

HERRAMIENTAS ACTUALES DE ANÁLISIS PARA LA VULNERABILIDAD COSTERA ANTE EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR: REVISIÓN PARA EL CARIBE MEXICANO

Jennifer Denisse Ruiz Ramírez
Universidad de Quintana Roo, Campus Chetumal, Departamento de Ciencias
Chetumal, Quintana Roo, México
e-mail: jennifer@uqroo.edu.mx

RESUMEN

Los ecosistemas costeros y las comunidades asentadas en la zona costera están sujetos a muchas presiones, incluido el cambio climático. Uno de sus impactos más reconocidos es el aumento del nivel del mar y la principal amenaza en los ecosistemas costeros es la futura afectación en la distribución espacial, diversidad de especies y productividad natural. Se describen cuatro herramientas para evaluar la vulnerabilidad de sistemas costeros: la metodología común del IPCC, el análisis multicriterio y los modelos DIVA y CATSIM. Se señalan las ventajas de las herramientas empleadas en ecosistemas costeros del Caribe mexicano. Se concluye con el requerimiento de esfuerzos adicionales multidisciplinarios para generar datos biofísicos y socioeconómicos de cada región, para desarrollar instrumentos de evaluación acordes a las condiciones y necesidades particulares de cada sistema costero (natural o social), para poder enfrentar los impactos del cambio climático de manera exitosa a largo plazo.

Palabras clave: cambio climático, comunidades, ecosistemas, zona costera.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas costeros están sujetos a muchas presiones, como son los cambios en los depósitos de nutrientes y la introducción de contaminantes a las lagunas, ríos y estuarios, además de la presencia de especies exóticas y la variabilidad natural del clima. El cambio climático constituye una presión adicional que puede alterar o poner en peligro esos sistemas naturales (Ponce-Vélez, *et al.*, 2011). El aumento del nivel del mar en las costas se reconoce como el aspecto más importante del cambio climático, representando una amenaza potencial y de la cual se han identificado siete impactos clave: 1) inundación de tierras bajas y desplazamientos de humedales, 2) erosión de la línea de costa, 3) inundaciones severas causadas por mareas de tormenta, 4) intrusión salina en estuarios y

acuíferos, 5) alteración del régimen de mareas en ríos, bahías y lagunas costeras, 6) cambios en patrones de sedimentación, y 7) disminución de la penetración de la luz para organismos benthicos (Hernández Arana, 2007; Sahin & Mohamed, 2014). Como consecuencia, afectaría la compleja interacción de los parámetros físicos del ambiente costero (Yin, *et al.*, 2012).

La vulnerabilidad y el riesgo ante el aumento del nivel del mar se ha intensificado en las últimas décadas, por lo que conocer y cuantificar los impactos socio-económicos y biofísicos de las zonas costeras es imperante. Este escenario se ha vuelto más pesimista en los últimos cinco años, debido a las proyecciones de aumento global del nivel del mar en el futuro. Se estima que para el año 2100 el aumento global del nivel del mar será de un metro, si las emisiones de gases de efecto

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

invernadero continúan, según el informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en 2007 (Rahmstorf, 2012).

Los ecosistemas costeros como los arrecifes de coral, marismas de agua salada, manglares y la vegetación acuática sumergida sufrirán los impactos del incremento del nivel del mar, el aumento de la temperatura superficial del mar y cualquier cambio en la frecuencia e intensidad de futuras tormentas y huracanes en las comunidades costeras (Ponce-Vélez, *et al.*, 2011; Shepard, *et al.*, 2012). En cuando al incremento del nivel del mar, los ecosistemas costeros serán afectados en su distribución espacial, diversidad de especies y productividad natural:

Manglares. Su permanencia dependerá de la tasa del incremento del nivel el mar en relación con la acreción vertical y el espacio para la migración horizontal del manglar, es decir, un desplazamiento tierra adentro de los manglares que puede estar limitado por el desarrollo urbano y el turismo en zonas costeras (Ponce-Vélez, *et al.*, 2011). La expansión o compresión del área o la distribución preferencial de una especie de manglar, dependerá de las características topográficas tierra adentro, del tipo de costa en función de su origen morfológico y la combinación de las características climáticas regionales (Flores Verdugo, *et al.*, 2011).

Pastos marinos. El ecosistema experimentará la reducción en la cantidad de luz disponible en el fondo (por aumento de profundidad) para realizar la fotosíntesis; habrá cambios en su productividad y valores funcionales, alterando la estructura y favoreciendo el desplazamiento horizontal de las praderas marinas, hacia nuevas áreas someras, producidas por la inundación de zonas costeras. La reducción de luz disponible puede provocar una variación en la composición de especies, provocando que las especies con menor requerimiento lumínico sean más abundantes. Si

la proyección de aumento del nivel del mar es de 50 cm en este siglo, esto puede reducir en 50% la disponibilidad de luz y ocasionar una reducción de 30-40% en el crecimiento de los pastos marinos (Gallegos Martínez, 2011; Liceaga, *et al.*, 2011).

Arrecifes. El incremento en el nivel del mar provocará cambios en los procesos de erosión y acreción de las costas, aumentando la vulnerabilidad al impacto de huracanes y tormentas. El efecto de inundaciones progresivas, impactará negativamente en la calidad del agua para el desarrollo de la biota coralina. Un arrecife sólo puede ser construido si las tasas de calcificación son mayores que las tasas de erosión por periodos prolongados de tiempo. Todos aquellos procesos o eventos que limitan la calcificación de los corales, o disminuyan la cobertura coralina pueden comprometer seriamente el balance de carbonato de un sistema arrecifal con la consecuente pérdida de biodiversidad y servicios a la sociedad (Blanchon, *et al.* 2011).

