

## **Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático\***

### **Adaptation of coastal vulnerability model in the coast of Tabasco to climate change**

**Rodimiro Ramos Reyes<sup>1&2</sup>, Lilia María Gama Campillo<sup>3</sup>, Juan Carlos Núñez Gómez<sup>1</sup>, Rufo Sánchez Hernández<sup>4</sup>, Humberto Hernández Trejo<sup>3</sup> y Osías Ruíz Álvarez<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>El Colegio de la Frontera Sur-LAIGE. Carretera Villahermosa-Reforma, km 15.5 s/n. Ranchería Guineo, 2 Sección, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco. Tel: 52 993 313 6110. (rros@ecosur.mx; jnunez@ecosur.edu.mx) <sup>2</sup>División Académica de Ciencias Biológicas- Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas, km 0.5 s/n. C. P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. <sup>3</sup>División de Académica de Ciencias Biológicas-Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas, km 0.5 s/n. C. P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. +52 993 3544308. (lilygama@yahoo.com; hhtrejo@gmail.com). <sup>4</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco- División de Académica de Ciencias Agropecuarias. Carretera Villahermosa-Teapa, km 25, Ranchería La huasteca, Municipio del Centro, Tabasco, C. P. 86040, México. (rusaher@hotmail.com). <sup>5</sup>Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas, km. 32.5. 20660. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. (ruiz.osias@inifap.gob.mx). <sup>6</sup>Autor para correspondencia: rreyes73@hotmail.com.

## **Resumen**

Las zonas costeras enfrentan drásticamente el efecto del cambio climático (CC), por su ubicación geográfica son propensas a erosión e inundación, provocando pérdida de tierras y cultivos agrícolas cercanos a la costa, reduciendo la distribución de especies naturales y cultivadas. El incremento del nivel del mar (INM) es un efecto provocado por el CC, que incrementa la vulnerabilidad de las comunidades costeras en el mundo. El índice de vulnerabilidad costera (IVC), es una metodología basada en un complejo conjunto de factores costeros que identifican el riesgo de un peligro en específico. El objetivo fue analizar la compatibilidad y adaptabilidad del IVC en el litoral tabasqueño, ante los efectos del cambio climático. Con base en una revisión bibliográfica, se obtienen datos precisos sobre los impactos potenciales del INM en el estado de Tabasco. Se concluye que el enfoque del IVC es posible aplicarlo considerando variables que contribuyen a la adaptación de la costa, como es la geomorfología costera, pendiente costera, aumento del nivel del mar, cambio en la línea de costa, oleaje y rango mareal. En el caso particular del litoral tabasqueño, las variables sedimentación y subsidencia puede robustecer la predicción de los impactos del INM. La

## **Abstract**

Coastal areas face drastically the effect of climate change (CC), for its geographical location are prone to erosion and flooding, causing loss of land and crops near to the coast, reducing the distribution of natural and cultivated species. The sea level rise (INM) is caused by CC, which increases the vulnerability of coastal community's worldwide. Coastal vulnerability index (IVC) is a methodology based on a complex set of coastal factors that identify the risk of a specific danger. The objective was to analyze the compatibility and adaptability of IVC in the coast of Tabasco, to the effects of climate change. Based on a literature review, accurate data on the potential impacts of INM in the state of Tabasco are obtained. It is concluded that the approach of IVC is possible to apply considering variables that contribute to the adaptation of the coast, such as coastal geomorphology, coastal slope, sea level rise, changes in the coastline, waves and tidal range. In the particular case of Tabasco coast, sedimentation and subsidence variables can strengthen the prediction of the impacts from INM. The lack of information on some variables is a limitation on the application of IVC on the coast of Tabasco, although it is feasible to make

\* Recibido: noviembre de 2015  
Aceptado: febrero de 2016

falta de información de algunas variables, es una limitación en la aplicación del IVC en la costa de Tabasco, aunque es factible realizar adaptaciones al modelo, debido a que dependiendo de las características costeras locales, algunas variables influyen en mayor o menor grado en la precisión de la información obtenida.

**Palabras clave:** erosión costera, inundación, incremento del nivel del mar y costa.

## Introducción

Las zonas costeras representan la primera porción terrestre en afrontar eventos extremos atribuidos al cambio climático (CC) tales como, intensos huracanes, inundaciones severas (tanto temporales como permanentes) y el incremento del nivel del mar (INM) (Bijlsma *et al.*, 1996; Sheik y Chandrasekar, 2011). La ocurrencia de estos eventos climáticos provocará la pérdida de tierras costeras al ser erosionadas e inundadas (Nicholls, 2002), causando cambios irreversibles en la ecología de los manglares (Finlayson *et al.*, 2013; Junk *et al.*, 2013) y pérdidas en los cultivos agrícolas cercanos al litoral (Turner *et al.*, 1996). Bajo este contexto, las implicaciones del CC son de preocupación, sobre todo porque en México, las zonas costeras son de relevancia económica para el país (Lara *et al.*, 2008).

Existe una alta probabilidad que la cantidad y magnitud de eventos climáticos extremos incrementen en el futuro, pero a la par se espera que los métodos y herramientas ofrezcan alternativas para la adaptación y mitigación al CC (ONU/EIRD, 2008). El INM afectará las zonas costeras del país, siendo las más vulnerables las del Golfo de México y el mar Caribe, donde sobresalen las costas tabasqueñas por su alta vulnerabilidad (SEMARNAP, 1997), sufriendo grandes impactos en la agricultura (IPCC, 2007).

La vulnerabilidad y su impacto en la economía de los países con litorales costeros, hacen necesario evaluar los INM y a la vez formular estrategias de respuesta que vayan acoplados a los cambios (Vafeidis *et al.*, 2008). Por otro lado se propone que la atención de problemas ambientales debe hacerse desde perspectivas holísticas, ello ayudará a alcanzar respuestas concretas (Reyes *et al.*, 2004). Sin embargo, hasta ahora no existe una metodología estándar para medir vulnerabilidad en las costas, por lo que existen múltiples enfoques, cada uno con ventajas y limitaciones.

adaptations to the model, because depending on local coastal features, some variables influence more or less in the accuracy of the information obtained.

**Keywords:** coastal erosion, flooding, sea level rise and coast.

## Introduction

Coastal zones are the first land portion facing extreme events attributed to climate change (CC) such as, intense hurricanes, severe flooding (both temporary and permanent) and sea level rise (INM) (Bijlsma *et al.*, 1996; Sheik and Chandrasekar, 2011). The occurrence of these weather events will cause loss of coast being eroded and flooded (Nicholls, 2002), causing irreversible changes in mangrove ecology (Finlayson *et al.*, 2013; Junk *et al.*, 2013) and losses of agricultural crops near the coast (Turner *et al.*, 1996). In this context, the implications of CC are of concern, especially because in Mexico, coastal areas are of economic importance for the country (Lara *et al.*, 2008).

