

Diseño urbano sensible al agua para la zona kárstica de Bacalar, Quintana Roo, México

Water sensitive urban design for the karst zone of Bacalar, Quintana Roo, Mexico

Silvana Marisa Ibarra-Madrigal^{1*} ,
Yesenia Nayrovick Hernández-
Montero² ,
Javier Rodrigo Nahuat-
Sansores² ,
David Gustavo Rejón-Parra² ,
Miguel Ángel Sánchez-Quijano² ,
Roberto Mena-Rivero² ,
Nuria Torrecano-Valle³ ,
Alfredo Arellano-Guillermo⁴ ,
Ángel Iván Romero-Martínez⁵ 

¹GeoAlternativa A.C. kilómetro 24 carretera federal Chetumal-Cancún, CP. 77930. Quintana Roo, México.

²Instituto Tecnológico de Chetumal. Av. Insurgentes 330, 17 de octubre, CP. 77013. Chetumal, Quintana Roo, México.

³El Colegio de la Frontera Sur. Avenida Centenario km 5.5, CP. 77014. Chetumal, Quintana Roo, México.

⁴Gobierno del estado de Quintana Roo. Avenida 22 de enero 1. Col. Centro, CP. 77000. Chetumal, Quintana Roo, México.

⁵Nacaome Foundation. Calle 27 sur entre Avenida 65sur y Avenida 70sur #3, Mzn 289 Lt3 CP. 77712. Solidaridad, Playa del Carmen, Quintana Roo, México.

*Autor de correspondencia:
silvanamarisa@geoalternativa.com

Artículo científico

Recibido: 10 de enero 2022

Aceptado: 10 de junio 2022

Como citar: Ibarra-Madrigal SM, Hernández-Montero YN, Nahuat-Sansores JR, Rejón-Parra DG, Sánchez-Quijano MA, Mena-Rivero R, Torrecano-Valle N, Arellano-Guillermo A, Romero-Martínez AI (2022) Diseño urbano sensible al agua para la zona kárstica de Bacalar, Quintana Roo, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): e3236. DOI: 10.19136/era.a9n2.3236

RESUMEN. En las regiones kársticas de México la construcción de ciudades se ha realizado con el uso de materiales y procesos que no corresponden con el funcionamiento de la dinámica de filtración del agua. Con el uso de modelos hidrodinámicos se analizó la implementación del Diseño Urbano Sensible al Agua (DUSA) en el karst y se evaluó el beneficio económico al disminuir las inundaciones en Bacalar, Quintana Roo, México. Como primera etapa se modeló la precipitación, escorrentía e infiltración; se determinó la infraestructura útil para mantener la conectividad del sistema hidrológico y se generaron escenarios modelo de permeabilidad. En la segunda etapa se analizó la eficiencia de los escenarios modelo. Finalmente se valorizaron los daños de inundación para cada escenario. Los resultados muestran que, si se mantiene un 68% de área urbana permeable y 32% impermeable con infraestructuras esponja, con periodo de retorno de 10 años, se retrasa hasta por 30 minutos el inicio de las inundaciones. Esto implica un ahorro de 5.56 millones de salarios mínimos. La implementación de DUSA reduce inundaciones, genera ahorros sociales y económicos, pero además mantiene la dinámica de flujo y conectividad del karst. El modelo internacional de DUSA disminuye la vulnerabilidad de los sistemas kársticos ante el cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático, inundaciones, modelación urbana, permeabilidad, valoración económica.

ABSTRACT. In the karst regions of Mexico, the construction of cities has been carried out using materials and processes that do not correspond to the functioning of filtration dynamics. The present work analyzes the effects of WSUD (Water Sensitive Urban Design) implementation on karst zone and the influence in the reduction of flooding. A permeability model was developed for the urban area of Bacalar, Quintana Roo, Mexico. As a first phase, precipitation, runoff, and infiltration were modeled; the useful infrastructure to maintain the connectivity of the hydrological system was determined and permeability models considering different scenarios were generated. In the second phase, the efficiency of the model scenarios was analyzed. Finally, flood damages were assessed for each scenario. The results show that if 68% of the urban area is kept permeable and 32% impermeable with sponge infrastructure, with a return period of 10 years, the onset of flooding is delayed by up to 30 minutes. This implies a saving of 5.56 million minimum wages. The implementation of DUSA reduces flooding, generates social and economic savings, but also maintains the flow dynamics and connectivity of the karst. The international DUSA model reduces the vulnerability of karst systems to climate change.

Key words: Climate change, flooding, urban modeling, permeability, economic valuation.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas kársticos cercanos a la costa son altamente vulnerable a los efectos del cambio climático (CC) y a las actividades humanas, debido a la alta permeabilidad, hidrología subterránea, y porque en ellos confluyen tanto sistemas marinos como terrestres (Hernández-Terrones *et al.* 2011, Rathore *et al.* 2016, Suchley y Álvarez-Filip 2018). La presencia de geformas como cavernas, dolinas y ríos subterráneos propicia una mayor conectividad en comparación con otros paisajes (Zhengxian *et al.* 2018), cualquier daño tiene un mayor efecto en la función de los ecosistemas y reduce los servicios ambientales en la región (Monterroso-Rivas *et al.* 2014, SEDETUR 2021). El margen costero del estado mexicano de Quintana Roo, colinda con el Caribe y alberga los ríos subterráneos más grandes del mundo (Moreno-Pérez *et al.* 2021), por ello la dinámica hidrológica del karst influye en todos los procesos ecológicos y ambientales de la región (Michener y Lajtha 2007, Silva 2019). De acuerdo con el Fondo Mundial para la Naturaleza, la vulnerabilidad del estado de Quintana Roo ante el CC, es media y media-alta, para las inundaciones y los fenómenos meteorológicos extremos (IPCC 2021, SEDETUR 2021). Por otro lado, Beddows *et al.* (2007) y Camacho-Cruz *et al.* (2020), señalan que es la actividad turística y urbana la que ha generado la mayor contaminación del agua superficial y subterránea del karst de la Península de Yucatán.