Vulnerabilidad Socio-Económica de las Comunidades

En las zonas costeras, la riqueza, producción y diversidad de recursos conlleva a la concentración de actividades y asentamientos humanos. A nivel mundial, 1,2 millones de personas (23% de la población mundial) viven a menos de 100 km de la costa, y el 50% está predispuestos a moverse en el 2030 (Adger, *et al.*, 2005). Este crecimiento urbano ha contribuido en el aumento de la vulnerabilidad en las zonas costeras, consideradas como una de las áreas más perturbadas del planeta. Entre los factores de impacto se encuentran la contaminación, la eutrofización, la industrialización, la reclamación de tierras, la producción agrícola, la sobrepesca y el turismo, entre otros (Botello & Villanueva, 2011).

El aumento en el nivel del mar tendrá diferentes efectos sociales y económicos sobre los

asentamientos humanos: daños por inundación y tormentas, pérdida de tierras, erosión, intrusión de agua salada. Otros impactos directos e indirectos incidirán en el turismo, la agricultura, el suministro (cantidad y calidad) de agua dulce, las pesquerías, los servicios financieros y la salud humana en las zonas costeras. La población costera residente podría ser afectada por un incremento de las inundaciones o tener la necesidad de mudarse a causa de éstas, de los desbordamientos o la pérdida de tierra por erosión. En el futuro habría cambios en los bienes y servicios comercializados como la tierra, la infraestructura urbana y turística, y la productividad agrícola e industrial (Botello & Villanueva, 2011).

El riesgo ante desastres naturales y la evaluación de la vulnerabilidad depende de varios factores, como la contabilización de la percepción de la gente. Ésta se logra identificando las causas principales como el acceso limitado al poder y los recursos disponibles, las opciones y las oportunidades de subsistencia, las opciones elegidas por la población que se ve afectada por un desastre (o desastres) en el tiempo y en el espacio, presiones dinámicas (la falta de educación, la urbanización y la demografía); y condiciones inseguras (lugares peligrosos) (Nirupama, 2012).

Las incertidumbres en las predicciones del aumento del nivel del mar crean la necesidad de abarcar una serie de escenarios dentro de la evaluación de vulnerabilidad. Estos escenarios necesitan incluir una gama de cambios probables; pero los detalles de cualquier evaluación de vulnerabilidad dependerán de la meta, del nivel de comprensión y de los recursos disponibles. La importancia en el desarrollo y aplicación de herramientas para estimar el grado de vulnerabilidad de cualquier sistema costero (natural o social) es vital para reducirlo y para incluir las opciones disponibles de adaptación (Botello y Villanueva Fragoso, 2011). Por lo que

el propósito de este documento fue revisar algunas metodologías como la *Common Methodology* del IPCC, que es utilizada para el análisis de datos (físicos y socioeconómicos), para estimar los impactos provocados por la elevación del nivel del mar; y el *Análisis Multicriterio*, que permite la evaluación a través de la ponderación de datos cualitativos y cuantitativos, considerando procesos participativos, con el fin de priorizar medidas de adaptación, para asignar recursos de manera eficiente. Ambos métodos se han aplicado para abordar la vulnerabilidad de ecosistemas costeros en México (pero en este documento, sólo se incluyen los del Caribe mexicano), que ya resienten el impacto del aumento del nivel del mar. Además, se incluyen los modelos DIVA y CATSIM como futuros modelos que pueden emplearse para el mismo fin. *DIVA* es un modelo integrado de investigación de los sistemas costeros que evalúa las consecuencias biofísicas y socioeconómicas del aumento del nivel del mar y el desarrollo socio-económico; y *CATSIM* es un modelo de simulación de catástrofe con el enfoque de gestión de riesgo de desastres.

Objetivo

Describir las principales herramientas utilizadas en el análisis de la vulnerabilidad de los sistemas costeros ante el aumento del nivel del mar.

MÉTODOS

Se describen las principales metodologías aplicadas para el análisis de vulnerabilidad de sistemas costeros, desde la metodología propuesta por el IPCC en 1992 (*Common Methodology*), hasta las herramientas de DIVA y CATSIM ampliamente reconocidas y aplicadas a nivel mundial que evalúan la vulnerabilidad al cambio climático y el riesgo ante los peligros naturales, respectivamente. Cada metodología va acompañada de las etapas (módulos, indicadores, variables o parámetros) que son requeridas para hacer efectiva la evaluación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Herramientas para el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo por el aumento del nivel del mar

La necesidad de investigación en el tema del aumento del nivel del mar, ha propiciado la colaboración en el desarrollo de metodologías para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo en zonas costeras (Romieu, *et al.*, 2010). Esta integración ha permitido el perfeccionamiento de herramientas y técnicas para el análisis, conjuntado diversas disciplinas para abordar el tema. A continuación se describen algunos instrumentos de evaluación:

Common Methodology

Este método desarrollado por el IPCC (1992), incorpora la opinión de expertos para el análisis de datos (con características físicas y socioeconómicas). El usuario puede estimar un amplio espectro de los impactos provocados por la elevación del nivel del mar, que incluye el valor de la tierra y la pérdida de humedales. El método en sí, es una lista de análisis que se debe hacer, pero no instruye explícitamente al usuario sobre cómo realizar el análisis. El usuario debe seguir siete pasos:

- 1) Delimitar el área o estudio de caso
- 2) Obtener un inventario de las características del área
- 3) Identificar los factores relevantes de desarrollo económico
- 4) Evaluar los cambios físicos
- 5) Formular estrategias de respuesta
- 6) Evaluar la vulnerabilidad
- 7) Identificar las necesidades futuras

Como resultado, la adaptación se centraría en tres opciones: retirar, acomodar o proteger. La escala del análisis puede ser global, regional, nacional o

Análisis Multicriterio

Es un método que permite la evaluación considerando diferentes objetivos, a través de la

estatal. Este enfoque es más útil como un estudio de línea de base a nivel país, donde se conoce poco sobre su vulnerabilidad costera.

