

# Vulnerabilidad física en las edificaciones del sector de Bocagrande, Cartagena de Indias ante un evento de tsunami

## *Physical vulnerability of buildings in the Bocagrande sector of Cartagena de Indias in the event of a possible tsunami*

DOI: 10.26640/22159045.2019.508

Fecha de recepción: 2019/04/09 Fecha de aceptación: 2019/06/28

Wilfrido Bolívar-Palma<sup>1</sup>; Julián Quintero-Ibáñez<sup>2</sup>; Emerson Herrera<sup>3</sup>

### CITAR COMO:

**Bolívar-Palma, W.; Quintero-Ibáñez, J.; Herrera, E. (2019).** Vulnerabilidad física en las edificaciones del sector de Bocagrande, Cartagena de Indias ante un evento de tsunami. *Bol. Cient. CIOH*; 38(2):69-78. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.2019.508

### RESUMEN

Los tsunamis se encuentran entre los fenómenos naturales más devastadores y poco frecuentes, resultado de una perturbación submarina que irrumpe en la zona costera. Sin embargo, la investigación científica en el mar Caribe con respecto a estos eventos es menor debido a su ocurrencia inusual si es comparado con el océano Pacífico. Se evaluó la vulnerabilidad física de 305 edificaciones del sector de Bocagrande, una zona notable a nivel socioeconómico y turístico, implementando el modelo *Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment* el cual ha sido analizado y validado obteniendo estudios satisfactorios. Asimismo, por medio de la aplicación móvil Survey 123 for ArcGIS se recolectó la información pertinente, representando los resultados en mapas temáticos con base a sistemas de información geográficos. Se determinó el índice de vulnerabilidad relativa de cada edificación, este refleja gran vulnerabilidad en aquellas construcciones inferiores a dos pisos. Igualmente, la primera línea de construcciones en madera situadas frente a la dirección del posible tsunami (desde el mar Caribe) desarrolla vulnerabilidad muy alta afectando los puntos comerciales sobre la playa y turistas aportando una herramienta para futuras tomas de decisiones e implementación por parte de autoridades locales.

**PALABRAS CLAVE:** vulnerabilidad física, sistemas de información geográfica, tsunamis.

### ABSTRACT

*Tsunamis are among the most devastating and rare natural phenomena, the result of an underwater disturbance that break in the coastal zone. However, scientific research in the Caribbean Sea regarding these events is less due to their unusual occurrence when compared to the Pacific Ocean. The physical vulnerability of 305 buildings in the Bocagrande sector was evaluated; a remarkable socioeconomic and tourist area; implementing the Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment (PTVA4) model, which has been analyzed and validated, obtaining satisfactory studies. Likewise, through the mobile application survey 123 for ArcGIS, the relevant information was collected, representing the results in thematic*

<sup>1</sup> Orcid: 0000-0002-3333-0159. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Cartagena de Indias, Bolívar. Correo electrónico: wbolivar@dimar.mil.co

<sup>2</sup> Orcid: 0000-0003-3026-0391. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Cartagena de Indias, Bolívar. Correo electrónico: jqintero@dimar.mil.co

<sup>3</sup> Orcid: 0000-0002-7258-8881. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), barrio El Bosque, Isla de Manzanillo, Cartagena de Indias, Bolívar. Correo electrónico: eherrera@dimar.mil.co

*maps based on geographic information systems. The relative vulnerability index of each building could be determined; this reflects great vulnerability in those constructions less than two stories. Likewise, the first line of wooden constructions located facing the direction of the possible tsunami (from the Caribbean Sea) develops very high vulnerability, affecting commercial points on the beach and tourists, providing a tool for future decision-making and implementation by local authorities.*

**KEYWORDS:** *Physical vulnerability, geographic information systems, tsunamis.*

## INTRODUCCIÓN

Con factores generadores de daños físicos como el impacto del oleaje en edificaciones, inundaciones y/o erosión costera, los tsunamis se encuentran entre los fenómenos naturales más devastadores y poco frecuentes a nivel mundial (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2019). Asimismo, pueden ser clasificados en locales, regionales o distantes dependiendo de la distancia o el tiempo que transcurre desde el origen de perturbación hasta la zona costera afectada. Sumado a esto, los fenómenos geológicos submarinos como sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos, entre otros, pueden ser las causantes de estos (National Center for Environmental Information, 2017).