There is a high probability that the number and magnitude of extreme weather events will increase in the future, but at the same time it is expected that the methods and tools provide alternatives for adaptation and mitigation to CC (ONU/EIRD, 2008). The INM will affect coastal areas from the country, being the most vulnerable the Gulf of Mexico and Caribbean Sea, where the coast of Tabasco stands for its high vulnerability (SEMARNAP, 1997), suffering great impacts on agriculture (IPCC, 2007).

Vulnerability and its impact on the economy of the countries with coastlines make necessary to assess INM and at the same time to formulate response strategies that are coupled with changes (Vafeidis *et al.*, 2008); on the other hand it is proposed that approach to environmental problems must be made from holistic perspectives, this will help achieve concrete answers (Reyes *et al.*, 2004). However, so far there is no standard methodology to measure vulnerability on the coast, so there are multiple approaches, each with advantages and limitations.

Based on the current concern for CC and the effects that it will bring to the coastal region, a literature review is necessary, to know the adaptation of the vulnerability model applied to date in the coast of Tabasco. The objective of this study is to analyze the compatibility and adaptability of the IVC methodology for the coast of Tabasco, taking into account local features and information available.

Con base en la actual preocupación del CC, y las afectaciones que traerá a la región costera, se hace necesaria una revisión bibliográfica a fin de conocer la adaptación del modelo de vulnerabilidad aplicado hasta la fecha en el litoral tabasqueño. En ese sentido este estudio tiene como objetivo analizar la compatibilidad y adaptabilidad de la metodología IVC para el litoral tabasqueño, considerando las características locales y la información disponible.

### El área de estudio y características vulnerables

La zona costera de Tabasco se ubica entre los 92° 28' y los 94° 10' de longitud oeste, y los 17° 15' y los 18° 39' de latitud Norte (Hernández *et al.*, 2008), con un litoral costero de 200 km repartido en los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso y Frontera, que en su conjunto albergan cerca de 616 500 habitantes (INEGI, 2010). El mar adyacente a su línea de costa es el Golfo de México, una de las aguas más complejas y productivas del mundo (Tunnell *et al.*, 2004).

La costa tabasqueña es resultado de importantes procesos aluviales (West *et al.*, 1985) originados por la dinámica fluvial ejercida por la cuenca Grijalva-Usumacinta, Río González y Tonalá. Debido a su génesis dominada por la acumulación de sedimentos, las costas de Tabasco son bajas arenosas ubicadas a menos de un metro sobre el nivel del mar, lo que las hace vulnerables a pequeñas variaciones (Ortiz y Linares, 1999).

En este contexto de vulnerabilidad el litoral tabasqueño (Figura 1), alberga recursos naturales de gran importancia como la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC), considerada la unidad de almacenamiento energético más importantes de Norteamérica (Toledo, 2003) así como zonas de cultivos agropecuarios como pastizales, cacao, maíz, huertos familiares y sistemas lagunares Carmen-Pajonal-Machona y Mecoacán; dando lugar a especies pesqueras de importancia comercial, de donde se obtiene el 90% de la pesca del estado (Contreras y Castañeda, 2004). Asociados a estos cuerpos lagunares costeros de Tabasco se encuentran las especies de mangle *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) (Villanueva *et al.*, 2010), condicionadas a diferentes gradientes de salinidad y periodos de inundación.

De acuerdo con estaciones mareográficas de la región, la marea es de tipo mixta con influencia diurna. El oleaje es moderado en dirección E-W con alturas máximas de 2 m en

### Study area and vulnerable features

The coastal area of Tabasco is located between 92° 28' and 94° 10' west longitude and 17° 15' and 18° 39' north latitude (Hernández *et al.*, 2008), with a coastline of 200 km distributed in the municipalities of Huimanguillo, Cardenas, Paraiso and Frontera, which together are home to about 616 500 inhabitants (INEGI, 2010). Adjacent to its coastline is the Gulf of Mexico, one of the most complex and productive waters in the world (Tunnell *et al.*, 2004).

The coast of Tabasco is the result of significant alluvial processes (West *et al.*, 1985) caused by the river dynamics exerted by the Grijalva-Usumacinta basin, Gonzalez and Tonalá River. Due to its genesis dominated by the accumulation of sediments, the coasts from Tabasco are sandy low located less than one meter above sea level, making them vulnerable to small variations (Ortiz and Linares, 1999).

In this context of vulnerability the coast from Tabasco (Figure 1), host important natural resources such as the biosphere reserve Pantanos de Centla (RBPC), considered the most important unit of energy storage in North America (Toledo, 2003) as well as areas for agricultural crops like pastures, cocoa, corn, family orchards and lake systems Carmen-Pajonal-Machona and Mecoacán; giving place to commercially important fish species, of which 90% of the state fishing (Contreras and Castañeda, 2004) is obtained. Associated to these coastal lagoons from Tabasco are mangrove species *Rhizophora mangle* (red mangrove), *Avicennia germinans* (black mangrove), *Laguncularia racemosa* (white mangrove) and *Conocarpus erectus* (Buttonwood mangrove) (Villanueva *et al.*, 2010) conditioned to different salinity gradients and flooding periods.

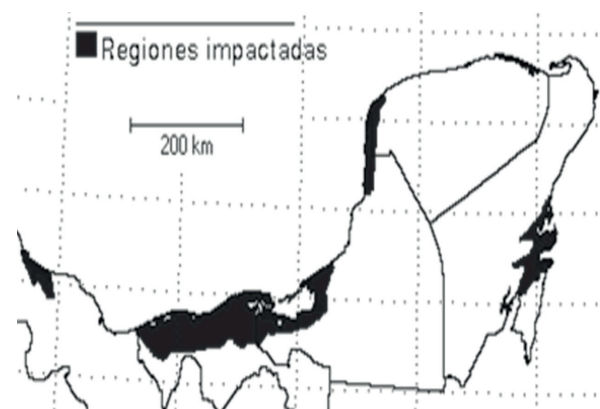


Figura 1. Zonas vulnerables al incremento del nivel del mar. SEMARNAP (1997).

Figure 1. Vulnerable areas to rising sea level. SEMARNAP (1997).

condiciones normales; sin embargo los vientos provenientes del norte aumentan considerablemente el oleaje con alturas de hasta 5 metros (SEMAR, s/f; Lankford, 1976).

Algunos estudios realizados en la costa de Tabasco evidencian la vulnerabilidad frente al INM (Hernández *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010), el principal impacto es la erosión costera, que en algunos sitios ha sido alarmante (-3 a -5 m/año en Sánchez Magallanes, Figura 2).



