

DOI: 10.25100/eg.v0i25.11903
Espacios y Territorios

***Escenarios de inundación ante el aumento del nivel del mar por
Cambio Climático, para las Playas del Coco, Tamarindo y Sámara,
Costa Rica***

***Inundation scenarios of sea level rise due to climate change for
Coco, Tamarindo and Samara Beaches, Costa Rica***

***Cenários de inundação diante do aumento do nível do mar por
Mudanças Climáticas, para as praias do Coco, Tamarindo e
Sámara, Costa Rica***

Melvin A. Lizano Araya

M.Sc. Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. Montes de Oca, Costa Rica.
melvin.lizanoaraya@ucr.ac.cr | 0000-0003-3437-3502

Omar G. Lizano Rodríguez

Dr. Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica. Montes de Oca, Costa Rica. omarglizano@gmail.com | 0000-0001-9407-0322

Para citar este artículo: Lizano Araya, M y Lizano Rodríguez, O. (2023). Escenarios de inundación ante el aumento del nivel del mar por Cambio Climático, para las Playas del Coco, Tamarindo y Sámara, Costa Rica. *Entorno Geográfico*, (25), e21411903. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i25.11903>

Resumen

Se analiza el aumento del nivel del mar tomando como base el nivel promedio de mareas altas para la región del Pacífico Norte de Costa Rica. Este estudio se realizó a partir de modelos, observaciones y mediciones efectuadas en campo, que presentan un nivel del mar y su respectivo ascenso para cuatro escenarios de acuerdo con los siguientes años: 2030, 2050, 2070 y 2100. Se elaboran escenarios reales para simular el comportamiento del nivel del mar en los próximos 100 años para las zonas de Playas del Coco, Tamarindo y Sámara. Se estudian los niveles de mareas astronómicas a partir de predicciones mareales. El aumento del nivel del mar en los próximos años por calentamiento global es según los escenarios de Nerem *et al.*, (2018) de alrededor 3 mm por año para la Costa Pacífica en general y se utiliza como base para crear las distintas combinaciones y generar los niveles mareográficos representados en este artículo. Los resultados muestran los niveles de inundación para cada uno de los años para las zonas del estudio, e indica las comunidades



que podrían ser inundadas para el año 2100, pero sucediendo de forma creciente en el resto de los años. Este estudio pretende alertar a las instituciones gubernamentales sobre estos escenarios para que tomen las decisiones correspondientes ante el inminente cambio del nivel del mar. Se proponen combinaciones de nivel del mar, de tal forma que otros componentes no incluidos en este estudio, como tsunamis, puedan ser simulados también, y ayude en la toma de decisiones ante estos posibles eventos.

Palabras Clave: nivel de mareas, escenarios, cambio climático, modelos, topografía y batimetría

Abstract

Sea level rise is analyzed based on the average high tide level for the North Pacific region of Costa Rica. This study was carried out based on models, observations and measurements made in the field, which present a sea level and its respective rise for four scenarios according to the following years: 2030, 2050, 2070 and 2100. Real scenarios are elaborated to simulate the behavior of the sea level in the next 100 years for the areas of Playas del Coco, Tamarindo and Samara. Astronomical tide levels are studied from tidal predictions. The sea level rise in the next few years due to global warming is according to the scenarios of Nerem *et al.*, (2018) around 3 mm per year for the Pacific Coast in general and is used as a basis to create the different combinations and generate the tidal levels represented in this article. The results show the levels of flooding for each of the years for the study areas and indicate the communities that could be flooded by the year 2100 but happening increasingly in the rest of the years. This study aims to alert government institutions to these scenarios so that they can make appropriate decisions in the face of impending sea level change. Sea level combinations are proposed, so that other components not included in this study, such as tsunamis, can be simulated as well, and help in decision-making in the face of these possible events.

Keywords: tidal level, scenarios, climate change, models, topography and bathymetry

Resumo

Analisa-se o aumento do nível do mar tomando como base o nível médio das marés altas para a região do Pacífico Norte da Costa Rica. Este estudo foi realizado a partir de modelos,

observações e medições de campo, que apresentam o nível do mar e sua respectiva elevação para quatro cenários correspondentes aos anos de 2030, 2050, 2070 e 2100. Foram elaborados cenários reais para simular o comportamento do nível do mar nos próximos 100 anos para as zonas de Playas del Coco, Tamarindo e Sámara. Os níveis de marés astronômicas foram estudados a partir de previsões de marés. O aumento do nível do mar nos próximos anos devido ao aquecimento global segue os cenários de Nerem et al. (2018), que indicam uma elevação de cerca de 3 mm por ano para a costa pacífica em geral, e essa estimativa foi utilizada como base para criar diferentes combinações e gerar os níveis mareográficos representados neste artigo. Os resultados mostram os níveis de inundação para cada um dos anos nas áreas estudadas e indicam as comunidades que poderão ser inundadas até o ano de 2100, com impactos crescentes ao longo do tempo. Este estudo tem como objetivo alertar as instituições governamentais sobre esses cenários, para que tomem decisões adequadas diante do iminente aumento do nível do mar. São propostas combinações de níveis do mar que permitam simular também outros componentes não incluídos neste estudo, como tsunamis, auxiliando assim na tomada de decisões frente a esses possíveis eventos.

Palavras-chave: nível das marés, cenários, mudanças climáticas, modelos, topografia e batimetria

Recibido: 24 de enero de 2022

Aceptado: 9 de septiembre de 2022

Publicado: 15 de enero de 2023

1. Introducción

Dentro del Sistema Tierra los efectos de las actividades humanas pueden detectarse a escala planetaria. Estos efectos han llevado a los científicos a definir una nueva época geológica, el Antropoceno, con base en evidencias que muestran que los procesos atmosféricos, geológicos, hidrológicos y biológicos del Sistema Tierra entre otros, están siendo alterados por las actividades humanas (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2013). Los cambios más fácilmente reconocidos incluyen el incremento de las temperaturas globales y de los niveles del mar, así como la acidificación de los océanos asociados al

aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2013).