Una alternativa para la adaptación y mitigación al CC es la incorporación de infraestructura sensible al agua, para ello se requiere implementar un Diseño Urbano Sensible al Agua (DUSA), con el cual se busca preservar la conectividad hidrológica y el ciclo del agua, para lograr comunidades urbanas resilientes (Gleason-Espíndola 2014). Al mantener la conectividad ecosistémica, el DUSA permite cumplir con la legislación mexicana relacionada con la planificación territorial (Congreso de la Unión 2015, Ibarra-Madrugal *et al.* 2020). Brown *et al.* (2009) han identificado las distintas etapas que debe experimentar una ciudad para alcanzar la resiliencia al CC. Se requieren seis etapas y al menos tres deben incorporar

la gestión pública avanzada y temas de gobernabilidad: ciudad de cursos de agua, ciclo del agua y ciudad sensible al agua.

El DUSA, es parte importante del paradigma del diseño urbano sustentable; tiene como objetivo considerar el recurso agua como un factor fundamental. Este paradigma incorpora conocimiento desde las ciencias sociales, la física, la ingeniería, así como las ciencias ambientales relacionadas con el suministro de servicios hídricos y protección de los entornos acuáticos (Wong y Brown 2009). Consiste en diseñar espacios públicos e infraestructura hidrosanitaria que imite el funcionamiento del sistema natural. También requiere de la incorporación de infraestructura acorde al paisaje, que permita la continuidad de los servicios ambientales, como la filtración y reutilización del agua de lluvia, la recarga del acuífero, y disminución de inundaciones entre otros (Gleason-Espíndola 2014). El paisaje se definió como un conjunto de ecosistemas que se conectan y funcionan como un tejido continuo de capas; el paisaje kárstico se distingue por conectar elementos superficiales y subterráneos a través del ciclo hidrológico (Wong 2006). De acuerdo con Wong (2006), Brown *et al.* (2009), y Silva (2019); el diseño urbano es un campo relacionado con la planificación y el diseño arquitectónico de entornos urbanos, que abarca más allá del ámbito hídrico, pero que tienen implicaciones en los efectos medioambientales sobre la tierra y el agua.

Quintana Roo representa el segundo lugar nacional en visitación turística (SEDETUR 2021) y primero en crecimiento poblacional (3.1% anual) (INEGI 2020). El diseño urbano existente y la demanda de servicios, rompe con la conectividad del karst, debido a los materiales y tipo de construcción utilizados. Además de poner en riesgo la perpetuidad de la calidad de vida brindada por la naturaleza (Brown *et al.* 2009). Por otro lado, la especulación de la tierra ha generado asentamientos irregulares (Gómez-Pech *et al.* 2018). El modelo de urbanización actual provoca la impermeabilización del suelo y modificación de los flujos de agua, alterando la conectividad natural. Los asentamientos urbanos generan mayores volúmenes de escorrentía y dependiendo la duración, intensidad y período

de recurrencia de las inundaciones, provoca daños económicos por las pérdidas materiales, lo cual en condiciones naturales no se presenta (CONAGUA 2015). Con el uso de modelos hidrodinámicos se analizó la implementación del DUSA en el karst y se evaluó el beneficio económico al disminuir las inundaciones en Bacalar, Quintana Roo, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el año 2019. El área corresponde al área urbana de la cabecera municipal de Bacalar, Quintana Roo. De acuerdo con el área de proyección del Programa preliminar de Desarrollo Urbano Municipal (Figura 1); el núcleo urbano se encuentra ubicado al centro oeste de la Laguna Bacalar. Esta zona presenta un clima Cálido sub-húmedo Aw1(x'), con temperatura media anual de 26° C, precipitación media anual de 1 327.4 mm, la estación de lluvia abarca de mayo a noviembre.

Modelo de infiltración

Se eligió el modelo precipitación-infiltración-escurrimiento por el Soil Conservation Service de Estados Unidos. Este modelo permite calcular el escurrimiento en función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso y las condiciones de humedad (USDA 1986, Campos-Aranda 1998). El comportamiento del suelo se representa con la curva N (CN), cuyo rango va desde cero para suelos muy permeables que tardan en saturarse, hasta cien, suelos muy impermeables o que rápidamente se saturan. La estimación del CN en todos los casos se realizó con la calculadora metodológica National Green Values (CNT 2009). Una vez determinada la infiltración y escorrentía, se desarrollaron escenarios de permeabilidad, en los que se utilizaron distintos diseños de infraestructura basada en el DUSA. Los datos de infiltración-escorrentía, fueron utilizados para analizar las variaciones de la inundación en tiempo y superficie, empleando modelación hidrodinámica bidimensional de flujo, basada en las ecuaciones de Saint Venant y utilizando el Software IBER 2.4.3 (Bladé *et al.* 2014, Sánchez-Quijano *et*

al. 2018). Para el modelo se utilizaron datos de precipitación de la estación meteorológica 23002 de CONAGUA, para el periodo 1962 a 2012 (SMN 2019). Además, del registro de lluvia máxima diaria, para determinar el hietograma y las curvas Intensidad-Duración-Tiempo de retorno (IDTr). Se eligió el periodo de 2 y 10 años de acuerdo con el lineamiento emitido por la Comisión Nacional del Agua (Campos-Aranda 1998, CONAGUA 2015).