**Figura 2. Impactos producidos por el INM. Sánchez Magallanes, Cárdenas, Tabasco.**

**Figure 2. Impacts produced by INM. Magallanes Sanchez Cardenas, Tabasco.**

### Modelo de vulnerabilidad: la inserción del término en el contexto costero

Para el IPCC (2007) la vulnerabilidad refleja la capacidad de un sistema o subsistema para afrontar la variabilidad climática y eventos extremos. Esta conceptualización conlleva a esperar una respuesta ya sea positiva o negativa, en la medida de las condiciones que se encuentre la costa (CEPAL, 2012). Sin embargo, la exposición, resistencia y resiliencia son quienes determinan en el contexto físico, de la vulnerabilidad de la zona costera (Figura 3). Por lo tanto cualquier estudio de vulnerabilidad, parte de la evaluación de impactos físicos en el medio natural (Klein y Nicholls, 1999).

De acuerdo al modelo adoptado, los primeros tres componentes indican la vulnerabilidad natural (o relativa); es decir, los impactos sufridos en el medio físico. No obstante, la capacidad de adaptación además de complementar el modelo, se convierte en el factor determinante de la vulnerabilidad real (o neta) del sistema. Por lo tanto, muchos sistemas tendrán vulnerabilidad natural alta, pero vulnerabilidad socioeconómica baja (Ojeda *et al.*, 2011) si cuentan con elementos o estrategias eficientes de adaptación. Por lo cual, los efectos del INM pueden impactar los recursos costeros, pero estos serán mayores en regiones con capacidad de adaptación reducida (Bijlsma *et al.*, 1996).

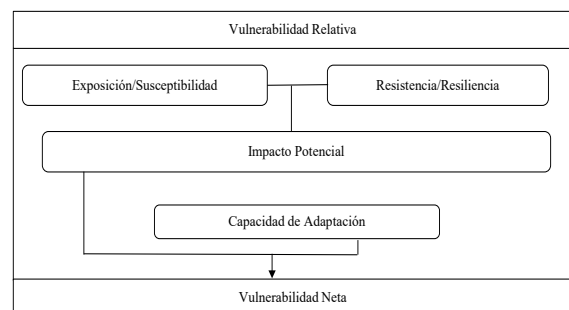
According to tidal stations in the region, the tide is mixed with diurnal influence. The waves are moderate in E-W direction with maximum heights of 2m under normal conditions; however the winds from the north significantly increase wave heights up to 5 meters (SEMAR, s/f; Lankford, 1976).

Some studies performed in the coast of Tabasco show the vulnerability to INM (Hernandez *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010), the main impact is coastal erosion, which in some places has been alarming (-3 to -5 m / year in Sanchez Magallanes, Figure 2).

### Vulnerability model: the inclusion of the term in the coastal context

For the IPCC (2007) vulnerability reflects the ability of a system or subsystem to cope with climate variability and extreme events. This conceptualization leads to expect an answer either positive or negative, to the extent in which are the coasts conditions (CEPAL, 2012). However, exposure, resistance and resilience are who determined in the physical context, the vulnerability of the coastal zone (Figure 3); therefore any vulnerability study, parts from the assessment of physical impacts on the environment (Klein and Nicholls, 1999).

According to the adopted model, the first three components indicate natural vulnerability (or relative); i.e. the impacts suffered in the physical environment. However, the ability to adapt, besides to complement the model, become the determinant factor of real vulnerability (or net) of the system. Therefore, many systems will have high natural vulnerability, but low socio-economic vulnerability (Ojeda *et al.*, 2011) if it counts with the elements or efficient adaptation strategies. Therefore, the effects of INM can impact coastal resources, but these will be higher in regions with reduced capacity of adaptation (Bijlsma *et al.*, 1996).



**Figura 3. Componentes de la vulnerabilidad.** Con base en Klein y Nicholls (1999) y Ojeda *et al.* (2011).

**Figure 3. Vulnerability components.** Based on Klein and Nicholls (1999) and Ojeda *et al.* (2011).

En Tabasco, el área de costa juega un papel importante en la economía de la entidad, en particular la de los municipios de Cárdenas, Paraíso y Centla, así como de otros cercanos a la franja del litoral (Huimanguillo, Comalcalco y Jalpa de Méndez); dicho borde costero se extiende a lo largo de 200 km, incluyendo una extensa red de escurrimientos, llanuras deltaicas, sistemas lagunares, esteros y marismas (Rodríguez-Rodríguez, 2002). La superficie de esta zona, asciende a 80 000 hectáreas aproximadamente, lo que representa 3.2% con respecto al total de la entidad; el uso potencial del área costera se ha restringido a las actividades agropecuarias, específicamente al cultivo de cocotero, ganadería extensiva, cultivos hortícolas en pequeñas áreas, y más recientemente a la explotación forestal del mangle (Palma-López *et al.*, 2007).

Los efectos del CC pueden generar diferentes niveles de vulnerabilidad, según la manera de cómo los enfrenten las comunidades, así como a las condiciones del espacio geográfico. De acuerdo a De la lanza *et al.* (1993), los cambios ambientales y la intervención del hombre han provocado una disminución en la superficie y cambios en la biodiversidad de los manglares, en el área de la laguna de Términos, Campeche. En Tabasco se observa una situación contraria; la subsidencia del complejo deltaico favorece el avance de la línea de costa hacia el continente y los efectos se observan a través de la erosión de playas y bocas, así como por la intrusión de agua marina hacia el continente, lo que contribuye a ampliar las áreas inundadas (Ortiz *et al.*, 2005), condición que favorece el crecimiento de áreas de manglar.

Una evidencia de la adaptación de algunas especies a los cambios ambientales, son las modificaciones en los patrones de distribución de éstas. Según Guerra y Ochoa (2006), a pesar de que en 1992 los pantanos de Centla fueron declarados como área protegida, la variación por pérdida en los tipos de vegetación y uso del suelo no se ha detenido; solamente el manglar ha sido capaz de mantener la superficie ocupada e inclusive en otras partes de la costa de Tabasco, dicha superficie se ha incrementado.

### **El modelo de medición adoptado: índice de vulnerabilidad costera**

Determinar con precisión la respuesta de la costa ante el INM es complejo, debido a las múltiples variables que entran en juego. Las zonas costeras son sistemas no lineales, donde las actividades humanas, los procesos naturales y

In Tabasco, the coastal area plays an important role in the economy of the entity, in particular in the municipalities of Cardenas, Paraiso and Centla, thus other nearby to the shoreline (Huimanguillo, Comalcalco and Jalpa de Méndez); the coastline stretches over 200 km, including an extensive network of runoff, deltaic plains, lagoon systems, marshes and swamps (Rodríguez-Rodríguez, 2002). The surface of this area is approximately of 80 000 hectares, representing 3.2% from the total surface of the entity; the potential use of the coastal area has been restricted to agricultural activities, specifically coconut, ranching, vegetable crops in small areas, and more recently to logging of mangrove (Palma-Lopez *et al.*, 2007).

