





Factores para desarrollar un índice de vulnerabilidad a la contaminación en acuíferos kársticos costeros urbanizados

Factors to develop an index of vulnerability to contamination in urbanized coastal karst aquifers

Wilbert David Uhu-Yam¹ ,
Oscar Frausto-Martínez^{1*} ,
José Francisco Rodríguez-
Castillo¹ ,
Orlando Colín-Olivares¹ 

¹Laboratorio de observación e investigación espacial, Universidad de Quintana Roo. Avenida Andrés Quintana Roo s/n, esq. Calle 110 sur, Col. Maravilla, CP. 77600. Cozumel, Quintana Roo, México.

*Autor de correspondencia: ofrausto@uqroo.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 04 de diciembre 2021

Aceptado: 11 de agosto 2022

Como citar: Uhu-Yam WD, Frausto-Martínez O, Rodríguez-Castillo JF, Colín-Olivares O (2022) Factores para desarrollar un índice de vulnerabilidad a la contaminación en acuíferos kársticos costeros urbanizados. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(3): e3220. DOI: 10.19136/era.a9n3.3220

RESUMEN. Este trabajo tiene el objetivo de proponer y analizar factores para la construcción de un índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos costeros urbanizados. Debido a las altas modificaciones antrópicas de los territorios, se tomó como área de estudio la ciudad de Playa del Carmen, Quintana Roo. Se abordaron cuatro factores: relieve, clima, ascenso del nivel del mar y el uso de suelo. Para el relieve se identificaron las depresiones utilizando datos LIDAR del INEGI. El factor clima se trabajó con datos meteorológicos de CONAGUA, empleando el Índice Modificado de Fournier. El ascenso del mar se recreó con proyecciones del aumento del mar y se consideró el nivel piezométrico y la distancia a la línea de costa. Finalmente, para el uso de suelo, se consideró la zonificación secundaria del Programa de Desarrollo Urbano y el coeficiente de ocupación del suelo. A cada factor se asignó una diferenciación de vulnerabilidad, la cual define la susceptibilidad del territorio a la contaminación. Los resultados para el relieve, muestran una mayor vulnerabilidad en el uso de suelo turístico residencial y mixto, con una frecuencia de 30 a 37 depresiones, predominando las dolinas y dolinas-úvalas. Para el clima se identificó la zona vulnerable al sureste de la ciudad, para el ascenso del mar se encontró en el primer kilómetro con respecto a la línea de costa, afectando el 20% de las depresiones. Los usos de suelo con mayor vulnerabilidad fueron de uso comercial, turismo residencial, habitacional de alta densidad y uso mixto.

Palabras clave: Ascenso del nivel del mar, clima, modelación, relieve, uso de suelo.

ABSTRACT. The aim of this work is to propose and analyse factors for the construction of an index of vulnerability to contamination of urbanised coastal karst aquifers. Due to the high anthropic modifications of the territories, the city of Playa del Carmen, Quintana Roo, was taken as the study area. Four factors were addressed: relief, climate, sea level rise and land use. For relief, depressions were identified using LiDAR data from INEGI. The climate factor was worked with meteorological data from CONAGUA, using the Modified Fournier Index. Sea rise was recreated with sea rise projections and the piezometric level and distance to the coastline were considered. Finally, for land use, the secondary zoning of the Urban Development Programme and the land use coefficient were considered. Each factor was assigned a vulnerability differentiation, which defines the susceptibility of the territory to pollution. The results for relief show a greater vulnerability in residential and mixed tourist land use, with a frequency of 30 to 37 depressions, predominantly sinkholes and sinkholes-úvalas. For climate, the vulnerable zone was identified to the southeast of the city; for sea rise, it was found in the first kilometre with respect to the coastline, affecting 20% of the depressions. The most vulnerable land uses were commercial use, residential tourism, high-density residential and mixed use.

Key words: Sea level rise, climate, modelling, relief, land use.

INTRODUCCIÓN

A partir el año de 1975, con la introducción del concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea de Albinet y Margat, se han propuesto diferentes modelos para calcular la vulnerabilidad, entre ellas están el DRASTIC, SINTACS, GOD (Ríos-Roja y Vélez-Otálvaro 2008). Este último es el más simple y sirve para una primera aproximación a las condiciones de vulnerabilidad de un acuífero; en tanto que, los índices EPIK, PI, COPK, KARTIC, RISKE, Enfoque esloveno, Pa-PRIKa, KAVI, LEPT, APLIE son desarrollados para el análisis de zonas kársticas (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Pero estos modelos tienen un enfoque hidrogeológico (Bolio-Barrientos *et al.* 2011). El modelo propuesto por Aguilar-Duarte *et al.* (2016), denominado Índice de la Vulnerabilidad del Acuífero Kárstico Yucateco (IVAKY), se construye específicamente para la Península de Yucatán (PY), en el se consideran las características y combinación de múltiples factores como el relieve, el clima y el suelo.

Para este estudio, se toma la definición de vulnerabilidad propuesta por Zwahlen (2003), quien denota las características de la hidrogeología, suelo, relieve, clima y vegetación, inherentes al sistema en conjunto que determinan la susceptibilidad a la contaminación por actividades antrópicas. Pero el desarrollo urbano en las zonas costeras es un aspecto significativo, debido al crecimiento poblacional, la expansión asociada a asentamientos irregulares y la sustitución de ambientes naturales que conlleva a un importante cambio de uso de suelo (Barragán y de Andrés 2016). Por lo que es necesario considerar el uso de suelo como factor principal que influye en el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, ya que la infraestructura urbana funciona como impermeabilizador, lo que disminuye la infiltración e incrementa el flujo de los contaminantes (Pousa *et al.* 2007); además, tiene influencia directa en la recarga e infiltración (Momejian *et al.* 2019).

