



Línea de costa teórica de la República Mexicana bajo el supuesto del descongelamiento total de los casquetes polares.

The theoretical coast of the Mexican Republic under the assumption of the all fusion of the polar caps

Rodrigo Tovar-Cabañas¹, José Alfredo Jáuregui-Díaz², Rocío del Carmen Vargas-Castilleja³ & Shany Arely Vázquez Espinosa⁴

Para citar este artículo: Tovar-Cabañas, R., Jáuregui-Díaz, Vargas-Castilleja, R.C. & Vázquez-Espinosa, S.A. (2018). Línea de costa teórica de la República Mexicana bajo el supuesto del descongelamiento total de los casquetes polares. *UD y la Geomática*, 13, 5-12. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.13550>

Fecha de recepción: 12 de noviembre de 2018 **Fecha de aceptación:** 12 de diciembre de 2018

RESUMEN

La investigación radica en que a través de la simulación de un gran incremento del nivel del mar, se busca incrementar la concientización de la población sobre la importancia de mitigar la huella ecológica, además de adaptarse al respectivo nicho ecológico bajo esta coyuntura de cambio climático. El cual tiene como objetivo: delimitar la línea de costa de la República Mexicana en caso de que la Antártida quedará libre de hielo. Es de advertir que el tratamiento metodológico partió de un análisis espacial donde se revisaron algunos softwares especializados en el manejo de información geofísica y altimétrica de alta resolución. Dentro de los resultados más apremiantes tenemos que hasta la fecha sigue siendo incierto el futuro de los procesos criogénicos y glaciológicos del continente antártico, por tales incertidumbres hemos calculado el nivel máximo posible que podría alcanzar el mar océano en caso de que los casquetes polares quedaran libres de hielo. Estimamos que de presentarse tal escenario, la República Mexicana perdería un 15% de su territorio. Ahora bien, este ejercicio reveló que la población que vivía en la zona de riesgo, era de alrededor de 22.6 millones de habitantes.

Palabras Clave: Ascenso del nivel del mar; Cambio Climático; México; Antártida.

SUMMARY

The paper shows a simulation of sea level rise for the case of Mexico. It seeks to raise public awareness of the importance of mitigating the ecological footprint and adapting to climate change. The objective is to delimit the coastline of the Mexican Republic in the event that Antarctica lost all ice. The methodology is a spatial analysis based on the management of high resolution geophysical and altimetric information. The results indicate that to date the future of cryogenic and glaciological processes in Antarctica is uncertain. In such scenario, Mexico would lose 15% of its territory, which would affect to 22.6 million inhabitants.

Keywords: Sea level rise; Climate Change; Mexico; Antarctica.

1 PhD en Geografía. Instituto Interdisciplinario de Investigación, Universidad de Xalapa rod_geo77@hotmail.com.

2 Doctor en Demografía. Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

3 Doctora en Medioambiente. Facultad de Ingeniería Arturo Narro Siller, Universidad Autónoma de Tamaulipas. rocvargas@docentes.uat.edu.mx

4 (Doctorante de la Universidad Veracruzana, Instituto de Investigaciones Histórico-Sociales. Maestra en Geografía Facultad de Geografía, Universidad Veracruzana. shanyvaz@gmail.com

Introducción

Recordemos que la reología de la Tierra no es constante como la aceleración controlada de un servomotor, por lo que constantemente está sometida a fuerzas tectónicas cuyos mecanismos aun científicamente no se han podido dilucidar. Por ejemplo tomando en cuenta la constante que da Laskar y Robutel (1993) para estimar el abatimiento secular de la oblicuidad del Planeta, el hemisferio rocoso está migrando hacia el sur a razón de kilómetro y medio cada 100 años. Al respecto, no sabemos cómo ni de qué forma el planeta ajustará ese desequilibrio de energía potencial. Por una parte, desde la teoría de la tectónica de placas, podría ocurrir que tal energía se libere a través de una serie de sismos, pero eso sólo ajustaría el puzle de la corteza terrestre, sin embargo, por ese mecanismo la Tierra no podría equilibrar rápidamente su centro de masa, el cual, cómo hemos dicho, se está comprometiendo dado que la densidad de la corteza del hemisferio norte es diferente a la del hemisferio sur. Para compensar el desbalance y la consecuente arritmia en el giro de la Tierra, desde la teoría del corrimiento polar, nuestro planeta cedería el hielo de la Antártida, luego de que ésta cambiará súbitamente sus coordenadas geográficas para situarse más al norte para que de esa forma la Tierra volviera a tener en equilibrio su centro de masa. Obviamente no vamos a discutir en este momento el caos derivado de la situación descrita. Por el contrario sólo la hemos traído a colación para mostrar lo plausible que puede resultar un gran incremento del nivel del mar de manera natural.

