

Impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Quintana Roo, México



Adrián Pedrozo Acuña

Julio, 2012

Versión 2.0

1. Introducción

El cambio climático global es la mayor amenaza que enfrenta la vida tal y como hoy la conocemos porque eleva la temperatura promedio del planeta. Por pequeña que sea, la variación de temperatura afecta el ciclo del agua, altera la frecuencia de los fenómenos climatológicos normales y hace más catastróficos los desastres naturales (erosión, sequías e inundaciones); a su vez, esto daña comunidades, cultivos y ecosistemas rompiendo el equilibrio ecológico en el cual se sustenta la vida actual en la Tierra.

El cambio climático está afectando a todo el planeta, provocando cientos de miles de víctimas cada año e impactando diversas actividades económicas. Se trata de un fenómeno tan complejo que sus causas e impactos están relacionadas con todos los ecosistemas y con diversos ámbitos de la actividad humana: los océanos y los ecosistemas marinos; los bosques y la rica biodiversidad que albergan; las formas en que producimos nuestros alimentos (agricultura y ganadería); el agua dulce; las formas de producir, distribuir y consumir la energía, por mencionar algunos.

Los efectos del cambio climático son visibles ya en todo el mundo, pero la distribución de la intensidad de sus impactos es desigual. En América Latina y el Caribe están aumentando las

condiciones climáticas extremas de toda índole y cada vez son más frecuentes fenómenos como sequías, fuertes lluvias, olas de calor, grandes incendios, etc. ([PNUMA/GRID, Arendal](#)).

La elevación del nivel del mar es probablemente el impacto antropogénico más importante del cambio climático en este siglo ([Grinsted, et al., 2009](#)). El enfoque utilizado por el IPCC ([Meehl, et. al, 2007](#)), para estimar la elevación futura del nivel del mar, ha sido la de modelar sus dos principales componentes: la expansión térmica y la fusión del hielo.

El nivel del mar es una importante variable oceanográfica afectada por el cambio climático. De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007), datos globales indican que en el periodo comprendido entre 1961 y 2003 el nivel del mar ha aumentado a una tasa promedio de 1.8 ± 0.5 mm año⁻¹. Estos datos muestran también que en el período 1993-2003 la tasa de incremento fue de 3.1 ± 0.7 mm año⁻¹, aunque no se sabe si el aumento en este último período es debido a oscilaciones naturales de escala decadal o si puede ser atribuido al cambio climático.

Las estimaciones del siglo XX muestran que el nivel medio mundial del mar se elevó a una tasa de unos 1.7 mm año⁻¹. El cuarto reporte (AR4) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) pronosticó un incremento en el nivel medio del mar global de hasta ~60cm para el año 2100, como resultado del calentamiento de los océanos y el derretimiento de los glaciares ([IPCC, 2007](#)).

La recopilación de datos de satélite (TOPEX/POSEIDON, Jason 1 y Jason2) ha confirmado a nivel mundial, una clara tendencia hacia el incremento en el nivel del mar global durante la última década (ver Figura 1.1).

Gráfico generado con datos de los satélites TOPEX/POSEIDON y J1, J2 disponibles @ GNES

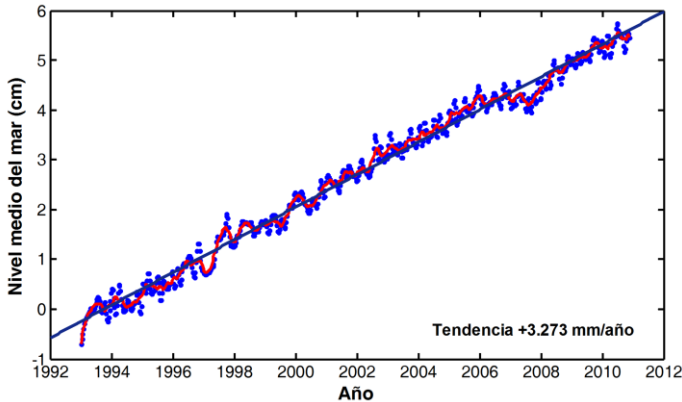


Figura 1.1. Tendencias mundiales del nivel del mar registradas por altimetría de satélite en la últimas dos décadas.

Las distintas proyecciones presentadas hasta ahora, consideran diferentes fenómenos climáticos como forzadores principales del incremento en el nivel del mar, tal y como se resume de forma gráfica en la Figura 1.2. Sin embargo, cabe destacar que los pronósticos más creíbles están basados en relaciones semi-empíricas, por lo que es necesario desarrollar modelos más apegados a la física con el propósito de reducir la incertidumbre en los pronósticos.

Estos resultados indican de forma clara que es fundamental desarrollar proyecciones más certeras para la planeación de infraestructura de protección y adaptación en las zonas costeras.

Por ejemplo, datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), estiman que a nivel mundial 500 Millones de personas se encuentran en riesgo ante una subida del nivel del mar de +1m. Aunado a lo anterior, las diferencias registradas entre los diferentes pronósticos de incremento en el nivel del mar para el año 2100, indican que con mucha seguridad las proyecciones del IPCC AR4 están subestimando el fenómeno.

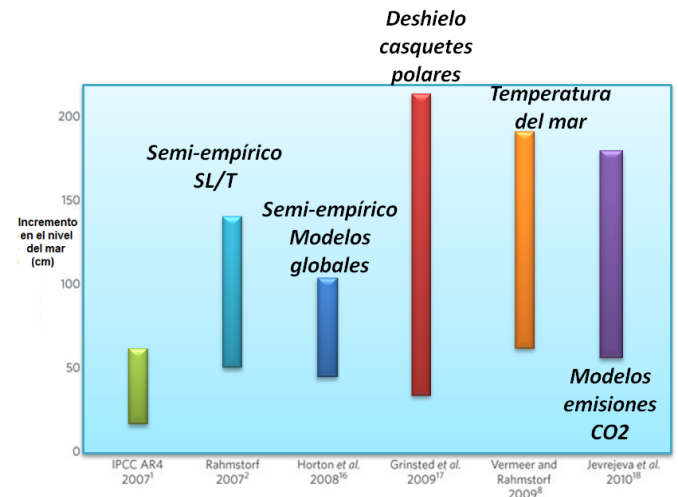


Figura 1.2. Proyecciones del incremento en el nivel del mar global para el año 2100.

A pesar de la variación en las proyecciones, los resultados indican de forma clara que el cambio climático incrementará el riesgo de inundaciones e intrusión salina en aguas superficiales (Nicholls, 2002). Por ejemplo, es sabido que, en ausencia de otros cambios, un incremento en el nivel del mar de 38 centímetros aumentará en cinco veces el número de personas expuestas a inundaciones inducidas por la presencia de marea de tormenta sobre las costas (Nicholls et al., 1999).

El efecto inmediato consiste en el incremento de inundaciones en zonas costeras; sin embargo, es sabido que efectos a largo plazo también ocurrirán conforme la costa se ajuste a las nuevas condiciones de forzamiento. Estos impactos incluyen más erosión costera e intrusión salina en aguas subterráneas.

Por otra parte, se sabe que a menos que los humedales costeros (e.j. marismas y manglares) cuenten con la suficiente disponibilidad de sedimentos para mantener el ritmo de la elevación del nivel medio del mar, éstos verán reducida su extensión superficial. Estos impactos físicos tendrán asociados a ellos efectos socioeconómicos, directos e indirectos, que parecen ser tremendamente negativos. Por ejemplo, en países en vías de desarrollo, para un incremento de +0.6m sobre el nivel del mar en el año 2100, se han proyectado costos de ~100 Billones de dólares (Nicholls et al., 2007, ver Figura 1.3).

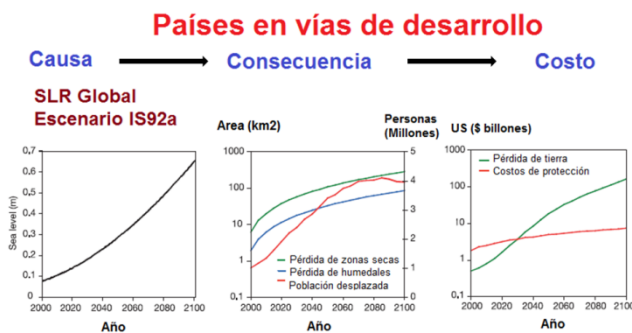


Figura 1.3. Costos asociados a un escenario de incremento en el nivel del mar en países en vías de desarrollo (Fuente: Nicholls et al. 2007).

Además, estudios abocados a la estimación de los daños en la zona costera señalan que es probable que estos se incrementen en un 20% si la costa está sometida a un proceso de erosión (West et al., 2001; Yohe y Schlesinger, 1998).

Los efectos del cambio climático se verán reflejados en que tan vulnerables pueden ser los ecosistemas y en su poder de adaptación. Las zonas costeras se caracterizan por una rica diversidad de estos entornos, así como a un gran número de actividades socioeconómicas.

Recientemente, México ha sido catalogado como uno de los países con más territorio localizado dentro de zonas costeras de baja elevación, las cuales se definen como el área continua a lo largo de la costa que tiene menos de 10 metros de elevación sobre el nivel del mar (McGranahan et al., 2007). En consecuencia, la necesidad de investigar los impactos del incremento en el nivel del mar en la zona costera es muy evidente.

Entre los estados costeros de México, Quintana Roo es de los estados más vulnerables ante los efectos del incremento en el nivel del mar y la presencia de mareas de tormenta más severas. Sin embargo, los impactos que resultan de estos forzamientos sobre la zona costera del Estado son inciertos. Tampoco se tiene certeza sobre la capacidad de adaptación de la sociedad para sobrellevar las consecuencias. El Estado de Quintana Roo representa el 2.3% del área total del país y posee el 10.6% del litoral nacional. Más aun, la industria turística ubicada en la zona

costera del Estado representa un ingreso económico de gran importancia al país.

Así, gran parte de la economía mexicana depende de la existencia de buenas condiciones climáticas en la zona litoral. Por lo tanto, es de gran trascendencia para el país, que se realice una valoración de los impactos que el incremento en el nivel del mar tendrá sobre la zona costera.

2. Objetivos

El objetivo general del ejercicio realizado por la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo en conjunto con el Banco Mundial, consiste precisamente en la evaluación de los impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del estado. Para ello se utiliza una metodología de última generación que permite establecer una valoración económica de los mismos. Además, este ejercicio considera el empleo de tres posibles escenarios de incremento en el nivel medio del mar hacia el año 2100.

La información así generada, representa la base de una valoración que puede ser realizada con un mayor nivel de detalle, de tal suerte que esta sirva como base para guiar el proceso de adaptación al cambio climático en el Estado de Quintana Roo.

Para alcanzar este objetivo, el presente reporte está dividido de la siguiente forma, la segunda sección introduce de manera general las principales características físicas y geográficas del

Estado de Quintana Roo, así como las condiciones socioeconómicas más sobresalientes. La tercera parte introduce la metodología utilizada para la valoración de los impactos del incremento en la zona costera del estado. Por último la sección cuatro presenta los resultados preliminares obtenidos bajo los conceptos de población y manglares afectados por los diversos escenarios probados.

La finalidad principal consiste en proporcionar información útil para la Secretaría Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo (SEMA), de tal suerte que el conocimiento permita a los tomadores de decisiones realizar acciones informadas al proponer los planes de desarrollo estatal y municipal.

3. Contexto General del Estado de Quintana Roo

Características geográficas

Ubicado en la península de Yucatán, el estado de Quintana Roo es uno de los cuatro estados limítrofes con Centroamérica y Junto con Baja California sur, es la entidad más joven del país (Promovidas a condición de Esta en 1974). Colinda al norte con el Estado de Yucatán, al oeste con el Mar Caribe, al sur con la bahía de Chetumal, Belice y Guatemala y al oeste con los Estados de Campeche y Yucatán.