Aunado a las problemáticas mencionadas se debe considerar el cambio climático como factor ante la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas sub-

terráneas (Nicholls y Cazenave 2010, Contreras-Tax *et al.* 2021), por lo que se necesita incorporar factores como el ascenso del nivel del mar y la distancia con respecto a la línea de costa, ya que la contaminación también se puede presentar en un plano horizontal (Blanco-de-la-Paz *et al.* 2018). Hay estudios que demuestran la contaminación de sistemas acuáticos (principalmente cenotes) en las zonas costeras de la Península de Yucatán y el Caribe Mexicano (Medina-Moreno *et al.* 2014, Hoogesteijn-Reul *et al.* 2015). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue proponer factores para la construcción de un índice de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos kársticos-costeros en zonas urbanizadas y se tiene como referencia a la Ciudad de Playa del Carmen, Quintana Roo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Comprende la ciudad de Playa del Carmen, ubicada en el municipio de Solidaridad, el cual se encuentra en la parte norte del estado de Quintana Roo, colinda al norte con los municipios de Lázaro Cárdenas y Benito Juárez, al sur con el municipio de Tulum y al este con el mar Caribe. Se localiza entre las coordenadas geográficas extremas 19° 46' a 20° 45' LN y 86° 57' a 88° 05' LO (Figura 1). La ciudad de Playa del Carmen presenta un clima de tipo Aw, cálido subhúmedo con lluvias de verano y, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), la temperatura promedio anual es de 25.4 °C, media mensual de 22.8 °C en febrero (mes más frío) y 27.5 °C en julio (mes más cálido); la precipitación media anual es de 1 475.5 mm y la media mensual de 123.3 mm. La ciudad se encuentra dentro de la región hidrogeológica RH33, cuenta con varios cenotes, aguadas y cuerpos de agua intermitentes y perennes (SEDUMA 2008) y predominan los suelos de tipo litosol y rendzina con clase textural media, mientras que el subsuelo está formado por calizas blancas, arenosas, no mineralizadas (Ruiz-Ramírez *et al.* 2020).

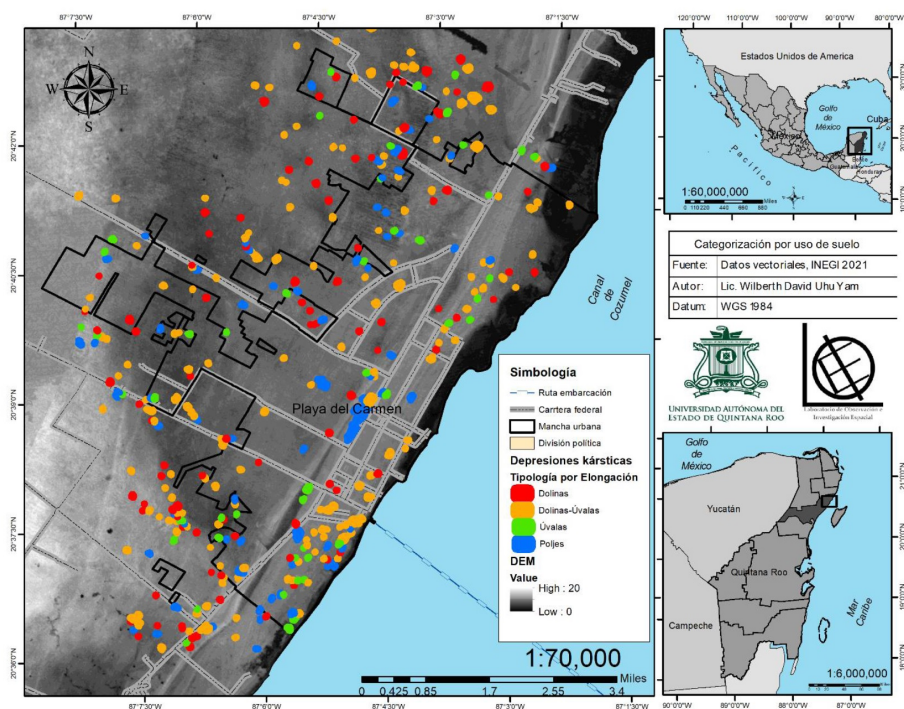


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Técnicas y herramientas para el análisis de los factores

Se establecieron cinco fases para este estudio; las primeras cuatro hacen referencia a cada factor: relieve, clima, aumento del nivel del mar y uso de suelo; la última a la unificación de los factores (Tabla 1).

Primera fase. El análisis del relieve se realizó a partir de dos variables: a) La frecuencia de depresiones por tipo de uso de suelo. Primero se identificaron las depresiones kársticas mediante el proceso descrito por Frausto-Martínez *et al.* (2018) y Colin-Olivares *et al.* (2019), sólo se reconocieron aquellas depresiones mayores a un metro de profundidad y se asignó un centroide a cada depresión; después, se diferenció el área por tipo de uso de suelo de acuerdo a la zonificación secundaria del Plan de Desarrollo Urbano del municipio de (PDU) y se obtuvo el número de depresiones para cada tipo de suelo; y b) Tipo de formas. Se trazó el eje mayor y menor en función del límite de la cota máxima de cada depresión y se calculó la longitud de cada eje, que permite la apli-

cación del índice de elongación (Fragoso-Servón *et al.* 2014, Frausto-Martínez *et al.* 2021), donde un índice menor a 1.25 se clasifica como dolina, de 1.25 a 1.75 como depresiones que se encuentran en la transición de dolinas a óvalas, de 1.75 pero menor 2 como óvalas y, mayor a 2.0 como poljes. Para presentar una caracterización de cada depresión se calculó su profundidad, volumen y área, con las herramientas Interpolate shape, Field calculator, Triangulator Surface y Polygon Volume del software ArcGis v. 10.8. Para luego asignar un peso en una escala del 1 al 10, con el uso de una estructura jerárquica para cada variable, con el objetivo de homogenizar los datos y obtener un solo mapa para el factor relieve.

