de la Defensa Nacional, Facultad de la Armada, Escuela de Ciencias del Mar, Av. Antártida Argentina 425, CABA, Argentina

<sup>3</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Paseo Colón 850, CABA, Argentina

**Resumen.** A partir de una serie de alturas horarias de 117 años del Río de la Plata se estudian los cambios producidos en las ondas de tormenta positivas (ODTP) entre 1905-2021, y se calcula la tendencia del nivel medio anual del río (NMAR). El análisis de las ODTP se basa en la tendencia anual del número de eventos, la duración media anual de eventos y la máxima altura de ODTP. También se realiza un análisis estacional de dichas variables. El objetivo es identificar el impacto del aumento del NMAR en la evolución de las ODTP. Los resultados muestran aceleración en la tendencia de la cantidad anual de eventos y en la media de su duración anual, siguiendo el comportamiento del NMAR. La duración media de los eventos se incrementa al remover la tendencia del NMAR mientras que la máxima altura de ODTP permanece sin cambios al remover la tendencia del NMAR.

**Palabras clave:** ondas de tormenta, sudestadas, nivel medio del mar, cambio climático

## 1 Introducción

El cambio climático global está causando un aumento del nivel medio del mar, lo que incrementa la frecuencia de inundaciones costeras [1]. Este aumento, junto con cambios a largo plazo en la magnitud, frecuencia y trayectorias de tormentas, puede alterar los parámetros de los niveles extremos del agua y la evolución de los peligros costeros.

El Río de la Plata (RdP) experimenta un aumento de su nivel medio atribuido al calentamiento global, similar a lo observado en otros océanos [e.g., 2, 3]. Este estuario es particularmente vulnerable a las tormentas conocidas como "Sudestadas", que generan inundaciones. Se ha observado un aumento en la frecuencia y duración de estas tormentas, probablemente vinculado al aumento relativo del nivel medio del agua [4].

Este trabajo analiza si el aumento del nivel medio anual del río contribuye a los cambios registrados en los eventos de Sudestada en el estuario del RdP, utilizando datos históricos de Buenos Aires. Se divide el análisis en dos periodos, en función del aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, y, en dos escenarios, escenario (E1) en el que se tiene en cuenta el aumento del NMAR para ambos periodos, y en otro escenario (E2) donde no se lo considera.

## 2 Datos y Metodología

A partir de una serie de alturas horarias correspondientes al mareógrafo de la Estación Palermo, ubicada en el Muelle de Pescadores, se calcula la tendencia del nivel medio anual. Para ello se obtiene la media aritmética de las observaciones anuales. A dicha serie se le aplica un filtro pasa bajos de Savitzky-Golay, y luego, ajustando por mínimos cuadrados, se obtiene la tendencia para el período que va desde 1905 a 1962 y para el período que abarca desde 1965 a 2021. También a partir de las observaciones se calculan cuatro series de residuos —diferencia entre la observación y la predicción de marea astronómica— para obtener los eventos de ODTP. Dos de dichas series pertenecen al primer período mencionado, y en una de ellas se contempla la variación del NMAR, mientras que en la otra no. Las otras dos series abarcan desde 1965 a 2021 y se analizan análogamente. Las predicciones de marea astronómica se calculan utilizando la Ecuación (1), con constantes armónicas obtenidas en períodos de 19 años.

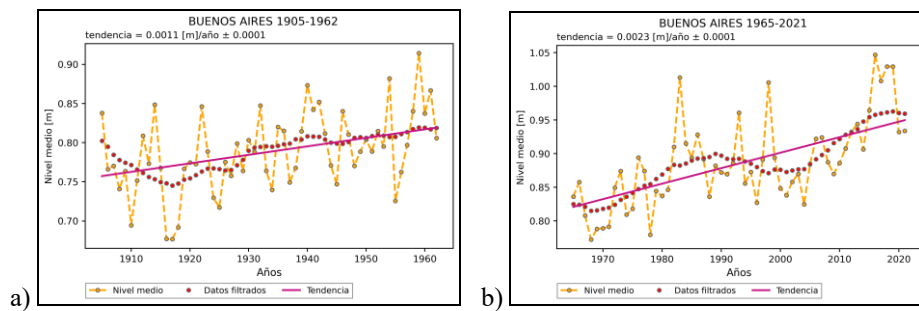
$$h(t) = \sum_{j=1}^n H_j f_j \cos((V+u)_j - g_j) \quad (1)$$

donde el subíndice  $j$  se refiere a cada componente de marea,  $t$  corresponde al tiempo de cada observación,  $h$  es la altura observada,  $H$  es la amplitud de las componentes,  $f$  es el factor nodal,  $(v+u)$  es el argumento de equilibrio y  $g$  corresponde a la época modificada.

Los residuos que constituyen ODTP deben satisfacer tres criterios: i) nunca deben caer por debajo de 0,30 m, ii) el mayor residuo del evento debe ser mayor o igual a 1,60 m., y iii) los eventos deben durar al menos 6 horas. Una vez identificados los eventos en las cuatro series de residuos, se calcula la tendencia de las siguientes variables: altura máxima anual observada, cantidad anual de eventos, máxima altura anual de ODTP, y máxima duración media anual de ODTP. Las tendencias se computan con igual metodología que para el NMAR. También se lleva a cabo un análisis estacional de esas mismas variables.

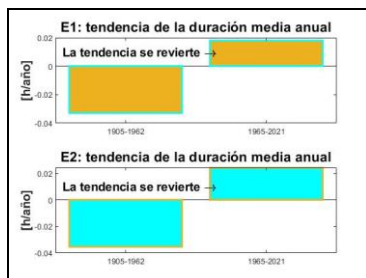
### 3 Resultados

En la Figura 1a se presenta la marcha anual de los niveles medios del río y su tendencia, para el período 1905-1962, y en la Figura 1b para el período 1965-2021. Allí se puede observar cómo la tendencia del nivel medio se duplica al pasar de un período al otro.