Desde un punto de vista artificial, desde hace décadas, se sabe que pruebas nucleares debajo de los enormes islándis del continente Ártico podrían generar inundaciones de estallamiento de magnitudes globales, cuyos tsunamis tendrían oleajes superiores a los 40 metros de altura. Por tal circunstancia una oficina de las naciones unidas desde 1977 prohibió la práctica de ese tipo de experimentos globales, entre otros en donde se involucren acciones tendientes a cambiar el nivel del mar o la latitud de ambos trópicos, etcétera.

Por todos los argumentos expuestos no está de más delimitar la línea de costa de la República mexicana en caso de que la Antártida quedará libre de hielo⁵, y de paso revisar las implicaciones sociales, económicas, incluso medio ambientales. Todo ello para seguir generando e incrementando la concientización de la población sobre la importancia de mitigar la huella ecológica, además de adaptarse al respectivo nicho ecológico bajo esta coyuntura de cambio climático.

Incremento súbito del nivel del mar. Marco histórico.

Uno de los primeros en documentar los cambios en el nivel del mar fue Smith (1838), tras estudiar ciertos depósitos aluviales que contenían restos marinos en Escocia e Irlanda. Tales evidencias se encontraban 24 metros por encima del nivel de la marea alta (Smith, 1937; Smith, 1845). Casi una década más tarde Chambers (1848) señalaba que los cambios en el nivel del mar también se podían apreciar en las costas de Gran Bretaña, Francia, Noruega y Estados Unidos, aunque para él tales cambios eran relativos, ya que así como los depósitos de detritos marinos del sur de Gran Bretaña, hacían suponer que hace millones de años ésta porción de tierra estuvo sumergida más de 500 metros (cuando el clima era más cálido y húmedo), la génesis de los detritos marinos de la porción norte (Escocia) hacían suponer otras cuestiones.

Un lustro después, Tylor (1853) calculó que la cantidad de materia sólida que anualmente arrojaba el río Mississippi al fondo del océano desplazaría suficiente agua para provocar un incremento del nivel medio del mar de por lo menos ocho centímetros en 10.000 años. Cuando replicó sus cálculos para el caso del río Ganges notó que tal incremento del nivel del mar sólo tardaría 1791 años. Por tal razón concluyó que los cambios en el nivel del mar no podían considerarse como definitivos, pues además consideró el hundimiento del piso oceánico, debido al peso del material depositado.

Pasada la mitad del siglo XIX varios científicos, mediante el método de armónicos esféricos, y una serie de consideraciones, tales como: la capilaridad del agua en función de la temperatura, el movimiento de las morrenas, la tasa de acumulación de nieve, el papel de la corriente de Golfo sobre la dinámica del polo norte, el área del continente antártico, el calor subterráneo, así como el espesor promedio de las capas de hielo, calcularon los cambios en el nivel del mar en función de distintos espesores de los casquetes polares, pero debido a que no se conocía con precisión el área de la Antártida, ni el espesor del hielo de la misma surgieron resultados diferentes, por ejemplo hubo quien afirmó que el aumento del nivel del mar producto del derretimiento de ambos casquetes polares sería de 115 m, otros hablaban de 198 m, mientras que otros calcularon 600 m, (Thomson, 1888).

Incremento del nivel del mar. Estado del arte.

En el pasado siglo XX, algunos científicos concluyeron que la capa de hielo antártico estaba en crecimiento hacia finales de los años 50tas, pero que este fenómeno no necesariamente contradecía el aumento en el nivel del mar observado, por lo que Wexler (1961) dijo que al parecer era arriesgado afirmar que la capa de hielo antártico estuviese aumentando o disminuyendo. Al respecto, Sissons (1966) además de documentar que la última crecida del mar fue de forma súbita hace 5,500 años, demostró que el nivel del

5 Recientemente, en 2016, un grupo de científicos de la Escuela de Geociencias de la Universidad de Edimburgo geo localizaron 91 volcanes desconocidos bajo el hielo de la Antártida.

mar es más fluctuante de lo que se cría hasta entonces. Luego, desde la meteorología, Wyrki (1977), notó que durante los súper niños, los vientos alisios ecuatoriales causan un abombamiento o acumulación de nivel del mar en el Pacífico occidental. Después esa hinchazón del nivel del mar comenzaba a caer lentamente, tal respuesta oceánica parece consistir en una onda de Kelvin ecuatorial de ciclos muy rápidos, observaciones similares fueron documentadas por Brooks (1977), quien describió cómo la presión atmosférica está fuertemente acoplada a las fluctuaciones del nivel del mar a lo largo de una línea de costa de alrededor de 500 km, en períodos de 3 a 7 días, concluyendo con ello que la presión atmosférica produce ciclos de descenso del nivel del mar. Años después, Pugh y Vassie (1980), luego de analizar las inusuales mareas altas que acontecieron en las islas británicas a mediados del siglo XX, concluyeron que aunque el nivel medio del mar puede estimarse para un año determinado, su tasa de cambio no es constante y secular, puesto que el cambio en el nivel medio del mar se produce debido al aumento en el volumen de agua en los océanos (mareas astronómicas con periodos largos de retorno) pero también por el movimiento vertical (isostático) de la Tierra.