Segunda fase. El clima se analizó a partir de la agresividad de la lluvia por medio del Índice Modificado de Fournier (IMF) (Arnoldus 1980). Se construyó una base de datos primaria con la información de la precipitación mensual de 11 estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua para el periodo de 1990 a 2018; posteriormente, se aplicó el índice de calidad de la información (ICI)

Tabla 1. Descripción de la importancia de los factores (clima, relieve, suelo y ascenso del mar)

Factor	VARIABLES	Importancia
Relieve	Frecuencia de depresiones	Permite identificar la intensidad de karstificación, tipo de recarga (puntual o difusa) y el tipo de flujo subterráneo (Lyndeys <i>et al.</i> 2010). Una alta densidad de depresiones se deduce como un epikarst desarrollado, por lo tanto, la vulnerabilidad es mayor (Aguilar-Duarte <i>et al.</i> 2016).
	Tipo de forma	Las dolinas son puntos de entrada directa de agua y contaminantes, por lo que son las más vulnerables, mientras que los poljes contienen suelos con alto contenido de arcillas, atenuando la infiltración de contaminantes, por lo que son los menos vulnerables y las úvalas son un caso intermedio (Aguilar-Duarte <i>et al.</i> 2016).
Clima	Agresividad de las lluvias	La precipitación es el factor primario para la recarga de las aguas subterráneas, es decir que a mayor intensidad de las lluvias mayor será la infiltración de agua y contaminantes (Taylor <i>et al.</i> 2013). Considerando que el agua es un vector para el transporte de contaminantes hacia el acuífero (Aguilar-Duarte <i>et al.</i> 2016).
Ascenso del mar	Proyecciones del aumento del mar	Los efectos del cambio climático han favorecido en la aceleración del aumento del nivel del mar afectando los ecosistemas principalmente en zonas costeras. Este aumento puede afectar con la desestabilización de las bocas en las lagunas costeras y estuarios (Torres-Mota <i>et al.</i> 2014) y la inundación de las depresiones kársticas y por la infiltración contaminar las aguas subterráneas.
	Distancia a la línea de costa.	Se toma como si fuera la distancia vertical al agua subterránea ya que la contaminación también ocurre en un plano horizontal. Se valora que la parte del acuífero más alejada de la costa es la menos vulnerable a la intrusión salina y otros contaminantes (Blanco-de-la-Paz 2018)
	Nivel piezométrico	A mayor nivel piezométrico mayor presión hidráulica ejerce el acuífero sobre el agua de mar y menos avanza la cuña marina, por lo tanto, la vulnerabilidad será menor (Blanco-de-la-Paz 2018; Valcerce-Ortega y Forcada-Labrador 2021)
Uso de suelos	Zonificación secundaria del uso de suelo del Programa de Desarrollo Urbano	Las zonas designadas para actividades específicas influyen en el grado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, principalmente las designadas al turismo y las zonas habitacionales. El turismo en zonas costeras kársticas tiene una influencia directa por la existencia de cenotes naturales que están habilitados para realizar actividades recreativas dejando un camino libre a la contaminación del agua subterránea por la infiltración en las fracturas interconectadas existentes (Medina-Moreno, 2014, Hoogesteijn-Reul 2015). También las actividades y asentamientos urbanos ejercen gran presión sobre el agua subterránea (Contreras-Tax <i>et al.</i> 2021)
	Coeficiente de ocupación de suelo	Representa el porcentaje de construcción, que funciona como impermeabilizante, por lo que, a mayor superficie construida, menor será la infiltración de agua y contaminantes por lo que la vulnerabilidad es menor. Mientras que las zonas con menor construcción serán las más vulnerables por el escurrimiento de las zonas más permeables (Pousa <i>et al.</i> 2007)

de manera manual en el software Excel. Con el mismo software se calculó el IMF para cada año y el promedió de los 28 años, considerando la recomendación de la UNESCO (2006). Para el cálculo del índice IMF se utilizó la siguiente fórmula:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Dónde: IMF = índice Modificado de Fournier, P_i = es la precipitación media mensual y P_t = es la precipitación media anual.

Por último, se importó la base de datos georreferenciada con los resultados del IMF al software ArcGIS v.10.8 para realizar un análisis espacial y de distribución de los datos por medio de una interpolación de Ponderación de distancia inversa (IDW, siglas en inglés). Con la interpolación terminada se recortó la información únicamente para el territorio del municipio de Solidaridad.

Tercera fase. Para el ascenso del mar se emplearon las siguientes variables: a) Aumento del nivel del mar, en el que se consideraron las proyecciones realizadas para México de uno, tres y cinco metros (Pedrozo Acuña 2012, PNUD-INECC 2016); b) Nivel piezométrico, al no existir datos puntuales de la zona de estudio, se decidió usar una aproximación con el uso de la base de datos de niveles piezométricos de la CONAGUA. Esta base fue importada al software ArcGIS v.10.8 para la depuración de datos y se seleccionaron 22 pozos de muestreo ubicados en la proximidad de la zona de estudio; se calculó el promedio de los datos y se realizó una interpolación IDW para obtener un mapa de distribución. C) La distancia con respecto a la línea de costa, para lo cual se utilizó como punto de referencia la ubicación del centroide de cada depresión. Esta medida se calculó por medio de un polígono con área de influencia a cada kilómetro con respecto a la línea de costa; después, con la herramienta selección por ubicación del mismo

software, se realizó la extracción de la información de las depresiones que se ubican en cada polígono. Estas dos últimas variables fueron consideradas a partir de lo propuesto por método GALDIT (Chachadi y Lobo-Ferrerira 2001) y el método DARLE de Blanco-de-la-Paz *et al.* (2018) diseñado para evaluar la vulnerabilidad a la intrusión salina en acuíferos costeros. Posteriormente, se asignó un peso a cada variable, en una escala del 1 al 10, en el que se empleó una estructura jerárquica para aplicar un análisis sumativo de los pesos para homogenizar los datos y obtener un mapa sintético para el factor ascenso del nivel del mar.

Cuarta fase. Uso de suelo, por tratarse de una zona urbana se utilizó la zonificación secundaria del Programa de Desarrollo Urbano (PDU) del centro de población Playa Del Carmen, Municipio Solidaridad 2010-2050 (CCPY 2010). Estas zonas se agruparon en 10 categorías según el uso de suelo designados (protección, equipamiento, parques urbanos, turismo campestre, habitacional de baja intensidad, comercial, turismo residencial, industrial, habitacional de alta intensidad y mixto) y se aplicó el coeficiente de ocupación de suelo (COS) representado por un porcentaje que indica que tanta área del terreno puede construirse y que tanto debe quedar libre. Posteriormente, en el software ArcGIS v.10.8 se creó un Shapefile con la agrupación de los usos de suelo y se asignó el grado de vulnerabilidad a cada uno de acuerdo a las consideraciones de Pousa *et al.* (2007) y Carretero y Kruse (2014), así como la relación con el COS. Posteriormente, se clasificó en cinco categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

Quinta fase. Con los resultados obtenidos de cada factor (relieve, clima, ascenso del nivel del mar y uso de suelo) se tomaron los datos mínimos y máximos para dividirlos en cinco cuantiles equivalentes a cada una de las cinco categorías de vulnerabilidad (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) y con la herramienta de reclasificación del software ArcGIS v.10.8; se obtuvo los archivos en formato ráster para aplicar álgebra de mapas para determinar las zonas de vulnerabilidad a la contaminación (Aguilar-Duarte *et al.* 2016).