Infraestructura sensible al agua

Basados en los criterios para implementación de DUSA (Gobierno de la CDMX 2016, IMPLAN 2017) y las características de la zona de estudio, se eligieron tres diseños de infraestructura: el bio-canal o swale, el jardín de lluvia y los pavimentos permeables, que en conjunto se les nombró infraestructura esponja. En todas se plantea el uso de materiales de la región y pueden colocarse en espacios públicos como estacionamientos, camellones, banquetas y andadores. Para la construcción virtual de la infraestructura, se utilizó una capa que corresponde al levantamiento topográfico de precisión centimétrica para el área del centro urbano. Para las áreas sin levantamiento topográfico, se empleó el sistema ASTER Global Digital Elevation (GDEM V3), en el cual cada píxel representa un área de 30 metros, con alta precisión horizontal y vertical de un arco segundo. Ambas capas se interpolaron con el algoritmo de vecinos cercanos, para aumentar la precisión en la elevación y la validez en la representación de escurrimiento e inundaciones. Con estos datos se obtuvo la modelación hidrodinámica de escurrimiento e inundación en un periodo de lluvia.

Simulación económica

El modelo hidrodinámico se utilizó para desarrollar los escenarios de ocupación, para superficies permeables (% p) e impermeables (% imp). Línea base: escenario previo a la ocupación urbana con 81.78% selva, 7.33% pastizal y 0.02% agua INEGI (2011), conserva las características de permeabilidad del ecosistema sin urbanización, con grupo hidrológico de suelo tipo B, buena condición de infiltración de 0.62, acorde al método de clasifi-

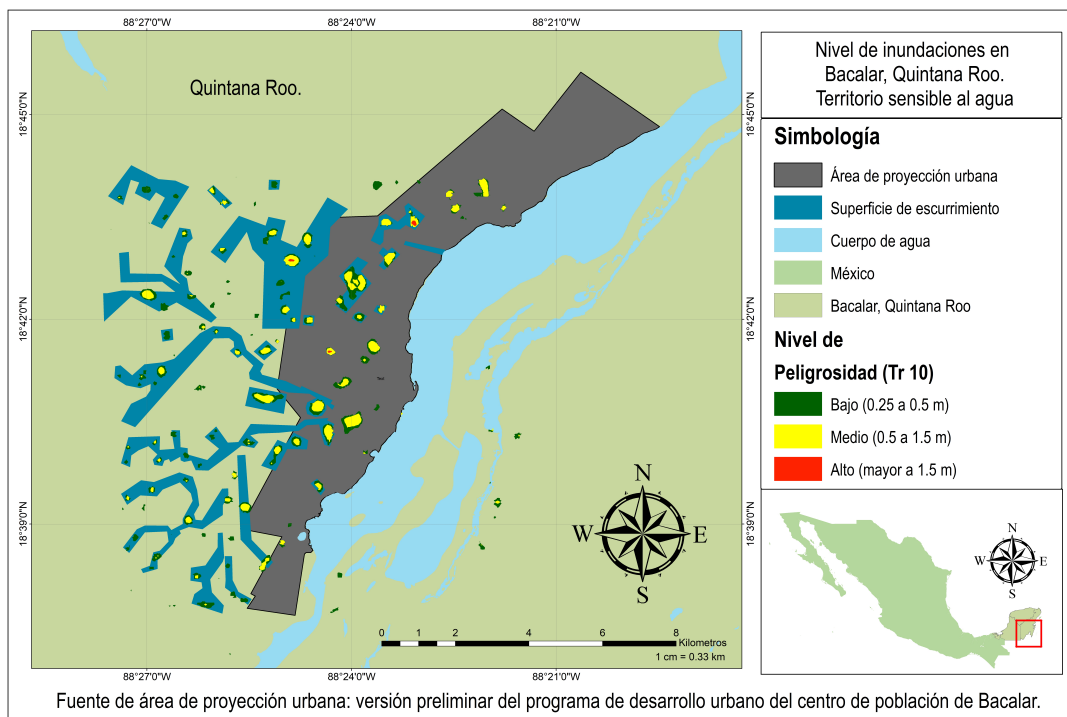


Figura 1. Nivel de inundación y red de flujos de agua superficial de la zona de estudio en Bacalar.

cación expuesto en USDA (1986). Situación actual: con análisis de imágenes satelitales de Google Earth (2019) se midió la proporción actual del centro urbano; resultó un 22% p vs 78% imp. Hipotético 1: situación hipotética 35% p vs 65% imp. Hipotético 2: el escenario optimista en el cual se manejó un 68% p vs 32% imp.