The effects of climate change can generate different levels of vulnerability, in the manner of how communities face them and the conditions of geographical space. According to De la lanza *et al.* (1993), environmental changes and human intervention has led to a decrease in surface and changes in mangrove biodiversity in the lagoon area from Terminos, Campeche. In Tabasco the contrary situation is observed; the deltaic complex subsidence favors the advance of the coastline to the continent and the effects are seen through beaches and ports erosion, as well as the intrusion of sea water into the continent, contributing to expand flooded areas (Ortiz *et al.*, 2005), condition that favors the growth of mangrove areas.

Evidence of the adaptation of some species to environmental changes, are modifications in the distribution patterns of these. According to Guerra and Ochoa (2006), although in 1992 the pantanos de Centla were declared as protected area, the variation by loss in the types of vegetation and land use has not stopped; only mangrove has been able to maintain the area occupied and even in other parts of the coast of Tabasco, such surface has increased.

### **The measurement model adopted: coastal vulnerability index**

Accurately determine the response of the coast to INM is complex due to many variables that come into play. Coastal areas are non-linear systems, where human activities, natural processes and policies regulations determine their ability to address and mitigate adverse events; however, these play an important role in INM (Pendleton *et al.*, 2010).

The methodological framework from IVC prepared by Gornitz *et al.* (1992) and proposed to assess the vulnerability of the Atlantic coast of the United States of America (USA)

las regulaciones políticas determinan su capacidad para enfrentar y mitigar los eventos adversos, sin embargo, juegan un papel preponderante al INM (Pendleton *et al.*, 2010).

El marco metodológico del IVC, elaborado por Gornitz *et al.* (1992) y propuesto para evaluar la vulnerabilidad de la costa atlántica de Estados Unidos de América (EE.UU.) consideró indicadores que influyen en los riesgos de inundación y erosión costera, por lo tanto prioriza las condiciones físicas de la costa en los potenciales impactos por INM. Este modelo también fue aplicado para medir la sensibilidad de las costas canadienses (Shaw *et al.*, 1998), en este caso, por sensibilidad se entiende, la magnitud del cambio en la costa producido por un aumento en el nivel del mar. Sin embargo, Thieler y Hammar (1999) ajustaron la propuesta de Gornitz (1992) para evaluar vulnerabilidad en parques costeros regionales y nacionales de EE.UU., considerando solo seis variables (Cuadro 1). Más recientemente, Ojeda *et al.* (2011) aplicó el modelo ya ajustado, aunque hizo adecuaciones en una de las variables (sustituyó pendiente costera por índice topográfico) de acuerdo a las exigencias de la costa andaluza en España.

considered indicators that influence in risks of flooding and coastal erosion, thus prioritizing the physical conditions of the coast in potential impacts by INM. This model was also applied to measure the sensitivity of Canadian waters (Shaw *et al.*, 1998), in this case, by sensitivity understand, the magnitude of change in the coast produced by sea level rise. However, Thieler and Hammar (1999) adjusted Gornitz (1992) proposal to assess vulnerability in regional and national coastal parks from USA, considering six variables (Table 1). More recently, Ojeda *et al.* (2011) applied the model already fit, but made adjustments in one of the variables (replacing coastal slope for topographic index) according to the requirements of the Andalusian coast in Spain.

This methodology uses a weighting system of 1 (very low) to 5 (very high vulnerability), for each of the variables. The combination of six variables gives the degree of vulnerability of the coast (Ojeda *et al.*, 2011) as follows:

$$IVC = \sqrt{\frac{a*b*c*d*e*f}{6}}$$

**Cuadro 1. Variables consideradas en cada uno de los países evaluados.**  
**Table 1. Variables considered in each of the countries evaluated.**

| Variables                                      | USA <sup>a</sup>         | Canadá <sup>b</sup>      | USA <sup>c</sup>                      | España <sup>d</sup>                   |
|--|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Relieve (altitud del terreno)                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                                       |                                       |
| Tipo de roca (resistencia a erosión)*          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |                                       |                                       |
| Forma costera*                                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> <sup>1</sup> | <input type="checkbox"/> <sup>1</sup> |
| Pendiente costera                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>              | <input type="checkbox"/> <sup>2</sup> |
| Cambio relativo del nivel del mar              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>              | <input type="checkbox"/>              |
| Cambio en la línea de costa (erosión-acreción) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>              | <input type="checkbox"/>              |
| Rango mareal                                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>              | <input type="checkbox"/>              |
| Altura de oleaje medio significativa           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>              | <input type="checkbox"/>              |

Incluye tipo de roca (litología); <sup>1</sup>sustituida por índice topográfico <sup>2</sup>\*variables descriptivas. <sup>a</sup>Gornitz *et al.* (1992), <sup>b</sup>Shaw *et al.* (1998), <sup>c</sup>Thieler y Hammar (1999) y <sup>d</sup>Ojeda *et al.* (2009).

Esta metodología utiliza un sistema de ponderación de 1 (muy baja) a 5 (muy alta vulnerabilidad), para cada una de las variables. La combinación de las seis variables resulta el grado de vulnerabilidad de la costa (Ojeda *et al.*, 2011)

quedando de la siguiente manera:  $IVC = \sqrt{\frac{a*b*c*d*e*f}{6}}$

Variables geológicas/geomorfológicas: geomorfología costera, tasa de cambio de la línea de costa a largo plazo y pendiente costera.

Geological / geomorphological variables: coastal geomorphology, change rate of the coastline long-term and coastal slope.

Physical / hydrodynamic variables: change rate for relative sea level, average significant wave height and average tidal range. The six variables are integrated into an equation that gives as result the IVC and consequently different degrees of vulnerability along the coast; already applied in different countries (Table 1).

Variables físicas/hidrodinámicas: tasas de cambio del nivel relativo del mar, altura media del oleaje significativo y rango mareal medio. Las seis variables se integran en una ecuación que da como resultado el IVC y por consecuencia diferentes grados de vulnerabilidad a lo largo del litoral. Ya aplicada en diferentes países (Cuadro 1).

Los resultados del índice permiten anticiparse a los impactos que experimentará la costa por el INM. Sin embargo, este modelo solo indica la vulnerabilidad relativa de cada tramo costero en función de su exposición (medio físico) frente al INM. Esto representa la base para realizar estudios con mayor detalle y permite estimar los riesgos y tomar las medidas necesarias, para salvaguardar los bienes en las costas.