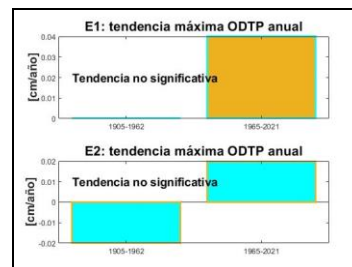


**Figura. 1.** Marcha anual de los niveles medios del río y su tendencia, 1a) para el período 1905-1962, y 1b) para el período 1965-2021.

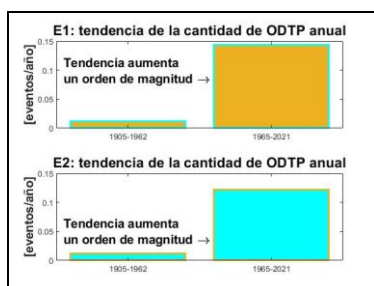
Las Figuras 2, 3, y 4 representan las tendencias de la duración media anual de los eventos, de la máxima altura anual de ODTP y de la cantidad de eventos, respectivamente, para los escenarios E1 y E2. Por su parte, en la Figura 5 se muestra la tendencia de la máxima altura anual observada. De acuerdo a estos comportamientos, se puede inferir que el aumento del NMAR registra una alta contribución en la máxima altura observada, de hecho, el valor de la tendencia en el período 1965-2021 es similar para ambas variables. La tendencia de la cantidad de anual de eventos aumenta en un orden de magnitud al pasar de un período a otro, por lo que no puede explicarse únicamente por el aumento del NMAR ya que este se duplica entre períodos.



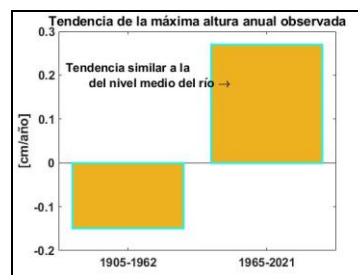
**Figura. 2.** Tendencia de la duración media anual de ODTP para E1(arriba) y E2 (debajo)



**Figura. 3.** Tendencia de la máxima altura anual de ODTP para E1(arriba) y E2 (debajo)



**Figura. 4.** Tendencia de la cantidad anual de eventos de ODTP para E1(arriba) y E2 (debajo)



**Figura. 5.** Tendencia de la máxima altura observada

Finalmente, las tendencias de la duración media de los eventos y de la altura máxima de ODTP no guardan relación con el aumento del NMAR. Al remover la tendencia del nivel del río, la duración de los eventos aumenta, y en el caso de la altura máxima de ODTP no presenta tendencia significativa en los períodos ni en los escenarios.

Del análisis estacional (no se muestran los gráficos) se concluye que el mayor número de eventos ocurre durante los veranos. Además, la duración media anual de los eventos es mayor en los veranos, otoños y primaveras del segundo período, comparado con el primero. El intervalo modal de la duración media anual corresponde al invierno en ambos períodos, si bien es la estación con menor cantidad de eventos. También se encuentra que si bien, al tomar el período completo de 117 años los eventos más largos ocurren en invierno, este comportamiento migra hacia las primaveras en los últimos años.

## 4 Discusiones

El análisis llevado a cabo permite afirmar que los cambios observados en las ODTP no pueden ser explicados únicamente y directamente por el aumento del NMAR, ya que no siguen su patrón de aumento. En el caso del número de eventos, cuyo aumento ocurre principalmente en las últimas primaveras, puede deberse a cambios en la circulación atmosférica [5] y los patrones de viento regional, como así también a cambios en la descarga de los ríos [3]. La falta de tendencia en la máxima altura de ODTP se puede explicar a partir de las interacciones no lineales con la marea astronómica [6].

## Referencias

1. Vitousek, S., Barnard, P.L., Fletcher, C.H., Frazer, N., Eriksom, L., Storlazzi, C.D.: Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Sci Rep.* 7, 1399 (2017), doi:10.1038/s41598-017-01362-7
2. Santamaría-Aguilar, S., Schuerch, M., Vafeidis, A., Carretero, S.C.: Long-Term Trends and Variability of Water Levels and Tides in Buenos Aires and Mar del Plata, Argentina. *Front Mar Sci.* 4 (2017), doi: 10.3389/fmars.2017.00380
3. Piecuch, C.G.: River effects on sea-level rise in the Río de la Plata estuary during the past century. *Ocean Sci.* 19,57-75 (2023), doi:10.5194/os-19-57-2023
4. D'Onofrio, E.E., Fiore, M.E., Pousa, J.L.: Changes in the regime of storm surges in Buenos Aires, Argentina. *J Coast Res.* 24, 1A, 260-265 (2008)
5. Laignel, B., Vignudelli, S., Almar, R., Becker, M., Bentamy, A., Beneviste, J., Birol, F., Frappart, F., Idier, D., Salameh, E., Passaro, M., Menende, M., Simard, M., Turki, E. I., Verpoorter, C.: Observation of the coastal areas, estuaries and deltas from space. *Surv Geophys.* (2023), doi:10.1007/s10712-022-09757-6
6. Wood, M., Haigh, I.D., Quan Quan, L., Hung, N.N., Hoang, T.B., Darby, S.E., Marsh, R., Skliris, N., Hirschi, J.J., Nicholls, R.J., Bloemendaal, N.: Climate-induced storminess forces major increases in future storm surge hazard in the South China Sea region. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 2021, 397 (2022), doi:10.5194/nhess-2021-397.