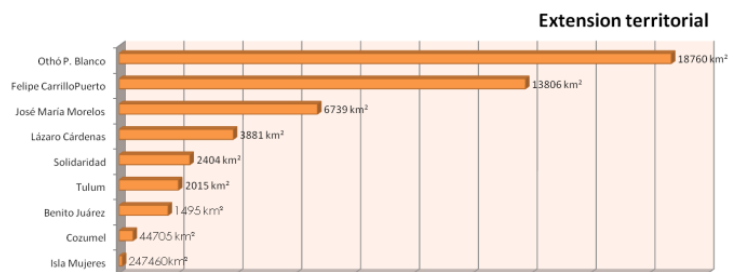


Figura 2.1: Ubicación del estado de Quintana Roo

Sus coordenadas geográficas son: al norte 21°36', al sur 17°49' de latitud norte; al este 86°43' y al oeste 86°43' de longitud oeste. (Figura 2.1).

Quintana Roo cuenta con una extensión territorial de 44.705 Km² que representa el 2.3% del total nacional. En cuanto a la extensión de sus litorales, el Estado cuenta con 1.176 km de litorales, representando el 10.6% de total de las costas de la República (Figura 2.4).

En cuanto a la distribución política del Estado, Quintana Roo consta de diez municipios: Benito Juárez, Cozumel, José María Morelos, Lázaro Cárdenas, Solidaridad, Tulum, Bacalar y Othon P. Blanco. La capital del Estado es la ciudad de Chetumal.(Figura 2.2).



Fuente: Consejo Estado de Población Quintana Roo

* Extensión sin incluir el municipio de Bacalar Tomado de Pozo et al 2011

Figura 2.2. Extensión territorial del Estado de Quintana Roo

Clima

El clima quintanarroense presenta en casi toda su extensión un clima cálido subhúmedo (Aw1, Aw1(x'), Aw2(x'),Aw0, Aw0(x')). En la isla de Cozumel el clima es cálido húmedo (Am(fm)). La temperatura media anual es de 26°C, con una temperatura máxima promedio de 33°C que se

presenta entre los meses de Abril y Agosto. La temperatura mínima promedio se encuentra alrededor de 17°C y se presenta en el mes de Enero.

La precipitación media anual es en promedio de 1300 mm, estando presente durante todo el año. La temporada con la mayor intensidad de lluvias está comprendida entre los meses de junio y octubre. (Figura 2.3)

Fisiografía y suelos

Quintana Roo hace parte de una gran masa y poco profunda laja caliza denominada Losa de Yucatán. En general el relieve es plano, con suaves inclinaciones no mayores de 0.01% y con pendientes que van en dirección oeste hacia el Mar Caribe. Existen algunas colinas de tamaño pequeño y numerosas hondonadas. La altura media es de 10 msnm.

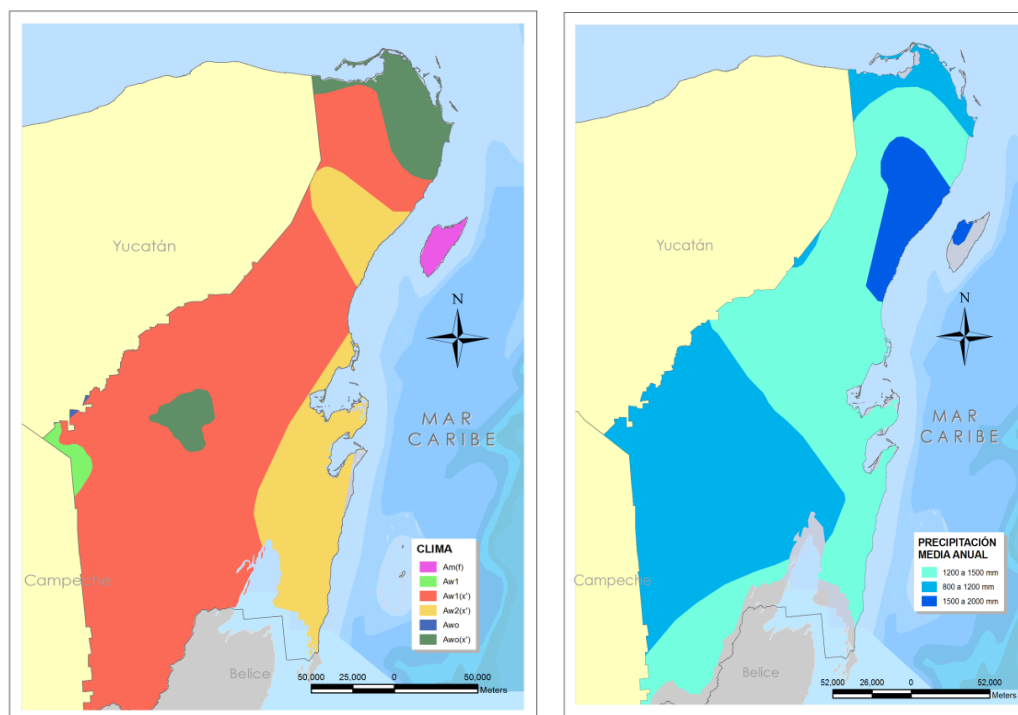


Figura 2.3. Unidades climáticas y precipitación media anual del Estado de Quintana Roo



Figura 2.4. Zona costera de Quintana Roo colindante con el mar Caribe
Foto: Gabriel Navarro Tomado de: Pozo et. Al (2011)

En cuanto a su fisiografía, el Estado se encuentra ubicado en la provincia fisiográfica XI. Esta provincia consiste en una extensa plataforma de rocas calcáreas marinas que han ido emergiendo hace millones de años. En esta provincia, a su vez, se descompone de tres subprovincias: Carso y Lomeríos de Campeche, Carso Yucatéco y Costa Baja de Quintana Roo. (Figura 2.5)

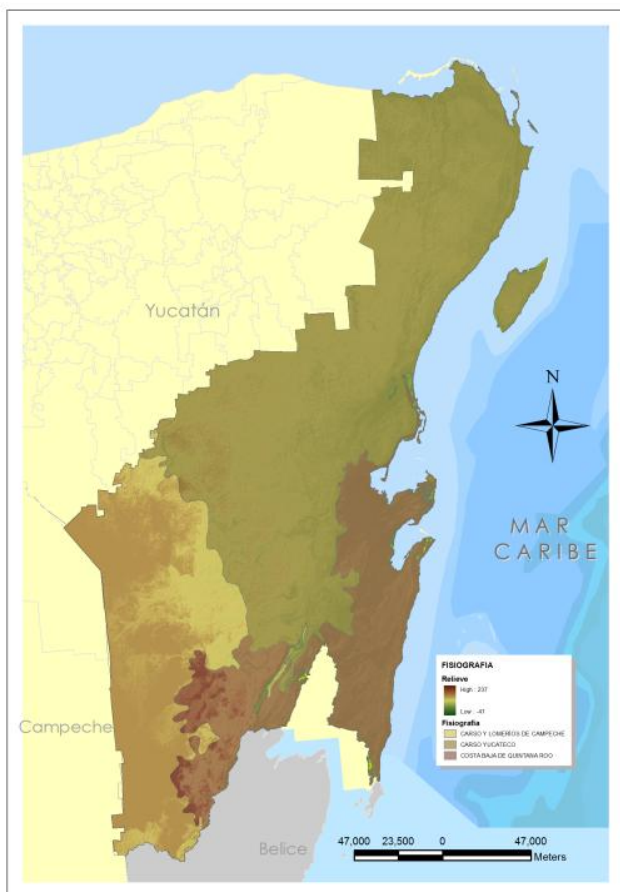


Figura 2.5. Fisiografía del Estado de Quintana Roo

Flora y Fauna

El Estado de Quintana Roo es uno de los estados con la mayor diversidad del país. El 90% de su territorio está conformado por selvas bajas, en la que albergan más de mil especies de flora, 360 especies de aves, 105 de mamíferos y 83 especies de anfibios y reptiles (COP16/CMP6, 2010).

En cuanto al número de humedales, Quintana Roo cuenta con 13 humedales reconocidos por la convención Ramsar como sitios de importancia internacional. Estos humedales cubren una superficie de 1.071.016Ha. Entre estos humedales se destacan los manglares, que cubren una superficie de 71016 Ha.

Las Áreas Naturales federales Protegidas cuentan con 8 parques nacionales, 2 centros de protección de flora y fauna, 3 centros de Reserva de la Biosfera y Un Santuario que es la Playa de la Isla Contoy (ver Figura 2.6).

Parques nacionales	Costa Occidente de Isla Mujeres, Punta Cancún, Punta Nizuc, Isla Contoy, Tulúm, Arrecife de Puerto Morelos, Arrecifes de Cozumel y Arrecifes de Xcalak.
Protección de flora y fauna	Uaymil y Yum Balam.
Reserva de la biosfera	Banco Chinchorro, Sian ka'an y Arrecifes de Sian ka'an.
Santuario	Playa de la Isla Contoy.

FUENTE: INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa. México. 2005

Tabla 2.1. Área naturales protegidas

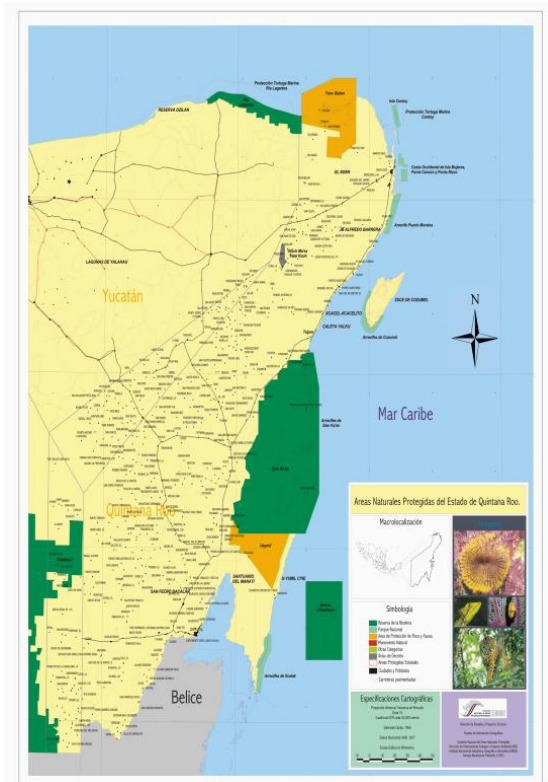


Figura 2.6. Áreas Naturales Protegidas del Estado de Quintana Roo Fuente:CONANP

Hidrología

Hidrología superficial

A pesar de su alta precipitación (>1.000 mm anuales), el Estado cuenta con escasos ríos y arroyos. La mayoría de las corrientes superficiales son flujos transitorios de recorrido muy corto y bajo caudal, desembocando en su mayoría en sistemas lagunares. Los ríos más importantes de Quintana Roo, se encuentran los Ríos Hondo (ver fotografía de la [Figura 2.7](#)), Azul, Escondido y Ucum.

Respecto a las lagunas, se destacan los cuerpos lagunares de Bacalar, San Felipe, La Virtud,

Guerrero y Milagros En Othon P Blanco, las lagunas de Chichankanab y Esmeralda en José María Morelos, y las Lagunas de Kaná, Noh-bec, Paytoro, Sac Ayín, X-Kojolí, Ocom y Chunyaxché en el municipio de Felipe Carrillo Puerto. Un resumen gráfico del sistema hídrico en el estado se presenta en la [Figura 2.7](#).