Lo anterior se refleja con un decremento en las masas glaciares, pero no en todas las regiones, así como una disminución de la cubierta de nieve en las regiones del hemisferio norte, los escurrimientos máximos de los glaciares y el derretimiento de la nieve se presentan de forma más temprana durante cada año, provocando la retirada de los glaciares, la fracturación de las grandes plataformas de hielo, el aumento del nivel del mar y el derretimiento del hielo permanente (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2013, p. 118). Todo esto es una influencia directa del aumento de la temperatura, expresado en el informe escrito por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (IPCC, 2014, p. 10), donde se apunta que es probable que el aumento de la temperatura media global en superficie a final del siglo XXI (2081-2100) respecto de 1986-2005 sea de 0.3° C a 1.7 °C bajo el escenario de las Trayectorias de Concentraciones Representativas 2.6 (en adelante *RCP*), donde la región del Ártico seguirá calentándose más rápidamente que la media global. A la vez, el documento indica que es prácticamente seguro que se produzcan temperaturas extremas cálidas de forma más frecuente en contra posición con temperatura menos frías que serán las menos frecuentes en la mayoría de las zonas continentales, en escalas temporales diarias y estacionales, conforme vaya aumentando la temperatura media global en superficie.

La extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 3.5% y el 4.1% por decenio, con disminuciones estivales aún más acentuadas entre el 9.4% y el 13.6% por decenio (IPCC, 2014, p. 44). En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve están decreciendo de manera acelerada, cambio que se ha manifestado en los últimos decenios, a tal punto que es probable que antes de mediados de siglo, el océano Ártico esté casi libre de hielo en el mes de septiembre, momento mínimo estival de hielo marino (IPCC, 2014, p. 12). Como lo indica Lambrechts (2007, p. 10): “La extensión de la capa de nieve media mensual en el Hemisferio Norte ha disminuido a un ritmo de 1.3% por decenio en los últimos 40 años, registrándose las mayores pérdidas en la primavera y el verano, lo que supone reducciones en la capa de nieve”.

La elevación del nivel del mar representa una de las consecuencias más importantes del Cambio Climático y que puede afectar a cientos de millones de personas en todo el mundo. En las últimas décadas el derretimiento de las capas de hielo y los glaciares representan más de la mitad del total del aumento actual observado en el mundo (Dieng *et al.*, 2017; Rietbroek *et al.*, 2016).

También se debe tener claro que el calentamiento del agua produce una dilatación térmica en el océano a nivel de las capas profundas. Esto está relacionado a ciertos fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación Austral (Church *et al.*, 2010). Domingues *et al.*, 2008 establece un aumento de esta dilatación térmica del océano hasta los 700 metros en el rango entre los $\pm 0.5 \pm 0.1$ mm/año y desde los 700 metros en el rango entre los 0.2 ± 0.1 mm/año, esto implica un aumento de las mareas de acuerdo con los valores mencionados por año.

A escala global se prevé la inundación de miles de kilómetros cuadrados de humedales costeros y tierras bajas (Bedia, 2004, p. 1). También es previsible el retroceso de playas y la ruptura de infraestructuras litorales de protección, la salinidad de acuíferos y la pérdida de tierras productivas para la agricultura y la ganadería (Bedia, 2004, p. 1). Los patrones de erosión y sedimentación litorales se verán modificados y afectarán instalaciones portuarias, enclaves turísticos y ecosistemas de especial valor, entre otras zonas sensibles (Van der Meulen *et al.*, 1991, p. 106). Las consecuencias previsibles son el retroceso por los cambios en la dinámica litoral, como por la proliferación de estructuras de protección que alterará el ambiente costero en general (Bedia, 2004, p. 1).

Asimismo, se conoce del último modelo climático, elaborado por Otto-Bliesner *et al.*, (2006, p. 1751) que concuerda con datos obtenidos de registros paleoclimáticos de testigos de hielo, polen fósil, sedimentos marinos y marcas químicas utilizados para comprobar la precisión del modelo. Se efectuó un cálculo del aumento para el año 2100, el cual indica que las costas del Sur, Suroeste y Surestes de Estado Unidos se verán seriamente afectadas, pues se registra un aumento aproximado de 6 metros del nivel del mar. Ciudades como

Nueva Orleans desaparecerán para esa fecha, al igual que ciertas zonas de la Florida, como los cayos (Otto-Bliesner *et al.*, 2006, p. 1752).

A nivel mundial a parte del aumento que presentan los océanos se tienen efectos locales y regionales como el hundimiento de la corteza terrestre y la ralentización de las corrientes oceánicas como por ejemplo la corriente del Golfo que están causando aumentos adicionales (Wright *et al.*, 2019) al conservar calor latente y generar un aumento para las áreas circundantes por expansión térmica.

Otros datos importantes indican que los glaciares, los casquetes polares y las capas de hielo combinadas han contribuido a aumentar el nivel de los océanos en 0.31 mm/año entre los años de 1992 y 1996, aumentando a 1.85 mm/año entre los años 2012 y 2016 (Bamber & Aspinall, 2013).

También se debe considerar que muchas de las proyecciones del nivel de los océanos a nivel costero son inferiores al cambio medio mundial del nivel del mar, debido al ajuste isostático de los glaciares, a cambios gravitatorios por la pérdida del hielo terrestre y de las aguas subterráneas almacenadas en tierra, así como a la expansión térmica causada en los océanos entre otros factores. En la mayoría de las regiones costeras las desviaciones locales de la media mundial pueden variar hasta ± 20 cm que, según el lugar difieren sustancialmente en sus causas subyacentes (Carson *et al.*, 2016).

2. Área de Estudio

Las áreas de estudio se ubican en la Región Chorotega, Costa Rica. Propiamente son las playas: del Coco, coordenadas geográficas centrales latitud Norte $10^{\circ} 33' 40''$ y longitud Oeste $85^{\circ} 42' 5.35''$, Tamarindo con las coordenadas geográficas centrales latitud Norte $10^{\circ} 19' 15''$ y longitud Oeste $85^{\circ} 50' 55.46''$ y Sámara coordenadas geográficas centrales latitud Norte $9^{\circ} 52' 27.16''$ y longitud Oeste $85^{\circ} 31' 14.35''$ ver Figura 1.

Figura 1. Mapa de ubicación de las playas de estudio



Fuente: elaboración propia

Nuestro país no escapa ante tal situación y principalmente, a lo que es el aumento del nivel de los océanos (Lizano, 1997, p. 172; Lizano y Salas, 2001, p. 172; Lizano, 2013, p. 9), debido a que al estar en un istmo y tener costas en ambas vertientes (Pacífica y Caribe) lo hace vulnerable ante futuros eventos de este tipo. Como lo indica Díaz (1999, p. 5), Costa Rica tiene más de 1100 Km de línea de costa en el Océano Pacífico y más de 200 Km en el Mar Caribe. Patrones de erosión desde leves, moderados y hasta severos ya se está viendo en las costas de Costa Rica, como lo señala Lizano (2013, p. 10), tanto en el Pacífico, como en el Caribe.