El método considera como entradas (input) las características físicas y socioeconómicas del área de estudio; y como salidas (output) el perfil de vulnerabilidad y una lista de políticas futuras, necesarias para adaptarse física y económicamente, ante una gama de impactos por aumento del nivel del mar, que incluye la pérdida de tierra, sus usos y valores asociados, la pérdida de humedales, entre otros.

Aunque es fácil de usar, se requiere de conocimiento exhaustivo de una serie de técnicas para estimar los impactos biofísicos y socioeconómicos del nivel del mar y la adaptación. Se requiere de cierto entrenamiento para completar los siete pasos (en semanas o meses), por parte de consultores externos; o se puede obtener asesoría formal con asistencia técnica del CZMS (Coastal Zone Management Subgroup, del IPCC). Como el método no indica explícitamente cómo realizar el análisis, el método analítico elegido por el usuario determinará sus necesidades informáticas.

Una aplicación de este método se realizó para estimar el grado de vulnerabilidad de los ecosistemas costeros mexicanos por Ponce-Vélez y colaboradores (2011), donde el estudio reveló que el grado de vulnerabilidad de los ecosistemas costeros de manglar y arrecifes coralinos es alto para los estados de Veracruz y Tabasco; y medio para los estados de Campeche y Quintana Roo. Además, el grado de vulnerabilidad del estado estaba relacionado con el grado de conservación o deterioro del manglar, la presencia de áreas naturales protegidas, y la temperatura como factor de estrés en los arrecifes coralinos.

ponderación de datos cualitativos y cuantitativos. Se trata de un método que facilita el debate y la incorporación de diferentes puntos de vista,

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

especialmente considerando procesos participativos. Tiene una perspectiva más amplia que la económica, incorpora e identifica opciones e introduce en la valoración distintas variables, comparándolas, sin reducirlas a una única magnitud (PEACC, 2014). Surge por la necesidad

de construir una metodología orientada en priorizar medidas de adaptación para asignar recursos de manera eficiente (Tabla 1) (PNUMA REGATTA, 2015).

La metodología consta de 7 pasos:

Tabla 1. Etapas del Análisis Multicriterio

ETAPAS	DESCRIPCIÓN
1. Diseño del proceso	<ul style="list-style-type: none"> • El objetivo del proceso • Los temas y la escala para identificar medidas • El tiempo para el proceso • Los actores clave para la priorización de medidas • La estructura de conducción del proceso • La estrategia de seguimiento
2. Criterios	<ul style="list-style-type: none"> • Los criterios para la priorización • El peso o ponderación de los criterios (importancia de acuerdo al sector) • La escala de calificación para cada criterio
3. Identificación de medidas	<ul style="list-style-type: none"> • Las medidas de adaptación vinculadas con el sector y las atribuciones de la institución implementadora. • Si no existe una lista de medidas, quién las identificaría • Las medidas deben considerar los criterios definidos: <ul style="list-style-type: none"> -Vulnerabilidad en el territorio -Amenazas del cambio climático a las que responde la medida -Escala y temporalidad -Actores involucrados -Monitoreo y evaluación
4. Revisión y ajustes	<p>Revisar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las medidas identificadas o componentes de las mismas • El proceso hasta el momento <p>Ajustar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las medidas que no hayan cumplido con los requisitos (modificarlas o eliminarlas) • Los actores relevantes que no hayan sido considerados • Los criterios definidos anteriormente
5. Priorización de medidas	<p>Se priorizan las medidas identificadas aplicando un análisis multi-criterio:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se utilizan los criterios identificados en el paso 2 • En un proceso participativo se hace la priorización de las medidas
6. Valoración económica	<ul style="list-style-type: none"> • Se hace un análisis costo-beneficio o costo-efectividad de las medidas priorizadas.

	<ul style="list-style-type: none"> • El análisis debe incluir cálculos sociales de los costos y beneficios directos e indirectos y las externalidades de la medida de adaptación
7. Seguimiento y retroalimentación	<p>Seguimiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se documenta, sistematiza y organiza la información generada de manera transparente durante todo el proceso. <p>Retroalimentación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se identifican las principales lecciones aprendidas • Se identifican los elementos y los riesgos importantes para replicar el proceso en el futuro.

Elaboración propia con datos de PNUMA REGATTA (2015)

La metodología es flexible y adaptable a diferentes contextos; fomenta la participación, reflexión constante y desarrollo de capacidades de los actores participantes; y promueve la transparencia en la toma de decisiones.

Este método fue aplicado en la elaboración del Programa Especial de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Yucatán (PEACC-YUC). El grupo multidisciplinario que participó en su elaboración consideró 5 criterios para la zona costera de Yucatán, de las cuales se enfocó en 8 medidas de adaptación particulares y por prioridad más alta: a) en la planificación adecuada de futuros asentamientos humanos, b) en el manejo estratégico del agua, y c) en las acciones preventivas y de alerta temprana ante eventos meteorológicos extremos. Estas adaptaciones son las que más riesgos pueden evitar (PEACC, 2014).