De igual manera, un sinnúmero de eventos catastróficos se han presentado alrededor del mundo, dejando pérdidas a su paso, tanto humanas como económicas; entre estos se encuentra el tsunami en la región de Tohoku, acaecido el 11 de marzo del 2011 al norte de la costa pacífica de Japón, dejando resultados devastadores y antecedido por un sismo de magnitud Mw9.0, que afectó las prefecturas de Iwate, Miyagi y Fukushima; con un saldo lamentable de 18 453 víctimas mortales (Koshimura, Hayashi y Gokon, 2014). Del mismo modo, en Latinoamérica, el 27 de febrero del 2010 se presentó en Chile un catastrófico evento generado también por un sismo, según el Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile, con magnitud de Mw8.8, desencadenando a su vez un tsunami y causando grandes pérdidas materiales, dejando además, 156 decesos (Naciones Unidas, 2010).

Según la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), el 81 % de los eventos de tsunami confirmados desde 1610 a.C. hasta 2017 d.C. han sido generados por perturbaciones sísmicas (National Center for Environmental Information, 2017). Sin embargo, cabe resaltar que existe el registro de los tsunamis antecedidos

por deslizamientos submarinos en un porcentaje menor del 7 % (Leslie y Mann, 2016), que a su vez pueden causar sorpresivamente un tsunami en regiones donde no existe el riesgo de tener esta clase de eventos, que generalmente se clasifican según las características geológicas del deslizamiento (presiones debido al depósito acelerado o existencia de capas débiles de sedimento) y aquellos generados por eventos externos, sismos o el cambio climático (Masson, Harbitz, Wynn, Pedersen y Løvholt, 2006).

En el mar Caribe estos eventos han ocurrido inusualmente en comparación con los presenciados en el océano Pacífico (Caicedo, Martinelli, Meyer y Steer, 1997); históricamente, ninguno de los tsunamis ocurridos ha llegado a tener un efecto importante en las poblaciones colombianas, por la lejanía de las fuentes sísmicas precursoras (Estrada y Farbiarz, 2005). De allí que sea factible la posibilidad de mitigar sus efectos destructores con una preparación adecuada (Lader, Whiteside y Lockridge, 2002). Adicionalmente, las zonas costeras a nivel mundial se encuentran expuestas a los tres tipos de tsunamis, principalmente a los locales (Fernández, 2002). Sin embargo, se hace pertinente empezar estudiando la vulnerabilidad física para evitar el caso de Nicaragua, donde no existía conciencia sobre la amenaza de tsunami y fue después del evento ocurrido en 1992 que los científicos empezaron a considerar los efectos destructivos de los tsunamis en la región (Fernández, 2002).

La vulnerabilidad se conoce como una medida de la susceptibilidad intrínseca que tiene un elemento en riesgo a fenómenos naturales potencialmente devastadores, dicho elemento puede ser a nivel social, económico, de servicios públicos e infraestructura (Tingsanchali y Karim, 2005). La evaluación de la vulnerabilidad física del entorno de las edificaciones va en aumento debido al cambio climático y global (Papathoma-Köhle, Keiler, Totschnig y Glade, 2012). Actualmente, esta característica se ha evaluado con diferentes

métodos; destacando el utilizado para evaluar la vulnerabilidad estructural por los tsunamis ocurridos en 1941 y 1969 en Casablanca, Marruecos; al norte de África, donde con un modelo numérico de inundación, mediciones *in situ* y herramientas de sistemas de información geográfica se evaluaron tres criterios: condiciones de las edificaciones, zona de inundación y la calidad de las obras de protección costera, los cuales se relacionan en una fórmula de cálculo dinámico (Omira *et al.*, 2010). Del mismo modo, cabe resaltar el modelo *Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment* (PTVA) (Papathoma, Frontiers y Dominey-Howes, 2003), inicialmente se empezó a implementar por la falta de un modelo robusto. Además, ha sido validado con datos reales tomados después del tsunami del 2015 en las ciudades de La Serena y Coquimbo en Chile (Izquierdo, Fritis y Abad, 2018).

Las consecuencias socioeconómicas de las últimas décadas en Colombia, debido a la ocurrencia de eventos naturales peligrosos, son un indicador de la alta vulnerabilidad de las comunidades localizadas en áreas propensas a estos fenómenos (Ungrd, 2018). Sumado a esto, económicamente, Cartagena de Indias presenta un pilar importante en la región Caribe que de

acuerdo con el Observatorio del Caribe Colombiano, su economía se encuentra principalmente en el turismo, en el sector industrial y portuario (Fuentes, Mercado y Quejada, 2012).