Para el caso de Costa Rica, se cuenta con el estudio efectuado por Díaz (1999), el cual determinó las zonas de riesgo ante un ascenso del nivel del mar: Punta Morales-Tárcoles. En este estudio Díaz utilizó la técnica AVVA (Análisis de Vulnerabilidad Asistido por Video-grabación Aérea, propuesta por Leatherman *et al.*, (1995), y efectuó una

clasificación del frente costero de acuerdo con su vulnerabilidad ante la acción de las olas o de los cambios del nivel del mar, y combinó ese método con el reconocimiento terrestre, el estudio estereoscópico de las aerofotos para trazar sobre ellas, los límites de regresión e inundación (transgresión). Es de resaltar que ese estudio se realizó con unos pocos datos topográficos aproximados alrededor de la Ciudad de Puntarenas, y sobre los cuales se superpusieron los escenarios del nivel medio del mar por calentamiento solamente. Nadie ha realizado escenarios de nivel del mar relativos a las demás componentes mareográficas, y más aún, refiriendo estos niveles al nivel “0” (cero) del mar de tal forma que corresponda al promedio de sicigias (Lizano, 2006, p. 53; 2009, p. 19).

Otro de los estudios es el de Lizano y Lizano (2010) que es una buena primera aproximación a la generación de escenarios ante el aumento del nivel del mar y otras tres componentes oceanográficas para la ciudad de Puntarenas, se toma como referencia base, al existir una carencia de este tipo de estudios para el país.

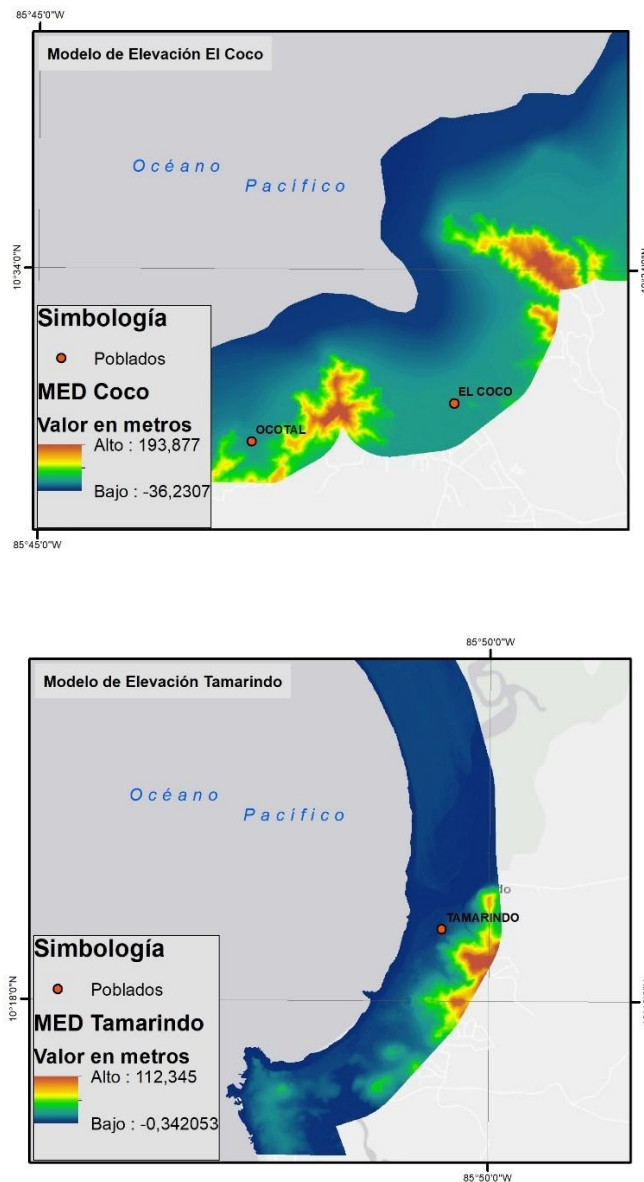
3. Métodos

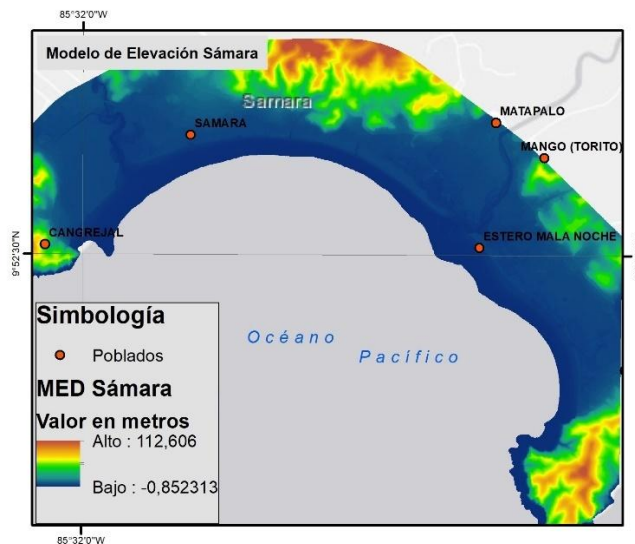
El levantamiento topográfico correspondientes a Playas del Coco, Tamarindo y Sámara se realizó mediante la técnica *Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging* (en adelante LIDAR) que deriva en una gran nube de millones de puntos para cada zona permitiendo obtener modelos de elevación, de alta resolución espacial del orden de 50 cm. Estos datos son facilitados por la Comisión Nacional de Emergencia (CNE) de un sobrevuelo realizado para cubrir las costas del Pacífico y Caribe del país, entre los años 2015-2016. Al revisar y validar los datos LIDAR de acuerdo a la clasificación internacional de la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) se procede a verificar la calidad y en algunos casos, se tiene que de la nube de puntos de para cada zona, entre un 30 y 40% de los datos de elevación, se encuentran en la categoría de no clasificados, por lo que se debió proceder a la fotointerpretación y corrección de estos, para contar con un área totalmente densificada que permita la obtención de cartografía a gran detalle menor a una escala 1:1000.