La valoración económica por daños por inundación se obtuvo a través de la clasificación de la peligrosidad (Arreguín-Cortés 2015, Alcocer-Yamanaka et al. 2016). La inundación se clasificó como peligrosidad alta para 1.5 m, media 0.5-1.5 m y baja para 0.25-0.5 m. Se determinó el área de afectación en hectáreas, periodos de retorno (Tr) 2 y 10 años, con y sin infraestructura esponja. La valoración económica del daño anual por inundación (VDA), se estimó para cada escenario considerando las ecuaciones propuestas por Ceballos-Bernal et al. (2016), en las que determinan las curvas de inundación-daño para diferentes tipos de vivienda y cuyo resultado se estima en salarios mínimos. La superficie urbana se dividió en un 60% para edificaciones (edifi-

cios y vivienda), 30% en vialidades y 10% en área de donación.

Los daños anuales se estimaron basados en el documento de CONAGUA (2015). El cálculo se determina con el inverso del Tr multiplicado por el costo del daño para superficie y tirante de inundación en los diversos escenarios. Es decir, $Tr\ 2 = 0.5\%$ de probabilidad de ocurrencia y $Tr\ 10 = 0.1\%$ probabilidad de ocurrencia.

Posteriormente es posible determinar el valor actual de los beneficios (VAB), por implementación de la infraestructura esponja. Para estimar el VAB se efectuó un cálculo de perpetuidad utilizando la ecuación:

$$VAB = \frac{BAAD}{r}$$

Donde: VAB es el valor actual de los beneficios, BAAD el beneficio por ahorro anual por daños y r la tasa social de descuento requerida por Secretaría de Hacienda y Crédito Público para evaluar proyectos del sector público.

RESULTADOS

La modelación hidrodinámica muestra que la mayoría de los polígonos de inundación presentan peligrosidad media (0.5-1.5 m), la escorrentía superficial se proyecta como una red de flujos de agua superficial que se formaría en el temporal estacional (Figura 1). El tiempo de inundación resultante para cada escenario, bajo la condición con y sin infraestructura esponja y con diferentes porcentajes de superficie permeable, se presenta en la Tabla 1. Para el escenario Línea Base, se tuvo un CN = 61, el inicio de la inundación se dio en 1 hora y 8 min. En este escenario no se implementó infraestructura esponja. El valor del daño anual esperado (VDA) se obtuvo para una probabilidad de ocurrencia cada 2 y cada 10 años (Tabla 2), para este escenario alcanza una cifra de 0.72 MSM (millones de salarios mínimos). Para el escenario Situación Actual, se tuvo un CN = 95, representa el de mayor impermeabilización (77.59%). El tiempo en que inicia la inundación es de sólo 10 min y 30 s. Con infraestructura esponja, el CN = 91, el tiempo de inundación aumenta a 12 min 50 s, es decir, se retrasa 4 min, 20 s. El VDA para este escenario se estima en 2.05 MSM sin infraestructura esponja y en 1.83 MSM con infraestructura.

En el escenario Hipotético 1, se obtuvo un CN = 83 y el tiempo en que inician los procesos de inundación es de 15 min con 50 s. Este mismo escenario con la aplicación de la infraestructura esponja, disminuye el CN = 79 y aumenta el tiempo de inicio de inundación, se retrasa 3 min con 20 s. El VDA sin la infraestructura esponja alcanza un valor de 1.77 MSM; mientras con la infraestructura esponja es de 1.38 MSM. Finalmente, para el escenario Hipotético 2, el CN = 77 y el inicio de inundación es de 20 min con 30 s. Con la infraestructura esponja el CN baja a 66 y el tiempo de inicio de inundación de 30 min 30 s. El VDA se calculó sin la infraestructura esponja con valor de 1.38 MSM y con la infraestructura esponja en 1.34 MSM. La implementación de infraestructura esponja genera un ahorro (Tabla 3), para el escenario Línea Base de 0.41 MSM, Situación actual 2.21 MSM, el Hipotético 1 de 3.84 y el Hipotético 2, presenta un ahorro 5.56 MSM.

DISCUSIÓN

Los modelos hidrodinámicos con implementación de DUSA generan los escenarios de permeabilidad óptimos para la región. Bajo un escenario del 68 y 32% de impermeabilidad, se obtiene un CN de 66, por lo que se logra el retraso del inicio de inundaciones de 30 min a Tr de 10 años. El hietograma (Figura 2) señala que la mayor intensidad de lluvia se produce en los primeros 30-40 min. De acuerdo con el informe de IMTA-CAPA (2016), en la zona sur de Quintana Roo la mayor intensidad de lluvia se presenta en los primeros 30 minutos. El cambio de uso de suelo para urbanización genera inundación por su efecto directo en la disminución de la permeabilidad y captación de agua (Yira et al. 2016, Siregar 2018). El desarrollo de modelos de simulación hidrodinámica es necesario para identificar las zonas de riesgo a inundación y constituyen una alternativa para una mejor planificación del territorio en las municipalidades en todo el mundo (Zope et al. 2016). La infraestructura urbana que imita o mantiene la captación y escorrentía natural, disminuye la vulnerabilidad de las ciudades y por tanto de las poblaciones humanas, ante el cambio climático (CE 2014). En este sentido la implementación de infraestructura sensible al agua representa una alternativa para las zonas kársticas de México.