DIVA (Dynamic Interactive Vulnerability Assessment)

El modelo DIVA es un modelo integrado de investigación de los sistemas costeros que evalúa las consecuencias biofísicas y socioeconómicas del aumento el nivel del mar y el desarrollo socio-económico, teniendo en cuenta la erosión costera (directa e indirecta), las inundaciones costeras (incluidos los ríos), el cambio en los humedales y la intrusión salina en los deltas y estuarios, así como la adaptación en términos de aumento de diques y protección de las playas.

La primera versión del modelo DIVA (DIVA 1.0) fue lanzada en 2004 y desarrollada como una herramienta financiada por la CE DINAS-COSTA (Dynamic and Interactive Assessment of National, Regional and Global Vulnerability of Coastal Zones to Climate Change and Sea-Level Rise).

La herramienta DIVA comprende cuatro componentes principales:

1. Una base de datos global, con datos biofísicos y socio-económicos costeros.
2. Escenarios de nivel del mar y socio-económicos global y regional hasta el año 2100.
3. Un modelo integrado, que consiste en módulos interactivos que evalúa impactos biofísicos y socio-económicos, efectos potenciales y costos de adaptación.
4. Una interfaz gráfica para que el usuario pueda seleccionar datos y escenarios, correr simulaciones en el modelo y analizar los resultados.

1.- La base de datos contiene información de aproximadamente 80 parámetros biofísicos y socio-económicos costeros del mundo. Los datos están representados con base en siete tipos de características geográficas: segmentos de la línea costera, unidades administrativas, países, ríos,

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

cuenclas, sitios de patrimonio mundial y celdas de 5 x 5 grados.

Estos segmentos de la línea costera fueron desarrollados al descomponer la línea costera mundial, basados en características biofísicas y socio-económicas, dentro de 12,148 segmentos de tamaño variable que son homogéneos en términos de impactos y vulnerabilidad ante el incremento del nivel del mar. La representación de los datos en la información de la costa unidimensional, simplifica los cálculos del modelo ya que las operaciones de SIG ya incluyen parte del pre-procesamiento de los mismos.

2.- Los escenarios incluidos en el modelo, contienen información acerca del aumento del nivel del mar, el cambio del uso de la tierra y el desarrollo socio-económico (por ejemplo,

población y crecimiento económico) todos derivados del Informe Especial del IPCC de escenarios de emisiones (SRES). Para cada SRES existen 6 diferentes escenarios para el nivel del mar asumiendo tres sensibilidades climáticas diferentes, así como un aumento del nivel del mar uniforme y regionalizado. Los escenarios de nivel del mar fueron producidos por el modelo climático de complejidad intermedia CLIMBER-2 del Instituto Postdam para el cambio climático.

3.- El modelo integrado consiste en un número de módulos desarrollados por los diferentes socios del proyecto y representan los subsistemas costeros. El modelo calcula los impactos de aumento del nivel del mar en los sistemas naturales y humanos, así como los efectos de la adaptación humana sobre estos impactos (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de cada módulo

Módulo	Descripción
Aumento del nivel del mar relativo	Crea escenarios de aumento del nivel del mar relativo, adicionando el movimiento vertical de tierra, a los escenarios de aumento del nivel del mar inducidos por el clima
	Se evalúan 4 tipos de impactos biofísicos: pérdida de tierras debido a la inundación y la erosión costera), inundaciones, intrusión salina en los deltas de los ríos y estuarios, y cambio en los humedales.
Efecto del río	Calcula la distancia desde la desembocadura del río y donde las variaciones del nivel del mar son notorias
Erosión indirecta	El aumento del nivel del mar afecta indirectamente en la erosión costera como en las cuencas, que se convierten en áreas donde se atrapan sedimentos.
	Calcula la pérdida de tierra, la pérdida de arena y la demanda de abastecimiento debido a la erosión indirecta. Este módulo usa una versión simplificada del modelo ASMITA (Aggregated Scale Morphological Interaction between a Tidal basin and the Adjacent coast). Considera cerca de 200 cuencas con influencia de mareas alrededor del mundo.
	La opción de adaptación considera el reemplazo de arena perdida para playas
Erosión total	Calcula la erosión directa en la costa basada en la regla de Bruun. Suma la erosión directa e indirecta

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

Cambio en el humedal	Calcula el cambio del área debido al aumento del nivel del mar, la construcción de diques y la posible recarga del humedal para 6 tipos de humedales
Inundación	<p>Evalúa la inundación causada por el mar y los ríos debido al aumento del nivel del mar y mareas de tormenta asociadas. Se consideran los efectos de los diques y las áreas de inundación se calculan por periodos de retorno de 1 en 1 a 1 en 1000 años.</p> <p>Debido a las dificultades en la predicción de cambios en las mareas de tormenta, las actuales se desplazan hacia arriba con el aumento del nivel del mar.</p> <p>La opción de adaptación considera la construcción de diques más altos.</p>
	<p>Evalúa la intrusión salina en los acuíferos de los deltas de los ríos y estuarios, considerando aproximadamente 200 ríos principales. La longitud de la intrusión salina en los ríos y en la tierra afectada, se calcula usando el aumento del nivel del mar relativo y tormentas de marea como entradas.</p> <p>No se consideran opciones de adaptación, DIVA no contabiliza la intrusión salina de los acuíferos costeros.</p>
Evaluación del humedal	<p>El cambio en los humedales costeros se evalúa en términos del área de humedales y la composición de los tipos de vegetación. Los humedales responden al aumento del nivel del mar con la migración horizontal, cambios verticales de elevación y transición en los tipos de humedales.</p> <p>La respuesta del humedal es una función de la relación del aumento del nivel del mar relativo con la amplitud de las mareas, suministro de sedimentos y migración espacial.</p> <p>Se consideran 6 tipos diferentes de humedales: bosque costero, humedal altamente inundado sin vegetación, humedal con baja inundación sin vegetación, pantanos de agua dulce, marismas (saladas) y manglares.</p> <p>La opción de adaptación incluye la recarga de humedales.</p>
	Calcula el valor de los diferentes tipos de humedales en función del PIB, la densidad de población y la zona de humedales.
Turismo	Calcula el número de turistas que ingresan al país
Costos y adaptación	Calcula los impactos socio-económicos de los efectos geo-dinámicos, teniendo en cuenta las opciones de adaptación definidas por el usuario