Para la zona del Playas del Coco se obtuvo posterior a la clasificación y fotointerpretación un total de 176 365 puntos de elevación, para Tamarindo de 3 609 705 puntos de elevación

y para la zona de Sámara un total de 4 044 03 puntos de elevación (son alturas elipsoidales sobre el WGS84), lo que permite obtener los modelos de elevación de alta resolución espacial para cada zona de estudio, como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2. Modelos de Elevación (MDE) de las zonas de Estudio





Fuente. Elaboración propia.

Con los datos filtrados, se procede a realizar el trabajo de campo, que permita realizar las mediciones del nivel del mar en cada una de las playas, y con el uso de las predicciones de marea para Playas del Coco, Tamarindo y Sámara (Lizano, 2006, p. 53), se establece la diferencia de la marea con el nivel 0 de referencia (marea de sicigia). Luego para cada playa, se realizó el levantamiento de puntos de control terrestre (PCT) con un receptor GeoMax Zenith 40 (Geodésico) que permite obtener las señales de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (en inglés *GNSS*) con respecto al 0 de marea y obtener alturas elipsoidales referidas al WGS84. Se obtienen las alturas del geoide EGM2008 para luego obtener las alturas ortométricas referidas al nivel 0 de marea. Esto genera una diferencia entre las alturas, lo que permite obtener un delta Δ que vendría hacer la diferencia entre las elevaciones (geoidales) con respecto al nivel 0 de marea de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta G = G2 - G1$$

ΔG : diferencia geoidal

$G2$: Geoide del punto conocido

$G1$: Geoide con respecto al nivel 0 de marea

La diferencia permite obtener lo que se conoce como el factor de ajuste necesario, para poder llevar los puntos de elevación conocidos a una superficie de referencia como lo es el 0 de mareas, de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$EF = \Delta G - PCT$$

EF: Elevación final referida al 0 de marea

ΔG : diferencia geoidal

PCT: Elevación Punto Control Terrestre

Al existir una carencia de un modelo Geoidal propio para el país al momento del estudio, se toma como referencia el modelo Geoidal EGM2008 garantizando con ello la estandarización de toda la información sobre este geoide.

Con los datos obtenidos en el levantamiento de campo y los datos de topográficos obtenidos del LIDAR se procedió a unificar los niveles de referencia topográficos, de manera que se tuviera en una sola capa para realizar la modelización.

Este nivel 0 del mar (nivel de sicigias) al que se refirieron los datos de una tabla de mareas, fue establecido para cada caso de forma individual: se tomó un punto en Playas del Coco, Tamarindo y Sámara. Se establece un promedio entre el valor de los datos dados por el LIDAR y los obtenidos en campo para con ello obtener para cada superficie el nivel de referencia con respecto al 0 de la marea.

A partir de comparar los puntos anteriores con los dados por el LIDAR para cada una de las zonas de estudio, se tiene una diferencia de 0.80 m para Playas del Coco, 0.80 m para Tamarindo y 0.77 m para Sámara lo que permite homologar los datos topográficos con respecto al nivel “0” del mar, que corresponde al promedio de sicigias (Lizano, 2006, p. 53; 2009, p. 19).

Para trabajar la información de mareas astronómicas se utilizó el software de escritorio (PC) llamado *Tidal & Currents* (Lizano, 2006, p. 53), cuyas predicciones incluidas en el programa, van desde el año 1901 hasta el año 2099.

Los distintos niveles del mar se modelaron utilizando un software de Información Geográfica (SIG), asumiendo un aumento del nivel del mar entre 0,20 cm, 0,30 cm, 0,60 cm y 0,82 m, según los criterios del informe del IPCC en los escenarios RPC (2014, p. 62) así como lo indicado por Nerem *et al.*, (2018) lo anterior se refleja en la Tabla 1. Para los casos de estudio, al nivel de las mareas de sicigia y máximas para el Pacífico Norte de Costa Rica (Lizano, 2006, p. 56) se le sumará cada uno de los incrementos mencionados, que de paso son conservadores, no extremos. Es importante aclarar que el nivel del mar regional puede ser muy diferente al promedio global, pero se utilizan estos datos al no contar con valores calculados específicamente para la costa Pacífica de Costa Rica. El máximo valor de marea para el Pacífico Norte es 3.29 m (Lizano y Lizano, 2010, p. 223), y un nivel de marea de 3.0 m es considerado alto e incluido en el estudio.

Tabla 1. Aumento del Nivel del Mar para el Pacífico

Marea Base	Año	Aumento
3 mts	2030	0.20
	2050	0.30
	2070	0.60
	2100	0.82
3.29 mts (Marea Máxima cada 4.65 años)	2030	0.20
	2050	0.30
	2070	0.60
	2100	0.82

Fuente: Elaboración propia con datos IPCC (2014)

4. Resultados

La altura topográfica promedio para la zona de Playas del Coco es de 14.80 m, referidos al nivel 0 del mar, para el caso de Tamarindo el promedio es de 5.42 m y finalmente para la zona de Sámara la elevación promedio es de 15.51 m (elevaciones referidas al elipsoide WGS84). Esos valores promedios indican que son zonas vulnerables a procesos marino-costeros cuyas componentes sean meteorológicas y oceanográficas.

Es importante recalcar que la mayor elevación para la zona de Tamarindo se encuentra en el Cerro dónde se tiene el residencial llamado “*Tamarindo Heights*” con una elevación de 136 m sobre el nivel 0 establecido, este punto se ubica al Sureste de centro del residencial. Para la zona de Sámara, el sitio de mayor elevación se encuentra al Norte del sector costero sobre las estribaciones del Cerro Sámara a una altura de 186 m sobre el nivel 0 referido. Finalmente, para el caso de Playas del Coco, se tiene que la mayor elevación se encuentra hacia el sector Suroeste del centro de la comunidad en el en el Cerro la Flor a una elevación de 197 m referidos al nivel 0 del mar (Figura 2).

4.1 Mareas máximas

A partir de los datos anteriores, se sabe que una marea máxima para las zonas de estudio corresponde a 3.29 m (Lizano, 2006, p. 59).

Múltiples escenarios se podrían construir para las zonas a partir de los diferentes niveles de marea astronómica: nivel “0”, nivel promedio de referencia (3 m), entre otros, con las distintas combinaciones de las componentes mareográficas, en este caso, el aumento del nivel del mar. Lo importante entonces, son aquellos niveles ante el aumento del nivel del mar que tienen potencial de inundación para las zonas de estudio. Las combinaciones seleccionadas de estos niveles se resumen en la Tabla 2 y se pueden apreciar en las Figuras 3, 4 y 5.