Finalmente, se aplica el modelo PTVA en su cuarta versión para evidenciar la vulnerabilidad física en las edificaciones del sector de Bocagrande ante un posible evento de tsunami; siendo un modelo de bajo costo en su ejecución, práctico de implementar y ser replicado a nivel costero-nacional. También por su acercamiento a la realidad en sus resultados, representando un aporte pertinente a la zona de estudio por el hecho de evaluar la vulnerabilidad individualmente de cada edificación, donde están concentrados intereses socioeconómicos esenciales para la ciudad de Cartagena de Indias. A su vez, se generaron mapas temáticos implementando sistemas de información geográfica (S.I.G) para determinar los puntos seguros en caso de emergencia, brindando información de alta calidad de la distribución la vulnerabilidad en el área, mitigando las posibles afectaciones del entorno, de turistas y residentes.

La evaluación se realizó en un área de 0.26 km<sup>2</sup> con un perímetro de 2.2 km aproximadamente



Figura 1. Área de estudio, península de Bocagrande.

(Figura 1).

Situada en el Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias, que a su vez está rodeada por el mar Caribe y la bahía de Cartagena, la península de Bocagrande se encuentra ubicada en la zona noroccidental de la ciudad de Cartagena de Indias. Según el Decreto No. 0977 del 2001, presenta un suelo arenoso saturado, lo cual, hace que este sea susceptible de manera moderada a la licuación. De igual forma, la parte suroccidental de Bocagrande es susceptible de manera moderada a la erosión costera por acción directa del oleaje del mar y la fuerza del viento. Si bien cuenta con obras de protección costera (espolones y diques exentos) las cuales atrapan sedimentos, favoreciendo y extendiendo la zona de playa que en situación de mar de leva retrocede la línea de costa. Adicionalmente, según el uso del suelo en esta zona se encuentra en su mayoría enmarcada entre la actividad comercial, residencial y turística.

Por último, el suelo marino de Cartagena está presente en el delta del Magdalena; en un estudio del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" (Invemar) y la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) determinaron que la facie sedimentaria más común es la de lodos litoclásticos (contenido de carbonatos inferior a 15 %), la cual se extiende como una franja de amplitud variable semiparalela a la costa; esta franja de sedimentos detríticos (entre 2 km y 6 km) va desde en el sector de la desembocadura del río Magdalena hasta la ciudad de Cartagena (Invemar y ANH, 2010).

Con base en el modelo PTVA4 se creó el formulario de selección múltiple, fundamentado en los dos ejes de evaluación del modelo: los atributos estructurales de la construcción y su entorno (Dall'Osso, Dominey-Howes, Tarbotton, Summerhayes, y Withycombe, 2016). Posteriormente, se hizo un análisis de los datos recolectados *in situ* con el formulario, finalizando con la elaboración de cuatro mapas basados en sistemas de información geográfica (SIG).

Para empezar, en el proceso sistemático de la plataforma Survey 123 for ArcGIS se destacan las siguientes etapas: diseño y publicación; recolección de datos, y visualización/análisis.

### **Etapa de diseño y publicación**

Previamente a la creación del formulario, se definió el orden de las preguntas con base en los dos ejes del modelo. A su vez, el formulario contiene un campo para hacer una fotografía de la edificación y otro para la geolocalización. Con la cuenta empresarial en ArcGIS Online del Sistema de Información Geográfico-Dirección General Marítima (SIGDimar) se creó en Survey123 Connect for ArcGIS un formulario tipo XLSform para automatizar la recolección de datos *in situ* por medio de la aplicación móvil Survey 123 for ArcGIS, y la posibilidad de analizar los datos en tiempo real por medio del sitio web <https://survey123.arcgis.com>. El conjunto de fórmulas empleadas para hallar el índice de vulnerabilidad relativa (RVI) por sus siglas en inglés y el peso de cada atributo utilizadas en la creación del formulario se encuentra detalladas en el artículo citado a continuación (Dall'Osso *et al.*, 2016).

Una vez creado, se publicó en la nube para ser descargado desde la aplicación móvil. Por último, se capacitó al personal de campo, explicando cada enunciado del formulario.

