





Variación del nivel del mar en el Caribe de Costa Rica, Centroamérica

Sea level variation in the Caribbean of Costa Rica, Central America

José Francisco Valverde Calderón¹ y Gustavo Barrantes Castillo^{2*}

 0000-0003-3926-1761

 0000-0003-2130-8883

1. Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia, Universidad Nacional. jose.valverde.calderon@una.cr

2. Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Costa Rica. gbarrantes@una.cr

* Autor de correspondencia / Corresponding author

RESUMEN

Entre las consecuencias del cambio climático en los sistemas costeros está el cambio del nivel del mar, el cual funciona como una línea base sobre la cual opera una variedad de procesos costeros, a diferentes escalas de tiempo y espacio. La presente investigación tiene por objetivo calcular la tasa histórica y actual de ascenso del nivel del mar a partir de datos de la estación mareográfica Limón. Para esto se utilizaron dos métodos: el análisis de regresión lineal simple y una descomposición de series temporales. Como resultado se obtuvo una tasa de cambio del nivel del mar para el período 1952 a 1968 de 2.32 mm/año con el primer método y 3.41 mm/año para el segundo método, que es consecuente con las publicaciones existentes. En el caso del período actual (2009 a 2021) se obtuvo una tasa de 4.18 mm/año para el primer método y 4.28 mm/año con el segundo método. Los resultados obtenidos confirman que existe una tendencia al aumento del nivel del mar en la región estudiada, situación que debe ser considerada al estudiar las transformaciones que están ocurriendo en la costa, como lo son la erosión costera identificada en algunas zonas del Caribe costarricense.

PALABRAS CLAVE: cambio climático, erosión costera, mareógrafo, serie de tiempo, tendencias

ABSTRACT

One of the consequences of climate change is sea level change in coastal systems, which function as a baseline, where a variety of coastal processes operate at different time and space scales. The objective of the present research is to calculate the historic and current rate of sea level rise, from Limon tide gauge station's data. Two methods were utilized for this purpose: Simple linear regression analysis and time series decomposition; with the first method, a rate of 2.32 mm/yr of sea level change was obtained for the time period 1952 to 1968; with the second one, a rate result of 3.41 mm/yr which is consequent with the existing publications. In the current period (2009 – 2021) a rate of 4.18 mm/yr was obtained with the first method and 4.28 mm/yr with the second method. The results gathered confirm the existence of an upward trend in sea level rise in the studied region. This situation should be considered when studying the transformation taking place in the coast, such as the coastal erosion identified in some of the Costa Rican Caribbean zone.

KEYWORDS: climate change, coastal erosion, tide gauge, time series, trend

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es definido como el cambio en los patrones del clima, causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero desde sistemas naturales y por actividades humanas (Faswy *et al.*, 2020). Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son las que conforman la mayor parte de las emisiones antrópicas de los últimos 150 años y estas se producen mediante la combustión de hidrocarburos y carbón (Barros y Camilloni, 2020). Este cambio ha sido estudiado a través de observaciones terrestres, aéreas y espaciales, lo que ha permitido registrar el aumento de la temperatura global y de los océanos, el incremento del nivel del mar y la pérdida de las masas de hielo de los polos y glaciares (Shaftel, 2021). Por su parte, Masselink y Gehrels (2015) consideran que las dos consecuencias más importantes del cambio climático para los sistemas costeros son el cambio de nivel del mar y el incremento en las tormentas que repercuten en la erosión costera y las inundaciones.

Según Dawahidi *et al.* (2019), el nivel medio del mar “se define como el nivel de las aguas tranquilas del mar promediado durante un período determinado de tiempo (meses, años), de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes como las olas queden compensados”. La determinación del nivel medio del mar se realiza mediante el análisis de los datos capturados con un mareógrafo, el cual es un instrumento que permite registrar los movimientos verticales del mar (Pons Valls, 2009) así como mediante el uso de técnicas satelitales como la altimetría satelital (Vignudelli *et al.*, 2021).

El nivel del mar ha cambiado constantemente a través de toda la historia conocida. Durante los últimos 3000 años hubo un nivel del mar estable con una tasa media de ascenso a nivel mundial de 1.1 mm/año (Dawahidi *et al.*, 2019). Llama la atención que en el caso del Caribe se estima que para los últimos 12000 años el nivel del mar nunca estuvo por encima del nivel actual (Khan *et al.*, 2017). De acuerdo con el IPCC (2021), en términos globales el nivel del mar aumentó 0.20 m entre 1901 y 2018, mostrando una aceleración del proceso en los últimos años, cuando la tasa promedio pasó de 1.3 mm/año entre 1901 y 1971, a 1.9 mm/año entre 1971 y 2006, hasta alcanzar los 3.7 mm/año entre 2006 y 2018. Se proyecta que el cambio en el nivel del mar afectará a aproximadamente el 70 % de las costas del mundo (Wong *et al.*, 2014). No obstante, hay que destacar

INTRODUCTION

Climate change is defined as the change in climate patterns, mainly caused by the emission of greenhouse gases from natural systems and due to human activities (Faswy *et al.*, 2020). Carbon dioxide emissions (CO₂) make up the majority of anthropic emissions in the last 150 years, and they are caused by the combustion of hydrocarbons and coal (Barros and Camilloni, 2020). This change has been studied by means of land, aerial, and space observations, which has allowed recording the global and sea temperature increase, the sea level rise, and the loss of ice masses in poles and glaciers (Shaftel, 2021). Masselink and Gehrels (2015) state that the two most significant consequences of climate change on coastal ecosystems are changes in sea level and an increase in storms, both of which impact coastal erosion and flooding.

According to Dawahidi *et al.* (2019), the mean sea level “is defined as the level of the calm sea waters averaged over a specified period of time (months, years), such that the periodical effects of tides and other frequent causes, such as waves, are compensated for”. The mean sea level is determined by analyzing the data captured with a tide gauge, an instrument that allows recording the sea’s vertical movements (Pons Valls, 2009), as well as via techniques such as satellite altimetry (Vignudelli *et al.*, 2021).

The sea level has constantly changed throughout known history. In the last 3000 years, the sea level has been stable, with an average global rise rate of 1.1 mm/year (Dawahidi *et al.*, 2019). It is noteworthy that, in the case of the Caribbean, the sea level has never been estimated to be above the current level in the last 12000 years (Khan *et al.*, 2017). According to the IPCC (2021), the global sea level increased by 0.20 m between 1901 and 2018, a process that has been accelerated in recent years, with the average rate going from 1.3 mm/year (1901-1971) to 1.9 mm/year (1971-2006), reaching 3.7 mm/year between 2006 and 2018. The sea level change is expected to affect approximately 70 % of the world’s coasts (Wong *et al.*, 2014). Nevertheless, it should be highlighted that this increase and its corresponding rate are not uniform in time or space, with higher or lower values for different regions of the planet (Church *et al.*, 2013).

In the case of Costa Rica, several works have warned about an accelerated coastal erosion in the Caribbean (Lizano and Gutiérrez, 2011; Lizano, 2013; Barrantes *et al.*, 2020). For their part, Barrantes and Sandoval (2021)

que este aumento y su respectiva tasa no son uniformes, ni en el tiempo ni en el espacio, resultando mayor o menor en diferentes regiones del planeta (Church *et al.*, 2013).

En el caso costarricense, varias investigaciones han advertido sobre una erosión costera acelerada en el Caribe (Lizano y Gutiérrez, 2011; Lizano, 2013; Barrantes *et al.*, 2020). Por su parte, Barrantes y Sandoval (2021) documentan que para la costa del Caribe sur de Costa Rica, 23.4 % de la línea de costa experimenta un retroceso mayor a 0.5 m/año. Estos autores destacan procesos erosivos importantes entre Cieneguita y la desembocadura del río Banano, con una tasa media de - 1.58 m/año, en Cahuita - 2.15 m/año, en Manzanillo - 2.1 m/año, en Gandoca - 1.2 m/año y en Puerto Vargas erosión intensa, en el orden de - 3 m/año. También advirtieron que no hay estudios que indiquen la tasa de cambio actual del nivel del mar en la costa del Caribe, parámetro que se podría vincular con la severidad de los procesos observados.

Asociado a lo anterior, el crecimiento de la población, la urbanización, la migración, el desarrollo turístico y el desplazamiento de poblaciones está incrementando la cantidad de personas y bienes expuestos en las denominadas Zonas Costeras de Baja Elevación (ZCBE); en otras palabras, se experimenta un aumento del número de personas, infraestructuras y activos ubicados en áreas costeras, lo que implica un incremento de riesgo relacionado con el ascenso del nivel del mar (IPCC, 2019). La presente investigación tiene por objetivo determinar la tasa actual de ascenso del nivel del mar para el Caribe costarricense, con base en los datos disponibles en la estación mareográfica de Limón, debido a la falta de estimaciones actuales y a su relevancia para comprender transformaciones que están ocurriendo en la costa, como la erosión costera y las consecuencias que este proceso puede generar a futuro en esta región.