Desde la glaciología, Lingle y Clark, (1979), afirman que las crecidas del nivel del mar también dependen de la forma topográfica que tienen las capas de hielo de la Antártica, así como de la isostasia del piso oceánico y de la reología de la Tierra. Señalan que del último máximo glaciario (hace 18 mil años) al presente, el nivel del mar aumentó 100 metros en promedio, pero atribuyen el 37% de ese levantamiento a la tectónica del fondo marino, y el 63% restante se lo atribuyen al hundimiento concurrente del geoide, ambos debido a reajustes gravitacionales del planeta. Alley y Whillans (1984), mediante la modelación de sistemas no lineales estimaron que la Antártica se adelgazó en promedio 100 m, debido al aumento del nivel del mar del holoceno. Para dicha simulación consideraron que la capa de hielo y el flujo glacial reaccionan de forma muy dinámica e incierta ante el aumento del nivel del mar y el ajuste isostático asociado. Desde finales del siglo XX, no cabe duda del papel tan importante que juega la Antártida para con los estudios del aumento del nivel del mar y del cambio climático. Por ejemplo Koerner y Fisher (1990) criticaron a los modelos de "efecto invernadero", que predecían que durante los próximos 100 años se daría un aumento del nivel del mar sin precedentes, sin considerar las amplias evidencias antárticas que hacen pensar lo contrario. Dichos glaciólogos apuntaron que lo importante era saber cuánto aumentaría la tasa de acumulación de nieve en la Antártida, en esa línea de pensamiento Bindshadler (1990), reafirmó que la Antártida tiene la mayor contribución potencial para producir un cambio rápido del nivel del mar, de hecho si se derritieran las capas de hielo de ambos polos, el nivel global del mar aumentaría en 70 metros.

Por otra parte, otros investigadores como Warrick y Farmer (1990) no apuestan por incrementos del nivel del mar tan súbitos, sino más bien, pese a los rangos de incertidumbre, estiman que el nivel del mar ascenderá de manera gradual unos 26 cm del año 2000 al 2100, otros autores como Grinsted, *et. al.*, (2004) predicen un ascenso de 1 metro para el mismo periodo. Sin embargo Warrick y Farmer reconocen que tal fenómeno, súbito o gradual, exacerbará problemas de inundaciones, salinización y erosión, lo cual podría interrumpir los mejores planes de desarrollo. También señalan que la cuestión consiste en reconocer que las predicciones tienen múltiples variables inciertas, lo que conlleva a una imposibilidad de especificar los detalles regionales de los cambios climáticos futuros. Por consenso dicen que lo único cierto es que se afirma que los mayores cambios climáticos ocurrirán dentro de la zona intertropical de convergencia.

En ese sentido varios grupos de investigación alrededor del mundo han modelado líneas de costa según distintos escenarios de inundación producto del aumento del nivel del mar. La mayoría han sido modelos globales que no muestran con suficiente detalle las especificidades regionales y locales, este es el caso de la National Geographic, (2013) que modeló una crecida del nivel del mar de alrededor de 70 metros para todo el globo terrestre. De tal modo, reconocemos que para la nación mexicana hace falta conocer ¿De qué tamaño es el área que el mar le podría ganar al territorio mexicano, de darse una subida de 70 m.? ¿Cuánta población está en esa zona cero? Por lo tanto la presente investigación busca dar respuesta a esas y otras interrogantes, para ello, vamos a exponer el método que nos sirvió para cartografiar la cota de 67 m. o límite que estimamos en caso de que los casquetes polares quedaran libres de hielo, no sin antes exponer brevemente, por geometría, la cantidad en volumen de hielo que alberga la Antártida.

Determinación geométrica del volumen de hielo antártico.