### **Etapa de recolección de datos**

Se planificó en oficina el recorrido para cubrir la zona de estudio. Por otro lado, en la recolección de los datos *in situ* cada experto del grupo tuvo el formulario descargado en los dispositivos móviles para agilizar el proceso; evaluando visualmente cada atributo necesario para hallar el RVI de las construcciones, tomando fotografías del punto analizado y realizando una geolocalización de este.

### **Etapa de visualización/análisis**

Se verificó en la plataforma web de Survey123 for ArcGIS la información recolectada. Aunque los datos pueden ser descargados de la web en formato Excel, KML, Shapefile y File Geodatabase, se eligió este último por las fotografías que contiene el formulario, útiles al verificar con la herramienta Street view de Google Earth. En conjunto con la herramienta de PTVA-4 ESRI ArcGIS toolbox se calculó automáticamente el RVI (Dall'Osso *et al.*, 2016), asumiendo tanto un escenario de exposición a inundación (WD= 2m, WDmax =3m) con base en los cálculos del profesor

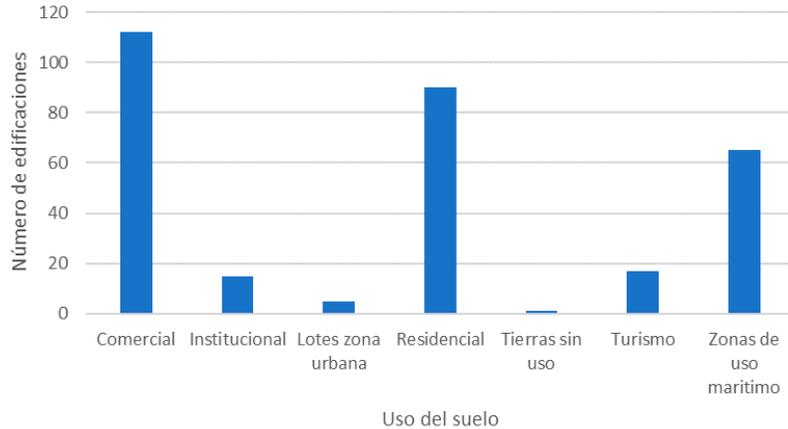
de la Universidad del Norte, Luis Otero, quien indica una probabilidad de olas hasta de 2 m en el mar Caribe (Carvajalino, 2018); como datos de vulnerabilidad por intrusión del agua (WV), dichos datos son: 2.5 m de altura de marcas de niveles de inundación en edificaciones, y asumiendo también la altura de cada edificación con 2.5 m por piso, de acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial 2011, debido a la falta de un modelo hidrodinámico y datos históricos de tsunamis.

Finalmente, se generaron mapas temáticos de vulnerabilidad física, revelando desde la edificación más vulnerable -en color rojo- hasta la menos vulnerable -en color verde-, utilizando el método ruptura natural (*Jenks*) para clasificar los rangos y separar las cinco clases recomendadas.

En consecuencia, al automatizar la recolección de información *in situ* se evaluaron visualmente 305 edificaciones; encontrando diferentes usos del suelo, presentando diferentes niveles de vulnerabilidad como se observa en la Tabla 1 y la Figura 2.

**Tabla 1.** Niveles de vulnerabilidad (RVI) según el uso del suelo.

Uso	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Comercial	6	4	13	60	29
Residencial	48	8	4	19	11
Mixta	27	5	9	15	9
Turismo	8	2	0	5	2



**Figura 2.** Conteo de edificaciones según su uso.

En conjunto, la zona se caracteriza por tener desde construcciones en madera hasta edificios de más de cinco pisos, con estructuras en concreto reforzado y muros en mampostería de ladrillo, como se evidencia en la Figura 3.



**(a)** Edificio más de cinco pisos.



**(b)** Casa de dos pisos concreto reforzado.



**(c)** Local comercial de un piso.



(d) Local comercial en madera.



(e) Casa de tres pisos.



(f) Local comercial de un piso con concreto reforzado.

**Figura 3.** Tipos de edificaciones en el área de estudio.

Teniendo en cuenta los valores asumidos tanto del escenario de exposición a inundación (Ex), como datos de vulnerabilidad por intrusión del agua (WV), del cálculo automático con el *toolbox* de ArcGIS se obtuvo un índice relativo mínimo de vulnerabilidad de 1.919 y un índice máximo de 4.039. En adición, el resultado de la ruptura natural (*Jenks*) clasificó los rangos en cinco clases de vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 2 e indicó la paleta de colores que va desde verde (vulnerabilidad mínima) hasta el color rojo (vulnerabilidad máxima).