ÁREA DE ESTUDIO

La estación mareográfica analizada en el presente estudio está ubicada en el litoral Caribe costarricense, el cual se localiza entre las coordenadas 10° 55' 47.53" N, 83° 40' 2.75" O en su extremo norte y 9° 34' 20.38" N y 82° 33' 53.24" O en su extremo sur. Desde el punto de vista técnico, este litoral puede ser dividido en dos secciones: la sección norte que presenta características de un margen continental pasivo y un régimen tectónico extensivo (fallas normales), mientras que la sección sur presenta un régimen

documentado que, for Costa Rica's southern Caribbean coast, 23.4 % of the coastline experiences a retreat greater than 0.5 mm/year. These authors highlighted significant erosive processes between Cieneguita and the Banano river mouth, with an average rate of - 1.58 m/year; in Cahuita, with - 2.15 m/year; in Manzanillo, with - 2.1 m/year; and in Gandoca, with -1.2 m/year. Additionally, they noted intense erosion in Puerto Vargas, on the order of - 3 m/year. They also warned that there are no studies indicating the current sea level change rate in the Caribbean coast, a parameter that could be linked to the severity of the observed processes.

In relation to the above, population growth, urbanization, migration, touristic development, and population displacement are causing an increase in the amount of exposed people and goods in the so-called low-elevation coastal zones (LECs). In other words, there is an increased number of people, infrastructure, and assets located in coastal areas, implying increased risk with regard to the sea level rise (IPCC, 2019). This research aims to determine the current sea level rise rate for the Costa Rican Caribbean, based on the available data from the Limón tide gauge station, given the lack of current estimations and the relevance of this issue in understanding the transformations taking place on the coast, such as coastal erosion and its potential consequences for the future of this region.

STUDY AREA

The tide gauge station analyzed in this study is located in the Caribbean littoral of Costa Rica, which is located between the coordinates 10° 55' 47.53" N, 83° 40' 2.75" W (north end) and 9° 34' 20.38" N and 82° 33' 53.24" W (south end). From a technical point of view, this littoral may be divided into two sections: the northern section, which features the characteristics of a passive continental margin and an extensive tectonic regime (normal faults), while the southern section exhibits a compressive regime with the occurrence of significant earthquakes (Alvarado and Cárdenas, 2016).

The climate of this region is characterized by the lack of a defined dry season, exhibiting two periods during which precipitations decrease, the first from February to March, and the second between September and October (Instituto Meteorológico Nacional, 2017). As for the tides, the Caribbean coast of Costa Rica shows microtidal conditions, with the tides rarely above 30 cm and an average tide of 15 cm (Lizano, 2006). The waves originate from

compresivo con ocurrencia de terremotos importantes (Alvarado y Cárdenas, 2016).

El clima de esta región se caracteriza por no presentar una estación seca definida, mostrando dos períodos en que disminuyen las precipitaciones, el primero de febrero a marzo y el segundo entre setiembre y octubre (Instituto Meteorológico Nacional, 2017). En cuanto a las mareas, la costa Caribe costarricense presenta una condición micromareal donde las mareas raramente superan 30 cm, con una marea promedio de 15 cm (Lizano, 2006). El oleaje proviene del nororiente, con períodos promedio de ola de 7.38 s y un carácter marcadamente local; la mayor energía se produce en los últimos y los primeros meses del año, contrariamente la menor energía se presenta de septiembre a octubre cuando disminuyen los vientos alisios (Lizano, 2009).

La estación mareográfica analizada se encuentra en las siguientes coordenadas aproximadas: 9.98° N, 83.02° O, que corresponden con la ubicación del muelle Alemán, en la ciudad de Limón. En la Figura 1 se muestra la ubicación de la estación, representada mediante un círculo morado.

the Northeast, with average wave periods of 7.38 s and a distinctly local character. The highest energy levels occur in the first and last months of the year. Conversely, the lowest values are observed between September and October, when the trade winds decrease (Lizano, 2009).

The analyzed tide gauge station is located in the following approximate coordinates: 9.98° N, 83.02° W, corresponding to the location of the Alemán pier, in the city of Limón. Figure 1 shows the location of the station, denoted by a purple circle.

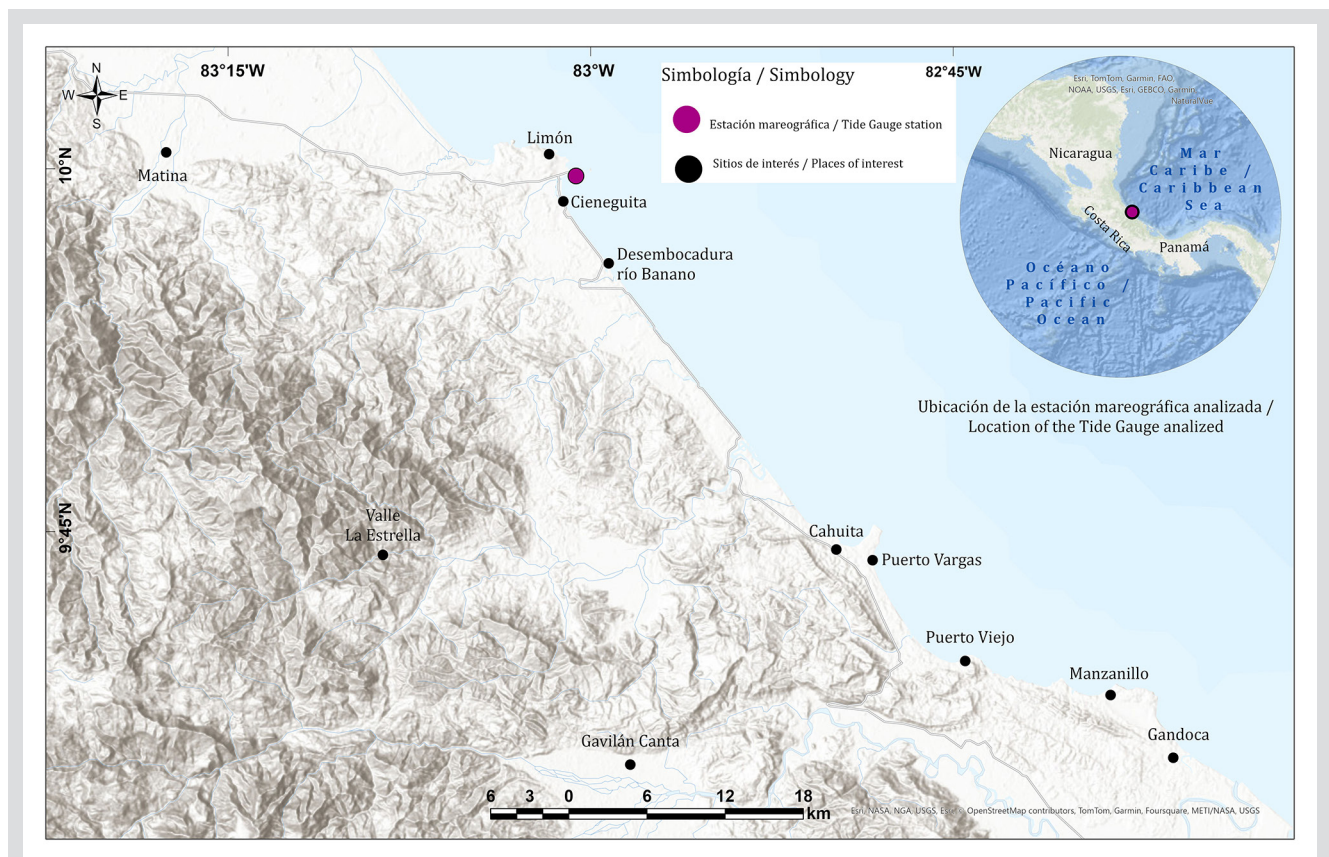


Figura 1. Ubicación aproximada de la estación mareográfica Limón, Costa Rica y otros sitios de interés

Figure 1. Approximate location of the Limón tide gauge station (Costa Rica) and other places of interest

MATERIALES Y MÉTODOS

La primera acción realizada fue localizar los registros (tanto históricos como actuales) de las estaciones mareográficas ubicadas en el Caribe costarricense. Después de esta revisión, se determinó que a lo largo de la historia sólo han existido instalaciones de mareógrafos en el puerto de Limón, cuyos registros no son continuos en el tiempo, sino que están segmentados. Se distinguen tres segmentos de datos: de 1948 a 1968, de 1970 a 1981 y desde 2009 a la actualidad, no coincidiendo las ubicaciones espaciales.

Los datos correspondientes al período 1948 a 1968 fueron descargados del sitio en internet del Servicio Permanente del Nivel del Mar (PSMSL), con una frecuencia mensual. Por su parte, los datos del período 1970 a 1981 fueron descargados del sitio indicado anteriormente, pero no fueron analizados, siguiendo la recomendación de Torres Parra *et al.* (2006), quienes afirman que este conjunto de datos presenta inconsistencias, como la falta de datos para 1975, hay 13 periodos con longitudes de al menos un mes donde no hay datos y se reporta que la incertidumbre de las observaciones es de varios centímetros, descartándose porque la serie es corta e incompleta.

Los datos de la actual estación mareográfica (instalada en 2009) se descargaron del Centro del Nivel del Mar (UHSLC), ubicado en la Universidad de Hawái. Este centro publica los datos con dos calidades: el primero denominado *Research Quality* (RQ), el cual son datos analizados y se consideran la versión final, mismos que pueden ser utilizados con fines de investigación, pero tienen la característica de que se publican con una latencia de entre uno y dos años, dependiendo de proceso que se le deba aplicar a las observaciones; el segundo tipo de datos son los calidad *Fast Delivery* (FD), a los cuales se les ha aplicado un control de calidad más básico, orientado a la identificación de errores en las observaciones. Este tipo de datos se publican con una latencia de entre uno y dos meses. Así, para los fines de la presente investigación, se combinaron datos calidad RQ con FD con la intención de contar con una mayor longitud de la serie temporal, debido a que los datos con calidad RQ llegan hasta el 31 de diciembre de 2018. En la Tabla 1 se muestra información sobre los conjuntos de datos analizados. Como dato adicional, para el período de 1948 a 1968 la estación mareográfica tiene asignado el código 552 del Sistema de Observación del Nivel del Mar Global (GLOSS, por sus siglas en inglés).