RESULTADOS

Para el relieve se identificaron 364 depresiones kársticas dentro de la zona urbana de Playa del Carmen (Figura 1), con un intervalo de profundidad de 1 a 6.75 m, con media de 2.20 m, el área de las depresiones fluctúa entre los 310.30 m² hasta los 53 819.83 m², con media de 2 889 m², el volumen oscila de los 147.65 a 143 006.59 m³, con media de 4 436.29 m³. Por el índice de elongación, se reconocen 87 dolinas (23.90%), 157 dolinas-Úvalas (43.13%), 46 úvalas (12.63%) y 74 poljes (20.32%). En la Tabla 2 se muestran los máximos, mínimos y promedios de las características morfométricas para cada grupo y en la Figura 2 se representa la frecuencia de depresiones kárstica por uso de suelo. Estos resultados permiten ubicar las zonas con mayor vulnerabilidad por frecuencia de depresiones en el sector norte y sur de la zona urbana, donde predomina el uso de suelo turístico residencial y habitacional de alta intensidad con una frecuencia de 30 a 37 unidades, con predominancia de dolinas-úvalas (Figura 3 y Tabla 3).

Los registros de precipitación anual histórica mínima, máxima y promedio, así como el IMF para cada estación se presentan en la Tabla 4, donde se observa que los valores extremos de precipitación se registran en Central Vallarta (67.3 mm) y el máximo en Playa del Carmen (2 790.4 mm). El índice de calidad de la información (ICI) mostró que seis estaciones tienen una calidad superior al 90% (Cobá, Cancún, Kantunilkín, Victoria, Solferino e Ideal), tres estaciones tienen una calidad media de 70 a 89% (Leona Vicario, Tulum y Playa del Carmen) y dos con valor inferior al 60% (Cozumel y Central Vallarta). Los resultados del IMF del promedio de 28 años registró el valor máximo en la estación de Cancún (224.1), con categoría de precipitación muy alta, al igual que las estaciones de Leona Vicario, Cobá, Solferino, Tulum, Cozumel, Victoria, Playa del Carmen, Ideal y Kantunilkín; mientras que el valor mínimo (130.7) se registró para Central Vallarta, clasificándose como alto. Pero para la zona urbana de Playa del Carmen los valores oscilan de 185.02 hasta los 200.74 clasificándose dentro de la categoría muy alto, según la clasificación propuesta por Arnoldus. La mayor vul-

Tabla 2. Datos morfométricos de las depresiones kársticas.

	Máxima	Dolina Mínima	Promedio	Máxima	Dolina-úvala Mínima	Promedio	Máxima	Úvala Mínima	Promedio	Máxima	Polje Mínima	Promedio
Profundidad (m)	6.5	1	2.65	6.74	1	2.14	3.75	1	1.63	5	1	2.13
Área (m ²)	11365.49	310.3	2197.73	25572.02	349.89	2838.55	9086.65	666.94	2124.68	53819.83	718.17	4284.78
Perímetro (m)	410.29	69.42	166.09	824.04	70.28	195.89	395.74	101.35	187.35	1225.78	107.34	261.78
Volumen (m ³)	31233.13	200.46	3619.9	86929.38	147.65	4213.32	9523.45	208.58	1841.36	143006.59	351.31	7482.21
Longitud Eje menor (m)	118.56	12.5	48.31	143.38	16.36	44.94	74.95	18.79	36.74	161.86	13.51	37.25
Longitud Eje mayor (m)	142.25	22.99	53.59	209.49	25.73	65.77	139.97	36.59	68.21	472.73	42.34	98.8

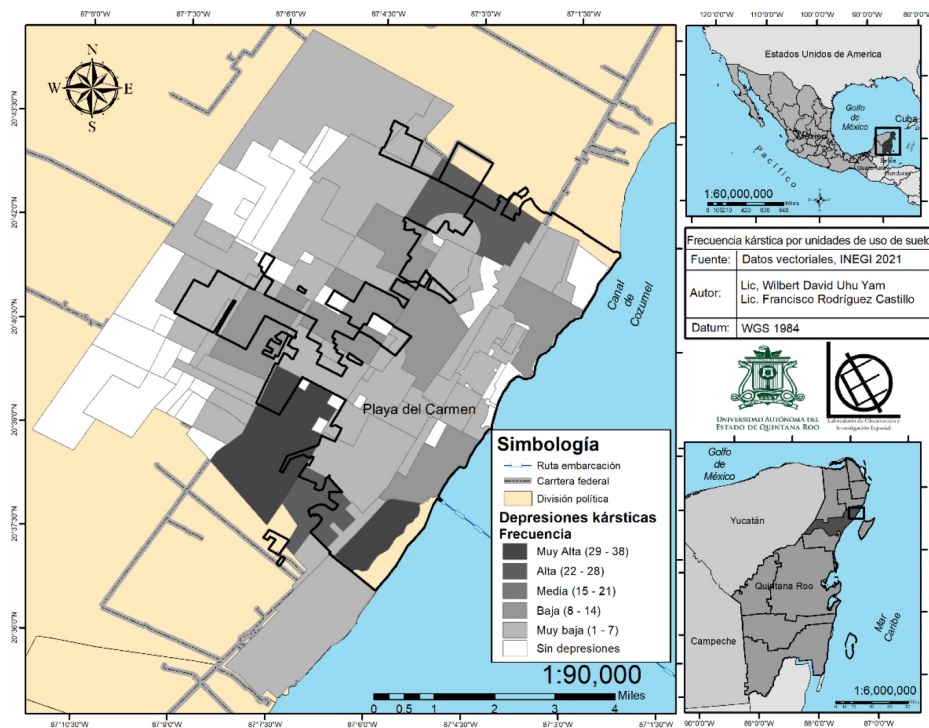


Figura 2. Frecuencia de depresiones kársticas por unidades de uso del suelo.

Tabla 3. Descripción de las categorías de vulnerabilidad.