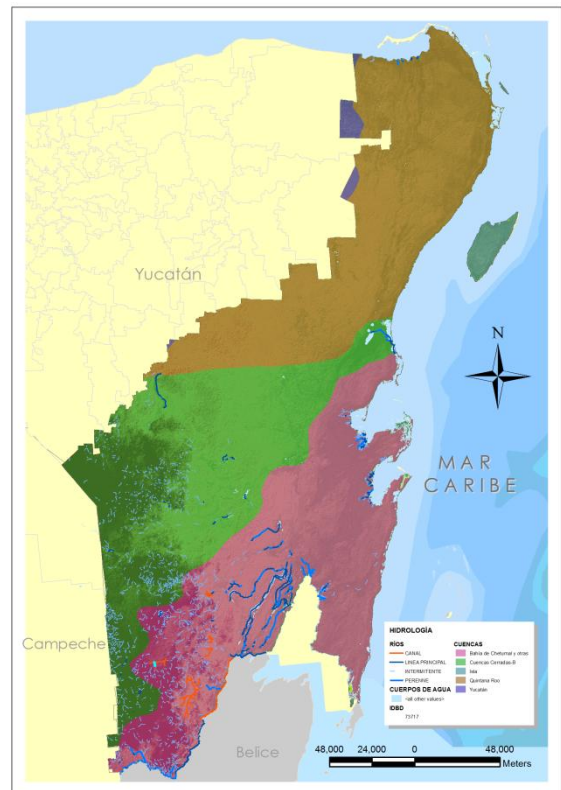


Figura 2.7. Hidrología superficial de Quintana Roo

Hidrología subterránea

Debido a la alta permeabilidad del suelo en el Estado de Quintana Roo, existe un gran número de corrientes subterráneas. En el territorio existen tres acuíferos, los cuales son explotados en su totalidad para todos sus usos. Esta explotación

representa el 99.8% de total de aprovechamiento hídrico en el Estado.

Los acuíferos, al encontrarse a poca profundidad de la superficie, presentan condiciones de sobreexplotación en diversos puntos, en especial en las zonas turísticas como son Cozumel, Cancún, y Playa del Carmen.

Uso del suelo

La superficie de Quintana Roo casi en su totalidad se encuentra cubierta por selva, El 10% corresponde a Manglar y una mínima parte a áreas agrícolas y pastizales.

En la actualidad, gran parte de superficie de selva áreas ha sido afectada por particas de agricultura nómada, y sólo en muy escasas regiones se cuenta con vegetación primaria o sin alteración.

En cuanto a la superficie destinada para la agricultura y la ganadería, la superficie destinada para estos fines comprende al 1% de la superficie estatal (ver [Figura 2.8](#))



Figura 8 Rio Hondo, Quintana Roo Fuente:viajeros.com

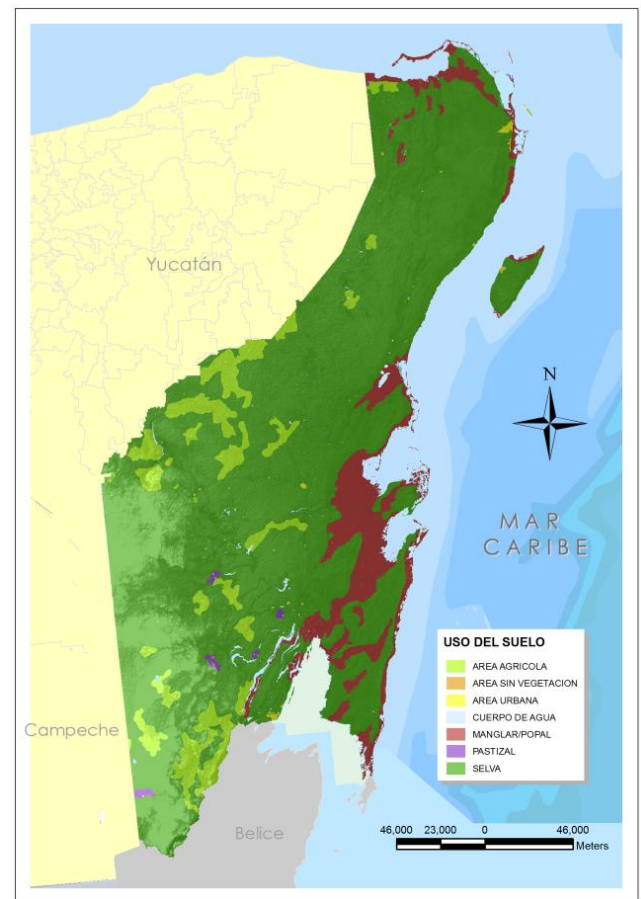


Figura 2.8. Uso de Suelo de Quintana Roo

Población

El crecimiento demográfico de Quintana Roo se comporta a un ritmo muy acelerado. A nivel nacional, es el Estado que presenta la tasa de crecimiento más elevada con 4.1% en el 2010 en comparación con el promedio nacional de 1.4%-([Figura 2.9](#)). Esta condición se debe principalmente a la alta migración de personas que van en búsqueda de mejores fuentes de ingreso. Sus destinos principales son las ciudades de mayor urbanización, lo cual ocasiona una sobrepresión de estas áreas.

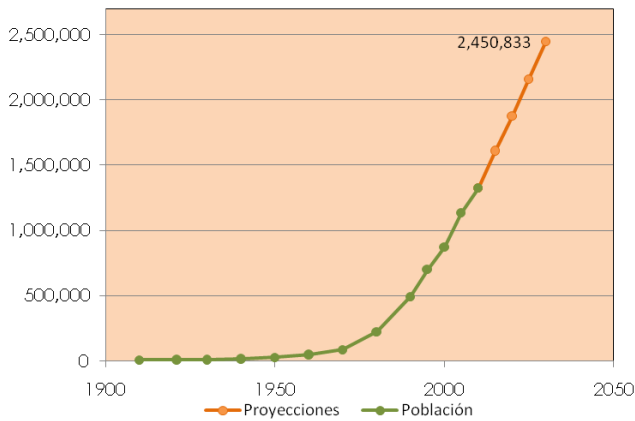


Figura 2.9. Crecimiento poblacional de Quintana Roo (1910-2030). Fuente CONAPO

Sin embargo, a pesar de todas estas presiones que vive el estado, Quintana Roo continúa siendo una de las entidades con el menor número de habitantes en el país. Conforme al último censo realizado por el INEGI en el 2010, la población total de Quintana Roo es de 1.325.578 habitantes, que representa el 1.3% del total nacional, de estos habitantes, el 88% habita en localidades urbanas y 12% en rurales. En la [Figura 2.10](#) se muestra la distribución de la población por edad y sexo.

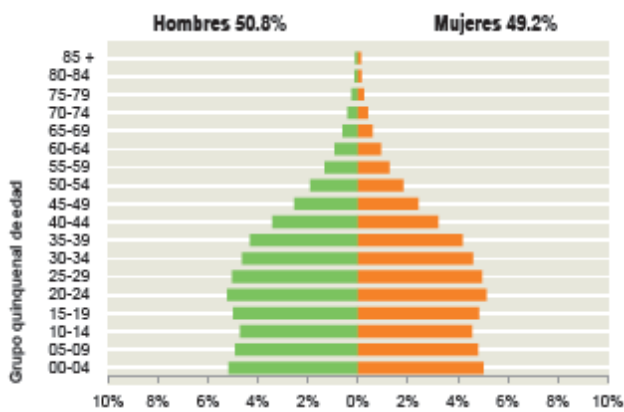


Figura 2.10. Características demográficas de la población, 2010 Fuente: INEGI Tomado de Pozo et al 2011

Distribución de la población

La distribución de la población a nivel municipal refleja una mayor presión demográfica en los municipios considerados turísticos. El 85% de la población se concentra en 20 localidades con más de 2.500 hab., mientras que el 15% de la población restante, se distribuye en 2.275 localidades. Los municipios de Benito Juárez y Othon P. Blanco, específicamente sus cabeceras municipales Cancún y Chetumal albergan el 70% de la población. La [Tabla 2.2](#) muestra la distribución municipal de la población en el Estado.

Clave del municipio	Municipio	Cabecera municipal	Habitantes (año 2010)
1	Cozumel	Cozumel	79 535
2	Felipe Carrillo Puerto	Felipe Carrillo Puerto	75 026
3	Isla Mujeres	Isla Mujeres	16 203
4	Othón P. Blanco	Chetumal	244 553
5	Benito Juárez	Cancún	661 176
6	José María Morelos	José María Morelos	36 179
7	Lázaro Cárdenas	Kantunilkin	25 333
8	Solidaridad	Playa del Carmen	159 310
9	Tulum	Tulum	28 263

Tabla 2.2. Distribución de la población Fuente INEGI: Panorama socio-demográfico *La población de Bacalar se encuentra incluida en el municipio Othón P. Blanco

Economía

La economía de Quintana Roo ha sido muy dinámica durante el último siglo. A mediados del siglo XX, el modelo económico quintanarroense se solventaba sobre la explotación forestal, siendo el caucho su principal producto. Pero sólo fue que a mediados de los setenta, la reducción en los volúmenes de explotación, sumado a los cambios políticos vividos como fueron la formación del Quintana Roo como libre y soberano y la política turismo que adoptó el Banco de México que fue los precursores del cambio económico que se experimentó en la región.

Actualmente el sector de prestación de servicios, que se encuentra ligado del turismo, contiene el 88% del PIB estatal (Tabla 2.3), captando más de 154 mil millones de pesos en el 2010. En comparación con las demás entidades, el Estado contribuye con el **1.4% del PIB nacional** ocupando el puesto 23.

En cuanto al PIB per cápita estatal, el Estado ha mostrado un incremento considerable llegando a un valor promedio de \$146.304. La Figura 2.11 muestra el comportamiento del PIB per cápita estatal para el periodo de 1993 a 2008.



Figura 2.11. PIB per cápita estatal FUENTE: IMCO con datos de CONAPO y SHCP

PIB 2010	Quintan Roo	Nacional	% Part. Estatal
	Total	Total	
Actividades Primarias	1,889	439,244	1.1%
Agricultura, ganadería, forestal, pesca y caza	1,889	439,244	1.1%
Actividades Secundarias	19,535	4,320,102	11.0%
Minería	245	1,079,586	0.1%
Electricidad, agua y suministro de gas por ductos	1,665	156,217	0.9%
Construcción	13,391	840,202	7.6%
Industrias manufactureras	4,235	2,244,097	2.4%
Actividades terciarias	155,389	7,745,399	87.9%
Comercio hoteles y restaurantes	65,856	2,333,354	37.2%
Transportes, correos y almacenamiento	15,807	889,037	8.9%
Servicios educativos y médicos	9,848	997,524	5.6%
Servicios financieros de seguros e inmobiliarios	20,037	1,484,195	11.3%
Actividades del gobierno	7,981	554,930	4.5%
Otros servicios (Servicios profesionales, científicos y técnicos, desechos, esparcimiento cultural y recreativo, información)	35,859	1,434,875	20.3%
Total	176,813	12,504,744	100.0%

Tabla 2.2. Actividades económicas de estado por Sectores FUENTE: INEGI 2010

3. Metodología

Modelo DIVA (Evaluación dinámica e interactiva de la vulnerabilidad)

El modelo DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability Assessment) es una herramienta de análisis integrado de sistemas costeros, el cual mide cuantitativamente los impactos biológicos y socio-económicos del incremento del nivel del mar a causa del cambio climático y del desarrollo socioeconómico (DINAS-COAST Consortium, 2006 Vafeidis *et al.*, 2008; Hinkel *et al.* 2009). Este modelo, a su vez permite explorar posibles estrategias de adaptación.

Desarrollado en primera instancia por el proyecto de la Unión Europea llamado DINACOAST (Dynamic and Interactive Assessment of National, regional, and Global Vulnerability of Coastal Zones to Climate Change and Sea-Level Rise), el modelo DIVA se enfoca en el desarrollo de un lenguaje común entre diferentes disciplinas para generar un concepto integrado de manera modular de la vulnerabilidad costera.

La metodología del modelo parte del análisis de susceptibilidad desde diferentes ámbitos. Cada análisis es organizado a través de módulos, los cuales representan los subsistemas que luego se integraran al modelo DIVA. Esta característica da al modelo su capacidad de dinamismo, interactividad y flexibilidad, permitiendo trabajar con diferentes fuentes de información y análisis. Finalmente cada análisis es integrado al sistema a

través de posibles escenarios de afectación en la región.

Para el estudio en la zona costera del Estado de Quintana Roo, la metodología se basa en la repercusión de diferentes escenarios climáticos debido al incremento nivel mar por el calentamiento global y compararlo con las características biológicas y socio-económicas de la región a través de técnicas de análisis de información geográfica (GIS). Estos impactos son determinados con y sin acciones de adaptación, de manera que los beneficios y los costos de protección sean considerados (Kedebe *et. al.*, 2010).