Lo primero que se debe obtener para calcular, por geometría, el volumen del hielo antártico es la distancia que tiene el radio del paralelo $66^{\circ} 33' 46.9''$ que es el que le corresponde al círculo polar antártico del año de 2017 (cateto adyacente). También se requiere conocer la altura de dicho paralelo respecto del ecuador (cateto opuesto).

$$\begin{aligned} \text{Cateto adyacente} &= re * \cos\alpha \\ \text{Cateto opuesto} &= rp * \sin\alpha \end{aligned}$$

Dónde:

$$re: \text{radio ecuatorial} = 6378 \text{ km}$$

$$rp: \text{radio polar} = 6356 \text{ km}$$

$$66.56302778 \cos\alpha = 0.397740023$$

$$66.56302778 \sin\alpha = 0.91749816$$

De ese modo

$$re: 6378 * 0.397740023 = 2528 \text{ km}$$

$$rp: 6356 * 0.91749816 = 5851.8 \text{ km}$$

Con esos valores estamos en posición de conocer el área del casquete polar, la cual se estima a partir de la fórmula: $2\pi r^2 h$ Donde r se refiere a la altura que va del círculo polar al polo. ($6356 - 5851.8 \text{ km} = 504.2 \text{ km}$). Por tanto, el área de un casquete polar es de 20,183,260.72 km. Ahora bien, si el área de todo el planeta Tierra es de 510 millones de km², el área de cualquier casquete polar corresponde a 3.96%.

El siguiente paso que se debe efectuar para calcular el volumen del hielo antártico es estimar la cantidad de volumen de la esfera terrestre: $et = (4\pi r^3)/3$. Esto es 1.08 billones de km³. De manera concomitante se debe calcular el volumen de una esfera hipotética o criosfera con un radio superior en 1.5 km al radio terrestre, pues este último valor representa el promedio del espesor de las capas de hielo polar. La diferencia entre el volumen de la esfera terrestre y la criosfera hipotética es de 765,278,647 km³. De ese volumen, el 3.96% le corresponde a un casquete polar, o sea 30 millones de km³. Mientras que para la superficie antártica, que representa el 2.75% del total del área de la superficie terrestre, le corresponden 21,045,162.80 km³. En tanto que a Groenlandia le corresponden más de 2 millones de km³.

Descontando la cantidad de roca continental de Groenlandia y la Antártida, tenemos alrededor de 21 millones de km³ de hielo polar en toda la Tierra. Con ese volumen de hielo, la Tierra, conforme al mismo cálculo geométrico, quedaría 45 metros bajo el agua, descontando la proporción continental, la anegación llegaría a 59.5 metros. Sin embargo, tomando en consideración otras variables tales como gravimetría y forma del geoide. De modo que si por alguna razón la Antártida quedará libre de hielos, es necesario conocer cuál sería la línea de costa resultante tras una crecida del nivel del mar de por lo menos 67 m, para ello es necesario recurrir a una serie de operaciones cartográficas, mismas que a continuación se detallan.

Metodología

Para definir la base cartográfica y el tipo de análisis espacial que se realizaría se revisaron algunos softwares especializados en el manejo de información geofísica y altimétrica que tuvieran la capacidad de desagregar datos con una resolución de 50 m para garantizar la más factible de las coberturas posibles de la República Mexicana. Los sistemas de información geográfica o softwares analizados fueron: ENVI desarrollado por Exelis Visual Information Solutions en 1977, ARCGIS creado por Environmental Systems Research Institute en 1999, Global Mapper fundado por Blue Marble Geographics en 2001, QGIS un sistema de código libre lanzado en 2002, y GvSIG impulsado por la Generalidad de Valenciana en 2004. Luego de revisar el costo beneficio de estos cinco potentes programas de cómputo cartográfico, decidimos trabajar con la versión de GvSIG

1.12, pues este software nos brindó la posibilidad de manejar la información de las distintas bases de datos creadas y procesadas en otros paquetes complementarios de acceso libre o de bajo costo, tal como: Google Earth, 3D-Route Builder 1.3.9.0, TCX-Converter 2.0.30, y Quikgrid 5.4.

De manera concomitante también se revisaron cinco bases de datos que contienen información altimétrica o modelos digitales de elevación y que se pudieran georeferenciar con una resolución de 50 m y una equidistancia de 1 a 5 m. Las fuentes de información altimétrica analizadas fueron Space Shuttle Radar Topography Mission liberada en 2009, ASTER Global Digital Elevation Model es un sensor japonés puesto en órbita en 1999, JAXA's Global ALOS 3D World desarrollado en 2006 y Light Detection and Ranging (LiDAR) creado a principios de los años 1960.

Al respecto, los modelos de elevación de Space Shuttle tienen una resolución en píxeles de 1° de latitud por 1° de longitud (110 x 110 km) por lo que su resolución no fue compatible con la cartografía que se requirió en la presente investigación; la equidistancia de ASTER es de 5 metros y una potente resolución de 50 metros en promedio pero desde 2008 muchos de sus datos fueron declarados públicamente no operativos por la NASA; LiDAR es un método de topografía por reflexión laser de precisión milimétrica, muy empleado en arqueología, geografía, geomorfología y silvicultura, pero de elevados costos de operación; por último ALOS es el conjunto de datos con una resolución horizontal de aproximadamente 30 metros de malla proporcionada por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón, el único inconveniente es que sólo cuenta con información en formato raster o imágenes satelitales en distintas bandas, de modo que la cantidad de información requerida para procesar a toda la República Mexicana equivaldría a unas 750 cartas análogas escala 1: 50,000.