Categoría	Descripción				
	Relieve	Clima	Ascenso del nivel del mar		
	Frecuencia	Predominancia	IMF	Distancia costa (km)	Aumento del mar (m)
Muy bajo	< 7	sin registro	185-02 - 189.58	7-9	-
Bajo	8-14	dolinas	189-59 - 192.97	6-7	-
Medio	15-21	dolinas-uvalas	192-98 - 195.87	4-5	-
Alto	22-28	úvalas	195-88 - 198.46	2-3	-
Muy alto	39-37	poljes	198-47 - 200.74	1	1-5

nerabilidad se observa al sureste de la zona urbana con valores del IMF de muy alto (198.46 a 200.74).

La ciudad de Playa del Carmen se ubica en el litoral costero y la altitud máxima es de 11 msnm. Por medio de las proyecciones del ascenso del nivel de mar de uno a cinco metros y la ubicación de las depresiones kársticas, se identifica que el 57.96% de éstas se verían afectadas si se considera la altitud

del fondo de cada unidad. Por lo que el ascenso de un metro afectaría 19 depresiones, con ascenso de tres metros tendría influencia en 93 unidades y con un escenario de ascenso de cinco metros afectaría 211 depresiones. Con respecto al nivel piezométrico, éste oscila de 2.15 a 19.11 m, al aplicar un análisis de interpolación, el nivel piezométrico de la zona urbana es de 6.40 m. La distancia de la línea de costa

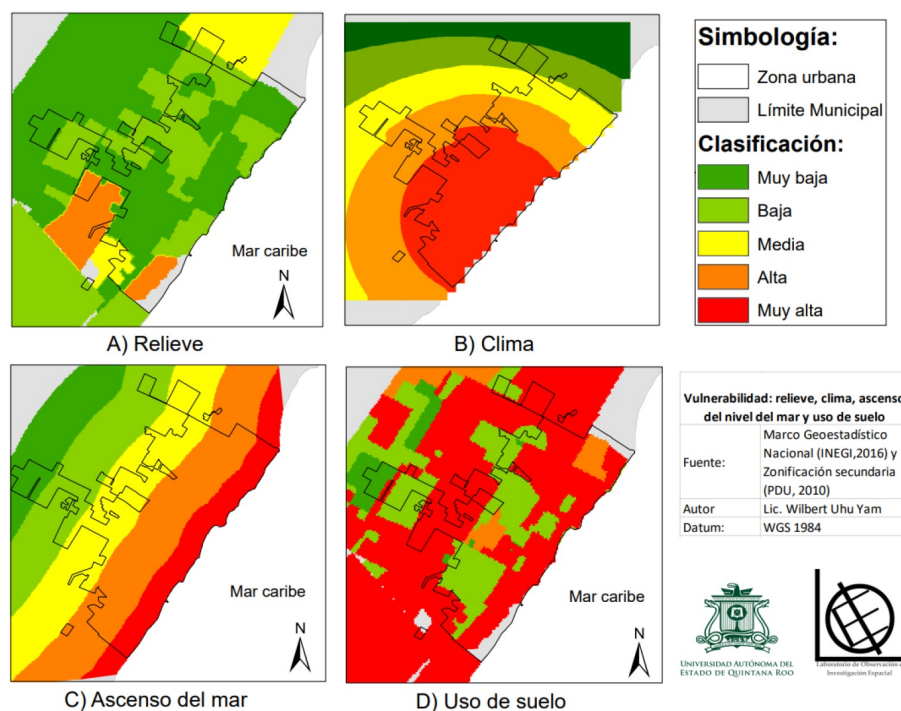


Figura 3. Mapa de vulnerabilidad (relieve, clima, ascenso del nivel del mar y uso de suelo).

Tabla 4. Datos de precipitación por estación meteorológica .

Estación	Precipitación				
	Mínima	Máxima	Promedio	ICI	IMF
Cobá	747.8	2125.6	1156.4	99.42	170
Cancún	817.5	2622.6	1384.9	99.42	224.1
Kantunilkín	1040.3	2734.2	1523.1	97.98	214.2
Victoria	1017.7	2277	1437.4	95.11	198.6
Solferino	708.2	1859.4	1258.3	94.54	177
Ideal	1072.5	2557	1448.9	93.39	203.9
Leona Vicario	501.9	1759.1	1165.5	89.94	164.3
Tulum	374.2	2177.8	1126.2	88.21	179.2
P. del Carmen	600.2	2790.4	1329.9	72.12	200.8
Cozumel	909.3	2235.3	1420.4	56.89	179.8
C. Vallarta	67.3	1794.6	834	53.1	130.7

al límite de la urbana es de hasta 9 km. Con el análisis de estas variables se identificó la zona más vulnerable en el primer kilómetro con respecto al litoral (Figura 3 y Tabla 3).

Se identificaron 630 polígonos con 24 diferentes usos de suelo. Principalmente de uso mixto barrial, ubicado en los bordes de las zonas de uso habitacional. Los usos de suelo con menor frecuencia son destinados a distrito de negocios, parques privados y la protección a pozos y humedales con un polígono. Conjuntamente, las zonas con

mayor coeficiente de ocupación de suelo son las destinadas al uso comercial, con autorización de construir hasta el 70% en el terreno. El uso del suelo se agrupó en 11 tipos principales (Figura 4) de acuerdo con las actividades permitidas señaladas en el plan de desarrollo urbano. Se atribuye una vulnerabilidad alta a muy alta en la mayor parte de la ciudad, asociada al uso comercial, turismo residencial, habitacional alto y uso mixto. La vulnerabilidad más baja se identificó en las zonas de protección asociada a depresiones kársticas, manglares y zonas