Escenarios de incremento del nivel del mar

Los escenarios extremos en el nivel medio de mar surgen de la combinación de la marea de tormenta, el nivel del mar, la subsidencia natural y la subsidencia inducida por la actividad humana (Nicholls *et. Al.*, 2008).

En el caso de la zona costera de Quintana Roo, las fuertes fenómenos de huracán (Figura 3.1) sumado a la presiones que causa la urbanización en áreas de costa, hace que los efectos del cambio climáticos sean más adversos.

El cálculo de los valores extremos en el nivel medio del mar (EWL) se encuentra dado por la siguiente ecuación (Abis *et. Al.*, 2011).

$$EWL = SLR + S100 + SUB_{Natural} \quad (1)$$

Otros sistemas a considerar en el estudio, y de los cuales se generaron escenarios de afectación fueron: la afectación en los servicios de transmisión de agua, electricidad y telefonía y los sistemas de interconexión terrestre y aérea

Los costos directos de afectación son calculados en torno a la afectación de bien o servicio repercute en total del PIB estatal. En el caso de población afectada, el costo de afectación es valorado a partir del PIB per cápita actual.

Una vez valorado este impacto, los costos son proyectados hacia escenarios futuros bajo índices constantes de crecimiento. Para la proyección de los costos de afectación se tomo en cuenta la tasa de crecimiento promedio anual del Estado de 2005-2009 (INEGI, 2011)

Teniendo en cuenta que la población afectada actual es diferente a la población afectada en años futuros, la población futura afectada es calculada mediante la proyección de la afectación actual afectada, considerando como índices constantes las tasas de natalidad, defunción, migración e inmigración registradas para el año 2010. La [Tabla 3.4](#) muestra los valores proyectados para los años 2005, 2030, 2050, 2080 y 2100.

Proyecciones	Años				
	2010	2030	2050	2080	2100
Población (miles)	1,362	2,668	5,228	14,336	28,088
PIB (millones)	176,813	238,141	320,741	501,344	675,238
PIB per cápita (miles)	129.84	174.87	235.52	368.14	495.83

Tabla 3.4. Proyección de la población y el PIB para el periodo (2005-2100)

Escenario ecológico

Con el propósito de determinar el impacto del incremento del nivel medio del mar desde una perspectiva ecológica, se utilizó la metodología propuesta por [Brander et. al. \(2005\)](#). Este método determina el impacto ecológico por medio de la estimación de las áreas afectadas como pérdida de manglar.

Los costos de este impacto se determinan por medio de la asignación de diversos servicios asociados a estas áreas naturales. En un escenario de subida del nivel medio del mar, estas áreas son determinadas por medio del cruce de información espacial referente a los incrementos del nivel del mar, en sus diversos escenarios, con aquellas regiones identificadas como mangle.

Así, los escenarios futuros son estimados mediante la proyección de los costos de afectación por hectárea de las áreas de manglar a 2100.

[Brander et. al.](#) Identificaron el costo de los distintos diversos servicios que estas áreas naturales otorgan. La [Figura 3.3](#) presenta los

valores definidos por hectárea de las zonas de manglar en dólares de acuerdo al servicio que prestan.

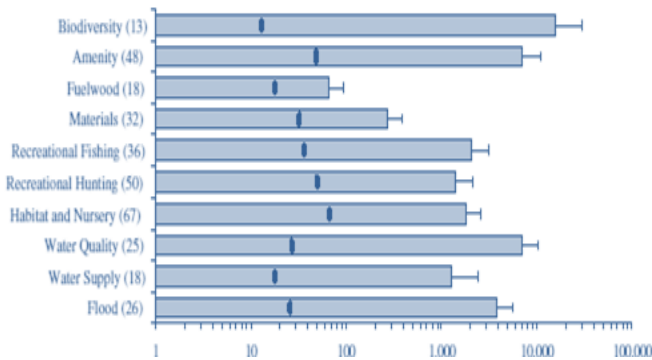


Figura 3.3. Valor de los manglares por servicio (Brander et. al., 2005)

Otro escenario a considerar en este estudio, hace referencia a la afectación de los escenarios de sobre-elevación del nivel medio del mar con los sistemas de abastecimiento de agua dulce, en especial con los pozos, cenotes, norias y ríos que cuenta el Estado. El cálculo de este escenario permite determinar la susceptibilidad de los sistemas de agua dulce a los efectos de salinización a causa de la intrusión de agua de mar.

Aplicación del modelo DIVA en el Estado de Quintana Roo

Una vez definida la amenaza física que representa el incremento en el nivel medio del mar en la costa de Quintana Roo, es posible realizar el cruce de la información con los factores sociales, económicos y ambientales más importantes del Estado (Figura 3.4), de tal suerte que se puedan proyectar los costos de las diferentes afectaciones que se

esperan bajo cada uno de los escenarios utilizados.

Esta operación se lleva a cabo por medio del procesamiento de la información geo-espacial con herramientas de sistemas de información geográfica (GIS) para la zona de estudio.

Dicho proceso tiene como punto de partida la generación de los mapas de inundación para cada uno de los escenarios definidos para el incremento del nivel del mar (en este estudio: 1m, 3m y 5m). Para generar esta primera información, se utiliza el modelo digital de elevaciones disponible por la Shuttle Radar Topographic Mission de la Agencia Espacial Estadounidense (SRTM-NASA), que tiene una resolución espacial de 90m.

Si bien es cierto que el nivel de detalle de esta información topográfica es gruesa, se acepta que puede ser útil para generar una primera evaluación de los posibles impactos en la zona costera. Sin embargo, se recomienda que en caso de requerir mayor detalle en la evaluación de los mismos, por ejemplo a una escala local, se utilice información con mayor detalle (ej. altimetría por rayo láser).

Las cotas así establecidas, permiten definir las áreas de afectación para cada escenario de nivel de mar empleado. Una vez obtenidos los escenarios de sobre-elevación del nivel del mar estos se relacionan con cada variable de análisis (ej. áreas de manglar o población). En particular, los valores a obtener se encuentran definidos por

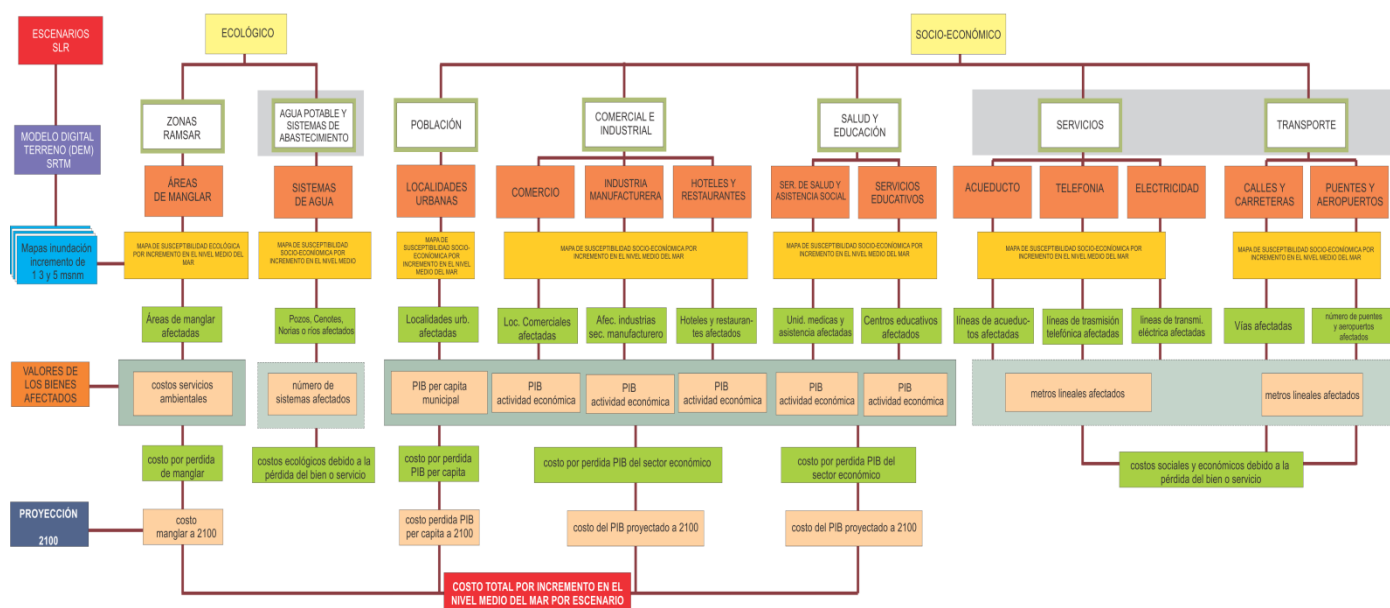


Figura 3.4. Marco esquemático del modelo DIVA para el Estado de Quintana Roo

Brown et. al. (2009) por medio de los siguientes parámetros:

Daño Residual (no monetario): Comprende la pérdida total de tierra (erosión o sumergencia), personas actualmente inundadas y migración forzada acumulada.

Pérdida de valor de humedales (monetaria): Comprende el valor monetario de los bosques costeros, las zonas de humedal sin vegetación y los manglares del Estado.

Total de los costos residuales: Comprende la pérdida de tierra, los costos de migración forzada, costos de salinización, costos de inundación y los costos de inundaciones fluviales.

Costos Totales de adaptación (monetario): Comprende los costos de alimentación artificial de playas, cuencas y humedales, y los costos en protección costera y fluvial.

Estimaciones de la Población afectada y valor del PIB estatal per cápita

La estimación del número de personas expuestas a los diferentes escenarios de incremento del nivel del mar, se determina a través de la relación entre la concentración de la población en zonas costeras y el área inundada. Para este caso, se utilizó como información base, la base de datos geo-espaciales de población por localidad disponible en la página web del INEGI, de esta forma la información fue cruzada con aquella obtenida para cada escenario de incremento en el nivel medio del mar. Con el número total de personas afectadas, se determina el valor socioeconómico por medio de la participación per cápita de la población expuesta en el total del PIB estatal.

La proyección del número total de personas expuestas y de su valor a lo largo del tiempo se determina con la proyección geométrica de los valores actuales de afectación. Según este método, el cálculo parte de la suposición que la población se incrementa con un porcentaje constante de cambio por unidad de tiempo (Naciones Unidas, 1952). El valor futuro de la población P_n se encuentra dado por la ecuación 2:

$$P_n = P_o (1+r)^t \quad (2)$$

Donde P_o es la población actual

r es el rango anual de incremento

t Es el periodo de tiempo en años

Para el cálculo de la población actual en el Estado de Quintana Roo, se tomo como base, La distribución poblacional del año 2000 asumiendo como tasa de crecimiento aquella reportada en el año 2010. Es posible utilizar el método de proyección geométrica de la población para la estimación de valores futuros de variables monetarias. Esta ecuación se conoce como la ecuación del valor futuro, donde el valor futuro del dinero es calculado bajo una tasa de crecimiento monetario constante. Por otra parte, para la proyección geométrica del PIB se utilizó como base aquella registrada en el año 2003 con una tasa de crecimiento promedio anual registrada de 2003 a 2008.

4. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos en la estimación de los impactos del incremento del nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Quintana Roo. Para ello, se utiliza la metodología descrita en la sección anterior que comprende una de las más avanzadas en el estado del arte. Este método incorpora, entre otros, la evaluación de los impactos ecológicos y socioeconómicos asociados a la amenaza. Los resultados comprenden la cuantificación y valoración de los impactos socioeconómicos y ecológicos originados por el incremento del nivel medio del mar.

Para el caso de este informe la estimación del costo total de afectación por afectación, comprende la valoración de los costos de población, industria, comercio, turismo y servicios educativos y de salud para los escenarios socioeconómicos. En el caso de los escenarios ecológicos el costo total consta de los costos de afectación de manglar.