De modo que de estas cinco potentes bases, nos fue imposible obtener información de equidistancia menor a 5 m, con resolución horizontal de 50 metros, por lo que tuvimos que idear un método capaz de generar cartografía vectorial a escalas grandes, de 1: 50,000 con equidistancia cada 10 metros pero en formato shape compatible con softwares libres. Hechas las salvedades, tenemos que la ruta metodológica que nos ayudó a producir una cartografía digital con una equidistancia menor a 5 m y una resolución horizontal de 50 m, contó con las etapas siguientes:

En una hoja de cálculo de Open Office 4.1.1, se construyó una base de datos de coordenadas UTM, con una equidistancia de 50 m en mallas con cobertura de 10 x 10 km. El documento de salida fue un archivo con formato DBF.

1. Cada malla de 10 x 10 km se abrió desde GvSIG para generar un mapa vectorial de puntos. El documento de salida fue un archivo con formato SHP.
2. Topológicamente, transformamos el mapa de puntos en un mapa de líneas denominado polilínea. El

documento de salida fue un archivo con formato KML.

3. El mapa de líneas se abrió desde Google Earth para asignarle un datum compatible y para potenciar la posibilidad de albergar una coordenada z. El documento de salida fue una base de datos con coordenadas X, Y, pero con valores 0 para la coordenada z, todo en formato KML.
4. Transformamos la base de datos X, Y, 0 a X,Y, Z mediante el uso de 3D-Route Builder El documento de salida fue una base de datos con coordenadas X, Y, Z en formato KML.
5. Con ayuda de TCX-Converter la base de datos X, Y, Z.KML se exportó a formato CSV.
6. La base de datos X, Y, Z.CSV se abrió desde Quikgrid para generar una interpolación en función de la coordenada z. La equidistancia asignada fue 1 metro y la resolución horizontal fue de 50 metros. El documento de salida fue un mapa topográfico virtual con formato DXF.
7. Geométricamente, desde GvSig, se abrió el mapa topográfico virtual para transformarlo de formato DXF a formato SHP. Todo el proceso se iteró hasta confeccionar toda la línea de costa de la República Mexicana (figura 1).

Resultados

La pregunta guía de la presente investigación fue: ¿Cómo se reconfiguraría el territorio mexicano tras la máxima crecida del nivel del mar? Sabemos hoy en día que los casquetes polares contienen alrededor de 21 millones de km³ de hielo, con ese volumen de hielo, si se derritiera, se estima que el mar en promedio ascendería 66 metros su nivel. El problema es que no hay certeza en las tasas de deshielo para el próximo siglo, puesto que su mecanismo es muy complejo ya que involucra diversos estudios tanto de las ciencias físicas como de las ciencias sociales. Sin embargo, dada la tendencia natural de la Tierra hacia su paroxismo interglacial, más el incremento de calor derivado de las actividades antropogénicas, hemos decidido modelar los territorios de la República Mexicana que en un futuro, geológicamente hablando, posiblemente queden bajo el agua.

Si el mar entrara a ocupar el espacio geográfico mexicano hasta la cota de 67 metros sobre el nivel del mar, el país perdería alrededor de 291,922 Km², equivalente al 15% del total d su territorio. La mayor parte de ese territorio se lo ganaría a la Llanura Costera del Golfo de México, seguido de la Península de Yucatán, luego la Llanura costera del Noroeste. En tanto que la Península de Baja California cedería toda la ensenada del puerto de San Carlos así como la de Guerrero Negro (figura 2).