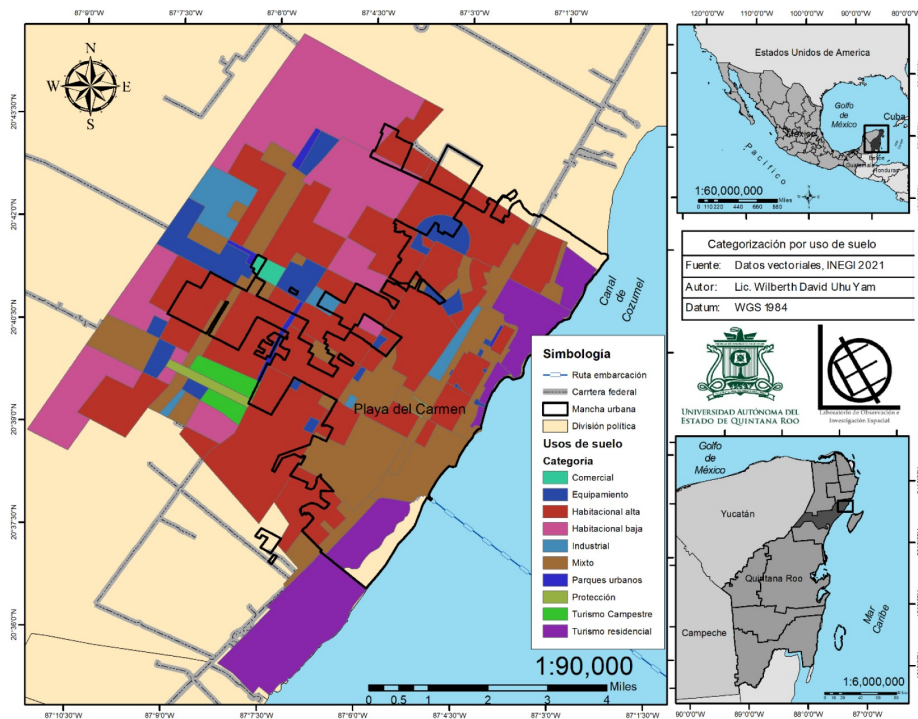


Figura 4. Uso de suelo.

Tabla 5. Descripción de las categorías de vulnerabilidad según el uso del suelo.

Categoría	Uso de suelo	Descripción
Muy bajo	Protección	Están destinados para la conservación de pozos y humedales, en estas zonas no está permitido la edificación de ningún tipo
Bajo	Equipamiento	Están destinados para edificios de administración pública y servicios como centros deportivos, escuelas, etc.
	Parques urbanos	Están destinados para la construcción de parques municipales, ecológicos y plazas cívicas
	Turismo campestre	Permite la construcción de 10 viviendas o 20 cuartos por hectárea y no debe exceder de dos niveles
Medio	Habitacional de baja intensidad	permite la construcción de 20 viviendas con una densidad de 72 personas por hectárea
Alto	Comercial	Permite la construcción de 40 viviendas por hectárea y pueden servir para mercados, cantinas, talleres de vehículos, gasolineras y restaurantes
	Turismo residencial	Permite la construcción de 25 viviendas o 50 cuartos por hectárea y no debe exceder de cuatro niveles
	Industrial	Destinada a industria ligera como almacenamiento y envasado de lubricantes, bodega de productos que no impliquen alto riesgo y distribución de gas L. P
Muy alto	Habitacional de alta intensidad	Permite la construcción de 60 viviendas con una densidad de 216 personas por hectárea
	Mixto	Permite la construcción de 60 viviendas por hectárea y puede ser utilizado para actividades de uso comercial, habitacional, equipamiento e industrial ligero.
	Crecimiento	Zonas designadas para la expansión urbana.

de selva (Figura 3 y Tabla 5).

DISCUSIÓN

Se han desarrollado una gran variedad de índices para calcular la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos con la consideración de particularidades de las zonas de estudio, siendo los fac-

tores más utilizados el espesor de las capas sobre el sistema, profundidad del suelo, litología del acuífero y tipos de suelos (Ríos-Roja y Vélez-Otálvaro 2008, Bolio-Barrientos *et al.* 2011, Doummar *et al.* 2012, Aguilar *et al.* 2013, Estrada-Godoy *et al.* 2013, Torres Díaz *et al.* 2014), estos factores se centran en un análisis geohidrológico. Si se consideran los antecedentes de los estudios en la península de Yu-

catán, se continua con el uso de los factores relieve y clima propuestos en el IVAKY (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Pero al factor relieve no se le dio el mismo grado de importancia debido a que el presente estudio se centra en zonas altamente urbanizadas y transformadas; razón por la que se descartó el tipo de suelo. Se incorporan dos nuevos factores, ascenso del nivel del mar (Medina-Moreno *et al.* 2014, Hoogesteijn-Reul *et al.* 2015, Contreras-Tax *et al.* 2021) y uso de suelo (Pousa *et al.* 2007, Barragán y de Andrés 2016). A partir del análisis cuantitativo de las depresiones kársticas, se incorpora en el análisis del relieve la distribución y características geomorfológicas de las unidades a mayor detalle (escala 1: 10 000), lo cual contrasta con el modelo propuesto para Yucatán (IVAKY), en el cual se usa una escala media (1: 50 000) (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Además, el relieve un posee un peso significativo para los modelos KAVI, KARSTIC, LEPT e IVAKY.

El factor clima puede medirse con diferentes índices, entre ellos la cantidad e intensidad de precipitación anual del área de estudio, el cual se usa en el modelo COP (Doummar *et al.* 2012) o por medio de la distribución espacial con la duración del periodo de lluvias propuesto por Delgado-Carranza *et al.* (2011), calculado a partir de datos de precipitación y temperatura, y que se usa en el modelo IVAKY (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Sin embargo, para este trabajo se decidió proponer una opción sencilla de calcular, a partir de la información disponible, la agresividad de lluvia con el Índice Modificado de Fournier, ya que solo se necesitan datos de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Cabe mencionar que los resultados obtenidos son generales y a una escala media, ya que solo existen dos estaciones meteorológicas dentro de la zona urbana.

Se considera la presencia de depresiones kársticas por su gran relevancia para el cálculo de vulnerabilidad (Plan *et al.* 2009) y por el hecho de tratarse de una zona costera, se propone el ascenso del mar como un factor significativo para este estudio, ya que el aumento del nivel del mar es la principal impacto del cambio climático (Nicholls y Cazenave 2010), donde se puede reconocer los efectos como la

inmersión total o un incremento en las inundaciones de la costa, pérdida o cambios en hábitats, erosión costera e intrusión de agua salina sobre las aguas superficiales y los mantos acuíferos (Nicholls 2015). El estudio de Ruiz-Ramírez *et al.* (2020) muestra los escenarios de aumento del mar para la ciudad de Playa del Carmen y deja en evidencia los daños potenciales que trae consigo el aumento del mar, ya que estima una afectación de 90 895 m² con un aumento de tres metros.