De acuerdo con los modelos el ahorro monetario en caso de daño puede alcanzar un valor de 5.56 MSM o 570.81 millones de pesos (valor a enero de 2019). De acuerdo con Pinos et al. (2017) existen pocos estudios en Latinoamérica que han evaluado los costos-beneficio del daño por inundación, así como aquellos que han analizado la implementación de infraestructura sensible al agua. No obstante, la necesidad de contar con ciudades basadas en el funcionamiento de los sistemas ecológicos ha sido abordada desde comienzos del siglo XX bajo definiciones y modelos homólogos al DUSA, como los sistemas urbanos de drenaje sostenible y la infraestructura verde (IMPLAN 2017). Como lo muestra Jiménez (2018) desde 1903 se reconocen el papel de la infraestructura verde en la conservación del agua y aire limpios, además de proveer

Tabla 1. Tiempo de inicio del aumento de escorrentía e inundación según modelación hidrodinámica para la lluvia con Tr = 10 años.

Situación urbana	% Área Permeable	% Área Impermeable	Tiempo de inicio de las inundaciones			
			CN	Sin infraestructura esponja	CN	Con infraestructura esponja
Línea base	(81.78% selva, 7.33% pastizal y 0.02% agua)		61	1 hora 8 min	–	–
Hipotético 1	34.52%	65.48%	83	15 min 50 s	79	19 min 10 s
Hipotético 2	67.61%	32.39%	77	20 min 30 s	66	30 min 30 s
Situación actual	22.41%	77.59%	95	10 min 30 s	91	12 min 50 s

Tabla 2. Comportamiento de los escenarios con y sin implementación de infraestructuras esponja.

A) Situación urbana	Daños sin infraestructura esponja (MSM)		Probabilidad de ocurrencia (%)		Daño Anual Esperado (MSM)
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 2	Tr = 10	
Línea base	0.98	2.73	0.5	0.1	0.76
Situación actual	3.14	4.81	0.5	0.1	2.05
Hipotético 1	2.66	4.40	0.5	0.1	1.77
Hipotético 2	1.94	3.72	0.5	0.1	1.38
A) Situación urbana	Daños con infraestructura esponja (MSM)		Probabilidad de ocurrencia (%)		Daño Anual Esperado (MSM)
	Tr = 2	Tr = 10	Tr = 2	Tr = 10	
Línea base	0.91	2.68	0.5	0.1	0.72
Situación actual	2.77	4.47	0.5	0.1	1.83
Hipotético 1	2.00	3.86	0.5	0.1	1.34
Hipotético 2	0.97	3.01	0.5	0.1	0.78

Tr = tiempo de retorno en años, MSM = millones de salarios mínimos para el año 2019.

Tabla 3. Ahorro monetario por daños probables.

Situación urbana	Beneficios (MSM)	Beneficios (millones de MXP\$) *
Línea Base	0.41	41.83
Hipotético 1	3.84	394.22
Hipotético 2	5.56	570.81
Situación Actual	2.21	227.37

*Valor estimado para el año 2019, MSM- millones de salarios mínimos.

una amplia gama de beneficios para personas y vida silvestre (Benedict y McMahon 2006). Las ciudades diseñadas bajo estos esquemas pueden salvaguardar los procesos naturales y culturales esenciales para sostener la vida humana (Kongjian Yu et al, 2006). El desarrollo de intervenciones ingenieriles que repliquen el funcionamiento de la naturaleza aportará una gama más amplia de beneficios sociales, ambientales y económicos.

A nivel mundial existen ejemplos de la implementación de diseños urbanos sensibles al agua, por lo que se ha desarrollado literatura sobre modelos y experiencias en relación con la incorporación de infraestructura esponja como alternativa para evitar inundaciones y desastres. Por ejemplo, se ha propuesto una transición a las Ciudades Esponja (Zevenbergen et al. 2018), como Australia, Singapur,

Holanda también la han incorporado (Roy et al. 2008, Rodríguez et al. 2015, Public Utilities Board 2018). La incorporación del DUSA aumenta la captación de agua y mantiene la permeabilidad de los suelos. Por lo que es la mejor alternativa para el beneficio social, ambiental y económico a través del tiempo (Liang et al. 2020, Kongjian Yu et al, 2006). Sin embargo, para que la implementación de DUSA tengan el efecto esperado, es necesario diseñar una distribución de espacios urbanos y naturales equilibrada (Gleason-Espindola 2014).

Los modelos y escenarios analizados sugieren que el tiempo relativo al inicio de inundaciones aumenta siempre que se procure mantener un porcentaje de superficie permeable o que se emplee infraestructura sensible al agua. Pero también revelan la importancia de la distribución del área permeable,