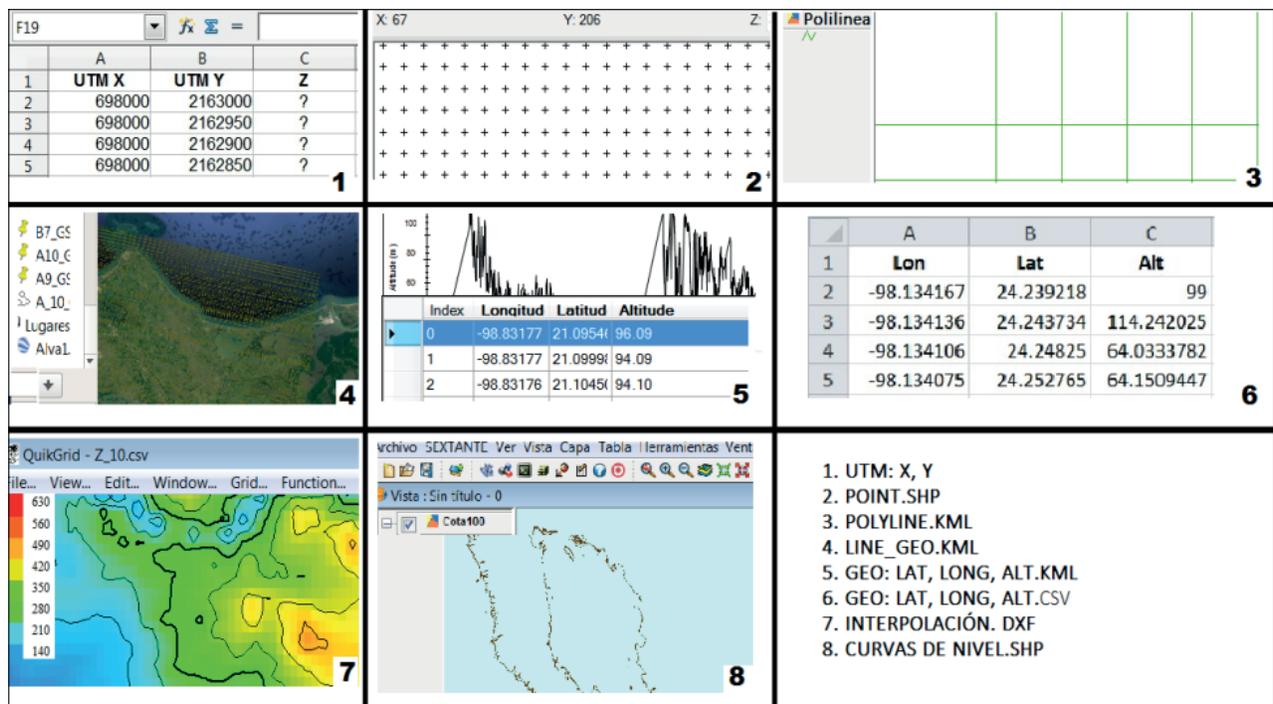


Figura 1: Etapas para la construcción de una curva de nivel usando datos satelitales.

Fuente: Elaboración propia



Figura 2: Línea de costa teórica de la República Mexicana bajo el supuesto del descongelamiento total de los casquetes polares

Fuente: Elaboración propia

Bajo ese escenario catastrófico, la población en riesgo asciende a más de 22.6 millones de habitantes. Es de particular importancia considerar los casos de las ciudades costeras de Tijuana, Mérida, Mexicali, Culiacán, Acapulco, Cancún, Reynosa, Matamoros y Veracruz, puesto que todas ellas cuentan con más de medio millón de habitantes viviendo por debajo de la cota de 67 msnm. Lo que las hace vulnerables no sólo a una crecida súbita del nivel del mar a consecuencia del derretimiento de los casquetes polares, sino a olas gigantescas producto de tsunamis, como el ocurrido en Tafjord, Noruega en 1934, cuyas olas superaron los 62 metros de altura.

La península de Yucatán quedaría reducida en un 71%. Siendo el estado de Yucatán la entidad con mayor pérdida de territorio, seguido de Quintana Roo y Campeche. El sur oeste de Quintana Roo se convertiría en una serie de ensenadas con dirección preferencial norte-sur. La costa norte de Yucatán retrocedería 150 km en promedio, y el territorio de Campeche quedaría repartido entre continente y una isla o península (figura 3).

En la Llanura Costera del Golfo quedarían anegados alrededor de 99,597 km². La mayor penetración ocurriría en la cuenca norte del río Pánuco, donde el mar se remontaría 140 km tierra adentro, mientras que en el norte de Tamaulipas la línea de costa se reubicaría a 130 km, por el mismo fenómeno la desembocadura del río Papaloapan se movería

100 km hacia el oeste de su ubicación actual. Sin embargo el caso más grave lo podría experimentar la Chontalpa, puesto que ésta prácticamente desaparecería junto con el estado de Tabasco.

El escenario planteado afectaría a la Llanura Costera del Noroeste mayoritariamente en su porción central justo frente a la ciudad de los Mochis, Sinaloa, donde un aumento del nivel del mar de 67 metros movería en 100 km la zona de pleamar. El caso del noroeste del estado de Nayarit, es particularmente significativo, pues a pesar de que en esa región la línea de costa sólo se recorrería 50 km hacia continente, corre el riesgo de que en algún momento las Islas Marías sufran algún desprendimiento de su talud, provocando un gran tsunami en poblados como Santiago Ixcuintla, Tecuala o el puerto de San Blas. Luego, en el estado de Sonora, tres de sus ciudades más importantes están en riesgo ante la crecida súbita del nivel del mar, puesto que Navojoa, Cd. Obregón y Guaymas se encuentran localizadas por debajo de la cota de los 45 msnm.