Tradicionalmente, se considera al suelo como un factor significativo en los modelos de vulnerabilidad, las características de espesor, la textura y los tipos de arcillas son los elementos significativos para el modelo KARSTIC (Davis *et al.* 2002). También se considera la permeabilidad del suelo para el modelo KAVI (Aguilar *et al.* 2013) y, a partir de las asociaciones edáficas, para cada unidad geomorfopedológica del IVAKI (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). Estas variables funcionan para estudios a escalas medias, ya que no existe información a nivel de detalle o donde se tienen sitios con bajo nivel de transformación natural del paisaje. Debido a lo anterior, se consideró incorporar el uso de suelo debido al avanzado desarrollo urbano de la zona costera. En el nororiente de la Península de Yucatán los índices de crecimiento de población y de expansión urbana son muy altos, asociados a la falta de planificación urbana y ausencia de servicios de tratamiento de aguas residuales (Frausto-Martínez *et al.* 2021). Esta variable afecta la calidad de los sistemas hídricos, ya que en ellos se desarrollan actividades de fabricación, almacenaje y trasporte que contienen sustancias potenciales para la contaminación de las aguas subterráneas mediante la infiltración. Asimismo, juega un papel importante ya que afecta la recarga de los acuíferos de dos formas, lo potencializa debido a la reducción de la cubierta impermeable, la escorrentía urbana de pozos secos y su posterior infiltración, rebose de alcantarillado y tuberías de agua y el riego excesivo. Por otra parte, disminuye la recarga por las superficies impermeables, la captación de aguas por la red pluvial y la extracción del agua (Howard y Gerber 2017). A pesar de que esta variable no es común

dentro de los modelos de vulnerabilidad, existen estudios como los de Howard y Gerber (2017) y Serra *et al.* (2021), que han considerado el uso de suelo para el estudio de la contaminación de aguas subterráneas; al respecto Heiβα (2020) ha anexado este factor junto con el análisis de índice DRASTIC y, González Herrera *et al.* (2018), ha modificado este índice, con el uso de suelo agregado.

Para la vulnerabilidad por factor, se observa que el clima tiene un comportamiento inverso a los resultados reportados para el estado de Yucatán con el modelo IVAKY, donde la mayor vulnerabilidad se ubica al centro de Yucatán y disminuye conforme se aproxima a la costa (Aguilar-Duarte *et al.* 2016). En el factor relieve su distribución es más homogénea y con tendencia a una vulnerabilidad alta y muy alta para ambos estudios. Para el ascenso del nivel de mar, la vulnerabilidad más alta se encuentra en las zonas próximas a la costa, lo cual coincide con los estudios de Chachadi y Lobo-Ferrerira (2001) y Blanco-de-la-Paz *et al.* (2018).

CONCLUSIONES

Los factores propuestos para la construcción del índice de vulnerabilidad a la contaminación de los

acuíferos kársticos, presenta las formas del relieve a escala detallada permitiendo una diferenciación fina de la vulnerabilidad. El incorporar el factor uso de suelo permitió un análisis de toda el área de estudio, a pesar de que esta se encuentra en su mayor parte urbanizada. El factor ascenso del mar muestra el grado de vulnerabilidad en un plano vertical y horizontal, este factor es importante considerarlo debido a la proximidad de la ciudad con el mar. Por último, el factor clima auxilió en la aproximación de la realidad; pero es necesario el uso de otros insumos, ya que no se cuenta con estaciones meteorológicas a escala local. Con el análisis de los cuatro factores se tiene una aproximación multidisciplinaria de la vulnerabilidad, por lo que, los factores propuestos pueden ser utilizados para la construcción de un índice de vulnerabilidad para acuíferos kársticos-costeros en zonas urbanas en zonas con características similares.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por el financiamiento de esta investigación, a través de la Beca Nacional, número: 819835.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Duarte Y, Bautista F, Mendoza M, Frausto O, Ihl T, Delgado C (2016) IVAKY: Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico Yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15: 913-933.
- Aguilar Y, Bautista F, Mendoza M, Delgado-Carranza C (2013) Vulnerabilidad y riesgos de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16: 243-263.
- Aller L, Bennett T, Petty R, Hackett G (1987) Drastic a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/2-85/018. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=ORD&dirEntryID=35474. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2021.
- Arnoldus H (1980) An approximation to the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: Boodt M, Gabriels D (ed) *Assessment of erosion*. John Wiley and Sons. New York. pp: 127-132.
- Azuz-Adeath I, Rivera-Arriaga E (2009) Descripción de la dinámica poblacional en la zona costera mexicana durante el periodo 2000-2005. *Revista Papeles de Población* 15: 75-107.
- Barragán JM, de Andrés M (2016) Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande* 64: 129-149.

- Blanco-de-la-Paz E, Brown-Manrique O, Márquez-Gurri R (2018) Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas en la cuenca sur de Ciego de Ávila. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 39: 73-83
- Bolio-Barrientos E, Bautista F, Pacheco-Ávila J (2011) Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México. *Revista Teoría y Praxis* 9: 55-72.
- CCPY (2010) programa municipal de desarrollo urbano de solidaridad 2010-2050. Cambio Climático de la Península de Yucatán. http://www.ccpy.gob.mx/archivos/documentos-agendas/tmp_201509113740.pdf. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2021.
- Carretero S, Kruse E (2014) Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(6): 5-24.
- Chachadi A, Lobo-Ferreira JP (2001) Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. In: *Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology*. Anna University Chennai, India. pp. 143-156.
- Colin-Olivares O, Frausto-Martínez O, Rodríguez C (2019) Cálculo automatizado de la profundidad de depresiones kársticas a escala detallada. En: Frausto-Martínez O (ed) *Conocimientos y saberes del karst tropical en México*. Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst A.C, Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística y Universidad de Quintana Roo, Mexico. pp: 55-78.
- Contreras-Tax A, Frausto-Martínez O, Uhu-Yam W (2021) Calidad del agua subterránea en una zona Kárstica de la Isla de Cozumel, Quintana Roo, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(1): 27.
- Davis AD, Long A, Wireman M (2002) KARSTIC: A sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. *Journal Environmental Geology* 42: 65-72.
- Delgado-Carranza C, Bautista F, Orellana-Lanza R, Hernández H (2011) Classification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatan, México. *Journal Investigations Geographics* 75: 51-60.
- Dummar J, Margane A, Geyer T, Sauter M (2012) Vulnerability mapping using the COP and EPIK methods. Technical Report n 7b. Technical Cooperation Project "Protection of the Jeita Spring". Department of Applied Geology, University of Göttingen, Germany & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Germany. 42p.
- Estrada-Godoy F, Silva-García JT, Ochoa-Estrada S, Moncayo-Estrada R, Cruz-Cárdenas G, Villalpaldo-Barragán F, Ramos-Leal A, Nava-Velázquez J (2013) Aplicación del método Sintacs para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la Cuenca del Río Duero, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 29: 235-248.
- Fragoso-Servón P, Bautista F, Frausto O, Pereira A (2014) Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31: 127-137.
- Frausto-Martínez O, Zapi-salazar NA, Colin-olivares O (2018) Identification of Karst Forms Using LiDAR Technology: Cozumel Island, Mexico. In: Abdalla R (ed) *Trends in geomatics-an earth science perspective*. In-techOpen. United kingdom. pp: 41-54.
- Frausto-Martínez O, Colín-Olivares O, Rodríguez-Castillo JF (2021) Karst en la ciudad: planificación del espacio urbanístico de la zona urbana de Cozumel, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(1): 31.
- Frausto O, Colín O (2019) Indicadores de sustentabilidad de la política de mares y costas - México. *Revista Costas* 1: 41-58.