Aunque hay plena confianza que este modelo es aplicable a cualquier entorno costero (Gornitz, 1992; Thieler y Hammar, 1999), se analiza cada una de las variables consideradas, dado que el modelo ha sido aplicado en regiones amplias (costa andaluza española, costas atlánticas de EE.UU., costas de Canadá). Lo anterior se argumenta debido a que un litoral de mayor extensión permite tener paisajes más diversos; sin embargo, en un litoral "corto" como el de Tabasco (200 km) existen menor número de ambientes, lo que conlleva a reducir las clasificaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, los procesos oceánicos costeros que inciden pueden darse en menor o mayor intensidad, lo que también influye en los indicadores de vulnerabilidad. Al final con este análisis se pretende asegurar que la metodología sea aplicable para la costa tabasqueña y sino, incluir nuevas variables o modificar las que sean necesarias.

### La metodología adoptada y su pertinencia para las costas de Tabasco

La metodología propuesta se ha aplicado en el mundo a diversos litorales costeros, por lo tanto, alimentar el modelo requiere considerar aspectos fundamentales, como las características propias de la costa en estudio, las presiones del entorno, su capacidad de adaptación y los datos disponibles (Figura 4).

### Variables propuestas vs condiciones locales

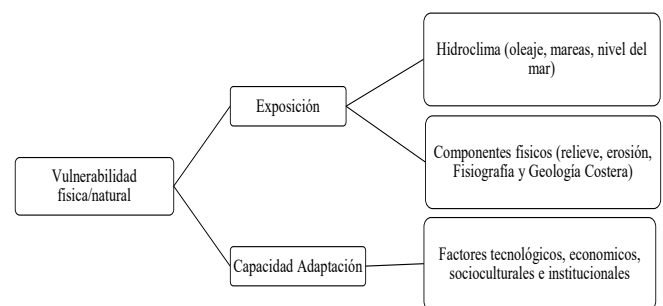
El bajo relieve, el origen de su formación, la influencia anual de frentes fríos y la presión excesiva de actividades antrópicas, ubican a la costa tabasqueña en condiciones de alta vulnerabilidad ante el INM. Sin embargo, todos los sistemas naturales poseen capacidad para resistir y recuperarse del daño, lo que en ecología es conocido como

Index results allow anticipating the impacts that the coast will experience by INM. However, this model only indicates the relative vulnerability of each coastal stretch in terms of their exposure (physical environment) against INM. This represents the basis to perform studies with greater detail and allows estimating the risk and taking the necessary measures to safeguard the assets on the coasts.

Although there is plenty confidence that this model is applicable to any coastal environment (Gornitz, 1992; Thieler and Hammar, 1999), analyze each of the variables considered, since the model has been applied in large regions (Spanish Andalusian coast, Atlantic coast from US, Canadian coasts). This is argued because a more extensive coastline allows more diverse landscapes; however, in a "short" coastline like Tabasco (200 km) there are fewer environments, leading to reduce vulnerability classifications. On the other hand, coastal ocean processes influencing may be of greater or lesser intensity, which also affects vulnerability indicators. At the end the objective of this analysis is to ensure that the methodology is applicable to the coast of Tabasco and if not to include new variables or modify as necessary.

### Methodology adopted and its relevance to the coast of Tabasco

The proposed methodology has been applied in the world to different coastal areas, therefore, to feed the model requires considering key aspects such as own characteristics of the coast under study, environmental pressures, its adaptability and available data (Figure 4).



**Figura 4. Componentes para evaluar vulnerabilidad por exposición en las costas de Tabasco.** Con base en Gornitz *et al.* (1992), Shaw *et al.* (1998), Thieler y Hammar (1999) y Ojeda *et al.* (2009).

**Figure 4. Components to assess vulnerability by exposure on the coast of Tabasco.** Based on Gornitz *et al.* (1992), Shaw *et al.* (1998), and Hammar Thieler (1999) and Ojeda *et al.* (2009).

resistencia y resiliencia (Klein y Nicholls, 1999), estas cualidades limitan el impacto mediante la adaptación para responder a la elevación del nivel del mar. La metodología plantea confrontar los efectos propiciados por fenómenos marinos como el oleaje, las mareas y el nivel del mar y las cualidades de la costa para mitigar esos efectos, tales como la altitud sobre el nivel del mar y la resistencia de la costa, de acuerdo a su forma y origen geológico.

### 1. Geomorfología costera

Esta variable refleja la resistencia de la costa a la erosión, por lo tanto considera características que se atribuyen al origen geológico. Entre las geoformas costeras se pueden diferenciar los acantilados, playas extensas adosadas, flechas litorales, deltas, pantanos, depósitos glaciales, estuarios, lagunas costeras, cordones litorales, entre otros (West *et al.*, 1985).

Para el caso de Tabasco, la combinación de entrada fuerte de sedimentos y una densa vegetación de manglar pueden significar la estabilidad a largo plazo de una costa donde el mar está creciendo a tasas similares a las globales (Syvitski *et al.*, 2005). Aunque la variable geología/geomorfología en los estudios realizados hasta ahora ha considerado los manglares como un tipo de geoforma costera, el grado de vulnerabilidad asignado ha sido de moderada a muy alta vulnerabilidad (Cuadro 2). Sin embargo, por la menor diversidad de paisaje y la poca diferenciación geológica de los ambientes costeros de Tabasco, los manglares pueden tener un grado de vulnerabilidad menor (entre baja y moderada).

### 2. Pendiente costera

Tabasco forma parte de la región Golfo de México, donde predominan los terrenos bajos y llanos, dado que el litoral tabasqueño se extiende dentro de una llanura baja inundable ésta podría quedar fuera. Sin embargo, existen mínimas diferencias en la topografía, misma que mediante un modelo digital LIDAR, permitirá obtener mediciones de gran valor para hacer una diferenciación del relieve a lo largo del litoral.

### 3. Aumento del nivel del mar

Las tendencias en el Golfo de México van desde  $1.8 \pm 9.2$  mm/año (Zavala *et al.*, 2010). El peligro se hace mayor en la costa de Tabasco debido a su ubicación geográfica y los procesos de formación a los que ha estado sujeta. Sin embargo, los impactos pueden no ser uniformes en todo

## Variables proposed vs local conditions

Low relief, the origin of its formation, the annual influence of cold fronts and excessive pressure from human activities, locate the coast of Tabasco in high vulnerability to INM. However, all natural systems have the capacity to withstand and recover from damage, which in ecology is known as resistance and resilience (Klein and Nicholls, 1999) these qualities limit the impact through adaptation to meet the sea level rise. The methodology proposes to confront the effects favored by marine phenomena such as waves, tides and sea level and qualities of the coast to mitigate those effects, such as the altitude above sea level and coast resistance, according its shape and geological origin.

### 1. Coastal geomorphology

This variable reflects coast resilience to erosion, therefore takes into account characteristics attributed to geological origin. Between coastal landforms it can be distinguished cliffs, long beaches, spits, deltas, swamps, glacial deposits, estuaries, coastal lagoons, offshore bars, among others (West *et al.*, 1985).