Por último la Península de Baja California perdería poco más del 25% de su territorio, y aunque si bien es cierto que el 70% de estas pérdidas territoriales las sufriría Baja California Sur, los cambios demográficos más significativos o población en riesgo están en Baja California Norte, puesto que parte de la ciudad de Tijuana se encuentra a menos de 65 metros de altura sobre el nivel del mar, y la ciudad de

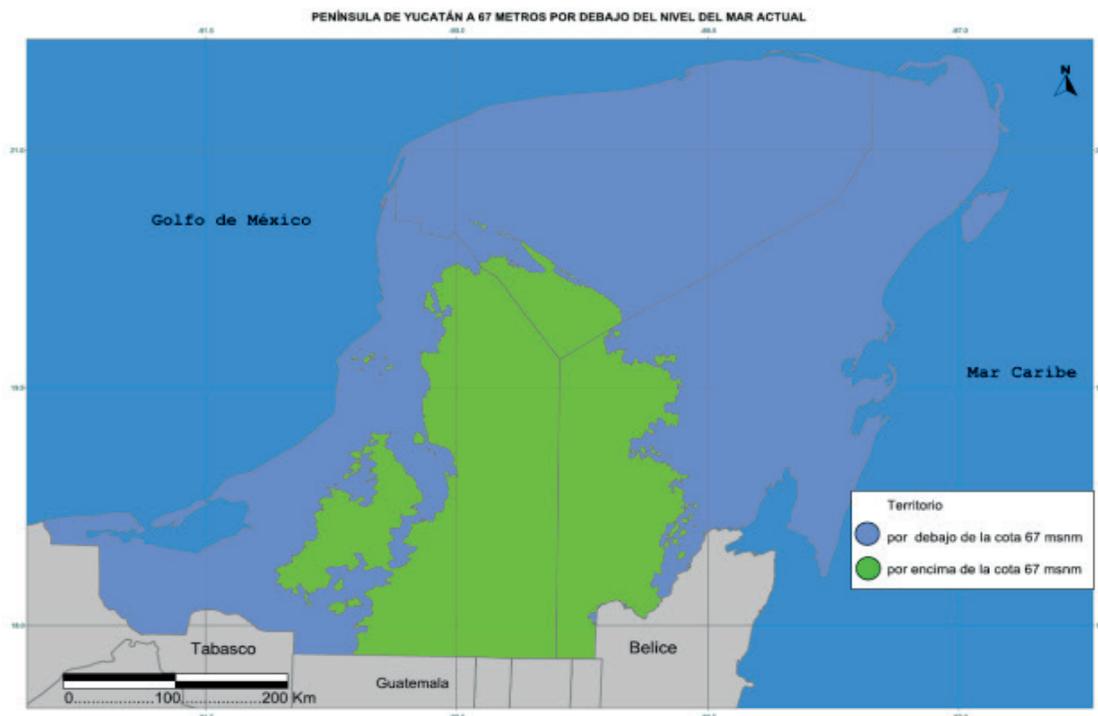


Figura 3: Península de Yucatán bajo el supuesto del descongelamiento total de los casquetes polares

Fuente: Elaboración propia

Mexicali a menos de 5 msnm. Al respecto, aunque Tijuana está más poblada que Mexicali, esta última es la que se encuentra más en riesgo ante crecidas extraordinarias del nivel del mar, como las que se pueden desencadenar en caso de que se derritiera el hielo de los casquetes polares.

Discusión de resultados

Las principales diferencias que se obtienen al comparar los resultados obtenidos en la presente investigación con otros trabajos, como los del arquitecto de software británico Alex Tingle, quien fusionó Google Maps con algunos datos de elevación costera de la NASA, para evaluar el impacto de las inundaciones entre 0 y 14 metros (Monmonier, 2008), son: las simulaciones informáticas no consideran los datos de marea, que para el caso de México, las variaciones de marea van de 0.5 hasta los 2 metros de altura; los datos de relieve de la Nasa, anteriores al año 2000, tienen errores de sobre estimación en función de estructuras como árboles y construcciones; en algunos sitios la Nasa no cuenta con registros de elevación; dichas simulaciones no analizan los previsible patrones geomorfológicos de erosión costera, es decir, asumen que la cota resultante sería la línea de costa, cosa que resulta imposible; por último, el formato vectorial de nuestros resultados es más indicado para

trabajar y contrastar nuestro modelo con información de carácter censal, de modo que no sólo estamos en posibilidad de mostrar las zonas cero sino de advertir sobre las áreas geoestadísticas con índices de vulnerabilidad social elevados.