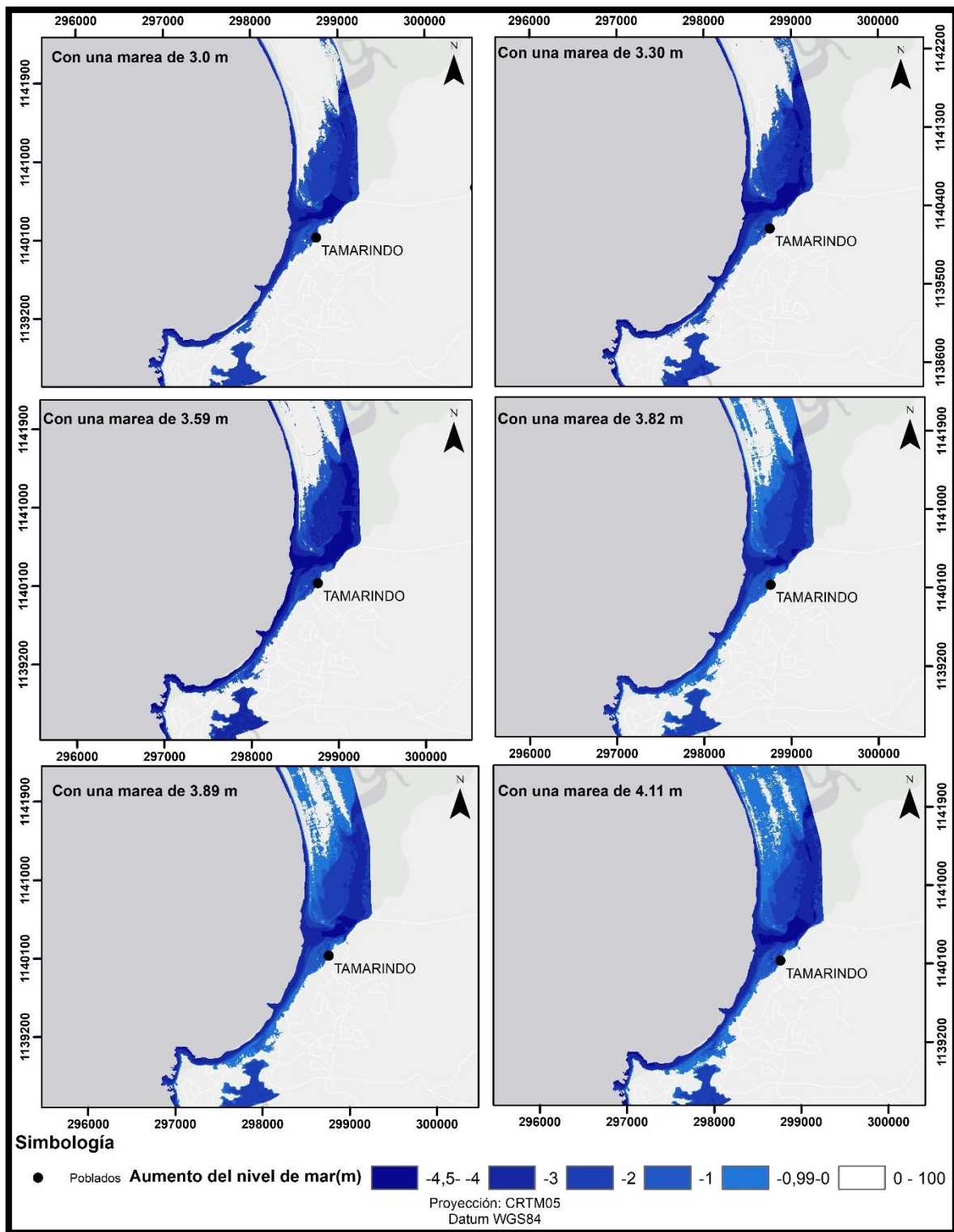
Tabla 2. Niveles mareográficos utilizados como posibles escenarios ante el aumento del nivel del mar

Escenario	Marea Base	Año	Aumento (m)	Marea Total (m)
1	3 mts	2030	0.20	3.20
2		2050	0.30	3.30
3		2070	0.60	3.60
4		2100	0.82	3.82
5	3.29 mts	2030	0.20	3.49
6		2050	0.30	3.59
7		2070	0.60	3.89
8		2100	0.82	4.11

Fuente. Elaboración propia.