In Tabasco's case, the combining of strong inflow of sediments and dense mangrove vegetation can mean long-term stability of a coast where the sea is growing at similar rates to global (Syvitski *et al.*, 2005). Although geology / geomorphology variable in studies performed to date has considered mangroves as a type of coastal landform, the vulnerability degree assigned is moderate to very high vulnerability (Table 2). However, due to the lower diversity of landscape and little geologic differentiation of coastal environments of Tabasco, mangroves could have a lower degree of vulnerability (low to moderate).

### 2. Coastal slope

Tabasco is part of the Gulf of Mexico region, where lowlands and plains predominate, since the Tabasco coast extends into a low flood plain, this could be left out. However, there are minor differences in topography same that through a LIDAR digital model will allow to obtain measurements of great value to perform a relief differentiation along the coast.

### 3. Sea level rise

Trends in the Gulf of Mexico range from  $1.8 \pm 9.2$  mm/year (Zavala *et al.*, 2010). The danger becomes greater on the coast of Tabasco due to its geographical location and formation processes to which has been subject. However, the impacts



el litoral de Tabasco, ya que hay zonas de hundimientos naturales, otras que reciben aportes sedimentarios, unas más de alta presión humana principalmente por la extracción de hidrocarburos y las últimas protegidas con infraestructura costeras como geotubos, escolleras y espigones.

cannot be uniform throughout the coast of Tabasco, as there are natural subsidence areas, other receiving sedimentary contributions, some with higher human pressure mainly by the extraction of hydrocarbons and the last protected with coastal infrastructure as geotubes, jetties and breakwaters.

**Cuadro 2. Ambientes considerados en la variable geología-geomorfología.**  
**Table 2. Environments considered in geology-geomorphology variable.**

|                              | Geología/geomorfología                   |   |   |  |   |
|------------------------------|--|---|---|--|---|
|                              | Muy baja (1)                             | Baja (2)  | Moderada (3)  | Alta (4)   | Muy alta (5)  |
| Gornitz <i>et al.</i> (1992) | Playa Rocosa, Acantilados, Fiordos       | Acantilados medianos, costas abruptas             | Acantilados bajos, depósitos glaciales, marismas, arrecifes de coral, manglares | Estuarios, lagunas, planicies aluviales                          | Playas de barrera, playas arenosas, fangales, deltas                                    |
| Shaw <i>et al.</i> (1998)    | Fiordos, Acantilados rocosos altos       | Acantilados rocosos bajos y medianos              | Playa de sedimentos no consolidados sobre lecho rocoso                          | Playa de barrera, turba, fangales, deltas                        | Sedimento de hielo, plataformas de hielo, glaciares de marea                            |
| Thieler y Hammar (1999)      | Playas rocosas, acantilados, Fiordos     | Acantilados medianos, costas abruptas             | Acantilados bajos, Depósitos glaciales, planicie aluvial                        | Playas de cantos rodados, Lagunas, Estuarios                     | Playas de barrera y arenosas, marismas, pantanos, deltas, manglares, arrecifes de coral |
| Ojeda <i>et al.</i> (2009)   | Acantilados altos sobre rocas coherentes | Acantilados medios con rocas de resistencia media | Acantilados medio/bajos sobre sedimentos muy erosionables                       | Playas extensas adosadas a planicies sedimentarias poco elevadas | Playas adosadas, islas de barrera, flechas litorales, deltas, tómbolos.                 |

#### 4. Cambio en la línea de costa

Se considera que conocer el presente y pasado de la costa es vital para detectar peligros por elevaciones del nivel del mar en las costas. En Tabasco, se han realizado estudios para evaluar esta variable (Hernández *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010); los datos encontrados muestran un retroceso costero alarmante, en el delta del Río San Pedro y San Pablo y en la zona de Sánchez Magallanes, de acuerdo a ello la costa tabasqueña da indicios de alta vulnerabilidad.

#### 5. Oleaje

El oleaje es un fenómeno que contribuye a las condiciones del clima marítimo, conocerlo y predecir su comportamiento es fundamental, dado que su ocurrencia modifica la línea costera (Pérez *et al.*, 2008).

#### 4. Change in shoreline

It is considered that knowing the present and past of the coast is vital to detect risks by sea level rise on the coasts. In Tabasco, have been performed studies to evaluate this variable (Hernandez *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010); data found show an alarming coastal retreat, in the delta from Río San Pedro and San Pablo and in the area from Sanchez Magallanes, according to this the coast of Tabasco is showing signs of high vulnerability.

#### 5. Swell

Swell is a phenomenon that contributes to the conditions of maritime climate, to know and predict their behavior is critical, since its occurrence modifies the coastline (Pérez *et al.*, 2008).

La variable oleaje juega un papel primordial en la vulnerabilidad de la costa tabasqueña, en el entendido, que es de origen acumulativa. La dinámica del oleaje en Tabasco cambia dependiendo de las condiciones climáticas (tormentas, frentes fríos y los vientos). West *et al.* (1985) describían olas que oscilan entre 30 a 70 cm en condiciones climáticas tranquilas; sin embargo, en la época de nortes el oleaje se presenta con mayor energía que rebasan los 5 m (Lankford, 1976; SEMAR s/f). Esta combinación de relativa calma y agresiva tormenta provoca la migración de sedimentos con mayor fuerza, especialmente importante para una costa de origen acumulativo y con serias amenazas de impactos ante el INM, por ello debe considerarse seriamente en las evaluaciones de impactos (Hernández *et al.*, 2008).

## 6. Rango mareal

Normalmente los litorales costeros están sujetos a las mareas. Las costas de Tabasco son micromareales; es decir, la amplitud es pequeña. Gornitz *et al.* (1994) considera que un rango de mareas grande disipa la energía del oleaje, lo que limita la erosión activa a los períodos de marea alta pero a su vez puede provocar fuertes corrientes que pueden transportar sedimentos no consolidados. Cabe señalar, que esta variable no es relevante para la costa tabasqueña, y en cierto momento podría ser omitida o bien reemplazada por otra.

## VARIABLES ADICIONALES A LAS DEL MODELO

### Sedimentación

Las cuencas hidrológicas continentales son responsables de la estabilidad de las zonas costeras, producen, transportan y depositan los insumos para los ambientes costeros (Toledo, 2003). El aporte anual de los ríos del mundo se calcula entre 20 billones de toneladas métricas de sedimentos que llegarían en condiciones naturales (Milliman y Syvitski 1992). Sin embargo, más de 100 millones de toneladas de sedimento están siendo atrapadas en diques y presas construidos en los últimos 50 años (Syvitski *et al.*, 2005).