4.1 Impacto Socioeconómico

Dado el alto grado de urbanización en las zonas costeras y su importancia en el desarrollo económico del Estado, Quintana Roo es altamente sensible al incremento del nivel medio del mar por efectos de cambio climático. A continuación se muestra el análisis del impacto socioeconómico en base a los escenarios de

población, comercial e industrial, salud y educación, servicios y transporte.

- **Población afectada**

Los resultados obtenidos para los escenarios de población afectada reflejan que cerca del 4% de la población total es afectada bajo el aumento de 1 metro en el nivel del mar. Ante el incremento de 3 metros la población afectada se estima en 9% y ante 5 metros de sobrelevación esta afectación asciende a 14%.

A nivel municipal el poblado presenta una mayor afectación es el municipio de de Benito Juárez, lo sigue de Lázaro Cárdenas e Isla Mujeres. La [Figura 4.1](#) muestra el mapa de susceptibilidad por población y la [tabla \(tabla 4.1\)](#). Muestra la distribución municipal de afectación para cada escenario modelado.

Cve	Municipio	población afectada		
		1 metro	3 metros	5 metros
1	Cozumel	14	7,766	11,765
2	Felipe Carrillo Puerto	71	95	403
3	Isla Mujeres	2,673	6,782	11,993
4	Otón P. Blanco	1,437	8,923	24,093
5	Benito Juárez	44,001	94,587	126,002
6	José María Morelos	0	0	0
7	Lázaro Cárdenas	2,952	2,956	2,956
8	Solidaridad	484	1,550	5,611
9	Bacalar	772	1,473	3,910
10	Tulum	129	3,681	2,243
ESTADO		52,533.82	127,813.00	188,976.00

Tabla 4.1 Distribución municipal de la población afectada por los escenarios de incremento en el nivel medio del mar

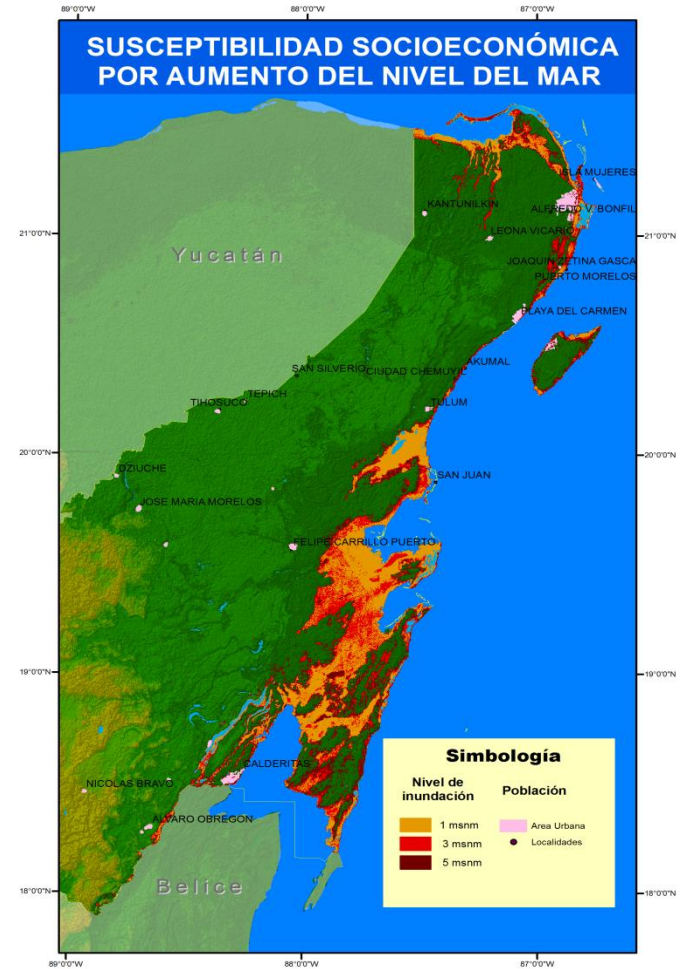


Figura 4.1 Mapa de susceptibilidad socioeconómica para población por aumento del nivel del mar en el Estado de Quintana Roo

Los costos económicos derivados de la afectación en cada escenario, son presentados en la [Tabla 4.2](#). De esta forma el costo total de afectación por población en base al PIB per cápita es valorado en 6 mil 820 millones de pesos para un escenario bajo (+1 msnm), 16 mil 592 millones para escenarios medio (+3msnm) y de 24.536 millones para un escenario alto (+5msnm)

Cve	Municipio	1 metro	3 metros	5 metros
1	Cozumel	\$1.82	\$1,008.34	\$1,527.57
2	Felipe Carrillo Puerto	\$9.22	\$12.33	\$52.33
3	Isla Mujeres	\$347.11	\$880.57	\$1,557.17
4	Otón P. Blanco	\$186.58	\$1,158.56	\$3,128.24
5	Benito Juárez	\$5,713.14	\$12,281.18	\$16,360.10
6	José María Morelos	\$ -	\$ -	\$ -
7	Lázaro Cárdenas	\$383.29	\$383.81	\$383.81
8	Solidaridad	\$62.84	\$201.25	\$728.53
9	Bacalar	\$100.24	\$191.25	\$507.67
10	Tulum	\$16.75	\$477.94	\$291.23
TOTAL Estado		\$6,820.99	\$16,595.24	\$24,536.64

Tabla 4.2 Distribución municipal de los costos socioeconómicos actuales por incremento del msnm

- **Comercial, industrial y turismo**

La alta concentración de los establecimientos comerciales e industriales sobre la zona costera, ocasionan una gran afectación a este rubro derivada de la sobre elevación del nivel del mar. El sector más afectado en cada escenario modelado sin duda alguna es el **sector hotelero** y los servicios relacionados al turismo, llegando a afectar casi un 30 % en el escenario alto (Tabla 4.3). Las Figuras 4.2 y 4.3 muestran los mapas de susceptibilidad para los sectores industrial-comercial y para el turismo.

establecimiento	Unidades afectadas			Estructura (%)		
	1 metro	3 metros	5 metros	1 metro	3 metros	5 metros
comercio	8	29	97	0.5	1.8	6.01
industrias manufactureras	15	56	168	0.54	2.01	6.03
Hoteles y restaurantes	12	38	101	3.53	11.5	29.1

Tabla 4.3 Establecimientos afectados por actividad económica para escenarios de afectación (+1,+3 y +5msnm)

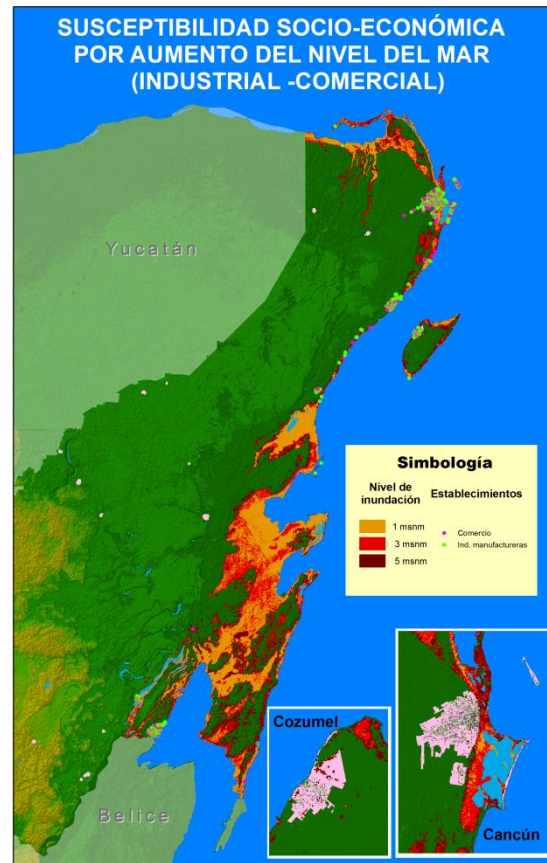


Figura 4.2 Mapa de susceptibilidad socioeconómica (Industria-comercial)

En cuanto al valor total de afectación, el costo total en el escenario bajo es estimado en 1342 millones de pesos, para el escenario medio el costo de afectación asciende a los 4,454 millones de pesos y para el escenario alto el costo es de 11,771 millones de pesos. La Tabla 4.4 muestra los valores totales de afectación para cada actividad económica analizada.

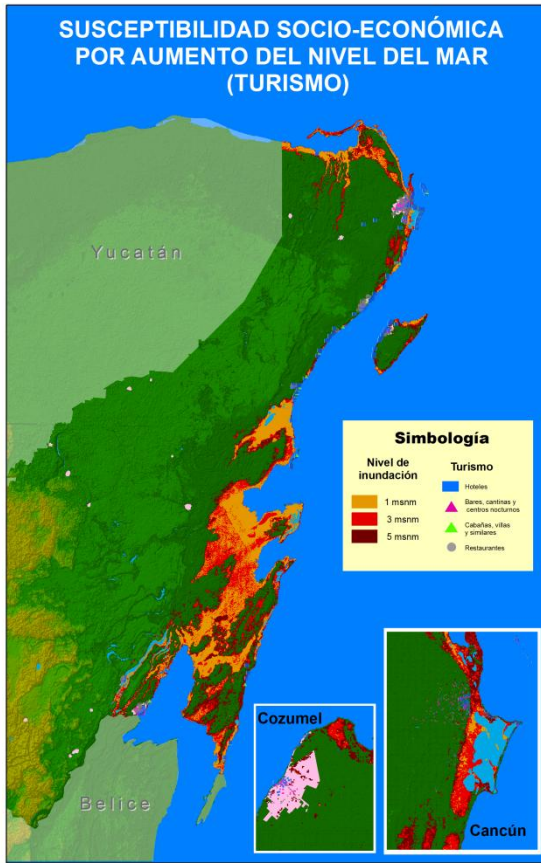


Figura 4.3 Mapa de susceptibilidad socioeconómica (Turismo)

Establecimiento	COSTO DE AFECTACIÓN (millones)		
	1 mts	3 mts	5 mts
comercio	164.159	595.075	1,990.423
industrias manufactureras	22.785	85.065	255.194
hoteles y restaurantes	1,155.424	3,774.384	9,525.825
TOTAL	1,342.367	4,454.523	11,771.442

Tabla 4.4 costos de afectación en industria, comercio y turismo por escenario

• **Salud y educación**

La afectación en los centros de prestación y prestación de servicios de salud y educación son presentados en la **Tabla 4.5**. Según estos resultados, se observa que el sector educativo es

el servicio más afectado ante el incremento del nivel medio del mar. Las **Figuras 4.4** y **4.5** muestran los mapas de susceptibilidad socioeconómica asociadas al sector salud y al sector educativo.

salud educación	UNIDADES AFECTADAS			ESTRUCTURA (%)		
	1 metro	3 metros	5 metros	1 metro	3 metros	5 metros
Salud	2	4	12	1.13%	2.26%	6.78%
Educación	12	100	182	0.55%	4.56%	8.30%

Tabla 4.5 Unidades afectadas en salud y educación por escenario

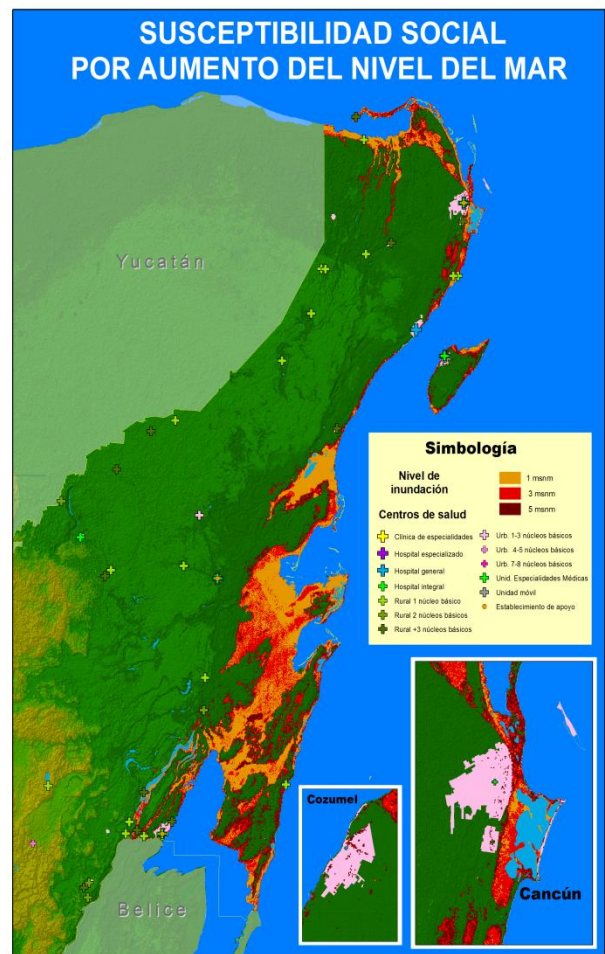


Figura 4.4 Mapa de susceptibilidad socioeconómica (Salud)