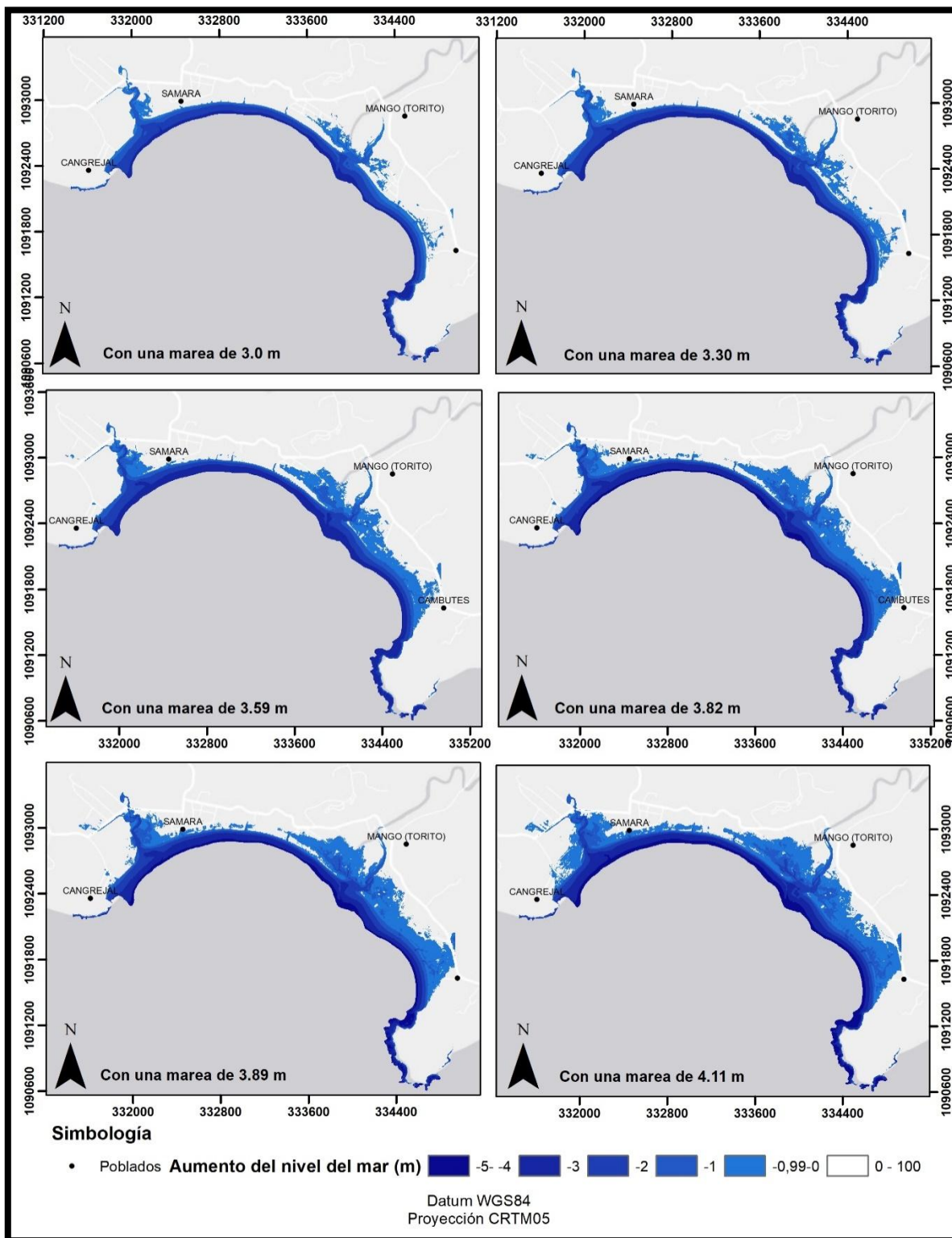
Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los niveles de inundación para las zonas de Tamarindo, Sámara y Playas del Coco que pudieran generarse en esta ocasión. Las observaciones que se hicieron corresponden a escenarios para las mareas de 3.0 m y 3.29 m en las zonas de estudio que coinciden con lo señalado en las figuras. A modo de aclaración, no aparecen en las figuras siguientes algunas de las mareas indicadas en la Tabla 2.

Figura 3. Escenarios de Inundación para la playa de Tamarindo



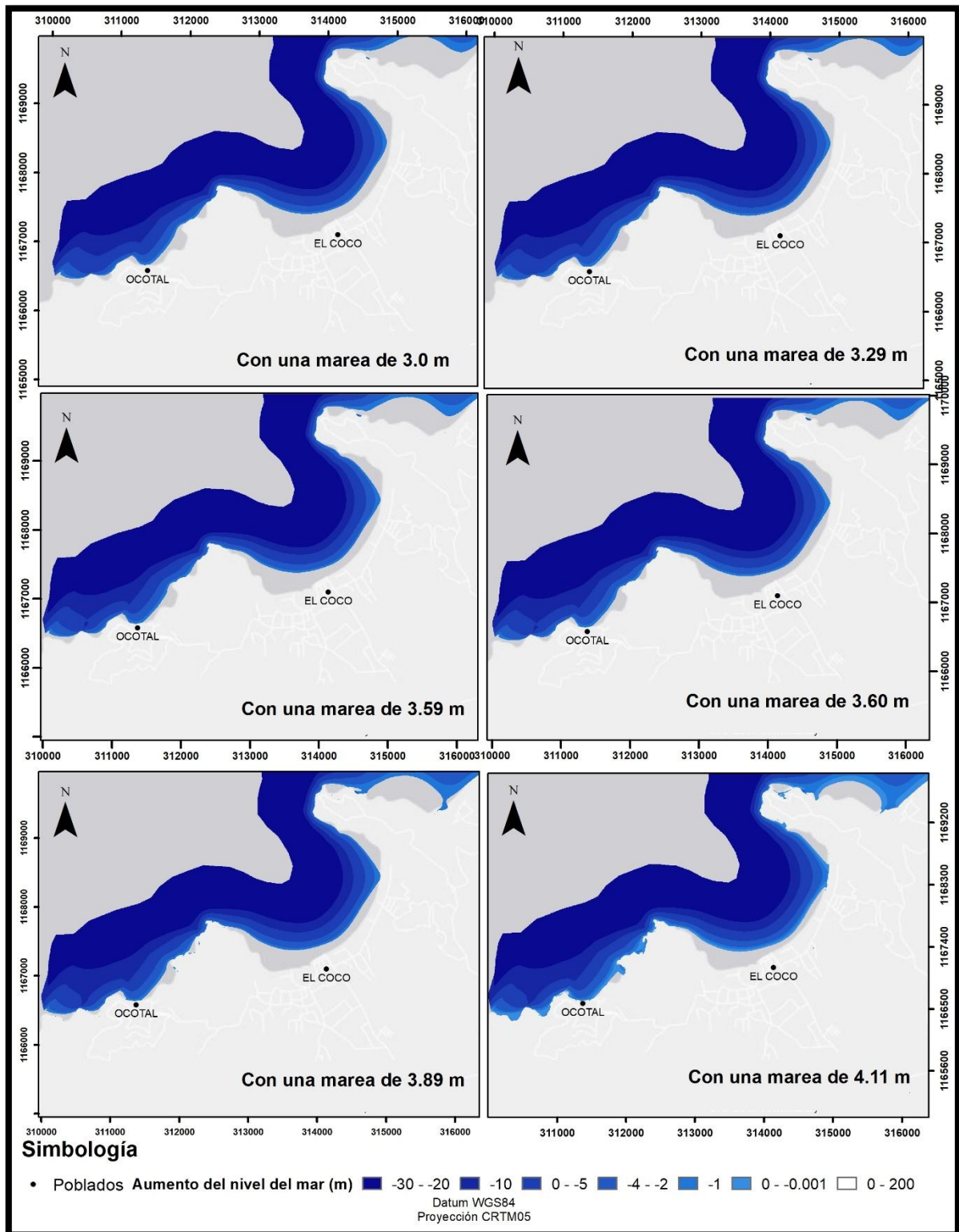
Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Escenarios de Inundación para playa Sámara



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Escenario de Inundación para Playas del Coco



Fuente: Elaboración propia

5. Discusión

El ascenso del nivel del mar por cambio climático supondrá un problema en el corto plazo (30 años) (IPCC, 2007, p. 21). Desde la mitad del siglo pasado el ritmo del aumento ha sido muy superior a la media de los dos milenios que le precedieron (IPCC, 2014, p. 46) Lo anterior queda reflejado en las estimaciones que muestran un ascenso significativo del nivel del mar, cuya causa directa está asociada con el aumento de la temperatura global, lo cual ha originado y está causando un derretimiento acelerado de los glaciares en muchas partes del mundo, con el consecuente problema de un mayor aporte de agua en todos los océanos (Lizano, 2013, p. 7). Lo anterior ha generado un aumento creciente del nivel del mar y se mantendrá hacia posteriores años; como se ha valorado en este documento. En consecuencia, se debe ir pensando en la forma de mitigar, para prevenir eventos y desastres mayores en el área en mención.