Esto es importante, dado que las costas de Tabasco son resultado de "poderosos procesos aluviales" (West *et al.*, 1985), como han sido la cuenca Grijalva-Usumacinta, la más grande y caudalosa de México. Sin embargo, en el

The variable swell plays an important role in the vulnerability of the coast of Tabasco, on the understanding, which is of cumulative origin. The swell dynamics in Tabasco changes depending on weather conditions (storms, cold fronts and wind). West *et al.* (1985) described waves ranging from 30 to 70 cm in calm weather; however, in the windy season the waves have more energy exceeding 5 m (Lankford, 1976; SEMAR s/f). This combination of relative calm and aggressive storm causes the migration of sediment, especially important for a cumulative cost of origin and serious threats to INM impacts, therefore it should be considered in impact assessments (Hernandez *et al.*, 2008).

## 6. Tidal range

Normally coastlines are subject to tides. The coasts of Tabasco are microtidal; that is, the amplitude is small. Gornitz *et al.* (1994) found that a large tidal range dissipates wave energy, limiting active erosion to high tide periods but in turn can cause strong currents that can carry unconsolidated sediments. It should be noted that this variable is not relevant to the Tabasco coast, and at one point could be omitted or replaced by another.

## ADDITIONAL VARIABLES TO THE MODEL

### Sedimentation

Inland watersheds are responsible for the stability of coastal areas, produce, transports and deposit the inputs for coastal environments (Toledo, 2003). The annual contribution of the world's rivers is estimated between 20 billion metric tons of sediment that come under natural conditions (Milliman and Syvitski 1992). However, over 100 million tons of sediment being trapped in dikes and dams built in the last 50 years (Syvitski *et al.*, 2005).

This is important, since the coast of Tabasco are the result of "powerful alluvial processes" (West *et al.*, 1985), as has been the Grijalva-Usumacinta basin, the largest and mighty of Mexico. However, in the affluent from Grijalva by the construction of the largest dams systems in the country (Angostura, Chicoasén, Malpaso and Peñitas) and more recently at the bottom of the basin a control gate, and there is a relationship between changes of land use and the supply of sediment (Geyer *et al.*, 2004).

afluyente del Grijalva por la construcción de sistema de presas más grandes en el país (Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas) y más recientemente en la parte baja de la cuenca una compuerta de regulación, existiendo una relación entre los cambios de uso del suelo y la oferta de sedimentos (Geyer *et al.*, 2004).

### Subsidencia

Los efectos de la presión humana en las costas contribuyen a mayores grados de vulnerabilidad. El asentamiento de centros urbanos importantes conlleva a la sobreexplotación de acuíferos, y construcciones en zonas propensas a inundación. La costa de Tabasco es una planicie con pendientes inferiores a 10.5%; sin embargo, el delta Grijalva-Usumacinta por condiciones naturales presenta subsidencia de descenso que se traduce en mayor erosión de la playa y retroceso de la línea costera (Ortiz y Linares, 1999). Por otro lado se considera que la subsidencia provocada por la extracción de fluidos del suelo (gas, petróleo y agua (Gornitz, 1994), favorecerá una mayor extensión de área inundable en la costa tabasqueña.

### Conclusiones

El modelo de vulnerabilidad que resulta de la revisión realizada en los diferentes escenarios costeros, arroja que para tener un mejor y más acertado índice de efectos de vulnerabilidad del cambio climático sobre el litoral tabasqueño, es necesario tomar en cuenta para su estudio las seis variables base, que son: geomorfología costera, pendiente costera, cambio en la línea costera, aumento en el nivel del mar, oleaje y rango mareal, contemplando que para Tabasco, esta última puede ser o no indispensable; pero agregando dos variables necesarias como lo son la sedimentación y subsidencia.

Para obtener resultados certeros es necesaria la correcta aplicación del modelo de índice de vulnerabilidad costera. Debido a la poca disponibilidad de datos, tendrían que realizarse monitoreos continuos, principalmente en sitios donde hay serias amenazas de erosión como Sánchez Magallanes y el delta de Grijalva-Usumacinta, lo anterior servirá para evaluar el potencial de impactos futuros.

### Subsidence

The effects of human pressure on the coast contribute to higher levels of vulnerability. The settlement of major urban centers leads to overexploitation of aquifers, and construction in flood-prone areas. The coast of Tabasco is a plain with slopes lower than 10.5%; however, Grijalva-Usumacinta delta for natural conditions has a decreased subsidence resulting in higher beach erosion and shoreline retreat (Ortiz Linares, 1999). On the other hand it considers that the subsidence caused by the extraction of ground fluid (gas, oil and water) (Gornitz, 1994), favor a more extensive flooding area in the Tabasco coast.

### Conclusions

The vulnerability model resulting from the review made in the different coastal scenarios, reveals that for better and more accurate vulnerability index from the effects of climate change on the Tabasco coast, it is necessary to taken into account for its study the six base variables, which are: coastal geomorphology, coastal slope, change in the coastline, sea level rise, swell and tidal range, considering that for Tabasco, the latter may or may not be essential; but adding two necessary variables such as sedimentation and subsidence.

For accurate results the correct application of the model of coastal vulnerability index is necessary. Due to the limited availability of data, continuous monitoring should be done, especially in places where there are serious threats of erosion like Sanchez Magallanes and the delta Grijalva-Usumacinta, the above will help to assess the potential future impacts.

The vulnerability of the Tabasco coast to sea level rise is evident; the application of this methodology with their respective adjustments will provide more accurate data on projected impacts and will be the basis to understand the changes on Tabasco coast and thus to plan strategies and make decisions in the medium and long term.

*End of the English version*



La vulnerabilidad de la costa tabasqueña ante el incremento del nivel del mar es evidente; la aplicación de esta metodología con sus respectivas adecuaciones, proporcionará datos más precisos de los impactos proyectados y será la base para entender las modificaciones del litoral tabasqueño y de esa manera planificar estrategias y tomar decisiones en el mediano y largo plazo.