MATERIALS AND METHODS

The first step was to locate the records (both historical and current) of the tide gauge stations in the Caribbean of Costa Rica. After this review, it was determined that, throughout history, there have only been tide gauge facilities in the Limón harbor, whose records are not continuous in time but are segmented. Three data segments can be identified: from 1948 to 1968, from 1970 to 1981, and from 2009 to the present date, with spatial locations that do not coincide.

The data corresponding to the 1948-1968 period were downloaded from the website of the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), with a monthly frequency. The data on the 1970-1981 period were also downloaded from the aforementioned site, but they were not analyzed, following the recommendations of Torres Parra *et al.* (2006), who stated that this dataset exhibits some inconsistencies, such as the lack of data for 1975 and the fact that there are 13 periods of at least one month with no data and reporting observation uncertainties of several centimeters. These data were discarded because the series is short and incomplete.

The data corresponding to the current tide gauge station (installed in 2009) were downloaded from the Sea Level Center (UHSLC), located in the University of Hawaii. This center publishes data with two qualities, the first one denoted as research quality (RQ), which corresponds to analyzed data that are regarded as a final version and can be used for research purposes, albeit published with a latency of one to two years depending of the processing applied to the observations; and the second one called fast delivery (FD), whose data have undergone a more basic quality control oriented towards the identification of observation errors. This type of data is published with a latency of one to two months. Thus, for the purposes of this research, RQ and FD data were combined, aiming to obtain a longer time series, given that the RQ data extend only until December 31, 2018. Table 1 shows the information of the analyzed datasets. As an additional detail, for the period from 1948 to 1968, the tide gauge station was assigned code 552 by the Global Sea Level Observing System (GLOSS).

Tabla 1. Descripción de los datos analizados.

Período / Period	1952 - 1968	2009 - 2021
Cantidad de años analizados / Number of years analyzed	16	12
Frecuencia de los registros / Record frequency	mensual / monthly	diaria / daily
Calidad de los datos analizados / Quality of the analyzed data	Revised Local Reference (RLR) / Revised Local Reference (RLR)	Research Quality (RQ) para el período del 16 de octubre de 2009 al 31 de diciembre de 2018; Fast Delivery (FD) para el período del 01 de enero 2019 al 31 de mayo de 2021 / Research quality (RQ) for the period between October 16, 2009, and December 31, 2018; and fast delivery (FD) for the period between January 01, 2019, and May 31, 2021
Fuente de los datos / Data source	PSMSL	UHSLC
Cantidad de registros faltantes / Number of missing records	0	67
Porcentaje de registros faltantes / Percentage of missing records	0.0 %	1.57 %

Table 1. Description of the analyzed data

Previo a determinar las tasas de cambio del nivel del mar, los datos fueron analizados realizando dos procesos, ambos en el programa Matlab®: el primero fue una revisión visual de los datos, mediante la graficación de estos. Esto se efectuó con el fin de identificar inconsistencias en los datos así como para tener una idea base del comportamiento de la serie. El segundo paso fue el completar la serie, en caso de que esta tuviera datos faltantes. El proceso se realizó mediante la función “*fillmissing*”. Como operador para completar los datos, se usó el dato previo al faltante, esto considerando el bajo porcentaje de datos no disponibles y a que estos están ubicados a lo largo de toda la serie. En el caso de los datos del periodo de 2009 a 2021, como se indica en la Tabla 1 la frecuencia de los datos es diaria, por lo que antes de proceder al análisis de estos, se calcularon los promedios para cada mes, mediante el cálculo de un promedio simple, usando la función “*retime*”, disponible en Matlab®.

Realizado el proceso de revisión de los datos, se procedió a calcular la tendencia de la serie de datos, lo que se interpreta como la tasa de cambio del nivel del mar. Para este fin, se utilizaron dos enfoques, ambos implementados en el programa Matlab®: El método “tradicional”, que consiste en estimar los parámetros de una regresión lineal simple al conjunto de datos, donde la pendiente de la ecuación corresponde con la tasa del cambio del nivel del mar (Jury, 2018).

Descomponer la serie de tiempo: este enfoque parte de la premisa de que una serie de tiempo está conformada por tres componentes: tendencia, estacionalidad y ruido. El objetivo es entonces “aislar” cada elemento de la serie y

Prior to determining the sea level change rates, the data were analyzed via two processes, both of them implemented in the MATLAB software. The first was a visual review of the data by means of plotting. This was done in order to identify inconsistencies in the data, as well as to obtain a base idea of the behavior of the series. The second process involved completing the series if it had any missing data. This was done via the *fillmissing* function. As an operator to complete the missing data, the data point prior to the missing one was used, considering the low percentage of unavailable data and the fact that these are spread throughout the entire series. Regarding the data for the 2009-2021 period, as indicated in Table 1, the frequency is daily, which is why, before the analysis, the average of each month was calculated using the *retime* function.

After the data review process, we calculated the data series trend, which is interpreted as the sea level change rate. To this effect, two approaches were implemented, both of them in the MATLAB software: The ‘traditional’ method, which consists of estimating the parameters of a simple linear regression of the dataset, where the slope of the equation corresponds to the sea level change rate (Jury, 2018).

Decomposing the time series, an approach based on the premise that a time series is made up of three components: trend, seasonality, and noise. Thus, the objective is to ‘isolate’ each element of the series and analyze components of interest. There are two general models for decomposing a time series: an additive model and a multiplicative model.

analizar el componente de interés. Hay dos modelos generales para descomponer una serie de tiempo: un modelo aditivo y un modelo multiplicativo. En este caso, se asume que la serie de datos (Y) es la suma de los tres componentes: $Y = T + S + R$, donde Y es la serie, T es la tendencia, S es la estacionalidad y R es el ruido. Para separar los componentes de la serie, se aplicó el método *Singular Spectrum Analysis* (SSA), el cual analiza de forma espectral no paramétrica las series de tiempo, sin partir de ningún modelo a priori (Golyandina *et al.*, 2018).

Como indican Golyandina *et al.* (2018), SSA es un método de análisis multipropósito, lo que lo convierte en una metodología aplicable para resolver problemas en diversas áreas, en particular aquellos asociados a series temporales e imágenes digitales. Una diferencia esencial entre SSA y otros métodos para analizar series de tiempo, donde se presume que hay componentes de tendencia y/o señales periódicas, radica en el hecho de que SSA no requiere ningún modelo de tendencia ni conocimiento previo sobre el número de componentes periódicos y sus frecuencias. Por ende, se consideró para la presente investigación adecuado que sea el propio método el que determine si en los conjuntos de datos hay tendencias y señales periódicas. Finalmente, habiendo aislado el término de tendencia, se estimó la pendiente que representa la tasa del cambio del nivel del mar.

Hay que considerar que el nivel del mar medido por un mareógrafo es relativo a la ubicación del instrumento, el cual puede estar afectado por un movimiento vertical del terreno, tanto de hundimiento como de levantamiento, aproximadamente en el mismo orden de magnitud en el que el nivel del mar sube o baja (Boretti, 2019). El no incluir esta consideración podría llevar a una sobre o subestimación del nivel del mar en el mediano y largo plazo, lo que podría conducir a tomar decisiones inapropiadas para proteger la costa o para orientar el proceso de adaptación (Pabón y Lozano, 2005).

En la presente investigación y en seguimiento a lo indicado anteriormente, se consideró la estación GNSS denominada LIMN, la cual se ubica en las cercanías de la estación mareográfica, con el fin de corregir la tasa de cambio del nivel mar por el movimiento vertical del terreno. Esto solo se hizo para los resultados de la estación mareográfica actual (2009-2021), por cuanto no se cuenta con información sobre el movimiento vertical del terreno para los datos mareográficos históricos (periodo 1952-1968).

La estación LIMN forma parte de la red Sirgas-Con, la cual es una red de estaciones GNSS que están operando y recolectando datos de forma continua, que son procesados

In this case, it was assumed that the data series (Y) is the sum of the three components ($Y = T + S + N$, where Y is the series, T corresponds to the trend, S denotes seasonality, and N represents noise). To separate the components from the series, the singular spectrum analysis (SSA) method was applied, which spectrally and non-parametrically analyzes time series without relying on any *a priori* model (Golyandina *et al.*, 2018).

As indicated by Golyandina *et al.* (2018), SSA is a multi-purpose analysis method, which enables its application in solving problems in a diversity of areas, particularly those associated with time series and digital images. An essential difference between SSA and other methods for analyzing time series, where it is assumed that there are trend and periodical signal components, lies in the fact that SSA does not require any trend model or prior knowledge regarding the number of periodical components and their frequencies. Therefore, for this research, we deemed it appropriate for the method itself to determine whether there were any trends and periodic signals in the datasets. Finally, after isolating the trend term, the slope representing the sea level change rate was estimated.

It should be considered that the sea level measured by a tide gauge is relative to the location of the instrument, which can be affected by vertical land motion, both subsidence and uplift, approximately to the same degree as the sea level rises or falls (Boretti, 2019). Not including this consideration could lead to over- or underestimation of the sea level in the medium and long term, as well as to making inadequate decisions to protect the coast or orient the adaptation process (Pabón and Lozano, 2005).