CURVAS IDT - SERIE ANUAL DE MÁXIMOS - 23002 - BACALAR

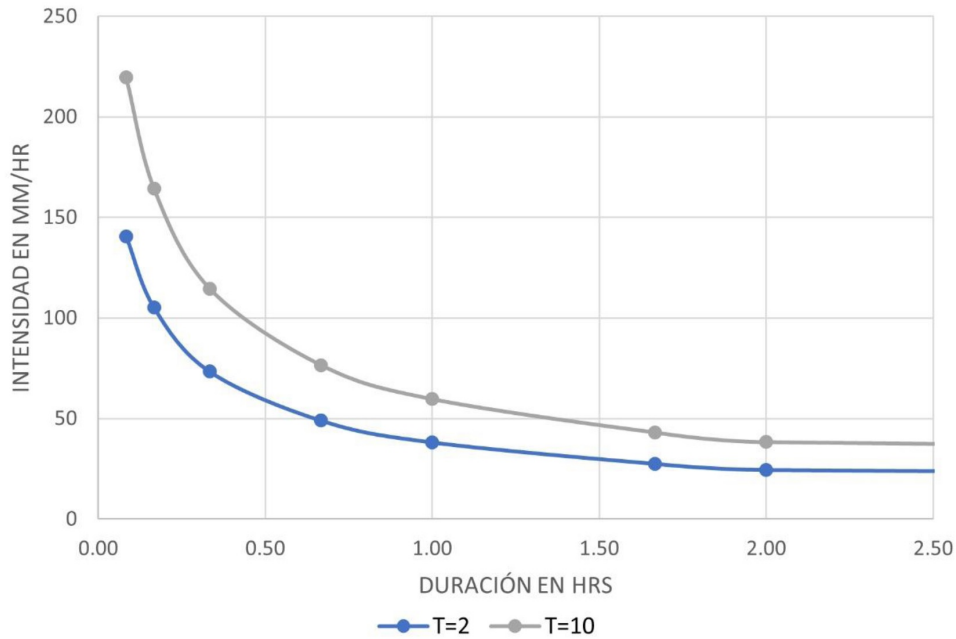


Figura 2. Histograma de curvas intensidad-duración-periodo de retorno (IDTr), para la estación climatológica 23002 Bacalar.

por lo que un parque de recarga es más efectivo si en la periferia urbanizada se optimiza la conectividad del paisaje. Algunos de los retos para la modelación futura es analizar distintas escalas geográficas, los distintos tipos de urbanización, implementación de parques de recarga, variantes de permeabilidad y conectividad. Por otro lado, se sugiere analizar sistemas individuales de tratamiento de agua residual e incorporar formas adaptadas a naturaleza del karst; se requiere la incorporación de variables como la ocurrencia de tormentas y huracanes, mayor número de intervalos de tiempo de precipitación e integrar el papel de las aguas subterráneas (Zope *et al.* 2016, Wang *et al.* 2020, Li *et al.* 2021, Meng *et al.* 2022). Los modelos de simulación obtenidos ofrecen un panorama sobre los costos beneficios de la implementación de la infraestructura DUSA, además de que revelan los diversos retos de modelación, la apremiante necesidad de desarrollar una estrategia de gestión, por lo que es necesario identificar los indicadores ambientales, sociales y económicos, además de los actores y componentes necesarios

para alcanzar la construcción de índices de ciudades sensibles al agua (Beck *et al.* 2016, Rogers *et al.* 2020, Brown *et al.* 2009).

CONCLUSIONES

Los escenarios obtenidos con los modelos hidrodinámicos con la implementación DUSA para Bacalar, son el primer análisis de este tipo para la región. Al mantener una permeabilidad mayor del 60% e implementar infraestructura DUSA, se retrasa la inundación hasta por 30 minutos y se alcanza un ahorro de 570.81 millones de pesos. El cambio de uso de suelo sobre el sistema kárstico de la Península de Yucatán debe ser planificado manteniendo la mayor permeabilidad en los sitios de recarga de agua al acuífero. Los escenarios y modelos desarrollados sostienen que es posible aplicar un diseño urbano sensible al agua, resiliente y acorde al funcionamiento del ciclo hidrológico. El DUSA puede contribuir con el desarrollo urbano municipal,

ordenamiento territorial, mapas de riesgo y la determinación de zonas metropolitanas y disminuir la vulnerabilidad ante el CC.

AGRADECIMIENTOS

Secretaría de Desarrollo Urbano y Territorial Sustentable Arq. Carlos Ríos Castellanos, Dra. Herlinda Silva. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado Lic. Francisco Gerardo Mora Vallejo e Ing. Luis Soberanis Allen. Comisión Nacional del Agua Q.F.B. José Luis Blanco Pajón. El Colegio de la Frontera Sur Dr. Héctor Hernández Arana. Asociación de Hoteles y Restaurantes de Bacalar Lic.

Linda Flor Argaez Calderón. Unión de Asociaciones de la Sociedad Civil en Bacalar, Marco Jericó y Arturo Arroyo. Colegio de Ingenieros Civiles de Quintana Roo, Zona Sur A.C. Ing. Amir Efrén Padilla Espadas. VIMSA Arq. Luis Carrión Cuellar. Red Mexicana de Cuencas (REMEXCU) Biol. Eduardo Ríos Patrón (coordinador). Yessica Osorio Miranda. Red Latinoamericana de Rescate de Ríos Urbanos Mtro. José Luis Romero (QEPD). Termarchitecture (Urban Planning & Architectural Design) Mariana García Solano. Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables del CONACyT Dr. José Arturo Gleason Espíndola.