**Tabla 2.** Rangos de niveles de vulnerabilidad.

Nivel de vulnerabilidad	Rango
Muy baja	1.919 - 2.356
Baja	2.357 - 2.759
Media	2.760 - 3.150
Alta	3.151 - 3.575
Muy alta	3.575 - 4.039

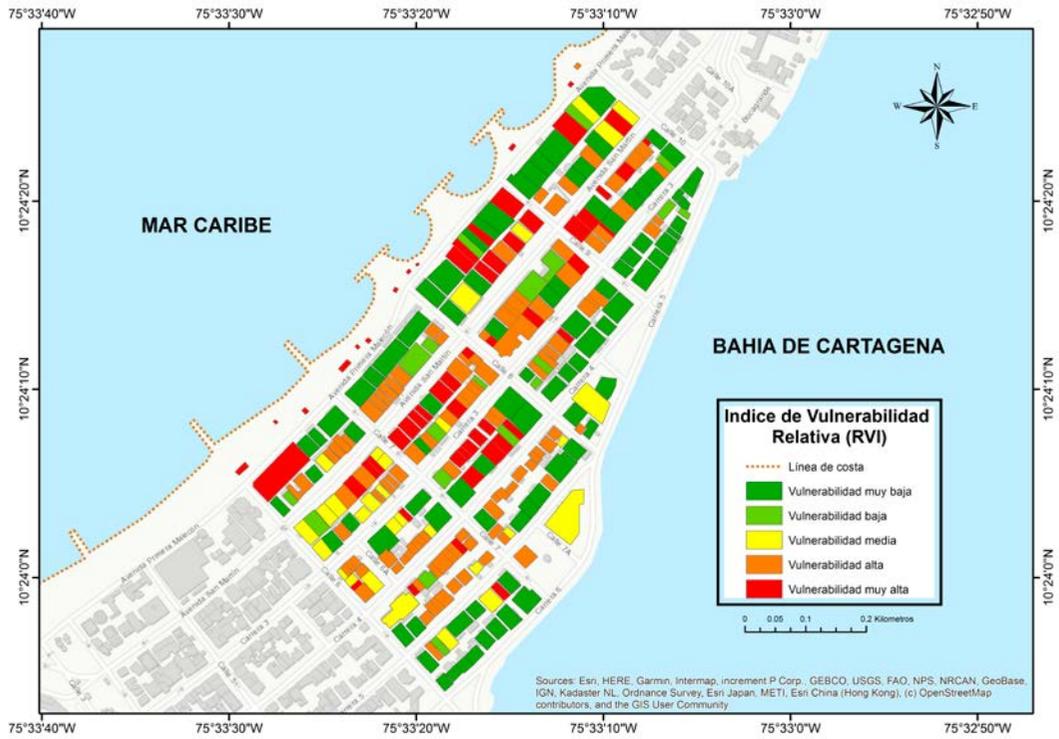
De esta manera, en la etapa de visualización de los datos, por medio del modelo PTVA4 se realizaron mapas temáticos en los que se indica el nivel de vulnerabilidad del área de estudio de manera general como se muestra en la Figura 4. Adicionalmente, tres mapas donde se muestra la vulnerabilidad en los usos del suelo con mayor relevancia en el sector (comerciales, residenciales y turismo/mixto) presentando una tendencia de menor nivel de vulnerabilidad en las edificaciones de más de cinco pisos, sin importar que estas

se encuentren en la primera línea para recibir el impacto del fenómeno natural.