## Literatura citada

- Bijlsma, L.; Ehler, C. N.; Klein, R. J. T.; Kulshrestha, S. M.; McLean, R. F.; Mimura, N. and Warrick, R. A. 1996. Coastal zones and small islands. *Climate Change 1995: impacts, adaptations, and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Contribution of working group II to the second assessment report of the IPCC.* 289-324 pp.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2012. Efectos de cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe: vulnerabilidad y exposición (consultado febrero, 2012). [http://www.eclac.org/publicaciones/xml/0/46750/2011786w.460\\_vulnerabilidad\\_y\\_exposición\\_web.pdf](http://www.eclac.org/publicaciones/xml/0/46750/2011786w.460_vulnerabilidad_y_exposición_web.pdf).
- Contreras, F. E. y Castañeda, O. 2004. Las lagunas costeras y estuarios del Golfo de México: hacia el establecimiento de índices ecológicos. *In: diagnóstico ambiental del Golfo de México.* Caso, M.; Pisanty, I. y Ezcurra, E. (Comps.). Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., 373-416 pp.
- Finlayson, C. M.; Davis, J. A.; Kingsford, R. T. and Parton, K. A. 2013. The status of wetlands and the predicted effects of global climate change: the situation in Australia. *Aquatic Sciences.* 75(1):73-93.
- Geyer, W. R.; Hill, P. S. and Kineke, G. C. 2004. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. *Continental Shelf Research.* 24:927-949.
- Gornitz, V.; White, T. W. and Cushman, R. M. 1992. Vulnerability of the U.S. to future sea level rise. conf-910780-i de 91 007853.
- Gornitz, V. M.; Daniels, R. C.; White, T. W. and Birdwell, K. R. 1994. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research. Coastal hazards: perception, susceptibility and mitigation. Special Issue No. 12.* 327-338.
- Guerra, M. V. y Ochoa, G. S. 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 59:7-25.
- Hernández, J. R.; Ortiz, P. M. A.; Méndez, A. P. y Gama, C. L. M. 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 65:7-21.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010 (consultado diciembre, 2010). <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=27>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group ii to the fourth assessment report of the IPCC.* Parry, M. L.; Canziani, O. F.; Palutikof, J. P.; van der Linden P. J. and Hanson, C. E. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976 p.
- Junk, W. J.; An, S.; Finlayson, C. M.; Gopal, B.; Květ, J.; Mitchell, S. A.; Mitsch, W. J. and Roberts, R. D. 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences.* 75(1):151-167.
- Klein, R. J. T. and Nicholls, R. J. 1999. Assessment of coastal vulnerability to climate change. 2(28):182-187.
- Lankford, R. R. 1976. Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification. *In: Wiley, M. (Ed.) Estuarine Processes.* Academic Press. New York. (2):182-215.
- Lara, J. R.; Arreola, J. A.; Calderón, L. E.; Camacho, V. F.; De la Lanza, G.; Escofet, A.; Ileana, M.; Guzmán, M. B. L.; López, M.; Meling, E. A.; Moreno, P.; Reyes, H.; Ríos, E. y Zertuche, J. A. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *In: capital natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D. F., 1:109-134.*
- Mazda, Y.; Magi, M.; Kogo, M. and Hong, N. 1997. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and salt marshes.* 1:127-135.
- Milliman, J. D. and Syvitski, J. P. M. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *J. Geology.* 100:525-544.
- Nicholls, R. 2002. Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth.* 27:1455-1466.
- Ojeda, J.; Álvarez, J. I.; Cajaraville, D. M.; Fraile, P.; Vallejo, I. y Márquez, J. 2011. Análisis preliminar de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía a la potencial subida del nivel del mar asociado al Cambio Climático. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Unión Europea. Fondo Europeo de Desarrollo Regional.* 154 p.
- ONU/EIRD (Naciones Unidas- Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres). 2008. El cambio climático y la reducción del riesgo de desastres. Ginebra (consultado mayo, 2008). <http://eird.org/publicaciones/rrd-cambio-climatico.pdf>. Nota informativa Núm. 1.
- Ortiz, P. M. A. y Linares, A. P. 1999. Escenarios por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 39:68-81.
- Ortiz, P. M. A.; Hernández, J. R.; Figueroa, M. E. J. M. y Gama, C. L. M. 2010. Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido del año 1995 al 2008. *In: vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático.* Botello, A. V.; Villanueva-Fragoso, S.; Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J. L. (Eds.). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 305-324 pp.
- Palma-López, D. J.; Cisneros, D. F.; Moreno, C. E. y Rincón, R. J. A. 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Villahermosa, Tabasco, México. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. ISPROTAB-FUPROTAB. 195 p.

- Pendleton, E. A.; Thieler, E. R. and Williams, S. J. 2010. Importance of coastal change variables in determining vulnerability to sea- and lake-level change. *Journal of Coastal Research*. 261:176-183.
- Pérez, D. M.; Bolaños, R. y Silva, R. 2008. Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 2(23)5-20.
- Reyes, E.; Day, J. W.; Lara, A. L.; Sánchez, P.; Zarate, D. and Yañez, A. 2004. Assessing coastal management plans using watershed spatial model for the Mississippi delta, USA, and the Usumacinta-Grijalva delta, México. *Ocean & Coastal Management*. 47:693-708.
- Rodríguez-Rodríguez, E. 2002. Las lagunas continentales de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. 264 p.
- SEMAR (Secretaría de Marina) s/f (consultado junio, 2010). <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioFrontera.pdf>.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1997. Primera comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. 139 p.
- Shaw, J.; Taylor, R. B.; Forbes, D. L.; Ruz, M. H. and Solomon, S. 1998. Sensitivity of the Canadian coast to sea-level rise. *Geological Survey of Canada*. 505:1-90.
- Sheik, M. P. and Chandrasekar, N. 2011. Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*. 1-11.
- Syvitski, J. P. M.; Vörösmarty, C. J.; Kether, A. J. and Green, P. 2005. Impact of human on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308:376-380 DOI: 10.1126/science.1109454.
- Thieler, R. and Hammar, E. 1999. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: preliminary results for the U.S. Atlantic Coast. U.S. Geological survey. Woods hole, Massachusetts. Open-file report. 99-593.
- Toledo, A. 2003. Ríos, costas y mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México. INE-SEMARNAT. 117p.
- Tunnell, J. W. Jr.; Felder, D. L. y Earle, S. A. 2004. El Golfo de México: pasado, presente y futuro. Una colaboración entre Estados Unidos de América, México, Cuba. *In: diagnóstico ambiental del Golfo de México*. Caso, M.; Pisanty, I. y Ezcurra, E. (Comps). Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., 361-371 pp.
- Turner, R. K.; Subak, S. and Adger, W. N. 1996. Pressures, trends, and impacts in coastal zones: interactions between socioeconomic and natural systems. *Environmental Management*. 20(2):159-173.
- Vafeidis, A.; Nicholls, R. J.; McFadden, L.; Tol, R.; Hinkel, J.; Spencer, T.; Grashoff, P. S.; Boot, G. and Klein, R. 2008. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*. 4(24):917-924.
- Villanueva, S.; Ponce, G.; García, C. y Presa, J. 2010. Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros. *In: vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático*. Botello, A. V.; Villanueva-Fragoso, S.; Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J. L. (Eds.). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 37-72 pp.
- West, R.; Psuty, N. P. y Thom, B. 1985. Las tierras bajas de Tabasco en el sureste de México. Villahermosa, Tabasco. Instituto de Cultura de Tabasco. 416 p.
- Zavala, H. J.; De Buen, R.; Romero, R. y Hernández, F. 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. *In: vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático*. Botello A.V.; Villanueva-Fragoso S.; Gutiérrez J. y Rojas-Galaviz J. L. (Eds.). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 249-368 pp.