Elaboración propia con datos de Hinkel & Klein (2009)

4.- La interfaz gráfica para el usuario permite escoger escenarios y estrategias de adaptación, para ejecutar el modelo y analizar y comparar los resultados para diferentes regiones. La interfaz

fue construida sobre la base de las herramientas Delf, la cual es un software con una colección de componentes para el apoyo a las decisiones y análisis de datos espacio-temporales. Los datos de

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

entrada y salida pueden ser visualizados en forma de tablas, gráficas y mapas. Todos los datos usados en el modelo pueden ser editados, importados a hojas de cálculo o exportados a formatos de Office.

DIVA también evalúa las consecuencias sociales y económicas de los impactos físicos descritos anteriormente, teniendo en cuenta escenarios socio-económicos (Tabla 3):

Tabla 3. Consecuencias sociales y económicas, con sus respectivos indicadores

Consecuencias	Indicadores	Datos, valores y opciones
Sociales	1.La población costera que habita en la planicie inundable dado por el número de personas que viven por debajo del nivel de las mareas de tormenta.	Para el cálculo de estos indicadores de la población se ha utilizado la versión 3 del modelo GPW (Gridded Population of the World) desarrollado por CIESIN (Center for International Earth Science Information Network) y CIAT (Centro Internacional de Agricultura tropical).
	2.La población que actualmente se inunda da un número estimado de las personas sujetas a inundaciones anuales	
	3.La migración forzada da el número de personas que tienen que migrar de la tierra que se perdería de forma permanente debido a la erosión y la inundación.	
Económicas	Costo de daños (impactos biofísicos y sociales)	
	La pérdida de tierras	Se calcula en base al supuesto de pérdida de la tierra que se utiliza para la agricultura. Las tierras agrícolas tienen el valor más bajo si se asume que la tierra utilizada para otros fines (industria o vivienda) son de mayor valor.
	La intrusión salina en los deltas de los ríos y estuarios	Se calcula en términos de la tierra agrícola afectada y el supuesto de que las tierras agrícolas pierden la mitad del valor del suelo no salino.
	Las inundaciones	Se calcula como el valor estimado de los daños causados por las inundaciones marítimas y fluviales basados en el uso del suelo y la profundidad de la inundación.
	El cambio del humedal	Están calculados basándose en el valor de la transferencia de la función derivado de un meta-

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

		análisis global de la valoración de los humedales. El costo de la migración se calcula con base en la pérdida del PIB per cápita.
	Costos de adaptación	
	Construcción de diques Regeneración de playas, Suministro en los humedales	Existen 4 opciones de adaptación: <ul style="list-style-type: none"> • “No adaptación”, se calcularán los daños potenciales. • “Protección total” para preservar tanto como sea necesario las funciones de los ecosistemas. • “Protección constante” para la construcción de diques, como un nivel de protección predefinido, para proteger de manera permanente. • “Adaptación costo-beneficio” balancea los costos y beneficios de la adaptación. Por ejemplo, la construcción de un dique, es una estrategia que mantiene un nivel de protección óptima a través del tiempo. Las opciones de adaptación se eligen según las diversas estrategias de adaptación complementarias.
	Intrusión salina	Se considera la opción de “no adaptación”
	Costo de las playas y recarga de humedales	El costo fue derivado de la consulta de expertos. Las diferentes clases de costos que fueron aplicados, dependen de que tan lejos se encuentra la arena para suministro de las playas.

Elaboración propia con datos de Hinkel & Klein (2009)

DIVA no produce una simple medida o índice de vulnerabilidad. Como resultado final, la comparación de los diversos componentes se deja a juicio del propio usuario.

La versión posterior de DIVA se ha enfocado en la evaluación de impactos en las costas y la adaptación a escala mundial, regional y nacional. Se han considerado versiones regionales de

DIVA, como DIVA-Europa, DIVA-Sur de Asia y DIVA-Caribe. Se espera que al incrementar la resolución espacial del análisis, aumente la utilidad del modelo para la gestión costera. Actualmente, DIVA está siendo desarrollada en cooperación con varias instituciones de investigación europeas, incluido el Foro Global Climático (GCF), la Universidad de Southampton, la Universidad de Kiel, la Universidad de Sussex y la Unidad de Investigación Costera de la Universidad de Cambridge. El GCF coordina este desarrollo y

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

mantiene el código DIVA (Hinkel & Klein, 2009; Hinkel, *et al.*, 2010; Hinkel, *et al.*, 2013; Vafeidis, *et al.*, 2008).

CATSIM (CATastrophe SIMulation)

El modelo de simulación de catástrofe (CATSIM) fue desarrollado por IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)), con el enfoque de gestión del riesgo de desastres integrada por el Banco Interamericano de Desarrollo; con el objetivo de apoyar a los países en desarrollo, propensos a los desastres (Schäfer, 2014). Los países más pobres y más vulnerables son a menudo los más afectados por los desastres naturales como inundaciones, huracanes, ciclones, incendios forestales, terremotos y tsunamis. Un desastre puede ser muy costoso, tanto en términos de llevar a cabo las reparaciones de la infraestructura vitales y necesarios para mantener un país en marcha y también para proporcionar un alivio para las personas afectadas. Los gastos normalmente se cubren con fondos públicos (impuestos, desvíos presupuestarios) o a través de préstamos y donaciones de la comunidad internacional (IIASA, 2016).