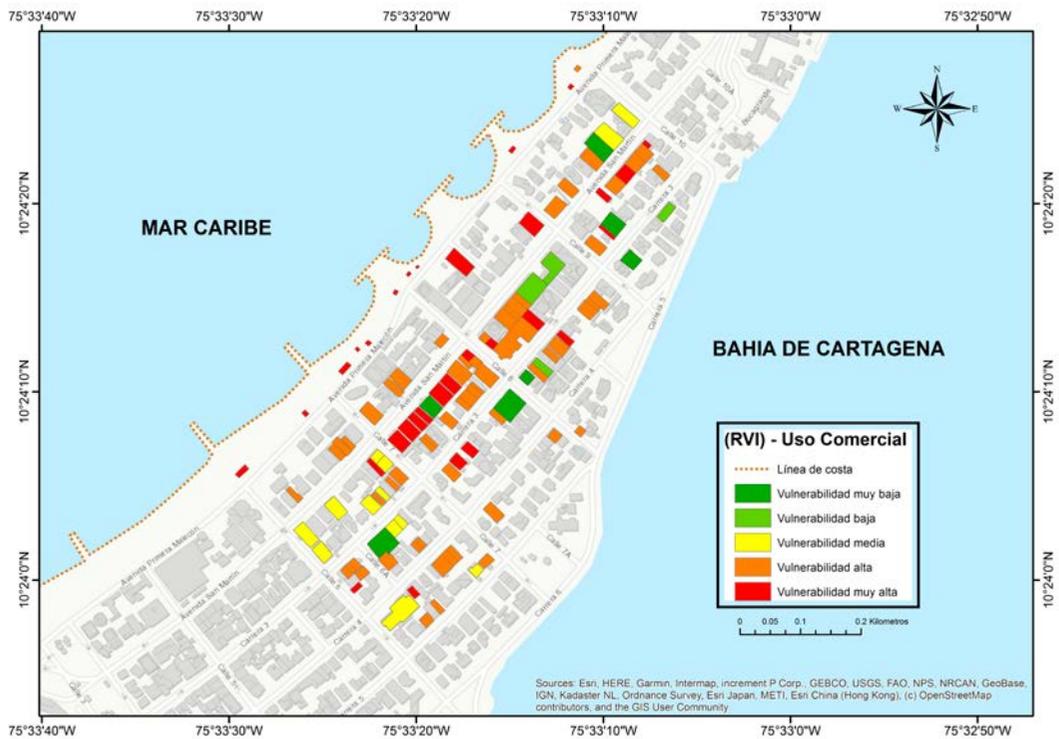
Por último, en la comparativa entre los usos del suelo y su nivel de vulnerabilidad física se obtuvo la Figura 5, donde se visualiza que entre las edificaciones con menor vulnerabilidad física ante un evento de tsunami se encuentran las de uso residencial, por otro lado, las edificaciones con un máximo índice de vulnerabilidad están enmarcadas en las comerciales.

De manera comercial y residencial Bocagrande se enmarca en un foco importante para la ciudad, sin dejar de lado el turismo, el sector industrial y portuario; además, los atributos de las edificaciones como el número de pisos, materiales estructurales y la relación con los elementos de su entorno, son factores causales de vulnerabilidad física ante un evento de tsunami.