In this research, and based on the above, the GNSS station called LIMN was considered, which is located in the vicinity of the tide gauge station, with the purpose of correcting the sea level change rate regarding vertical land motion. This was only done for the results of the current tide gauge station (2009-2021), as there are no vertical land motion data for the historical tide gauge information (1952-1968 period).

The LIMN station is part of the Sirgas-Con network, a network of GNSS stations that are in operation and collecting data in a continuous manner. These data are processed by analysis centers that generate, among others, weekly solutions. In this vein, the weekly solutions of the LIMN station for the 2010-2023 period were downloaded, and, via a simple linear regression, the vertical velocity was estimated.

por centros de análisis que generan, entre otra información, soluciones semanales. De esta forma, se descargaron las soluciones semanales de la estación LIMN para el período 2010 a 2023 y mediante una regresión lineal simple, se estimó la velocidad vertical.

RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de analizar los datos para el periodo de 1952 a 1968. Posteriormente, se presentan los resultados de la serie que cubre el período de 2009 a 2021.

Análisis de los datos del período 1952 a 1968

A pesar de que la serie de datos del PSMSL para la estación mareográfica inicia en 1948, la misma está segmentada por datos perdidos, con un primer período entre abril de 1951 y junio de 1952. Por este corte en el registro, se decide realizar el cálculo con los datos a partir de julio de 1952 y hasta diciembre de 1968, lapso para el cual no hay pérdida de datos.

Los resultados obtenidos al aplicar al conjunto de datos una regresión lineal simple dan una tasa de cambio del nivel del mar de 2.31 mm/año para este período, con un valor R^2 ajustado de 0.07, lo que significa que la regresión lineal solo explica en 7 % de la variabilidad de la variable respuesta. En la Figura 2 se observa la línea de tendencia respectiva.

RESULTS

This section shows the results obtained after analyzing the data for the 1952-1968 period. Then, the results for the series covering the 2009-2021 period are presented.

Data analysis for the 1952-1968 period

Despite the fact that the PSMSL data series for the tide gauge station starts in 1948, it is segmented by missing data, with a first period between April 1951 and June 1952. Given this gap in the records, we decided to perform our calculations with the data from July 1952 to December 1968, an interval for which there is no data loss.

The results obtained by applying a simple linear regression to the dataset show a sea level change rate of 2.31 mm/year for this period, with an adjusted R^2 value of 0.07, which means that linear regression only explains 7 % of the variability in the response variable. Figure 2 shows the corresponding trend line.

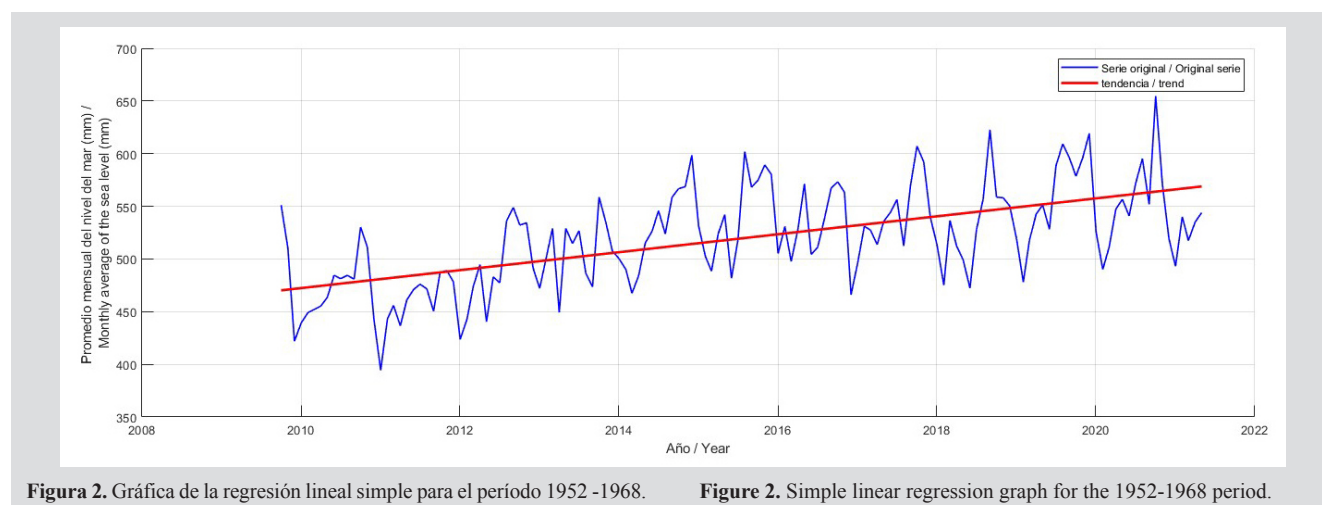


Figura 2. Gráfica de la regresión lineal simple para el período 1952-1968.

Figure 2. Simple linear regression graph for the 1952-1968 period.

Al aplicar el método SSA para descomponer la serie, se obtuvo el componente de tendencia (segundo gráfico en la Figura 3), el componente estacional y ruido (tercer y cuarto gráfico de la Figura 3, respectivamente).

By applying the SSA method to decompose the series, the trend component was obtained (second graph in Figure 3), the seasonal component, and the noise (third and fourth graphs in Figure 3, respectively).

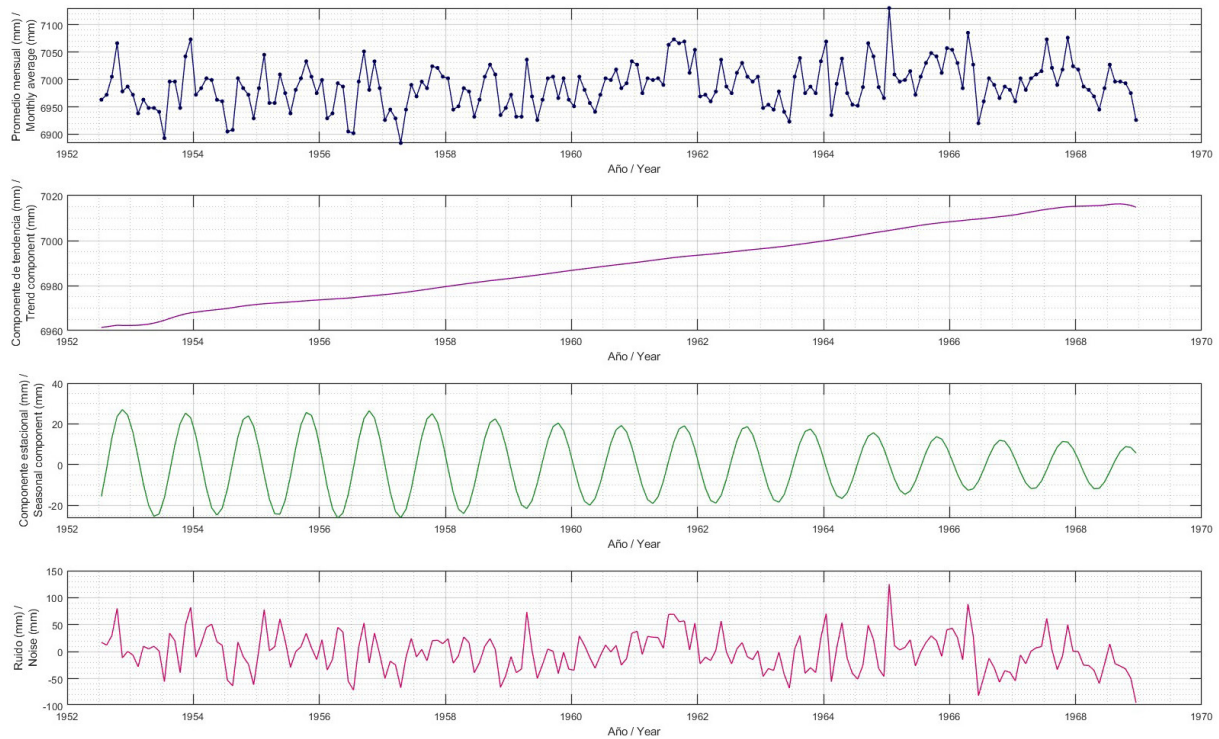


Figura 3. Resultados de la descomposición de la serie de tiempo usando el método SSA, para el período 1952-1968.

Figure 3. Results of the time series decomposition via the SSA method for the 1952-1968 period.

Tras aplicar una regresión lineal simple al componente de tendencia, se obtuvo una tasa del cambio del nivel del mar de 3.41 mm/año, con un valor del parámetro R^2 ajustado de la regresión de 0.99, lo que significa que el modelo permite explicar casi por completo la variable respuesta, en este caso, el componente de tendencia de la serie de datos. En la Figura 4 se muestra la salida gráfica de la regresión lineal.

After applying simple linear regression to the trend component, a sea level change rate of 3.1 mm/year was obtained, with an adjusted R^2 regression parameter value of 0.99. This means that the model allows almost fully explaining the response variable – in this case, the data series trend. Figure 4 shows the graphic output of the linear regression.