LITERATURA CITADA

- Alcocer-Yamanaka VH, Rodríguez-Varela JM, Bourguett-Ortíz VJ, Llaguno-Guilberto OJ, Albornoz-Góngora PM (2016) Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua VII*: 33-55.
- Arreguín-Cortés F, López-Pérez M, Montero-Martínez M (2015) Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático: efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. 148p.
- Beck L, Brown R, Chesterfield C, Dunn G, de Haan F, Lloyd S, Wong T (2016) Beyond benchmarking: A water sensitive cities index. *OzWater 16*: 10-12.
- Beddows P, Blanchon P, Escobar E, Torres-Talamante O (2007) Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana 83*: 32-35.
- Benedict MA, McMahon E (2006) *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Island Press. Washington, DC. USA. 299p.
- Bladé E, Cea L, Corestein G, Escolano E, Puertas J, Vázquez-Cendón E, Dolz J, Coll A (2014) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería 30(1)*: 1-10. DOI: 10.1016/j.rimni.2012.07.004.
- Brown RR, Keath N, Wong TH (2009) Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science & Technology 59*: 847-55.
- Camacho-Cruz KA, Ortiz-Hernández MC, Sánchez A, Carrillo L, Navarrete ADJ (2020) Water quality in the eastern karst region of the Yucatan Peninsula: nutrients and stable nitrogen isotopes in turtle grass, *Thalassia testudinum*. *Environmental Science and Pollution Research 27*: 15967-15983.
- Campos-Aranda DF (1998) *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 30p.
- CE (2014) *Construir una infraestructura verde para Europa*. Comunidad Europea. Bélgica. 23p.
- Ceballos-Bernal AI, Baró-Suárez JE, Díaz-Delgado C (2016) Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. Aplicación de las curvas inundación-daños en países en desarrollo. *Investigaciones Geográficas 65*: 169. DOI: 10.14198/INGEO2016.65.10.

- CONAGUA (2015) Metodologías de Evaluación Socioeconómica para Proyectos de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Protección a Centros de Población. Comisión Nacional del Agua, CDMX, México. 256p.
- Congreso de la Unión (2015) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/148.pdf>. Fecha de consulta: 15 de enero de 2019.
- CNT (2009) Green Values. Stormwater Management Calculator. Center for Neighborhood Technology. San Francisco - Chicago USA. <https://greenvalues.cnt.org/index.php>. Fecha de Consulta: 27 de agosto de 2019.
- Gleason-Espíndola EJ (2014) Sistemas de Agua Sustentables en las Ciudades. Trillas. Guadalajara, Jalisco, México. 332p.
- Gobierno de la CDMX (2016) Hacia una Ciudad Sensible al Agua. El espacio público como una estrategia de gestión de agua de lluvia. Gobierno de la Ciudad de México. CDMX, México. 211p.
- Gómez-Pech EH, Barrasa-García S, García de Fuentes A (2018) Paisaje litoral de la Laguna de Bacalar (Quintana Roo, México): ocupación del suelo y producción del imaginario por el turismo. *Investigaciones Geográficas* 95: 1-18.
- Google Earth (2019) Imagen Satelital del Municipio de Bacalar. <https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>. Fecha de consulta 9 de febrero de 2019.
- Hernández-Terrones L, Null KA, Ortega-Camacho D, Paytan A (2015) Water quality assessment in the Mexican Caribbean: impacts on the coastal ecosystem. *Continental Shelf Research* 102: 62-72.
- Ibarra-Madrigal SM, Gracia MA, Schmook B (2020) Ordenamiento territorial, agua subterránea y participación sociopolítica en Bacalar, Quintana Roo, México. *Sociedad y Ambiente* 22: 265-292.
- IMPLAN (2017) Manual de lineamientos de diseño de infraestructura verde para Municipios Mexicanos. Peñúñuri-Soto (Coord.). Instituto Municipal de Planeación Urbana de Hermosillo, Sonora, México. 265p.
- IMTA-CAPA (2016) Estudio geohidrológico en el acuífero de Chetumal, Quintana Roo - Informe Final. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo en Anexo I.8 del Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal, Q. Roo. Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay Pix y Xul Há. <http://www.opb.gob.mx/portal/wp-content/uploads/transparencia/93/1/f/PDU2018/I-8%20anexo%20drenaje%20pluvial%20y%20zonas%20inundables%2019012018.pdf>. Fecha de consulta: 10 de marzo 2019.
- INEGI (2011) Carta de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250,000 serie V. Instituto Nacional de Geografía. Ciudad de México, México. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>. Fecha de consulta: 10 de marzo 2019.
- INEGI (2020) Censo de Población y Vivienda. Estudio 2020 de Indicadores de demografía y sociedad. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Quintana Roo, México. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Indicadores>. Fecha de consulta: 20 de diciembre 2021.
- IPCC (2021) Summary for policymakers. In: MassonDelmotte, VP, Zhai A, Pirani SL, Connors C, Péan S, Berger N, Caud Y, Chen L, Goldfarb MI, Gomis M, Huang K, Leitzell E, Lonnoy JBR, Matthews TK, Maycock T, Waterfield O, Yelekçi R, Zhou B (eds) *Climate change: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 3-32.
- Jiménez M, De la Rivas JL (2018) Ecos de Olmsted en Europa. El sistema de parques y los orígenes del urbanismo europeo contemporáneo. *Navarra, España. Revista de Arquitectura* 20: 86-103.