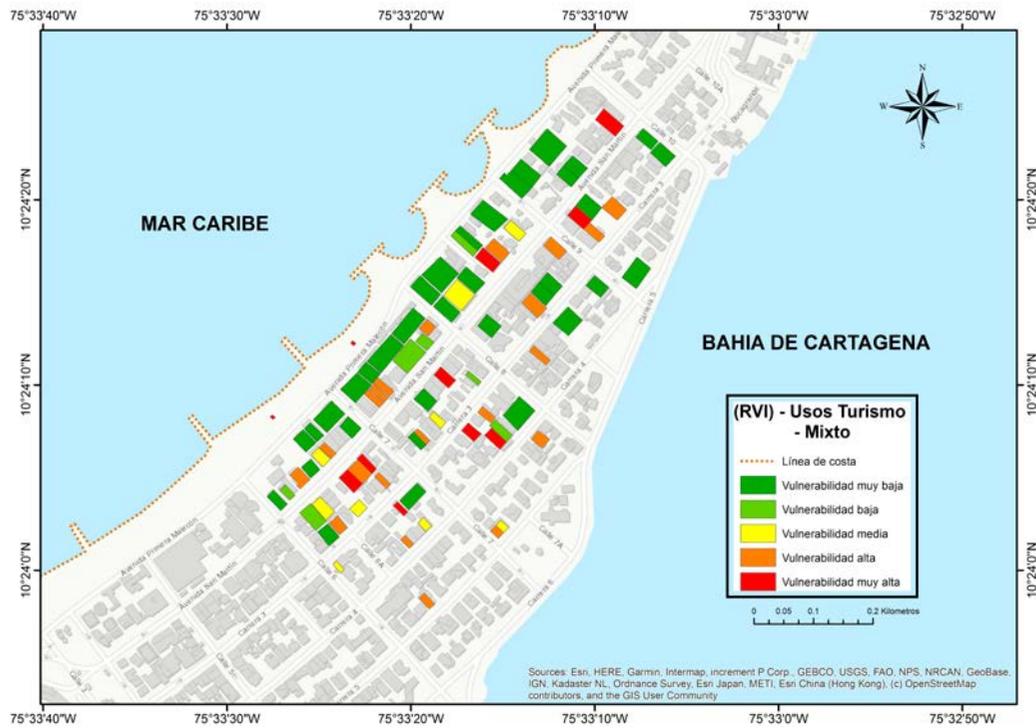
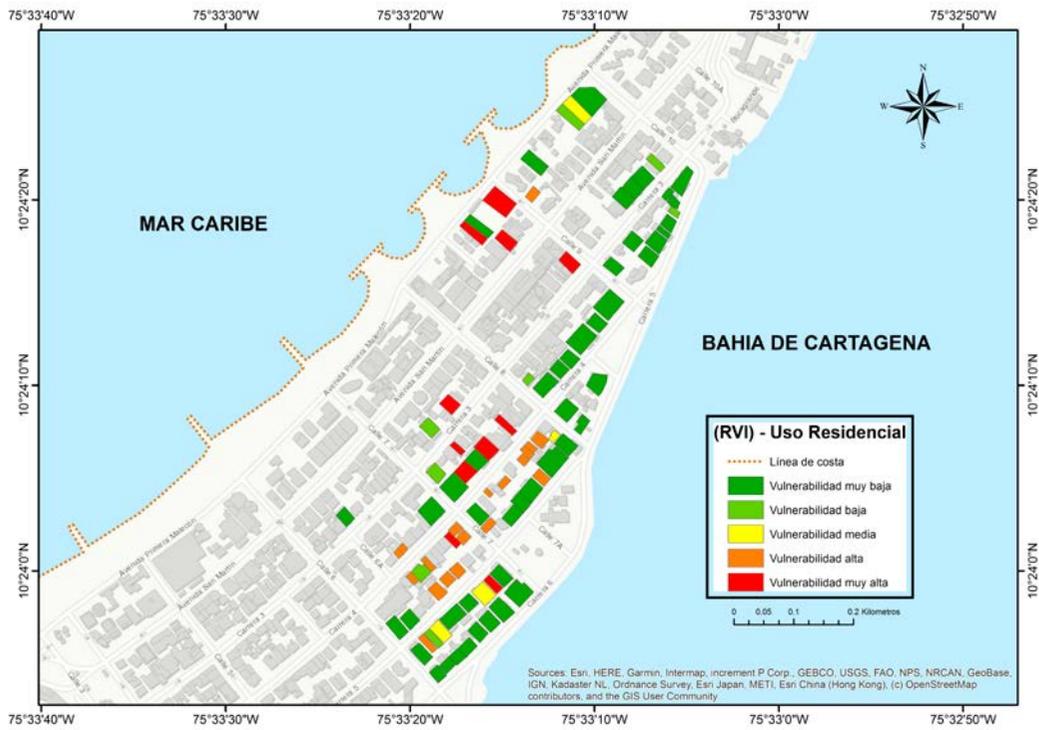
Por lo anterior, se puede observar el comportamiento entre mapas temáticos y gráficas, donde reflejan gran vulnerabilidad en aquellas construcciones inferiores a dos pisos. Igualmente, la primera línea de construcciones en madera, situadas frente a la dirección del posible tsunami (desde el mar Caribe) desarrolla vulnerabilidad muy alta, afectando los puntos comerciales sobre la playa y turistas en la zona. Sin embargo, la ubicación frente a tal evento en la segunda línea, principalmente, con una vulnerabilidad muy baja se debe a la oferta hotelera con edificaciones de más de cinco pisos, brindando posibles puntos de evacuación de manera oportuna.



(a) Primera vista índice de vulnerabilidad relativa (RVI) para edificaciones del barrio Bocagrande a una simulación de 2 m.

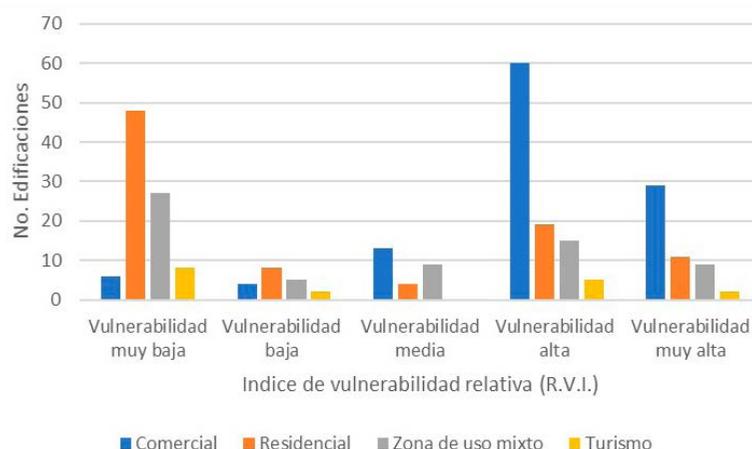


(b) Índice de vulnerabilidad relativa (RVI) comercial.