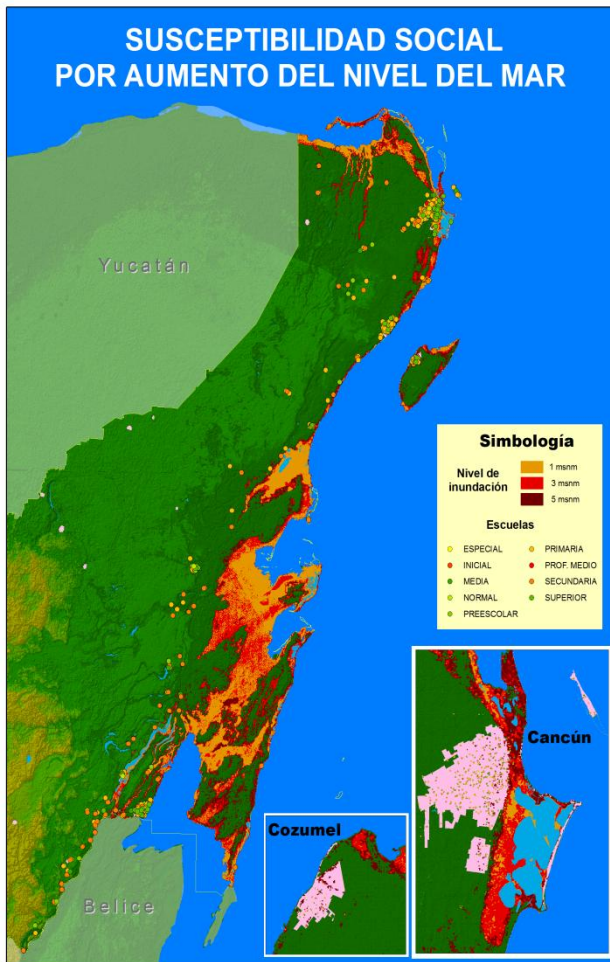


Figura 4.5 Mapa de susceptibilidad socioeconómica (Educación)

Teniendo en cuenta la proporción del PIB estatal en estos sectores, se estima que el costo total de afectación para un escenario de +1 metro es de 91 millones de pesos. Ante un incremento de +3 metros el costos total supera los 302 millones de pesos y ante un incremento de +5 metros, el costo total de afectación es de 433 millones de pesos. La [Tabla 4.6](#) muestra los costos totales por servicio para cada escenario modelado.

Salud-educación	COSTO DE AFECTACIÓN (millones)		
	1 mts	3 mts	5 mts
Salud	72.181	144.362	433.085
Educación	18.924	157.703	287.019
TOTAL	91.105	302.064	720.104

Tabla 4.6 costos de afectación para el sector salud y educación por escenario

• *Servicios y transporte*

La susceptibilidad de los sistemas de interconexión aéreo y terrestre del Estado, así como la afectación de las diferentes amenazas sobre los sistemas de abastecimiento y generación de servicios básicos como agua y electricidad son evaluadas en esta sección.

Conforme a la evaluación de impactos en sistemas viales y aéreos, la [Figura 4.6](#) muestra el mapa de susceptibilidad asociado a cada amenaza. Conforme a este análisis, los puentes y carreteras ubicados en la zona costera del Estado, son afectados entre el 0.6% en escenarios bajos y un 17% en escenarios altos. En cuanto a sistemas de interconexión aérea, la amenaza alta afecta al aeropuerto internacional del municipio de Chetumal. La [Tabla 4.7](#) muestra la longitud afectada y su estructura porcentual para cada nivel de incremento modelado.

Transporte	METROS LINEALES AFECTADOS			ESTRUCTURA (%)		
	1 metro	3 metros	5 metros	1 metro	3 metros	5 metros
Puente	9	9	14	56.25%	56.25%	87.50%
Carretera	13,167	53,295	131,663	1.67%	6.77%	16.72%
Calle	13,161	55,792	392,268	0.56%	2.37%	16.66%
Aeropuerto	-	-	1	0.00%	0.00%	25.00%

Tabla 4.7 Vías de comunicación aéreas y terrestres afectadas por escenario de incremento del nmm

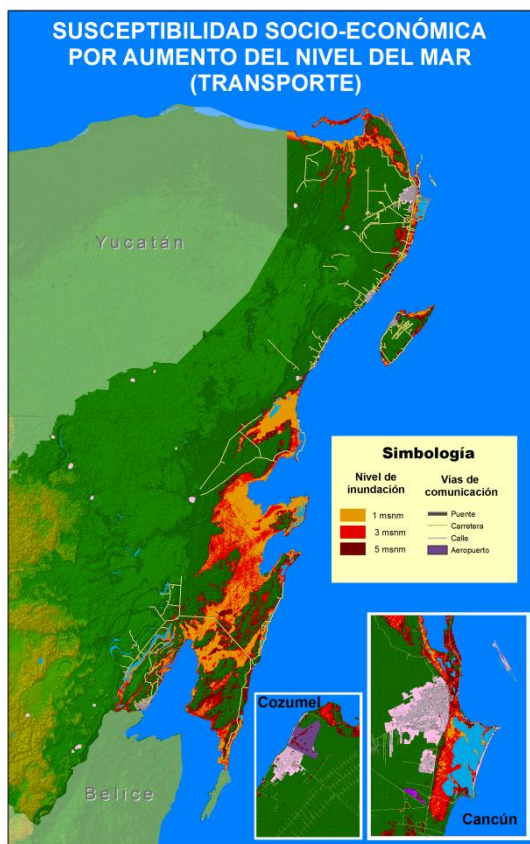


Figura 4.6 Mapa de susceptibilidad socioeconómica (Transporte)

En cuanto a la afectación a las redes de abastecimiento de agua energía y telefonía, la [Figura 4.7](#) muestra el mapa de susceptibilidad socioeconómica para este sector.

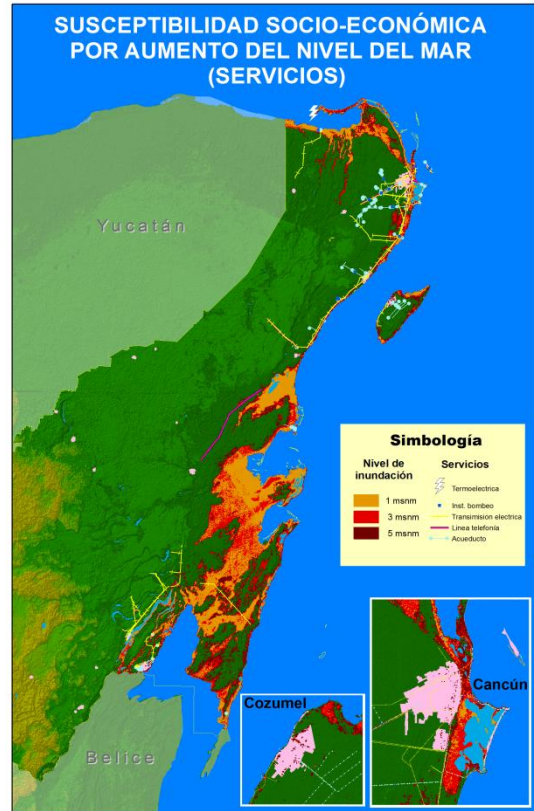


Figura 4.7 Mapa de susceptibilidad socioeconómica (Servicios)

Partiendo de la identificación de las líneas de transmisión afectadas por cada escenario, en la [Tabla 4.7](#) se muestra se muestran los valores totales y porcentaje de afectación por servicio en la zona costera del Estado de Quintana Roo.

servicios	METROS LINEALES AFECTADOS			ESTRUCTURA (%)		
	1 metro	3 metros	5 metros	1 metro	3 metros	5 metros
Inst. bombeo	1	2	3	7.14%	14.29%	21.43%
Trans. eléctrico	11,976	42,588	98,162	1.31%	4.65%	10.73%
Telefonía	6,139	19,937	45,812	2.15%	6.97%	16.03%
Acueducto	3,270	24,356	45,236	0.80%	5.96%	11.07%
Termoeléctricas	-	1	1	-	100%	100%

Tabla 4.7 Sistemas de distribución de energía, agua, y telefonía afectados por escenarios de incremento de +1,+3 y +5msnm

COSTOS FUTUROS DE AFECTACIÓN SOCIOECONÓMICA

Evaluación futura de la población

La identificación de la población futura afectada es evaluada en base a la proyección geométrica del número de personas afectada por escenario. Esta media permite establecer, sin medidas de mitigación o protección, cual sería la población que sería vulnerable al incremento del nivel del mar. La [Figura 4.8](#) muestra la población total afectada por escenario para los años 2030,2050, 2080 y 2100.

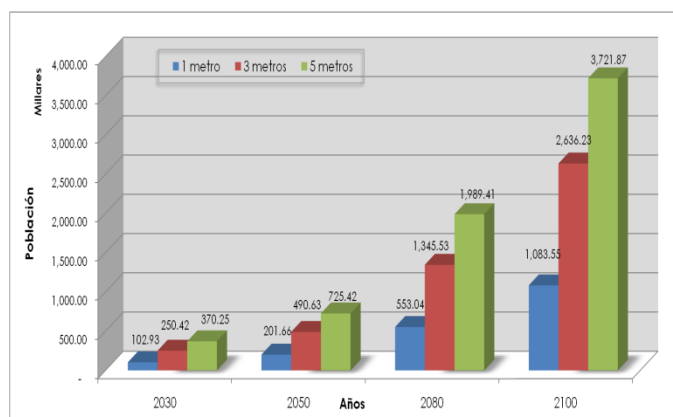


Figura 4.8 Población futura afectada para los municipios de Quintana Roo (2030-2100)

La evaluación de la población futura en base al valor esperado del PIB para el año a evaluar, permitió establecer los costos socioeconómicos en torno a la población para cada escenario de incremento de nmm. Las [tablas 4.8, 4.9 y 4.10](#) muestran los costos futuros de afectación por municipio, para cada escenario de incremento estimado.