Este instrumento identifica los países con un potencial de "déficit de financiación", es decir, países que se consideran con alta probabilidad que rebasen la capacidad del gobierno para financiar el proceso de recuperación ante el desastre. Debido a que los fondos pueden no estar disponibles en un corto plazo, se requieren instrumentos financieros disponibles antes del desastre; por ejemplo, mecanismos de transferencia de riesgos, tales como los fondos de reserva, seguros, bonos de catástrofe, y las líneas de crédito ante contingencias (IIASA, 2016).

CATSIM es una herramienta útil que le permite al usuario cambiar los parámetros y supuestos para mostrar las estrategias financieras apropiadas en el contexto pre y post-desastre. También puede calcular la combinación óptima de estas medidas

y los resultados se muestran en una capa del Google Maps (IIASA, 2016, Schäfer, 2014). Utiliza datos nacionales disponibles (con los que cuenta cada país) y que permite a los asesores políticos plantear "qué pasa si". El modelo mostrará entonces la mejor combinación de estrategias financieras para adaptarse a las circunstancias actuales. CATSIM tiene una interfaz gráfica fácil de usar que permite al usuario definir los parámetros de búsqueda de peligros, la vulnerabilidad y los elementos expuestos. Consta de 2 etapas en condiciones de incertidumbre: primera etapa (ex ante) y segunda etapa (ex post); y 2 módulos (Hochrainer, 2008; Hochrainer-Stigler, *et al.*, 2012; Schäfer, 2014):

Módulo I. Se evalúa el riesgo. La evaluación se concentra en la vulnerabilidad financiera para el próximo año por varios impactos de un desastre (Enfoque con información limitada).

Módulo II. Se muestran los costos y beneficios de diversas estrategias financieras para la gestión de riesgos, así como las consecuencias para los indicadores importantes como el crecimiento económico o la deuda. La evaluación se concentra en la vulnerabilidad financiera para un horizonte de tiempo determinado, utilizando las medidas ex ante y ex post (Enfoque basado en la probabilidad).

Wolf (2012) menciona que la capacidad de recuperación económica puede ser estimada en CATSIM, ya que considera dos horizontes temporales: un tiempo corto y otro periodo de retorno fijo. El resultado describe la eficacia de la entidad (país) para hacer frente a los daños, va a depender del nivel de daño y si se recibe ayuda exterior. El modelo se ejecuta para cada periodo de retorno, que corresponden a los diferentes escenarios futuros.

La evaluación de daños para cada escenario se mide por el indicador " brecha financiera " (es decir, el daño no puede ser financiado en su totalidad por las diversas fuentes disponibles del

gobierno). Entonces se busca en primer lugar, el "caso del déficit de financiación del año", es decir, el período de cambio en el cual se produce un déficit de financiación; y en segundo lugar, una evaluación de "riesgo indirecto" que considera un periodo de tiempo mayor, estimando las consecuencias macroeconómicas de esta vulnerabilidad. Estos escenarios pueden no contener los fenómenos extremos, o uno o más eventos.

En este último caso, la capacidad de reaccionar a cada evento depende de los eventos anteriores.

Por lo tanto, la capacidad de financiar las pérdidas, nuevamente se calcula para cada escenario por separado.

La evaluación de daños o de cada posibilidad está dada por los indicadores de desarrollo económico (como el presupuesto del gobierno y el PIB). Otros indicadores diferentes que son conocidos como "medidas de riesgo" son posibles y están considerados dentro de los parámetros económicos de CATSIM (Tabla 4).

Tabla 4. Variables y parámetros considerados en el modelo CATSIM

Elementos	Tipos	Descripción
Variables	Decisión	<ul style="list-style-type: none"> • Gastos de mitigación • Seguros • Contribución al fondo de reserva • Tasa por crédito por contingencia
	Respuesta	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento esperado de descuento para los próximos x años. • Probabilidad de déficit para los próximos x años • Reducción esperada de crédito en los próximos x años
Parámetros	Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Retorno en capital • Tipo de descuento para los rendimientos futuros • Tasa de depreciación • Factor para la mitigación • Tasas de primas de seguro • Tipo de interés para el fondo de reserva, el crédito contingente, el crédito interno, préstamo de IMF, bonos internacionales • Tasa por créditos por contingencia • La desviación máxima • Crédito Interno máximo • Capital inicial • Fondo de Reserva Inicial • Presupuesto fijo (previsto para t = 1, ..., x años) • Límite de crédito
	Catástrofe	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilidad de que ocurra la primera pérdida • 20-años de pérdida por eventos • 50-años de pérdida por eventos • 100 años de pérdida por eventos • 500 años de pérdida por eventos

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

		<ul style="list-style-type: none"> • 1000 años de pérdida por eventos
	Simulación	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte de tiempo • Número de escenarios • Longitud del gasto

Elaboración propia con datos de Hochrainer (2008)

La vulnerabilidad y la evaluación de riesgos puede llevarse a cabo de forma interactiva para diferentes supuestos acerca de las posibilidades de acción, es decir, el usuario del modelo puede elegir diferentes fuentes de financiación. En este caso, la ejecución del modelo para diferentes supuestos producirá escenarios con las consecuencias de las diferentes acciones. CATSIM tiene un alcance similar a DIVA, utilizándolo como una herramienta de exploración.