- González-Herrera RA, Albornoz-Euán BSI, Sánchez Y Pinto I A, Osorio-Rodríguez JH (2018) El acuífero Yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 34: 667-683.
- Heiða L, Bouchaou L, Tadoumant S, Reichert B (2020) Index-based groundwater vulnerability and water quality assessment in the arid region of Tata city (Morocco). *Groundwater for Sustainable Development* 10: 100344. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100344
- Hoogsteijn-Reul AL, Febles-Patrón JL, Nava-Galindo VA (2015) La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán* 19: 169-175.
- Howard K, Gerber R (2017) Impacts of urban areas and urban growth on groundwater in the Great Lakes Basin of North America. *Journal of Great Lakes Research* 44(1): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.11.012>.
- León C (2004) Piezas de un rompecabezas: dimensión socioeconómica de las costas de México. En: Rivera Arriaga E, Villalobos, Azuz-Adeath I, Rosado-May F (eds) *El manejo costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. México. pp: 5-26.
- Lindsey BD, Katz BG, Berndt MP, Ardis AF, Skach KA (2010) Relations between sinkhole density and anthropogenic contaminants in selected carbonate aquifers in the eastern United States. *Environmental Earth Sciences* 60: 1073-1090.
- Medina-Moreno SA, Jimenez Gonzales A, Gutierrez-Rojas M, Lizardi-Jiménez MA (2014) Estudios de contaminación por hidrocarburos en cenotes de Quintana Roo relacionada al desarrollo turístico en el Caribe Mexicano. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 13: 509-516.
- Momejian N, Abou-Najm M, Alameddine I, El-Fadel M (2019) Groundwater vulnerability modeling to assess sea-water intrusion: A methodological comparison with geospatial interpolation. *Water Resources Management* 33: 1039-1052.
- Nicholls R J (2015) Adapting to Sea Level Rise. In: Shroder J, Ellis J, Sherman D (eds) *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters*. Elsevier, pp. 243-270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396483-0.00009-1>.
- Nicholls RJ, Cazenave A (2010) Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Journal Science, New York, N.Y.* 328: 1517-1520.
- Pedrozo-Acuña A (2012) Impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Quintana Roo, México. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo y el Banco Mundial. <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-qroo/banco-mundial/escenarios-aumento-nivel-mar.php>. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2021.
- Plan L, Decker K, Faber R, Wagreich M, Grasemann B (2009) Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Journal Environmental Geology* 58: 285-297.
- PNUD-INECC (2016) Impacto de la elevación del nivel del mar en la superficie y línea de costa de 35 islas pobladas y prioritarias de México. Informe Final. Ciudad de México. 24p.
- Pousa J, Tosi L, Kruse E, Guaraglia D, Bonardi M, Rizzetto F, Schnack E (2007) Coastal processes and environmental hazards: The Buenos Aires (Argentina) and Venetian (Italy) Littorals. *Journal Environmental Geology* 51: 1307-1316.

- Ríos-Roja L, Vélez-tálvaro M (2008) Vulnerabilidad a la contaminación, Zona Sur acuífero del Valle del Cauca, Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra* 23: 69-84.
- Ruiz-Ramírez JD, Gutiérrez-Aguirre MA, Frausto-Martínez Ó (2020) Biodiversidad y vulnerabilidad de Playa del Carmen ante el incremento del nivel medio del mar. En: Vargas-Delgado O (ed) *Handbook T-IX CIERMMI Mujeres en la ciencia biología*. México. pp: 95-106.
- SEDUMA (2008) Caracterización del POEL del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo. México. <http://sema.qroo.gob.mx/bitacora/index.php/decretos/municipiodesolidaridad/category/20-documentos-tecnicos?download=89:caracterizacion-del-poel-solidaridad>. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2021.
- Serra J, Cameira MDR, Cordovil C M, Hutchings NJ (2021) Development of a groundwater contamination index based on the agricultural hazard and aquifer vulnerability: Application to Portugal. *Science of The Total Environment* 772: 145032. DOI. 10.1016/j.scitotenv.2021.145032.
- Taylor RG, Scanlon B, Döll P *et al* (2013) Groundwater and climate change. *Nature Climate Change* 3: 322-329.
- Torres-Díaz M, Basulto-Solis Y, Cortés-Esquivel J, García-Uitz K, Koh-Sosa Á, Puerto-Romero F, Pacheco-Ávila J (2014) Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea en Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 1: 189-203.
- Torres-Mota R, Salles-Alfonso-de-Almeida P, López-González J (2014) Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5: 5-20.
- UNESCO (2006) Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°3. Editorial del Norte la Serena, Chile. 58p.
- Valcerce-Ortega RM, Forcada-Labrador CE (2021) Evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión marina en el sector Güira-Quivacán del acuífero costero Cuenca Sur de Artemisa y Mayabeque. *Revista Minería y Geología* 37: 30-43.
- Zwahlen F (2003) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission, COST Action 620. Belgium. 39p.