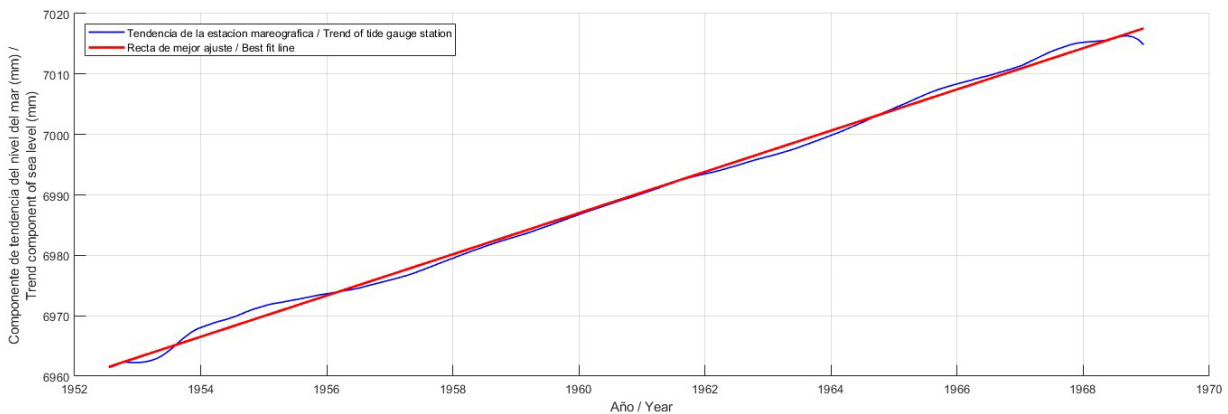


Figura 4. Gráfica de la regresión lineal simple aplicada al componente de tendencia resultante de la descomposición para el período 1952-1968.

Figure 4. Graph of the simple linear regression applied to the trend component resulting from the decomposition for the 1952-1968 period.

Análisis de los datos del período 2009 a 2021

Los datos analizados para este periodo corresponden a la actual estación mareográfica, la cual fue instalada en 2009 y está operativa desde entonces. Los datos fueron analizados aplicando el método de regresión lineal simple, obteniéndose como resultado que la tasa de cambio del nivel en 8.51 mm/año. El valor del parámetro R^2 ajustado de la regresión obtenido fue de 0.36, siendo esto que el modelo explica 36 % de la variabilidad de la variable respuesta. La Figura 5 muestra la serie de datos y la línea de tendencia de la regresión lineal.

Data analysis for the 2009-2021 period

The data analyzed for this period correspond to the current tide gauge station, which was installed in 2009 and has been in operation since. The data were examined via the simple linear regression method, observing a sea level change rate of 8.51 mm/year. The value of the adjusted R^2 regression parameter was 0.36, *i.e.*, the model explains 36 % of the response variable's variability. Figure 5 shows the data series and the trend line for the linear regression.

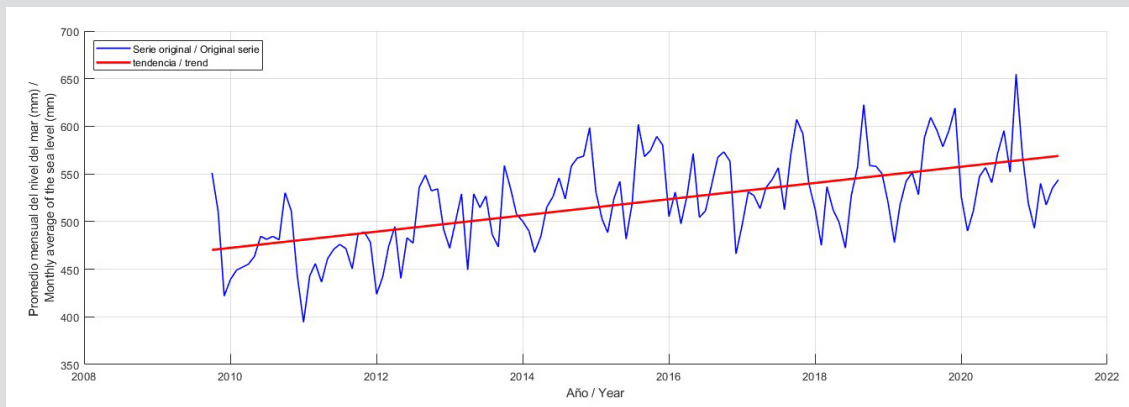


Figura 5. Gráfica de la regresión lineal simple para el período 2009-2021.

Figure 5. Simple linear regression graph for the 2009-2021 period.

Este conjunto de datos también fue analizado aplicando el método SSA para obtener los componentes de la serie. Estos resultados se muestran en la Figura 6, donde el segundo gráfico indica el componente de tendencia.

Tras aplicar una regresión lineal simple al componente de tendencia, se obtuvo una tasa del cambio del nivel del mar de 8.61 mm/año, con un valor del parámetro R^2 ajustado de 0.99, interpretándose este valor de forma que el modelo aplicado permite explicar casi por completo la variable respuesta, la cual es el componente de tendencia de la serie de datos. La Figura 7 muestra el componente de tendencia y la recta de la regresión lineal.

Cuando se analizan datos mareográficos, es necesario considerar lo que se define como el *Vertical Land Motion* (VLM), el cual hace referencia al movimiento vertical de la superficie, referente al sitio donde está instalada la estación mareográfica (Mohamed *et al.*, 2019). Para la presente investigación, se utilizó la estación LIMN, para la cual se obtuvo una velocidad vertical de -4.33 mm/año. Al tomar la velocidad vertical de la estación LIMN como valor de referencia para el VLM y que la tasa de cambio estimada a partir de los datos del mareógrafo mediante el método SSA es de 8.61 mm/año para la estación actual, se tiene

This dataset was also analyzed by using the SSA method to obtain the series components. These results are shown in Figure 6. Here, the second graph depicts the trend component.

After applying a simple linear regression to the trend component, we obtained a sea level change rate of 8.61 mm/year, with an adjusted R^2 parameter value of 0.99, indicating that the model allows almost fully explaining the response variable, *i.e.*, the trend component of the data series. Figure 7 shows the trend component and the linear regression line.

When analyzing tide gauge data, it is necessary to consider vertical land motion (VLM), defined as the vertical movement of the surface and refers to the place where the tide gauge station is installed (Mohamed *et al.*, 2019). For this research, the LIMN station was employed, measuring a vertical velocity of -4.33 mm/year. By taking the vertical velocity of the LIMN station as a reference VLM value and considering that the change rate estimated from the tide gauge data via the SSA method is 8.61 mm/year for the current station, a sea level change rate of 4.28 mm/year is obtained after subtracting the VLM. This procedure was

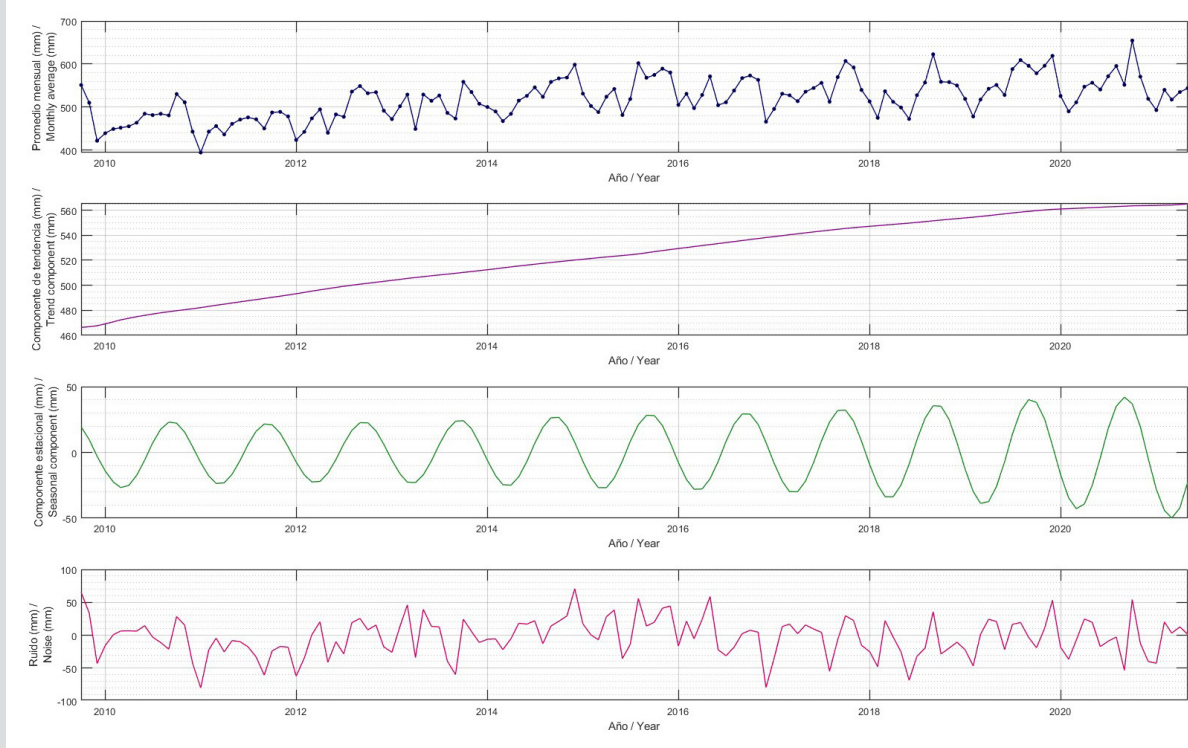


Figura 6. Resultados de la descomposición de la serie de tiempo usando el método SSA, para el período 2009-2021.

Figure 6. Results of the time series decomposition via the SSA method for the 2009-2021 period.