Por último, es necesario mencionar que las herramientas *Common Methodology* del IPCC y el Análisis Multicriterio, presentan entre sus ventajas la utilización de datos físicos y socioeconómicos del área de estudio, son fáciles y flexibles de usar, comprenden la mayor diversidad de escalas (regional, nacional o estatal) y se aplican a cualquier ecosistema (manglares, pastos marinos y arrecifes coralinos).

Las herramientas DIVA y CATSIM, cuentan entre sus ventajas el manejo de una gran cantidad de datos (biofísicos y socio-económicos), los modelos contienen módulos interactivos con interfaz gráfica, permiten escoger escenarios, generar costos de adaptación, los resultados pueden exportarse en formato Office y los mapas se generan en Google.

Sin embargo, la mayor desventaja de estos últimos, es que ambos fueron desarrollados en instituciones extranjeras que están a cargo de su mantenimiento, por lo que no son de libre acceso. Además, la herramienta DIVA maneja dos escalas (global o regional), y sólo puede aplicarse a ecosistemas de manglares (humedales); y la herramienta CATSIM maneja sólo la escala nacional, pero puede aplicarse a cualquier ecosistema afectado por un desastre natural (Tabla 5).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de las herramientas.

Herramienta	Ventajas	Desventajas	Sistema costero
<i>Common Methodology</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utiliza datos físicos y socio-económicos ✓ Evalúa impactos por la elevación del nivel del mar (incluye el valor de la tierra y la pérdida de humedales) ✓ Fácil de usar ✓ Escala a nivel global, regional, nacional o estatal 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No instruye al usuario sobre cómo realizar el análisis ▪ Conocimiento exhaustivo de una serie de técnicas para estimar impactos biofísicos y socio-económicos del nivel del mar y la adaptación ▪ La adaptación se restringe en retirar, acomodar o proteger 	<ul style="list-style-type: none"> • Manglar • Pastos marinos • Arrecifes coralinos

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se requiere entrenamiento (semanas o meses) 	
Análisis Multicriterio	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utiliza datos físicos y socio-económicos ✓ Ponderación de datos cualitativos y cuantitativos (peso y escala de calificación) ✓ Flexible y adaptable ✓ Escala a nivel regional, nacional o estatal ✓ Prioriza las medidas de adaptación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No existe un método ideal aplicable de modo universal y automático ▪ Dificultad para definir criterios de comparación y elaborar tablas de puntuación ▪ Se requiere gran cantidad de información ▪ Aplicación de métodos matemáticos con alta cualificación ▪ Falta de datos confiables ▪ Proceso largo e interactivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Manglar • Pastos marinos • Arrecifes coralinos
DIVA	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utiliza datos biofísicos y socio-económicos ✓ Evalúa impactos por la elevación del nivel del mar (incluye erosión costera, inundación, cambio en los humedales, intrusión salina) y desarrollo socio-económico ✓ Maneja gran cantidad de parámetros del mundo ✓ Contiene módulos interactivos, interfaz gráfica, realiza simulaciones ✓ Permite escoger escenarios, conocer impactos biofísicos, efectos potenciales, estrategias y costos de adaptación ✓ Edita o exporta tablas, gráficas y mapas a hojas de cálculo o formatos de Office 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No produce una simple medida o índice, se deja a juicio del propio usuario ▪ Desarrollo y mantenimiento del modelo es por parte de instituciones europeas ▪ Considera el aumento del nivel del mar uniforme y regionalizado ▪ Considera el aumento de diques y protección de playas como medidas de adaptación ▪ Utiliza software DELF ▪ Escala a nivel global o regional 	<ul style="list-style-type: none"> • Humedales (manglares)
CATSIM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utiliza datos nacionales (propios del país) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La evaluación de daños es por evento 	<ul style="list-style-type: none"> • Cualquier ecosistema

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Evalúa cualquier desastre natural (inundaciones, ciclones y huracanes, incendios, terremotos y tsunamis) ✓ Fácil de usar ✓ Contiene interfaz gráfica, se pueden cambiar parámetros y supuestos para mostrar estrategias financieras en el contexto pre y post desastre. ✓ Se pueden elegir diferentes fuentes de financiamiento. ✓ Produce escenarios de costos y beneficios con las consecuencias de las diferentes acciones en indicadores como crecimiento económico o la deuda ✓ Calcula la combinación óptima de medidas y resultados en Google maps 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desarrollo y mantenimiento del modelo es por parte de un instituto en Austria. ▪ Escala a nivel nacional 	
--	--	---	--

CONCLUSIONES

La costa es una zona de gran fragilidad, sus ecosistemas costeros están expuestos a diferentes

amenazas y sufrirán los impactos del incremento del nivel del mar, que afectarán principalmente su distribución, diversidad y productividad. Esta vulnerabilidad se acentuará por la concentración de la población en la zona costera en corto y mediano plazo.

Es urgente el estudio de la vulnerabilidad en el país, pero se requieren esfuerzos adicionales multidisciplinarios que generen datos biofísicos y socioeconómicos de cada región, para desarrollar instrumentos de evaluación que brinden

estrategias y medidas de adaptación acordes a las condiciones y necesidades particulares de cada sistema costero (natural o social) y, poder enfrentar los impactos del cambio climático de manera exitosa (lo más pronto posible y) a largo plazo.