Conclusiones

Hasta la fecha sigue siendo incierto el futuro de los procesos criogénicos y glaciológicos del continente antártico, desde el paradigma gradualista se pronostica una crecida del nivel del mar para el periodo de 2000 a 2100 no mayor a medio metro. Sin embargo recientes disciplinas académicas, tal como la reología, y la gravimetría glacial dudan de tales oscilaciones seculares. Lo cierto es que las grietas de tensión que se presentan en la periferia del continente antártico, dada la dirección preferencial del abatimiento secular de la oblicua o trópico de cáncer, irán en aumento durante este siglo. Es decir, posiblemente el deshielo del continente antártico sea multifactorial.

Por tales incertidumbres hemos calculado la cota de 67 msnm o nivel máximo posible que podría alcanzar el mar océano en caso de que los casquetes polares quedaran libres de hielo. Por lo tanto estimamos que de presentarse tal escenario, la República Mexicana perdería un territorio de

291,922 km², equivalente al 15% del total nacional. Ahora bien, este ejercicio reveló que la población que vivía en la zona cero o bajo la cota de 67 msnm en el año de 2010 era de alrededor de 22.6 millones de habitantes.

Regionalmente, la Península de Yucatán sería la provincia fisiográfica con la mayor pérdida a consecuencia de este fenómeno, puesto que dicha plataforma perdería alrededor de 100,100 km² de territorio, equivalente al 71% del total peninsular, siendo el estado de Quintana Roo el más afectado, territorial y poblacionalmente hablando. Le seguiría la Llanura costera del Golfo de México, con una pérdida territorial de alrededor de 99,000 km², donde Tabasco es el caso más crítico, puesto que prácticamente todo el estado desaparecería bajo las aguas del mar. En tanto que la Llanura costera del Noroeste perdería alrededor de 63,000 km² en esta provincia fisiográfica, el estado de Nayarit se encuentra más en riesgo debido a la posibilidad de desprendimientos geológicos frente a sus costas. Por último la Península de Baja California reduciría su territorio unos 37,000 km².

Rereferencias

- Alley, R. B., & Whillans, I. M. (1984). Response of the East Antarctica ice sheet to sea-level rise. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C4), 6487-6493.
- Bindschadler, R. A. (1990). SeaRISE: a multidisciplinary research initiative to predict rapid changes in global sea level caused by collapse of marine ice sheets.
- Brooks, D. A. (1976). Sea Level Fluctuations off the Carolina Coasts and Their Relation to Atmospheric Forcing (No. NCSU-CMCS-77-6). *North Carolina State Univ Raleigh Center For Marine And Coastal Studies*.
- Chambers, R., & Davis, C. H. (1849). Ancient Sea-Margins, as Memorials of Changes in the Relative Level of Sea and Land. *The North American Review*, 69(144), 256-269.
- Grinsted, A., Moore, J., y Svetlana Jevrejeva, S. (2004). Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 ad. *Climate Dynamics*, 34(4): 461-472.
- Koerner, R. M., & Fisher, D. A. (1990). Climatic warming, glaciers and sea level. *Annals of Glaciology*, 14(1), 343-343.
- Laskar J, Robutel JF (1993): *The chaotic obliquity of the planets*. *Nature* 361: 608-612.
- Lingle, C. S., & Clark, J. A. (1979). Antarctic ice-sheet volume at 18000 years BP and Holocene sea-level changes at the West Antarctic margin. *Journal of Glaciology*, 24(90), 213-230.
- Monmonier, M. (2008). Web cartography and the dissemination of cartographic information about coastal inundation and sea level rise. In *International Perspectives on Maps and the Internet* (pp. 49-71). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pugh, D. T., & Vassie, J. M. (1980). Applications of the joint probability method for extreme sea level computations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69(4), 959-975.
- Sissons, J. B. (1966). Relative sea-level changes between 10,300 and 8,300 BP in part of the Carse of Stirling. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 19-29.
- Smith, J. (January 01, 1837). *On the last changes in the relative levels of the land and sea in the British Islands*. *Mem. Wernerian Nat. Hist. Soc*, 49-88.
- Smith, J. (1845). 3. Farther account of indications of Changes in the relative Levels of the Sea and Land. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1, 153-153.
- Thomson, W. (1888). XXXV. Polar Ice-caps and their Influence in Changing Sea Levels. *Transactions of the Geological Society of Glasgow*, 8(2), 322-340.
- Tylor, A. (1853). *On changes of the sea-level effected by existing physical causes during stated periods of time*. London: Printed by Taylor and Francis.
- Warrick, R., & Farmer, G. (1990). The greenhouse effect, climatic change and rising sea level: implications for development. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 5-20.
- Wexler, H. (1961). Ice budgets for Antarctica and changes in sea-level. *Journal of Glaciology*, 3(29), 867-872.
- Wyrтки, K. (1977). Sea level during the 1972 El Niño. *Journal of Physical Oceanography*, 7(6), 779-787.
- National Geographic, (2013). Rising seas. National Geographic. Septiembre de 2013.