Escenario bajo (+1 msnm) en millones de pesos				
Municipio	2030	2050	2080	2100
Cozumel	\$4.80	\$12.66	\$54.26	\$143.18
Felipe Carrillo Puerto	\$24.33	\$64.19	\$275.16	\$726.10
Isla Mujeres	\$915.95	\$2,416.98	\$10,360.82	\$27,340.39
Otón P. Blanco	\$492.34	\$1,299.17	\$5,569.13	\$14,695.95
Benito Juárez	\$15,075.53	\$39,781.01	\$170,528.53	\$449,994.81
José María Morelos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Lázaro Cárdenas	\$1,011.40	\$2,668.86	\$11,440.54	\$30,189.59
Solidaridad	\$165.83	\$437.58	\$1,875.75	\$4,949.78
Bacalar	\$264.50	\$697.95	\$2,991.90	\$7,895.11
Tulum	\$44.20	\$116.63	\$499.94	\$1,319.26
Estado	\$17,998.86	\$47,495.02	\$203,596.04	\$537,254.16

Tabla 4.8 Costo futuro de afectación municipal para el escenario bajo de afectación

Escenario medio (+3 msnm) en millones de pesos				
Municipio	2030	2050	2080	2100
Cozumel	\$2,660.75	\$7,021.12	\$30,097.31	\$79,421.52
Felipe Carrillo Puerto	\$32.55	\$85.89	\$368.17	\$971.55
Isla Mujeres	\$2,323.61	\$6,131.50	\$26,283.80	\$69,358.32
Otón P. Blanco	\$3,057.15	\$8,067.15	\$34,581.29	\$91,253.96
Benito Juárez	\$32,406.90	\$85,514.66	\$366,574.12	\$967,324.66
José María Morelos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Lázaro Cárdenas	\$1,012.77	\$2,672.47	\$11,456.05	\$30,230.49
Solidaridad	\$531.05	\$1,401.33	\$6,007.06	\$15,851.58
Bacalar	\$504.67	\$1,331.72	\$5,708.65	\$15,064.11
Tulum	\$1,261.16	\$3,327.94	\$14,265.80	\$37,644.94
Estado	\$43,790.61	\$115,553.78	\$495,342.26	\$1,307,121.14

Tabla 4.9 Costo futuro de afectación municipal para el escenario bajo de afectación

Escenario alto (+5 msnm) en millones de pesos				
Municipio	2030	2050	2080	2100
Cozumel	\$4,030.86	\$10,636.56	\$45,595.53	\$120,318.59
Felipe Carrillo Puerto	\$138.07	\$364.35	\$1,561.84	\$4,121.41
Isla Mujeres	\$4,108.98	\$10,842.69	\$46,479.15	\$122,650.31
Otón P. Blanco	\$8,254.62	\$21,782.11	\$93,372.98	\$246,394.89
Benito Juárez	\$43,170.14	\$113,916.48	\$488,323.68	\$1,288,600.36
José María Morelos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Lázaro Cárdenas	\$1,012.77	\$2,672.47	\$11,456.05	\$30,230.49
Solidaridad	\$1,922.41	\$5,072.82	\$21,745.56	\$57,382.71
Bacalar	\$1,339.62	\$3,534.97	\$15,153.30	\$39,986.88
Tulum	\$768.48	\$2,027.86	\$8,692.80	\$22,938.77
Estado	\$64,745.95	\$170,850.31	\$732,380.88	\$1,932,624.41

Tabla 4.10 Costo futuro de afectación municipal para el escenario alto de afectación

- **Escenarios futuros de industria, comercio y turismo**

Ante escenarios futuros, los costos asociados en la pérdida de capacidad comercial e industrial en relación al PIB estatal, muestran un gran incremento durante en el periodo 2030-2100. Sólo ante el incremento de +1mmsm, los costos a 2100 se encuentran alrededor de los 5126 millones de pesos. Si este incremento es de +3msnm, los costos en este sector a final del periodo se estiman en 17 mil 011 millones de pesos. Finalmente un escenario alto de ascenso del nivel del mar (+5msnm) ocasionaría perdidas al Estado al termino de 2100 por 44 mil 954 millones de pesos. En la [Figura 4.9](#) se muestra la evolución del costo en los sectores comercial, industrial y turismo a 2100.

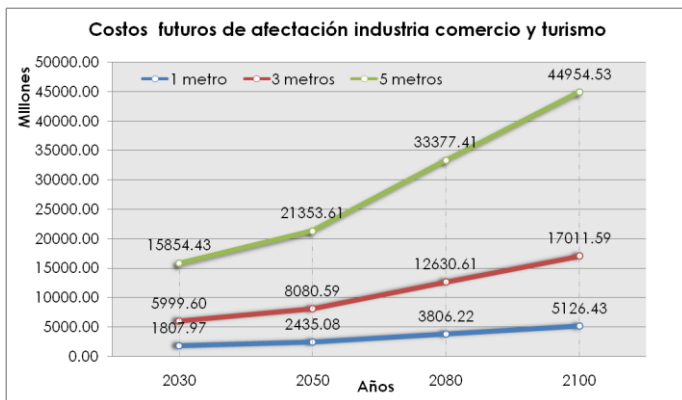


Figura 4.9 Evolución de los costos de afectación en la industria, el comercio y el turismo (2030-2100)

- **Escenarios futuros de servicios educativos y de salud**

La afectación en los sectores educativos y de salud a finales de 2100 muestra costos asociados en cuanto al PIB de 347 millones para escenarios bajos, 1153 millones para un escenario medio y

2750 para un escenario alto. La [Figura 4.10](#) muestra la evolución del costo en estos sectores para el periodo 2030-2100.

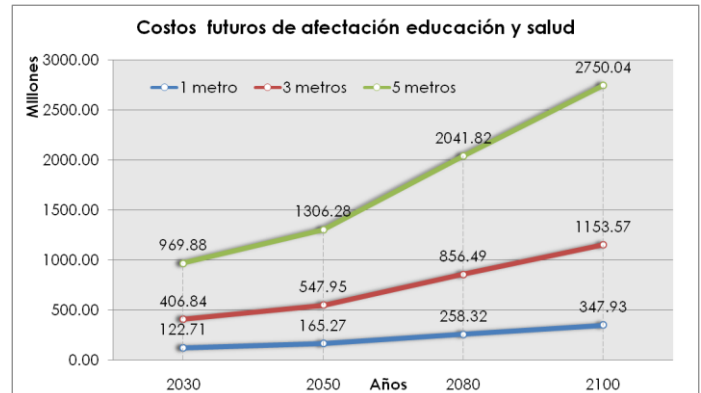


Figura 4.10 Evolución de los costos de afectación en salud y educación (2030-2100)

Análisis Ecológico

Debido a la inmensa riqueza en recursos naturales que cuenta el Estado de Quintana Roo, el análisis de los impactos ecológicos ante el incremento del nivel del mar, se percibe como un elemento de vital importancia en los mecanismos de protección y conservación de sistemas de importancia nacional.

La estimación del impacto ecológico en la zona costera del Estado de Quintana Roo, se aborda en función de la pérdida de sistemas de humedales ante los escenarios de incremento del nivel del mar considerados. Así, se cruza la información de inundación costera con aquella obtenida para los manglares costeros. La [Figura 4.11](#) presenta los resultados obtenidos de este ejercicio

considerando tres escenarios de incremento en el nivel del mar.

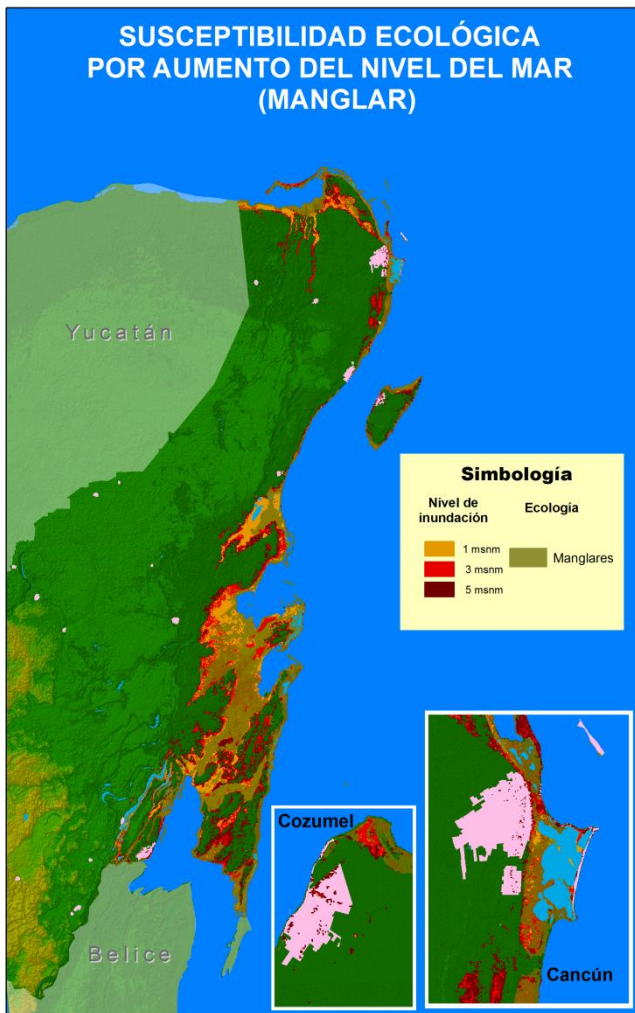


Figura 4.11 Mapa de susceptibilidad ecológica (Manglar) por aumento del nivel del mar en el Estado de Quintana Roo

Los resultados obtenidos indican una alta fragilidad de los sistemas de humedales al incremento del nivel del mar. Esto se registra en la alta pérdida de manglar estimada bajo todos los escenarios de incremento en el nivel del mar modelados. Esto se debe a la baja elevación del terreno que existe en la zona donde se ubican estos sistemas (< 5 metros), lo que representa que para bajo todos los escenarios de incremento

del mar, se estima una afectación de más del 94% del área total registrada. La [Tabla 4.11](#) presenta los valores en hectáreas del área de manglar afectada y el porcentaje de afectación en torno al total estatal.

SRL	Ha de manglar afectadas	Porcentaje
1 metro	122,425.49	94.05%
3 metros	126,660.78	97.31%
5 metros	127,363.58	97.85%

Tabla 4.11 Hectáreas de manglar afectadas por escenario

El costo económico de los impactos ecológicos estimados, se determina a partir de la definición de los servicios ambientales que un área de manglar otorga a la sociedad. Para este propósito, se utiliza la valoración de manglar presentada por [Brander et. al., 2006](#). En el presente ejercicio, se determinaron siete servicios ambientales que prestan los manglares para el territorio de Quintana Roo. Estos son: biodiversidad, amenidad, pesca recreacional, hábitat, calidad y suministro de agua y control de inundación.

De esta forma es posible asociar a las áreas de manglar afectadas un costo nominal en pesos para cada escenario modelado. La [Tabla 4.12](#) presenta los valores utilizados por hectárea afectada y el valor total de afectación estimado para cada escenario.

Servicios ambientales	Precio Ha US	precio en MXN *	1 metro	3 metros	5 metros
biodiversidad	13	165.1	\$20,212.45	\$20,911.70	\$21,027.73
amenidad	48	609.6	\$74,630.58	\$77,212.41	\$77,640.84
pescarecreacional	36	457.2	\$55,972.93	\$57,909.31	\$58,230.63
Habitad y	67	850.9	\$104,171.85	\$107,775.66	\$108,373.67
Calidad del agua	25	317.5	\$38,870.09	\$40,214.80	\$40,437.94
Suministro de agua	18	228.6	\$27,986.47	\$28,954.66	\$29,115.31
control de inundación inundación	26	330.2	\$40,424.90	\$41,823.39	\$42,055.45
TOTAL (miles)			\$362,269.27	\$374,801.92	\$376,881.57

Tabla 4.12 Costos por afectación de manglar en bases a los servicios ambientales.

• **Afectación sobre sistemas de agua potable**

Parte importante de la evaluación ecológica está determinada en la identificación de los sistemas de agua dulce susceptibles a los procesos de intrusión salada, que el incremento del nivel del mar causa. La [Figura 4.12](#) presenta el mapa de susceptibilidad ecológica en los sistemas de agua potable en el Estado de Quintana Roo.

Conforme al análisis de impactos, es posible notar que los sistemas más afectados son las Norias, seguidos de los ríos y los Cenotes. La [Tabla 4.13](#) muestra el número de sistemas afectados por escenario modelado.