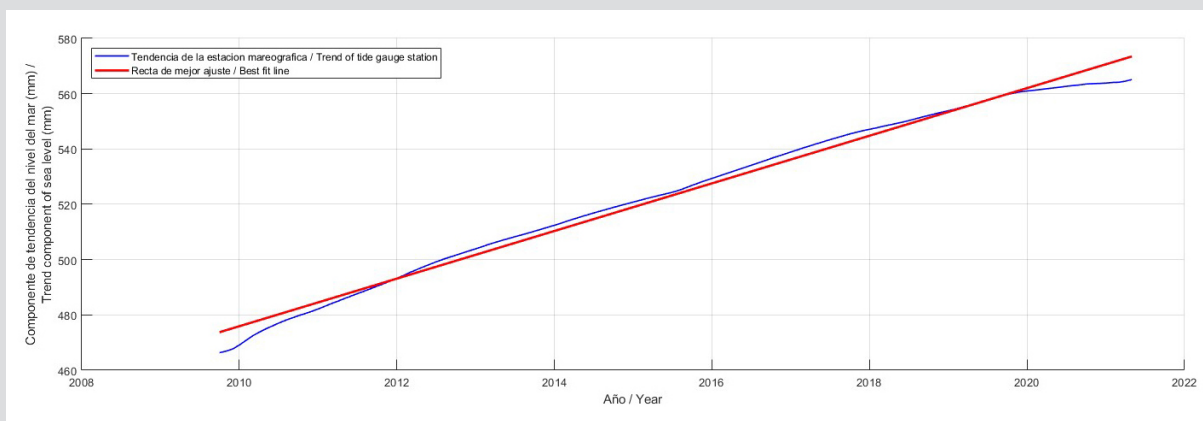


Figura 7. Gráfica de la regresión lineal simple aplicada al componente de tendencia resultante de la descomposición para el período 2009-2021.

Figure 7. Graph of the simple linear regression applied to the trend component resulting from the decomposition for the 2009-2021 period.

entonces que la tasa de cambio del nivel del mar, restando el VLM, es de 4.28 mm/año. Este procedimiento ha sido sugerido por Araújo (2017) en la costa portuguesa y por Boretti (2019) en la del Caribe mexicano, al considerar variaciones que pueden atribuirse a la tectónica local (Araújo, 2014). Se resumen los resultados obtenidos con los datos del mareógrafo de Limón en la Tabla 2, de la cual se observa que hay un incremento en la tasa de ascenso del nivel del mar cuando se compara la tasa histórica con la actual.

suggested by Araújo (2017) for the Portuguese coast and by Boretti (2019) in the Caribbean coast of Mexico, considering variations attributable to local tectonics (Araújo, 2014). Table 2 summarizes the results obtained with the Limón tide gauge data, observing an increase in the sea level rise rate when comparing the historical and current rates.

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos tras analizar los distintos conjuntos de datos disponibles.

Mareógrafo / Tide gauge	Fecha inicial / Initial date	Fecha final / Final date	Meses / Months	Años / Years	Regresión lineal / Linear regression (mm/año - mm/year)	SSA (mm/año - mm/year)
Limón	Julio / July 15, 1952	Diciembre / December 15, 1968	198	16.5	2.32	3.41
Limón	Octubre / October 16, 2009	Mayo / May 31, 2021	145	11.6	8.52	8.61
Limón, considerando el VLM / Limón, considering VLM	Octubre / October 16, 2009	Mayo / May 31, 2021	145	11.6	4.19	4.28

Table 2. Summary of the results obtained after analyzing the different available datasets.

DISCUSIÓN

Con el propósito de comparar los resultados obtenidos se hizo una recopilación bibliográfica de publicaciones en las cuales también se han analizado los datos históricos del mareógrafo de Limón. Se debe aclarar que no se encontraron documentos con resultados para la estación mareográfica actual. El resumen de esta recopilación se muestra en la Tabla 3.

DISCUSSION

With the purpose of comparing the results obtained, we elaborated a bibliographic compilation of publications that have also analyzed historical data of the Limón tide gauge. It should be clarified that no documents with results for the current tide gauge station were found. The summary of this compilation is presented in Table 3.

Tabla 3. Resumen de los resultados históricos publicados.

Título de la publicación / Title of the publication	Autores y año / Authors and year	Período datos / Data period	Total de años / Total years	Tasa publicada / Published rate / (mm/año - mm/year)	Fuente de los datos / Data source	Método de análisis usado / Analysis method used	Significancia del resultado / Results significance
Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide- gauge records	Aubrey <i>et al.</i> (1988)	1948–1969	21.0	-1.60	PSMSL	Regresión lineal simple / Simple linear regression	No se reporta este dato / These data are not reported
Regional sea level change and variability in the Caribbean Sea since 1950	Palanisamy <i>et al.</i> (2012)	1950–1968	19	2.20	PSMSL	No se indica el método de análisis empleado / The employed analysis method is not indicated	0.6 (no se indica las unidades) / (units are not indicated)
Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea	Torres y Tsimplis (2013)	1948–1968	20.3	1.70	Hawái, PSMSL	Modelo basado en estimar por mínimos cuadrados el componente de tendencia y señales periodicas / Model based on the least- squares estimation of the trend and periodical signal component	± 0.8 (mm/año) / (mm/year)
Variabilidad y cambio del nivel del mar en Costa Rica	Ballesteros y Salazar (2012)	1948–1980	32	1.68	PSMSL	Regresión lineal simple / Simple linear regression	No se reporta este dato / These data are not reported

Table 3. Summary of the published historical results.

En la Tabla 3 se observan algunas variaciones de los valores presentados en otros trabajos con respecto de los resultados obtenidos en esta investigación, esto cuando se aplica el método de regresión lineal simple a la serie original. Las publicaciones de Ballestero y Salazar (2012) y Torres y Tsimplis (2013) que analizan un mayor período (1948-1969) registran valores similares y próximos al obtenido en esta publicación (Tabla 2). No obstante, en Aubrey *et al.* (1988) el valor aportado es un poco menor y con signo negativo; en dicha publicación no se logró identificar la causa de esta diferencia ya que el método usado para el análisis de los datos es una regresión lineal simple, por lo que es posible asumir un error de digitación o tipográfico.

En el caso de la serie 1950–1968 el valor presentado por Palanisamy *et al.* (2012) no difiere mucho del obtenido en esta publicación (Tabla 2). En términos generales podría asumirse que con una serie de datos más larga se obtienen valores más bajos cuando se aplica el método de regresión lineal simple, o que al cortarse la serie de datos los resultados se ven afectados.

Para el análisis de los resultados de la actual estación mareográfica, se debe considerar que ella se encuentra en el Caribe sur de Costa Rica, donde existe un sistema compresivo compuesto por fallas inversas y pliegues que hacen parte del Cinturón Deformado del Norte de Panamá, mismo que inicia detrás de la ciudad de Limón y se continúa en Panamá (Denyer y Kusssmaul, 2000). Este sistema cambia de dirección y entra por el centro del país para generar el denominado Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, que marca el límite norte de la microplaca de Panamá. Este marco tectónico provoca levantamientos y deformación en ambas costas como resultado de la acumulación de esfuerzos y su posterior liberación (Norabuena *et al.*, 2004; Protti *et al.*, 2014). Resulta particularmente interesante el caso del terremoto de Limón de 1991 en el cual se documentó un levantamiento costero que osciló entre 30 cm y 1.5 m en la costa (Denyer *et al.*, 1994). De este modo, es necesario considerar la corrección relacionada con el efecto deformante del ciclo sísmico en este emplazamiento, corrección que fue realizada a partir de los datos de la estación GNSS denominada LIMN.

En relación con la interpretación de los resultados obtenidos para la actual estación mareográfica en Limón, hay un incremento en la tasa de ascenso del nivel del mar, esto en comparación con respecto al período de 1952 a 1968, estimándose la actual tasa en 4.28 mm/año luego de corregir por el movimiento vertical del terreno, lo que en general es consecuente con el aumento global de dicha tasa, la cual

Table 3 shows some variations in our results with regard to the values presented in other works when applying the simple linear regression method to the original series. The publications by Ballestero and Salazar (2012) and Torres and Tsimplis (2013), which analyze a longer period (1948-1969), recorded values similar and close to those of this work (Table 2). However, in Aubrey *et al.* (1988), the value provided is slightly lower and with a negative sign; the publication failed to identify the cause of this difference, since the method used for data analysis was a simple linear regression, so it is possible to assume a typographical or data entry error.

In the case of the 1950-1968 series, the values provided by Palanisamy *et al.* (2012) do not differ much from those obtained in this work (Table 2). In general terms, it could be assumed that a longer data series yields lower values when applying the simple linear regression method, or that interruptions in the data series affect the results.

To analyze the results of the current tide gauge station, its location in the southern Caribbean of Costa Rica, where there is a compressive system composed of inverse faults and folds within the North Panama Deformed Belt, which begins behind the city of Limón and continues in Panama (Denyer and Kusssmaul, 2000). This system changes direction and enters through the center of the country, generating the so-called Central Costa Rica Deformed Belt, which marks the northern border of the Panama microplate. This tectonic framework causes uplifts and deformation in both coasts, as a result of the accumulation of stress and its subsequent release (Norabuena *et al.*, 2004; Protti *et al.*, 2014). The case of the 1991 Limón earthquake is particularly interesting, wherein a coastal uplift oscillating between 30 cm and 1.5 m was recorded (Denyer *et al.*, 1994). Thus, it is necessary to consider corrections related to the deformation effect of the seismic cycle at this location. These corrections were made based on the GNSS station called LIMN.