Aunque las herramientas DIVA y CATSIM se han aplicado en otros países y han generado excelentes resultados para las estrategias de adaptación ante el aumento del nivel del mar, y manejo de riesgos ante desastres naturales; en México, y concretamente en el Caribe mexicano, la aplicación de la metodología del IPCC y el Análisis Multicriterio, para evaluar los ecosistemas costeros y enfocarse en las medidas de adaptación han producido también excelentes resultados, y esto sólo se logra con el producto de años de esfuerzo y colaboración de instituciones de investigación y de educación superior, que

puede ser la base para crear nuevos instrumentos de evaluación de ecosistemas costeros mexicanos que son únicos por sus características particulares.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Quintana por la oportunidad de realizar estudios de doctorado en el CINVESTAV-Unidad Mérida, a través de la beca PRODEP. Este documento es un extracto del tema desarrollado para la presentación del Examen General de Conocimientos. Los comentarios de dos revisores anónimos mejoraron en gran medida la presentación final de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Adger, W.N., T.P. Hughes, C. Folke, S.R. Carpenter & J. Rockström. 2005. Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*. 309(5737): 1036-1039
- Blanchon, P., R. Iglesias-Prieto, E. Jordán Dahlgren & S. Richards. 2011. Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. 295-314. En: Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). 2011. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 2ª ed. México. 754 p.
- Botello, A.V. & S. Villanueva-Fragoso. 2011. Introducción. 1-14. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 2ª ed. México. 754 p.
- Flores Verdugo, F.J, P. Casasola, G. de la Lanza-Espino & C. Agraz. 2011. El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático. 205-228. En: Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). 2011. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 2ª ed. México. 754 p.
- Gallegos Martínez, M.E. 2011. Efectos del cambio climático sobre las praderas de pastos marinos. 255-276. En: Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). 2011. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 2ª ed. México. 754 p.
- Hernández Arana, H. 2007. Calentamiento global y zonas costeras: peligrosa combinación. *Ecofronteras*. 31: 10-13.
- Hinkel, J. & R.J.T. Klein. 2009. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea level rise: the development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*. 19:384-395.
- Hinkel, J., R.J. Nicholls, A.T. Vafeidis, R.S.J. Tol & T. Avagianou. 2010. Assessing risk of and adaptation to sea-level rise in the European Union: an application of DIVA. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*. 15:703-719.

Hinkel, J., D.P. van Vuuren, R.J. Nicholls & R.J.T. Klein. 2013. The effects of adaptation and mitigation on coastal flood impacts during the 21st. century. An application of the DIVA and IMAGE models. *Climatic Change*. 117:783-794.

Hochrainer, S. 2008. www.start.org/Program/advanced_institute3.../Hochrainer.ppt

Hochrainer-Stigler, S., R. Mechler & G. Pflug. 2012. Modeling macro scale disaster risk: the CATSIM Model. Chapter: Integrated Catastrophe Risk Modeling. 32: 119-143. Series Advances in Natural and Technological Hazards Research.

IIASA, 2016. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/RISK/CATSIM.en.html>

IPCC. 2012. www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml

Liceaga-Correa, M.A., L.U. Arellano Méndez & H. Hernández-Núñez. 2011. Efectos de los huracanes y cambio climático sobre el Caribe mexicano: adaptabilidad de los pastos marinos. 277-294. En: Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). 2011. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 2ª ed. México. 754 p.

Nirupama, N. 2012. Risk and vulnerability assessment: a comprehensive approach.

International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment. 3(2): 103-114

PEACC. 2014. Programa Especial de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Yucatán. Análisis de opciones de adaptación al cambio climático, estrategias e indicadores. Factor CO2 Ideas, Yaax Beh, Instituto EPOMEX, CINVESTAV-Mérida, PIKE-CARBOSUR, Gobierno de Yucatán, INECC y BID. 192 p.

PNUMA REGATTA. 2015. Metodología para la identificación y priorización de medidas de adaptación frente al cambio climático. SEMARNAT-GIZ. www.cambioclimatico-regatta.org/index.../documents-and-tools?

Ponce-Vélez, G., S. Villanueva-Fragoso & C. García Ruelas. 2011. Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros del Golfo y Caribe Mexicanos. 37-72. En: Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). 2011. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 2ª ed. México. 754 p.

Rahmstorf, S. 2012. Sea-level rise: towards understanding local vulnerability. *Environmental Research Letters*. 7 (2): 021001

Romieu, E., T. Welle, S. Schneiderbauer, M. Pelling & C. Vinchon. 2010. Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies

Herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera

through coastal applications. Sustainability science. 5(2): 159-170

Sahin, O. & S. Mohamed. 2014. Coastal vulnerability to sea-level rise: a spatial-temporal assessment framework. Natural Hazards. 70 (1): 395-414.

Schäfer, L. 2014. Stocktaking of climate risk assessment approaches related to loss and damage. GIZ and UNU-EHS. 34 p.

Shepard, C.C., Agostini, V. N., Gilmer, B, Allen, T., Stone, J., Brooks, W. & Beck, M. 2012. Assessing future risk: quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York. Natural Hazards. 60(2): 727-745

Vafeidis, A.T., R.J. Nicholls, L. McFadden, R.S.J. Tol, J. Hinkel, T. Spencer, P.S. Grashoff, G. Boot & R.J.T. Klein. 2008. A new global database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. Journal of Coastal Research. 24(4): 917-924.

Wolf, S. 2012. Vulnerability and risk: comparing assessment approaches. Natural Hazards. 61(3): 1099-1113.

Yin, J., Z. Yin, J. Wang & S. Xu. 2012. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. Journal of Coastal Conservation. 16 (1): 123-133
<https://www.pikpotdam.de/research/projects/projects-archive/favaia/diva>

<http://www.diva-model.net/>

https://unfccc.int/files/national_reports/nn-annex_i_natcom/cge/application/pdf/diva_print_me_first.pdf