- Kongjian Y, Dihua L, Nuyu L (2006) The evolution of Greenways in China. *Landscape and Urban Planning* 76: 223-239.
- Li J, Hong A, Yuan D, Jiang Y, Zhang Y, Deng S, Chen Y (2021) Elaborate simulations and forecasting of the effects of urbanization on karst flood events using the improved Karst-Liuxihe Model. *Catena* 197: 104990. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104990.
- Liang C, Zhang X, Xia J, Xu Jing, She D (2020) The effect of sponge city construction for reducing directly connected impervious areas on hydrological responses at the urban catchment scale. *Water* 12: 1163. DOI: 10.3390/w12041163.
- Meng X, Li X, Nghiem LD, Ruiz E, Jahir MA, Gao L, Wang Q (2022) Improved stormwater management through the combination of the conventional water sensitive urban design and stormwater pipeline network. *Process Safety and Environmental Protection* 159: 1164-1173.
- Michener RH, Lajtha K (2007) *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Blackwell Publishing, Malden, USA. 526p.
- Monterroso-Rivas A, Fernández-Eguiarte A, Trejo-Vásquez RI, Conde-álvarez AC, Escandón-Calderón J, Villers-Ruíz L, Gay-García C (2014) *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 644p.
- Moreno-Pérez PA, Hernández-Téllez M, Bautista-Gálvez A (2021) In danger one of the largest aquifers in the world, the great Mayan aquifer, based on monitoring the cenotes of the Yucatan Peninsula. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 81: 189-198.
- Pinos J, Timbe L, Orellana D (2017) *Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador*. *Maskana* 8: 147-162.
- Public Utilities Board (2018) *Active, Beautiful, Clean Waters: Design Guidelines*. 4th Edition. PUB Press. https://www.pub.gov.sg/Documents/ABC_Waters_Design_Guidelines.pdf. Fecha de consulta: 15 de enero de 2019.
- Rathore SS, Chandravanshi P, Chandravansh A, Jaiswal K (2016) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on aquatic ecosystem. *Journal of Agriculture and Veterinary Science* 9: 89-96.
- Rodríguez MI, Cuevas MM, Huertas F, Martínez G, Moreno B (2015) Indicators to evaluate water sensitive urban design in urban planning. *Sustainable Development* 1: 371-382.
- Rogers BC, Dunn G, Hammer K, Novalia W, de Haan FJ, Brown L, Chesterfield C (2020) *Water Sensitive Cities Index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions*. *Water research* 186: 116411. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116411.
- Roy AH, Wenger SJ, Fletcher TD, Walsh CJ, Ladson AR, Shuster WD, Brown RR (2008) Impediments and Solutions to Sustainable, Watershed-Scale Urban Stormwater Management: Lessons from Australia and the United States. *Environmental Management* 42: 344-359.
- Sánchez-Quijano MA, Miguel González C, Gutierrez-López A (2018) Modelación hidrológica de la rotura de presa utilizando el software IBER. *Revista Nthe* 24: 34-40.
- SEDETUR (2021) *Plan Maestro de Turismo Sustentable Quintana Roo 2030*. 1ª Ed. Secretaría de Turismo del Gobierno del Estado de Quintana Roo. SEDETUR. Quintana Roo, México. 135p.
- Silva RSMJ (2019) *Diseño urbano sensible al agua. Retos y oportunidades*. 1ª edición. 3Ciencias. España. 87p.

- Siregar RI (2018) Land cover change impact on urban flood modeling (case study: Upper Citarum watershed) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 126: 1-8. DOI: 10.1088/1755-1315/126/1/01202.7.
- SMN (2019) Normales Climatológicas por Estado. Servicio Meteorológico Nacional, Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=qroo>. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2019.
- Suchley A, Alvarez-Filip L (2018) Local human activities limit marine protection efficacy on Caribbean coral reefs. Conservation Letters 11(5): e1257. DOI 10.1111/conl.12571.
- USDA (1986) Urban hydrology for small watersheds. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conserving Engineering Division, Technical Release-55. Second Ed. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf. Fecha de consulta: 15 de enero de 2019.
- Wang J, Hu C, Ma B, Mu X (2020) Rapid urbanization impact on the hydrological process in Zhengzhou, China. Water 12(7): 1870. DOI: 10.3390/w12071870.
- Wong THF, Brown RR (2009) The water sensitive city: principles for practice. Water Science & Technology 60: 673-682.
- Wong THF (2006) Water sensitive urban design - the journey thus far. Australasian Journal of Water Resources 10: 213-222.
- Yira Y, Diekkruger B, Steup G, Bossa AY (2016) Modeling land use change impacts on water resources in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso). Elsevier 537: 187-199.
- Zevenbergen C, Dafang Fu, Pathirana D (2018) Transitioning to sponge cities: challenges and opportunities to address urban water problems in China. Water 10: 1230. DOI: 10.3390/w10091230.
- Zhengxian Zhang, Weiping Wang, Shisong Qu, Qiang Huang, Shuai Liu, Qiaoyi Xu and Ludong Ni (2018) A new perspective to explore the hydraulic connectivity of karst aquifer system in Jinan Spring Catchment, China. Water 2018: 1368. DOI: 10.3390/w10101368.
- Zope PE, Eldho TI, Jothiprakash V (2016) Impacts of land use-land cover change and urbanization on flooding: A case study of Oshiwara River Basin in Mumbai, India. Catena 145: 142-154.