**(d)** Índice de vulnerabilidad relativa (RVI) turismo mixto.

**Figura 4.** Índice de vulnerabilidad relativa.



**Figura 5.** Conteo de edificaciones según su uso y nivel de vulnerabilidad física.

Enfáticamente, los resultados de usar el modelo PTVA4 son aproximaciones relativas, útiles para comparar el comportamiento entre edificaciones y determinar cuál es más o menos vulnerable, pero no para estimar el daño en esta prediciendo cuál colapsará.

## REFERENCIAS

- Caicedo, J. H.; Martinelli, B.; Meyer, H.; Steer R., R. (1997). Efecto de tsunami del Mar Caribe en la costa de Colombia. En: *Memorias del Seminario Nacional de Ciencia y Tecnologías del Mar*. Bogotá.
- Carvajalino, L. (2018). *Cien años después, ¿está preparado el Caribe para otro gran tsunami?* NOTICIAS UNINORTE.
- Dall’Osso, F.; Dominey-Howes, D.; Tarbotton, C.; Summerhayes, S.; Withycombe, G. (2016). Revision and improvement of the PTVA-3 model for assessing tsunami building vulnerability using “international expert judgment”: introducing the PTVA-4 model. *Natural Hazards*, 83(2):1229-1256. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2387-9>
- Estrada, B.; Farbiarz, J. (2005). El terremoto y posterior tsunami del 26 de diciembre de 2004 en Indonesia. *Dyna*, 72(145): 85-90.
- Fernández, A., M. (2002). Daños, efectos y amenaza de tsunamis en América Central. *Revista Geológica de América Central*, 26(26):71-83.
- Fuentes, D.; Mercado, M.; Quejada, R. (2012). *Diagnóstico socioeconómico y del mercado de trabajo*. Cartagena de Indias.
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2019). *Tsunami Glossary*.
- Invemar y ANH. (2010). *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar No. 20, p. 458
- Izquierdo, T.; Fritis, E.; Abad, M. (2018). *Analysis and validation of the PTVA tsunami building vulnerability model using the 2015 Chile post-tsunami damage data in Coquimbo and La Serena cities*. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1703-2018>
- Koshimura, S.; Hayashi, S.; Gokon, H. (2014). The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction. *Soils and Foundations*, 54(4), 560-572. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.06.002>
- Lader, J. F.; Whiteside, L. S.; Lockridge, P. A. (2002). A brief history of tsunamis in the Caribbean SEa. *Science of Tsunami Hazards*, 20(2), 57-94.
- Leslie, S. C.; Mann, P. (2016). Giant submarine landslides on the Colombian margin and tsunami risk in the Caribbean Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 449, 382-394. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.040>

- Masson, D. G.; Harbitz, C. B.; Wynn, R. B.; Pedersen, G.; Løvholt, F. (2006). Submarine landslides: Processes, triggers and hazard prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845), 2009-2039. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1810>
- National Centers for Environmental Information. (2017). *Tsunami Sources 1610 B.C. to A.D. 2017 from Earthquakes, Volcanic Eruptions, Landslides, and Other Causes*.
- Omira, R.; Baptista, M. A.; Miranda, J. M.; Toto, E.; Catita, C.; Catalão, J. (2010). Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Natural Hazards*, 54(1), 75-95. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9454-4>
- Papathoma, M.; Frontiers, R.; Dominey-Howes, D. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 733-747. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-733-2003>
- Papathoma-Köhle, M.; Keiler, M.; Totschnig, R.; Glade, T. (2012). Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: Debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards*, 64(3), 2083-2105. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0105-9>
- Tingsanchali, T.; Karim, M. F. (2005). Flood hazard and risk analysis in the southwest region of Bangladesh. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(10), 2055-2069. <https://doi.org/10.1002/hyp.5666>
- Ungrd, (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. In Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Naciones Unidas (2010). *The Chilean earthquake of 27 February 2010: an overview*. In United Nations publication.