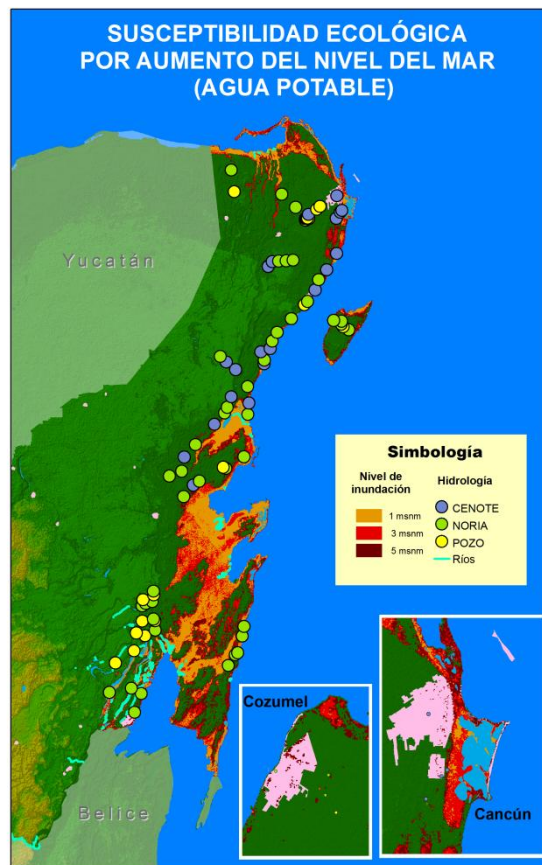


Figura 4.12 Mapa de susceptibilidad ecológica (Agua potable) por aumento del nivel del mar en el Estado de Quintana Roo

Escenarios futuros de afectación ecológica

De forma similar al ejercicio de proyección del PIB per cápita estatal, se realizó la proyección de los costos de afectación por pérdida de manglar hacia los años 2030, 2050, 2080 y 2100. La cual fue realizada bajo índices constantes de crecimiento. De acuerdo con los resultados de nuestro análisis, el costo de afectación de manglar hacia el año 2100, para los diferentes escenarios de incremento del nivel del mar considerados, se

transporte	NUMERO DE SISTEMAS AFECTADOS			ESTRUCTURA (%)		
	1 metro	3 metros	5 metros	1 metro	3 metros	5 metros
Cenote	2	4	6	10.00%	20.00%	30.00%
Noria	9	11	12	21.43%	26.19%	28.57%
Pozo	-	-	3	0.00%	0.00%	15.79%
Rio	8	8	8	-	-	-

Tabla 4.13 Sistemas de agua potable afectado por escenario

estima en alrededor de los quince mil millones de pesos. A manera de resumen, la [Figura 4.13](#) muestra los costos futuros de afectación de manglar ante diferentes escenarios de incremento de mar.

Notablemente, los costos asociados a los impactos ecológicos considerados en este ejercicio son muy similares sin importar el incremento en el nivel del mar considerado.

Costos de Afectación de Manglar

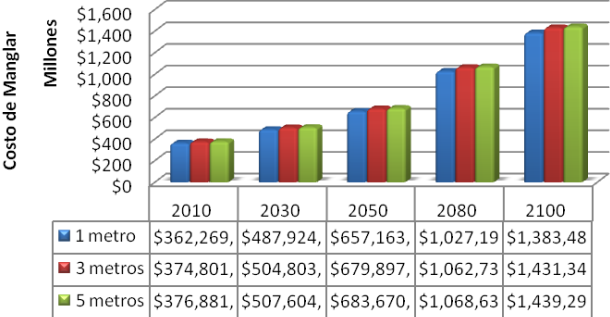


Figura 4.13 Costos de afectación futuros de manglar ante diferentes escenarios de incremento del nivel del mar

Costos totales de afectación por incremento en el nivel del mar

Con el propósito estimar el costo total de afectación por el incremento en el nivel del mar en la zona costera del Estado de Quintana Roo, se calcularon los costos totales en función de la sumatoria de los costos socioeconómicos y ecológicos calculados para los diferentes escenarios utilizados.

Conforme a lo anterior, la [Tabla 4.13](#) resume los valores monetarios totales de afectación para los

años 2030, 2050, 2080 y 2100 conforme escenarios de incremento del mar.

ESCENARIO	COSTO EN MILLONES DE PESOS	AÑOS				
		actual	2030	2050	2080	2100
1 metro	poblacion	6,820.99	17,998.86	47,495.02	203,596.04	537,254.16
	comercio	1,342.37	1,807.97	2,435.08	3,806.22	5,126.43
	educacion y salud	91.11	122.71	165.27	258.32	347.93
	socioeconómico	8,254.46	19,929.54	50,095.37	207,660.59	542,728.52
	manglar	362.27	487.92	657.16	1,027.20	1,383.49
	ecologico	362.27	487.92	657.16	1,027.20	1,383.49
	TOTAL	8,616.73	20,417.46	50,752.53	208,687.79	544,112.01
3 metros	poblacion	16,595.24	43,790.61	115,553.78	495,342.26	1,307,121.14
	comercio	4,454.52	5,999.60	8,080.59	12,630.61	17,011.59
	educacion y salud	302.06	406.84	547.95	856.49	1,153.57
	socioeconómico	21,351.83	50,197.04	124,182.32	508,829.35	1,325,286.30
	manglar	374.8	504.8	679.9	1,062.73	1,431.35
	ecologico	374.8	504.8	679.9	1,062.73	1,431.35
	TOTAL	21,726.63	50,701.85	124,862.22	509,892.09	1,326,717.65
5 metros	poblacion	24,536.64	64,745.95	170,850.31	732,380.88	1,932,624.41
	comercio	11,771.44	15,854.43	21,353.61	33,377.41	44,954.53
	educacion y salud	720.1	969.88	1,306.28	2,041.82	2,750.04
	socioeconómico	37,028.19	81,570.25	193,510.21	767,800.12	1,980,328.98
	manglar	376.88	507.6	683.67	1,068.63	1,439.29
	ecologico	376.88	507.6	683.67	1,068.63	1,439.29
	TOTAL	37,405.07	82,077.86	194,193.88	768,868.75	1,981,768.28

Tabla 4.14 Costos totales de afectación ante diferentes escenarios incremento de mar

4. Conclusiones

Los resultados presentados en este reporte indican por un lado, la alta fragilidad de la zona costera del Estado de Quintana Roo, y por otro la necesidad de generar estrategias de adaptación a estos escenarios.

Los impactos se estudiaron por medio de una de las metodologías más avanzadas dentro del estado del arte, lo que permitió la evaluación integral de los impactos ecológicos y socioeconómicos asociados a la amenaza. En el caso de este reporte, sólo se utilizaron dos parámetros de análisis, uno social (población y uno ecológico (manglar)). Además, se incorporó una valoración monetaria de ambos impactos lo

que permitió determinar el costo total de afectación y su valor futuro en el tiempo.

La zonas de mayor susceptibilidad ante la incidencia de diferentes incrementos del nivel mar, de acuerdo a los impactos socioeconómico, corresponden a los municipios de Benito Juárez y Solidaridad, en especial las cabeceras de Cancún y Chetumal.

Los resultados presentados en este estudio respecto a la valoración de los impactos socioeconómicos, considera solamente un análisis de afectación directa del evento, es decir, que se enfoca en el perjuicio a corto plazo de la pérdida de áreas pobladas por efecto del incremento del mar. En esta sentido, la valoración socioeconómica se encuentra determinada por la pérdida del capital humano en cuanto a su PIB per cápita.

Desde el punto de vista socioeconómico, se puede estimar que ante un incremento de +1 metro en el nivel del mar, los costos de afectación son de 7.370 millones de pesos con un total de 68.844 personas afectadas; mientras que para un escenario de +3 metros, los costos de afectación se estiman en 11.670 millones afectando a 104.254 personas. Por último, para un escenario de +5 metros, el costo socioeconómico de afectación es de 20.536 millones de pesos afectando a 183.456 personas. Los valores proyectados hacia escenarios futuros determinaron un costo total a 2100 de 1.197.696 millones de pesos en el escenario bajo, 1,211,037, millones de pesos en el escenario medio y

1,910,173 millones de pesos en el escenario más adverso.

En cuanto a la metodología para la valoración de sistemas naturales, el estudio determinó siete diferentes servicios que los humedales del Estado. Estos servicios son valorados conforme al estudio a partir de la valoración de servicios ambientales propuesta por Brander et. al., 2006. Esta valoración permite determinar el costo por hectárea afectada en el Estado. Los resultados asociados a la susceptibilidad ecológica del Estado, determinaron que bajo todos los escenarios modelados, la pérdida de los sistemas de manglar es casi total. El incremento de +1 metro afecta el 94 % del total de ecosistemas de manglar del Estado, mientras que los incrementos de +3 y +5 metros sobre el nivel del mar afectan a más del 97% del total. Dado que el Estado posee la mayor cantidad de manglar a nivel nacional, es evidente que la afectación estimada tendrá un impacto considerable en la reducción del inventario nacional de humedales.

La valoración de los impactos ecológicos actuales tomando en cuenta los servicios ambientales prestados, determinaron un costo total de afectación ecológica para el escenario de +1 metro de incremento en el nivel del mar de 362 millones de pesos. Para el escenario de +3 metros de incremento, se estima en 374 millones. Finalmente, considerando un incremento de +5 metros el costo de afectación se calculó en 376 millones de pesos. Estos valores proyectados a 2100 fueron estimados en 13.341 millones para +1

metro, 13.802 millones para +3 metros y 13.879 millones para escenarios de +5 metros.

Los costos totales de afectación proyectados a diferentes años indican en su escenario más adverso (+5m) que para el año 2030 es posible tener un costo de hasta 90,342 millones de pesos, mientras que para el año 2050 este sea de hasta 253,487 millones y para el 2080 y 2100 de hasta 1.192 y 3.35 billones de pesos, respectivamente.

5. Referencias

Grinsted, A., J.C. Moore y S. Jevrejeva. 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. *Clim. Dyn.* Vol.34, No.4, 461-472. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-008-0507-2>

IPCC, *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press.

Meehl, G.A. et al., 2007. *Global Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

OMM/PNUMA/IPCC. 1997. Resumen para responsables de políticas. Impactos regionales del cambio climático: Evaluación de la vulnerabilidad. 16 p.

Nicholls, R. J. 2002. Rising sea levels: potential impacts and responses, *Issues in Environmental Science and Technology*, Vol. 17, pages 83–107.

Nicholls, R. J., Frank, M. J., Hoozemans, Marchand M. 1999. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses, *Global Environmental Change*, Vol. 9, pages 69–87.

Nicholls, R. J. et al., in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M. L. Parry et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007).

Yohe, G. and Schlesinger, M. E., 1998. Sea-Level Change: The Expected Economic Cost of Protection or Abandonment in the United States, *Climatic Change* 38, 337–472.

Mc Granahan, G., Balk, D., Anderson, B. 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, vol. 19, no. 1, 17-37 doi: 10.1177/0956247807076960.

Kebede and Nicholls (2010). *Population and Assets Exposure to Coastal Flooding in Dar es Salaam (Tanzania): Vulnerability to Climate Extremes*.

Pozo, C. (editora). 2011. *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*, Tomo 2. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (PPD). México, D. F. INEGI. Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa. México. 2005

DINAS-COAST Consortium, 2006. DIVA 1.5.5. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany,

Vafeidis, A.T., Nicholls, R.J., McFadden, L., Tol, R.S.J., Hinkel, J., Spencer, T., Grashoff, P.S., Boot,

G. & Klein, R.J.T., 2008. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 24: 917-924.

Hinkel, J., Nicholls, R.J., Vafeidis, A.T., Tol, R.S.J. and Avagianou, T., 2009. Assessing risk of, and adaptation to sea-level rise in the EU27: an application of DIVA. *A Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, in review.

Abiy S. Kebede and Robert J. Nicholls, Population and Assets Exposure to Coastal Flooding in Dar es Salaam (Tanzania): Vulnerability to Climate Extremes. REPORT SUBMITTED TO: Global Climate Adaptation Partnership (GCAP). 17 JANUARY 2011

Brander, L.M., Florax, R.J.G.M. and Vermaat, J.E., 2006. The empirics of wetland valuation: A comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. *Environmental and Resources Economics*, 33(2): 223-250.

United Nations (1952). *Manual I: Methods for estimating total population for current dates* (United Nations Publications, Sales No. 52.XIII.5).

Brown, S., Kebede, A.S. and Nicholls, R.J., 2009. Sea-Level Rise and Impacts in Africa, 2000 to 2100. *unpublished report to Stockholm Environment Institute*, Oxford, pp. 215.