Regarding the interpretation of the results obtained for the current tide gauge station in Limón, there is an increase in the sea level rise rate when compared against the 1952-1968 period, with the current rate estimated at 4.28 mm/year after correcting for VLM. This is generally consistent with the global increase in this rate, which was estimated to be at 3.7 mm/year between 2006 and 2018 according to the IPCC (2021). Considering the length of the current record (11.6 years analyzed in this research), the two provided values (8.61 mm/year and 4.28 mm/year, without and with correction for VLM, respectively) have a

se estima en 3.7 mm/año entre 2006 y 2018, según IPCC, 2021. Considerando la longitud de registro actual (11.6 años analizados en la presente investigación), los dos valores aportados (8.61 mm/año y 4.28 mm/año, sin y con corrección por el movimiento vertical del terreno, respectivamente) poseen una gran incertidumbre que solo se podrá reducir al aumentar la longitud del registro. Por lo tanto, estos datos presentados no deben utilizarse para la planificación futura del desarrollo urbano de la costa, pero sí como una referencia para confirmar que existe una tendencia al aumento del nivel del mar que debe considerarse al estudiar las transformaciones que están ocurriendo en la costa, como lo son la erosión costera acelerada (Barrantes y Sandoval, 2021) y la afectación por oleajes severos (Barrantes *et al.*, 2020).

Lo anteriormente indicado se sustenta con base en NOAA (2023) que indica que si se dispone de al menos 30 años de datos en una estación mareográfica, el error esperado en el cálculo de la tasa de cambio del nivel del mar es de 1.5 mm/año mientras que si se dispone de 60 años de datos el error esperado se reduce a ± 0.5 mm/año. Además, se indica que, si el registro es de al menos 20 años de datos, el error esperado es de ± 3.0 mm/año. Es entonces necesario considerar que la estación mareográfica de Limón, que si bien es cierto operó desde 1948 hasta 1968, tuvo una pérdida de datos de aproximadamente dos años, lo que reduce la longitud de la serie que efectivamente puede analizarse a 16 años. Por otro lado, la estación mareográfica actual en Limón está operando desde 2009; sin embargo, hay una pérdida de datos de aproximadamente año y medio entre 2021 y 2022, lo que provoca que la serie se haya cortado.

En cuanto al impacto del ascenso de nivel del mar en el Caribe costarricense, se debe considerar que la región Huetar Norte, donde se encuentra la costa Caribe, presenta el desempleo abierto más alto del país (11.7%). De sus cantones o municipios costeros, la gran mayoría se encuentran en el quintil más bajo del índice de Desarrollo Humano del país, con excepción de Pococí y Siquirres que se encuentran en el quintil II, esto de acuerdo con datos del Ministerio de Planificación y Política Económica (2023). Aparte de las actividades agroextractivas, como banano y piña, la agricultura de subsistencia, la pesca y con mayor auge actual el turismo, son las principales fuentes de empleo. Destaca también la presencia de importantes áreas costeras protegidas como lo son: el Refugio de Vida Silvestre Barra del Colorado, el Parque Nacional Tortuguero, el Parque Nacional Cahuita y el Refugio Mixto de Vida Silvestre Gandoca-Manzanillo. También se encuentra en esta región la ciudad de Limón, que

high uncertainty that could only be reduced by extending the record length. Therefore, these data should not be used for the coast's future urban development planning but should serve as a reference to confirm that there is a trend of increasing sea level that must be considered when studying the transformations occurring on the coast, such as accelerated coastal erosion (Barrantes and Sandoval, 2021) and the impact of severe wave events (Barrantes *et al.*, 2020).

The above is supported by NOAA (2023), which states that, if at least 30 years of data from a tide gauge station are available, the expected error in calculating the sea level change rate will be ± 1.5 mm/year, whereas, if 60 years of data are available, the expected error will be reduced to ± 0.5 mm/year. Furthermore, it is indicated that, if the record includes at least 20 years of data, the expected error will be ± 3.0 mm/year. It is therefore necessary to consider that, although it did operate from 1948 to 1968, the Limón tide gauge station experienced a data loss of approximately two years, reducing the effective analyzable length of the series to 16 years. On the other hand, the current tide gauge station in Limón has been operating since 2009, but there was a data loss of approximately a year and a half between 2021 and 2022, interrupting the series.

As for the impact of sea level rise on the Costa Rican Caribbean, it should be noted that the Huetar Norte region, where the Caribbean coast is located, has the highest open unemployment rate in the country (11.7%). Most of its coastal cantons or municipalities are in the lowest quintile of the country's Human Development Index, with the exceptions of Pococí and Siquirres (second quintile), according to data from the Ministry of Planning and Economic Policy (2023). Apart from agro-extractive activities (*e.g.*, banana and pineapple), subsistence agriculture, fishing, and – currently booming – tourism are the main sources of employment. The presence of important protected coastal areas is also notable, such as the Barra del Colorado Wildlife Refuge, Tortuguero National Park, Cahuita National Park, and the Gandoca-Manzanillo Mixed Wildlife Refuge. The city of Limón is also located here, which boasts the highest economic development in the region and is home to important commercial and tourist ports.



posee el mayor desarrollo económica de la región y es donde se ubican importantes puertos comerciales y de turismo.

Los autores consideran que el efecto más evidente de la tasa de ascenso del nivel del mar relativo, calculada en + 8.61 mm/año, es en el retroceso de la línea de costa en el Caribe Sur, con tasas entre intensas y severas encontradas en sectores como Cieneguita, Cahuita, Manzanillo y Gandoca (Barrantes y Sandoval, 2021), mientras que la extensión e intensidad de la erosión en el Caribe Norte resulta menor (Barrantes y Ortega, 2023), lo que puede estar asociado a su localización en un margen continental pasivo y por ende podría estar exenta de la subsidencia tectónica, correspondiéndole a esta región (Caribe Norte) una tasa de ascenso de nivel del mar de 4.28 mm/año. La pérdida y disminución de las playas como sucede en Cahuita, Manzanillo y Gandoca (Sandoval y Barrantes, 2021) representa una pérdida de un valioso recurso turístico que puede estar afectando el turismo de sol y playa. Así mismo, en lugares como Cieneguita y Puerto Vargas deja expuesta la infraestructura pública y los establecimientos comerciales y turísticos ante la inundación y sedimentación marina.

El aumento en el nivel del mar ha implicado un aumento en el alcance de los oleajes severos sobre la costa como el ocurrido en 2020 que penetró hasta la zona de restaurantes en Playa Bonita y requirió de la colocación de sacos de arena para proteger la recepción de entrada en playa Cahuita. En el caso de la Ciudad de Limón, sus muros están siendo superados por los oleajes que ahora penetran en la ciudad.

A futuro es preocupante la falta de planificación en la ocupación de la zona costera, ya que se aumenta la exposición acompañada con frecuencia por una alta vulnerabilidad de sus habitantes. Con el cambio climático es de esperar oleajes altos más frecuentes que pueden destruir la infraestructura próxima a la línea de costa como carreteras, sistemas de transmisión de electricidad y agua potable, así como un aumento en la degradación de los ecosistemas costeros que representan una primera línea de defensa, como lo son los arrecifes de coral, la vegetación costera y los manglares, que ya se están siendo afectados.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se muestran los resultados obtenidos tras analizar los datos históricos del mareógrafo de Limón, para el período de 1952 a 1968. Si bien es cierto este dato no tiene vigencia en la actualidad, es relevante por

The authors believe that the most evident effect of the relative sea level rise rate, calculated as + 8.61 mm/year, is the coastline retreat in the southern Caribbean, with intense to severe rates found in Cieneguita, Cahuita, Manzanillo, and Gandoca (Barrantes and Sandoval, 2021), while the extent and the intensity of the erosion in the northern Caribbean is lower (Barrantes and Ortega, 2023), which may be associated with its location on a passive continental margin, likely exempting it from tectonic subsidence. This region (northern Caribbean) reports a sea level rise rate of 4.28 mm/year. The loss and reduction of beaches, as is the case of Cahuita, Manzanillo, and Gandoca (Sandoval and Barrantes, 2021), represents the loss of a valuable resource, which may be affecting sun and beach tourism. Likewise, in places such as Cieneguita and Puerto Vargas, this phenomenon leaves public infrastructure, as well as commercial and touristic establishments, exposed to flooding and marine sedimentation.

The sea level rise has brought forth an increase in the reach of severe wave events along the coast, such as the one in 2020, which penetrated up to the restaurant area in Playa Bonita and required the placement of sandbags to protect the entrance reception at Cahuita beach. Moreover, the walls of the city of Limón are being overrun by waves that now penetrate into the city.

Regarding the future, the lack of occupation planning in the coastal area is worrying, as exposure often comes with a high vulnerability for residents. In the face of climate change, high waves are more frequently expected, which may destroy the public infrastructure near the coastline, such as roads and electrical and drinking water transmission systems, in addition to increased degradation in the coastal ecosystems that constitute the first line of defense, *i.e.*, coral reefs, coastal vegetation, and mangroves, which have already been affected.

CONCLUSIONS

This article shows the results obtained after analyzing historical data from the Limón tide gauge station for the 1952-1968 period. Even though these data are not currently valid, they remain relevant as they provide a baseline that allows for comparisons with current values. Regarding the modern tide gauge station, data for the 2009-2021 period were analyzed, obtaining a sea level change rate of 4.28 mm/year after correcting the tide gauge for vertical land motion.

cuando provee una línea base que permite una comparación con el valor actual. Relacionado con la estación mareográfica moderna, se analizaron los datos para el período de 2009 a 2021, obteniéndose como resultado una tasa de cambio del nivel del mar de 4.28 mm/año, esto corrigiendo el valor obtenido en el mareógrafo por el movimiento vertical del terreno.