Una peculiaridad obtenida a partir de los fenómenos modelados es que la inundación en cada zona comienza por los esteros y desembocaduras presentes en los 3 sitios, ya que por la morfología de cada sitio favorece que ante un aumento de marea y sumado al aumento paulatino del nivel del océano estas sean las zonas que por su geografía favorezcan los procesos de inundación para cada una de estas áreas. En Tamarindo la afectación se da sobre el estero y manglar que divide Tamarindo de Playa Grande, en Sámara se afecta principalmente comunidades del poblado de los Mangos y Cambute y en Playas del Coco con un menor impacto en el poblado del Coco (principal) por los 2 esteros que presenta.

Otro punto por valorar se da a causa de los problemas que acarreará el máximo aumento del nivel del mar (0.60 cm – 0.82 cm), pues bajo estos escenarios el incremento no implicará un tipo de marea alta y marea baja. El ascenso del nivel es algo sumatorio y prácticamente, a partir del año 2090 los sectores circundantes a las comunidades de las 3 playas, estarán inundados o con un grado medio de afectación. Posterior al año 2100 es muy factible que otros sean los sectores inundados bajo una cortina de agua que oscilará entre los 0.60-0.90 cm o más. Esas zonas se encontrarán cerca de los centros poblados para cada zona de estudio.

Según el software Tides & Currents for Windows (Lizano, 2006, p. 53), la mayor marea astronómica, para la región del Pacífico Norte de Costa Rica, es de 3.29 m. En un estudio adicional de las mareas altas de 20 años de esta zona, se demuestra que la frecuencia de superar una marea de 3 m para el sitio es de 42.3 veces/año. Para el año 2050 con un escenario adicional de 0,30 m, la frecuencia de tener niveles del mar con valores mayores o iguales a 3 m sería de 391 veces/año. Para los demás escenarios (2070 y 2100), la probabilidad de tener niveles del mar superiores a ellos, serán todos los días para las zonas señaladas en este estudio.

Otro de los fenómenos que puede conllevar algunos tipos de problemas para las poblaciones, sería el causado por las tormentas lejanas y/o locales (Lizano, 2010), que provocan el apilamiento del oleaje no modelado en este estudio, pero que al sumarse con un período de marea alta podría incidir en algunas inundaciones en partes importantes cercanas más allá de los escenarios aquí planteados para las comunidades de Tamarindo, el Coco, así como Sámara, Mango y Cambute. Bajo crecientes aumentos del nivel del mar, el oleaje se constituye en el factor más dinámico y una fuente de energía suficiente para causar impacto costero en estas áreas, hasta el grado de favorecer problemas de erosión de forma más acelerada para cada zona del presente estudio, aumentando los que ya de por sí presentan (Lizano, 2013, p. 19).

Es meritorio aclarar que en este estudio se han tratado los distintos niveles mareográficos como una superposición de niveles pasivos simplemente, sin tomar en cuenta que la dinámica de ciertas componentes, como las corrientes, la parte termodinámica; así como el oleaje, que tiene la capacidad de modificar la geomorfología costera en un corto tiempo ante eventos extraordinarios y severos. Esto puede desequilibrar los sistemas de una forma inimaginable si no se toman las medidas respectivas pronto, pues como lo señala Lizano y Gutiérrez (2011), ya el aumento del nivel del mar es una realidad en nuestras costas, a la vez si sucede lo mencionado, sería bueno utilizar técnicas como el LIDAR o la Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados para obtener cartografía a detalle que permita nuevamente modelar los escenarios para una toma de decisiones concreta y certera en poco tiempo.

El otro componente que no se incluyó en este estudio, es el aumento del nivel del mar por un tsunami. El tsunami reciente de Japón (10 de marzo del 2011) produjo un aumento del nivel del mar en Quepos de 18 cm según datos del Centro de Alerta de Maremotos del Pacífico¹. Hay simulaciones de Ortíz *et al.*, (2001) de tsunamis históricos con ondas de 3.5 m de altura por ejemplo para la Ciudad de Puntarenas. De manera que los escenarios incluidos aquí, también sirven para sobreponer este componente a las condiciones de la marea existente en el momento de arribo de un tsunami, y constituye una herramienta válida para que las autoridades respectivas evalúen las condiciones del nivel del mar ante un evento de este tipo en el Océano Pacífico.

6. Conclusiones

Por el grado de importancia que tiene este tema, en el cercano, mediano y largo plazo, hacia las comunidades mencionadas anteriormente, es que las autoridades respectivas deberían invertir en equipo tecnológico que permita cuantificar estos escenarios de forma más precisa. Para ello se recomienda instalar un mareógrafo en la región del Pacífico Norte del país, que permita medir y obtener patrones sobre el nivel del mar y su aumento, con el fin de tener un registro continuo de esas variaciones, lo cual puede ayudar a prevenir y mitigar posibles amenazas, así como otras que puedan ocurrir y que no se encuentran citados en este documento.

El panorama mostrado en este documento se puede tornar difícil si a parte del aumento del nivel del mar se consideran otras variables o fenómenos que puedan presentarse para un día particular como el fenómeno de El Niño, alta precipitación o un tsunami, y que en un mismo día estos eventos podrían superponerse, pues implicarían aumentos importantes en el nivel del mar, al punto que podrían ocasionar inundaciones aún mayores a las mostradas en este documento. A partir de lo anterior, las autoridades correspondientes deberían tener algún plan de acción o de emergencia para eventos que produzcan impacto costero, o construir la infraestructura necesaria para proteger a cada zona de acuerdo con su particularidad, y comenzar a trabajar en la posible reubicación de toda la población o proponer nuevos códigos constructivos para este tipo de fenómenos.