Se concluye que para la costa Caribe de Costa Rica se ha presentado un incremento de la tasa de cambio del nivel, la cual se ha casi que duplicado, esto tras comparar los resultados de los dos periodos analizados, los cuales están distanciados aproximadamente 50 años. Este incremento, como ha evidenciado otras investigaciones, se puede asociar para explicar los procesos erosivos observados en algunas playas del caribe costarricense. Por ello, es relevante seguir acumulando datos en la estación mareográfica a fin de incrementar la longitud de la serie temporal y mejorar la calidad de los valores estimados.

En cuanto a los métodos aplicados, se considera que el de descomposición de las series temporales es una alternativa para el estudio de series mareográficas, ya que el separar el término de tendencia del término estacional, permite el análisis del primero, sin la influencia del segundo, situación que no ocurre cuando se usa una regresión lineal al conjunto original de datos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Permanente de Nivel del Mar (PSMSL), al Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis (Sinamot) de la Universidad Nacional (UNA) y al Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawái (UHSLC), cuyos datos fueron el punto de partida para realizar la presente investigación.

It is concluded that, in the Caribbean coast of Costa Rica, there has been an increase in the sea level change rate, which has almost doubled. This was found by comparing the results of the two analyzed periods, which are approximately 50 years apart. This increase, as evidenced by other studies, may be associated with the erosive processes observed in some beaches of the Costa Rican Caribbean. Therefore, it is relevant to continue accumulating data in the tide gauge station, in order to increase the length of the time series and improve the quality of the estimated values.

As for the models applied, we believe that the time series decomposition method is an alternative for the study of tide gauge series, as separating the trend term from the seasonal one enables an analysis of the former, without the influence of the latter, which does not occur when applying linear regression to the original dataset.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Permanent Sea Level Service (PSMSL), the National Tsunami Monitoring System (Sinamot) of Universidad Nacional (UNA), and the Sea Level Center of the University of Hawaii, whose data were the starting point for carrying out this research.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Alvarado, G. and G. Cárdenas. 2016. Geology, tectonics, and geomorphology of Costa Rica: A natural history approach. In Kappelle, K. (Ed.) *Costa Rican ecosystems*, Univ. Chicago. 704 p.
- Araújo, A. 2017. As variações do nível do mar em Cascais: um processo em aceleração? XI Congr. Geogr. Port.
- Araújo, M. D. A. 2014. Climate, tectonics and beach erosion: the case of Espinho (NW Portuguese Coast). *Quat. Stud.*, 5 (2008): 39-50.
- Aubrey, D. G., K. O. Emery and E. Uchupi. 1988. Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide-gauge records. *Tectonophysics*, 154(3-4): 269-284.
- Ballesteros, D. y P. Salazar. 2012. Variabilidad y cambio del nivel del mar en Costa Rica. *Inf. Técn., Lab. Oceanogr. Man. Cost., Univ. Nal. Costa Rica.*
- Barrantes, G. and K. Ortega. 2023. Coastal erosion and accretion on the Caribbean coastline of Costa Rica long-term observations. *J South Am Earth Sci*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104371>



- Barrantes-Castillo, G. y L. F. Sandoval-Murillo. 2021. Cambios en la línea de costa en el Caribe Sur de Costa Rica durante el periodo 2005-2016. *Rev Cienc Ambient.*, 55(2): 105-134.
- Barrantes, G., J. Valverde, D. Paniagua y N. Morales. 2020. Gira de reconocimiento del efecto del oleaje severo ocurrido entre el 13 y 20 de enero de 2020 en el Caribe Sur, Costa Rica. 21 p. *Inf. Progr. Geomorf. Amb., Univ. Nal.*
- Barrantes-Castillo, G., I. Arozarena-Llopis, L.F. Sandoval-Murillo y J. F. Valverde-Calderón. 2020. Playas críticas por erosión costera en el Caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005-2016. *RGE*, 1(64): 95-122. <https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.4>
- Barros, V. y I. Camilloni. 2020. La Argentina y el cambio climático: de la física a la política. Eudeba. <https://cutt.ly/ZEMyTql>
- Boretti, A. 2019. A realistic expectation of sea level rise in the Mexican Caribbean. *JOES*, 4(4): 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.06.003>
- Church, J. A., D. Monselesan, J. M. Gregory and B. Marzeion. 2013. Evaluating the ability of process-based models to project sea-level change. *Environ. Res. Lett.*, 8(1): 014051.
- Dawahidi, T., D. Ibarra y F. Gomáriz. 2019. Estimación de la subida del nivel del mar por efecto del cambio climático mediante datos de mareógrafos y la serie de satélite NASA Topex-Poseidon/Jason. El caso de Valencia. *An. Geogr. Univ. Complutense*, 39(1): 39-58. doi: <http://dx.doi.org/10.5209/AGUC.64676>
- Denyer, P. y S. Kussmaul (Eds). 2000. *Geología de Costa Rica*. Edit. Tecnol. Costa Rica. 520 p.
- Denyer, P., O. Arias y S. Personius. 1994. Efecto tectónico del terremoto de Limón. *RGE*, 39-52. <https://doi.org/10.15517/RGAC.V0I0.13394>
- Fawzy, S., A. I. Osman, J. Doran and D. W. Rooney. 2020. Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environ. Chem. Lett.*, 18: 2069-2094.
- Golyandina, N., A. Korobeynikov and A. Zhigljavsky. 2018. *Singular spectrum analysis with R*. Springer. 284 p.
- IMN. 2017. *Clima de Costa Rica: el clima y las regiones climáticas de Costa Rica*. Inst. Meteorol. Nal. <https://www.imn.ac.cr>
- IPCC. 2019. *Sea level rise and implications for low-lying islands, Coasts and Communities — Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>
- IPCC. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis. Policymakers*, 6. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- Jury, M. R. 2018. Puerto Rico sea level trend in regional context. *Oc. Coast. Manag.*, 163: 478-484.
- Khan, N. S., E. Ashe, B. P. Horton, A. Dutton, R. E. Kopp, G. Brocard, S. E. Engelhart, D. F. Hill, W. R. Peltier, C. H. Vane and F. N. Scatena. 2017. Drivers of Holocene sea-level change in the Caribbean. *Quat. Sci. Rev.*, 155: 13-36. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.08.032>
- Lizano, G. 2006. Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *RECyT*, 24: 51-64.
- Lizano, O. 2009. Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica, parte 1. *RECyT*, 25: 43-56.
- Lizano, O. 2013. Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la isla del Coco. *InterSedes*, 14(27): 6-27.
- Lizano, O. y A. Gutiérrez. 2011. Erosión en las costas de Costa Rica, un problema de todos. *Ent. Prev.*, 7: 14-16.
- Masselink, G. and R. Gehrels. 2015. Introduction to coastal environments and global change. *Coast. Environ. Glob. Change*, 1-27.
- Mideplan. 2023. *Índice de Desarrollo Social 2023. Informe final*, MIDEPLAN, San Jose. 218 p.
- Mohamed, B., A. Mohamed, K. A. El-Din, H. Nagy and A. Elsherbiny. 2019. Sea level changes and vertical land motion from altimetry and tide gauges in the Southern Levantine Basin. *J. Geodyn.*, 128: 1-10.
- NOAA. What is sea level?. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/faq.html#q4>
- Norabuena, E., T. H. Dixon, S. Schwartz, H. DeShon, A. Newman, M. Protti, V. González, L. Dorman, E. R. Flueh and P. Lundgren. 2004. Geodetic and seismic constraints on some seismogenic zone processes in Costa Rica. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 109(B11).
- Pabón, J. D. y J. A. Lozano. 2005. Aspectos relacionados con las estimaciones globales y regionales del ascenso del nivel del mar, y su aplicación a Colombia. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, 14: 97-106.
- Palanisamy, H., M. Becker, B. Meyssignac, O. Henry and A. Cazenave. 2012. Regional sea level change and variability in the Caribbean Sea since 1950. *J. Geod. Sci.*, 2(2): 125-133.
- Pons Valls, J.M. 2009. La medición del nivel medio del mar: principios y métodos. *Mapping*, 135: 6-10.
- Protti, M., V. González, A. V. Newman, T. H. Dixon, S. Y. Schwartz, J. S. Marshall, L. Feng, J. I. Walter, R. Malservisi and S. E. Owen, 2014. Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nat. Geosci.*, 7(2): 117-121. <https://doi.org/10.1038/ngeo2038>

- Sandoval, L. y G. Barrantes. 2021. Cambios en la cobertura de la tierra en los puntos calientes de erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005 – 2017. *Uniciencia*, 35(2). <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.6>
- Shaftel, H. 2021. Overview: Weather, global warming and climate change. *Climate change: Vital signs of the planet*. <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming-vs-climate-change/>
- Torres, R. R. and M. N. Tsimplis. 2013. Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *J Geophys. Res. Oceans.*, 118(6): 2934-2947.
- Torres-Parra, R. R., J. C. Gómez-López y F. Afanador-Franco. 2006. Variación del nivel medio del mar en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 24: 64-72
- Vignudelli, S., F. Birol, J. Benveniste, L. L. Fu, N. Picot, M. Raynal and H. Roinard. 2019. Satellite altimetry measurements of sea level in the coastal zone. *Surveys in Geophysics*, 40, 1319-1349.
- Wong, P. P., I. J. Losada, J. P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. L. McInnes and A. Sallenger. 2014. Coastal systems and low-lying areas. *Clim. Change*, 2104: 361-409.

RECIBIDO / RECEIVED: 29/01/2024

ACEPTADO / ACCEPTED: 24/04/2024