¹ https://www.weather.gov/prh/data_products_ptwc

Es de suma importancia que la variable de aumento del nivel del mar se incluya para los planes reguladores costeros, con el fin de que sirva como un instrumento adecuado para el ordenamiento territorial y la planificación urbana por parte de las instituciones pertinentes, mismo que debería ser de acatamiento obligatorio para las Municipalidades que en su espacio, cuenten con el componente costero. Para este caso serían los gobiernos locales de Nicoya, Santa Cruz y Carrillo.

7. Referencias Bibliográficas

- Bamber, J.L., & Aspinall W.P. (2013). An expert judgement assessment of future sea level rise from the ice sheets. *Nature Climate Change*, 3(4), 424–427. <https://doi.org/10.1038/nclimate1778>
- Bedia, J. (2004). Creación de un modelo digital de elevación para la predicción de futuros escenarios de inundación en el estuario del Río Loughor (Sur de Gales). Proyecto fin de carrera Bachelor (Honours) Environmental Science Wolverhampton University, School of Applied Sciences.
- Carson, M., Köhl, A., Stammer, D., Slagen, A., Katsman, C., Van de Wal, R., Church, J., & White, N. (2016). Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change*, 134, 269–281. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1520-1>
- Church, J., Aarup, T., Woodworth, P., Wilson, W., Nicholls, R., Rayner, R., Lambeck, K., Mitchum, G., Steffen, K., Cazenave, A., Blewitt, G., Mitrovica, J., & Lowe, J. (2010). Sea-Level Rise and Variability: Synthesis and Outlook for the Future. In J. Church, P. Woodworth, T. Aarup & W. Wilson (Eds.), *Understanding Sea-Level Rise and Variability* (pp. 402-419). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444323276.ch13>

- Díaz, J. (1999). *Determinación de las zonas de riesgo ante un ascenso del nivel del mar: Punta Morales-Tárcoles* (Informe Final N° 59). MINAE-IMN.
- Dieng, H., Cazenave, A., Meyssignac, B., & Ablain, M. (2017). New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach. *Geophysical Research Letters*, 44(08), 3744-3751. <https://doi.org/10.1002/2017GL073308>
- Domingues, C., Church, J., White, N., Gleckler, P., Wijffels, S., Barker, P., & Dunn, J. (2008). Improved estimates of upper-ocean warming and multidecadal sea-level rise. *Nature*, (453), 1090-1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. (Informe N° 4). IPCC, Rajendra K. Pachauri y Andy Reisinger. <https://bit.ly/2RIaAeJ>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. (Informe N° 5). IPCC, Rajendra K. Pachauri y Leo Meyer. <https://bit.ly/2DpxsL1>
- Lambrechts, C. (2007). Highlights. En: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Ed.), *Global Outlook for Ice & Snow* (pp. 7-18). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, GRID-Arendal.
- Leatherman, S., & Nicholls, R. (1995). Accelerated Sea-Level Rise and Developing Countries: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 14(1), 1-15.
- Lizano, M, y Lizano, O. (2010). Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, 11(21), 215-229. <https://bit.ly/3toxuMI>

- Lizano, O. (1997). Las mareas extraordinarias de 1997 en la costa del Pacífico de Costa Rica. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, 4(2), 169-179. <https://bit.ly/3gliEIT>
- Lizano, O. (2006). Algunas características de las mareas en la costa Pacífica y Caribe de Centroamérica. *Ciencia y Tecnología*, 24(1), 51-64. <https://bit.ly/3tm8XaX>
- Lizano, O. (2009). Corrientes marinas en algunas playas de Costa Rica. En: R. Viales, J. Amador, F. Solano y S. Amador (Eds.), *Concepciones y representaciones de la naturaleza y la ciencia en América Latina* (pp. 259-272). Editorial Universidad de Costa Rica.
- Lizano, O. (2010). Batimetría, modelo de elevación digital y sus aplicaciones. *Revista AZIMUTH 10 DIGITAL*, 18-21. <https://bit.ly/3G97JHL>
- Lizano, O. (2013). Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *InterSedes*, 14(27), 6-27. <https://doi.org/10.15517/isucr.v14i27.10405>
- Lizano, O, y Gutiérrez, A. (2011). Erosión en las costas de Costa Rica, un problema de todos. *En Torno a la Prevención*, (7), 14-16. <https://bit.ly/3EdWeMB>
- Lizano, O, y Salas, D. (2001). Variaciones geomorfológicas en los últimos 50 años de la Isla Damas, Quepos, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49(2), 171-177. <https://bit.ly/3hCKSdz>
- National Weather Service. (16 de agosto de 2016). Productos del PTWC por identificadores de AWIPS. National Weather Service. <https://bit.ly/3UJIMbp>
- Nerem, R., Beckley, B., Fasullo, J., Hamlington, B., Masters, D, & Mitchum, G. (2018). Climate change driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era.

- National Academy of Sciences*, 115(9), 2022-2025.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>
- Ortiz, M., Fernández, M, y Rojas, W. (2001). Análisis de riesgo de inundación por tsunamis en Puntarenas, Costa Rica. *Geos*, 21(2), 108-113. <https://bit.ly/3hCJAiI>
- Otto, J., Marshal, S., Overpeck, J., Miller, G, & Hu, A. (2006). Simulating Arctic Climate Warmth and Icefield Retreat in the Last Interglaciation. *Science*, 311(5768), 1751-1753. DOI: 10.1126/science.1120808
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2013). *GEO-5 Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Medio ambiente para el futuro que queremos. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, opciones para América Latina y el Caribe*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Rietbroek, R., Brunnabend, S., Kusche, J., Schröter, J, & Dahle, C. (2016). Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(6), 1504–1509.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1519132113>
- Van der Meulen, F., Witter, J, & Arens, S. (1991). The use of a GIS in assessing the impacts of sea level rise on nature conservation along the Dutch coast: 1990–2090. *Landscape Ecology*, 6(1-2), 105-113. <https://doi.org/10.1007/BF00157750>
- Wright, L., Syvitski, J, & Nichols, C. (2019). Sea Level Rise: Recent Trends and Future Projections. In: L, Wright., & C, Nichols (Eds.), *Tomorrow's Coasts: Complex and Impermanent*. Coastal Research Library. Springer, Cham
https://doi.org/10.1007/978-3-319-75453-6_3

8. Agradecimientos

A los estudiantes Karol Barquero Bolaños y Franco Aguiar Cuadra, estudiantes de Geografía de la Universidad de Costa Rica, por la colaboración en la elaboración de este artículo. A la Vicerrectoría de Investigación por apoyo a través del proyecto No. B5267.