

Suelos Y Karst, Origen De Inundaciones Y Hundimientos En Chetumal, Quintana Roo, México

Patricia Fragoso-Servón, (PhD)

Alberto Pereira-Corona, (PhD)

Universidad de Quintana Roo, México

Doi: 10.19044/esj.2018.v14n14p33 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n14p33](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n14p33)

Abstract

The Mexican Caribbean and its main cities have the highest population growth rate in Mexico. This work goal was to analyze the growth of the city of Chetumal and the geopedological characteristics in which it has been developed, to identify potential hazards and thereby improve development programs. The methodology consisted in the study of geopedological characteristics and the analysis of land use changes in the city over time. The main problems of Chetumal are floods and subsidence. Floods are more common in areas where Gleysols soils are found in low-lying areas. The subsidence is associated to Leptosols with a phreatic mantle at a shallow depth where the precipitations favors dissolution of rock. The extrapolation of the relationships between geopedological conditions and the area occupied by the city, allows us to suppose that areas which the current Urban Development Program proposes for future city expansion will develop the same problems of subsidence and flooding as the areas already built in sites with similar conditions.

Keywords: Floods, karst, risk, soils, subsidence

Resumen

El Caribe mexicano y sus principales ciudades tiene la tasa de crecimiento poblacional más alta de México. El objetivo fue analizar el crecimiento de la ciudad de Chetumal y las características geopedológicas en las que se ha desarrollado, para identificar los peligros potenciales y mejorar con ello los programas de desarrollo. La metodología consistió en el estudio de las características geopedológicas y el análisis de los cambios de uso de suelo de la ciudad en el tiempo. El problema principal de Chetumal son las inundaciones y los hundimientos. Las inundaciones son más comunes en las zonas donde se encuentran suelos Gleysols en zonas bajas. Los hundimientos se asocian a Leptosols con un manto freático a poca profundidad donde las

precipitaciones favorecen la disolución de la roca. La extrapolación de las relaciones entre las condiciones geopedológicas y el área que ocupa la ciudad, permite suponer que las áreas que el Programa de Desarrollo Urbano vigente propone para el desarrollo futuro de la ciudad presentarán los mismos problemas de hundimientos e inundaciones que las áreas ya desarrolladas actualmente en sitios con condiciones similares.

Palabras-Clave: inundaciones, karst, riesgo, subsidencia, suelos

Introducción

La mayor parte de las zonas costeras han sido sustancialmente modificadas por el hombre, se estima que la expansión humana en la zona costera alcance un 75% a nivel mundial, ello trae consigo que la interacción del hombre y el sistema natural tienda a perturbarse con efectos desde casi imperceptibles hasta catastróficos (Gutiérrez, 2008). Los usos de las zonas costeras son variados: turismo, residencia, recreo, industria, comercio, agricultura, pesca, reserva natural, explotación de recursos, militar o estratégico (Day, 2010).

Quintana Roo es el estado más joven de México, decretado en 1974 (INAFED-CEDEMUN, 2010), se encuentra en la parte oriental de la Península de Yucatán y es el único estado mexicano que limita con el Mar Caribe.

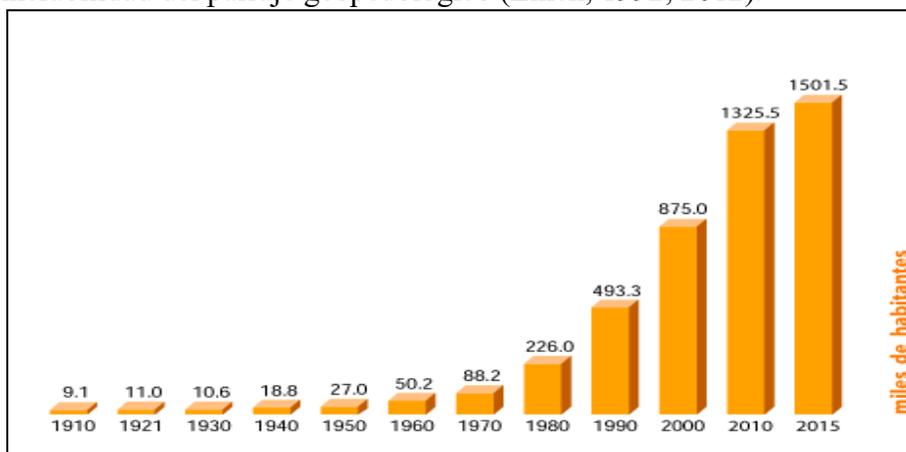
La zona costera del Caribe Mexicano es afectada por la presencia de huracanes en los meses de junio a noviembre, en los últimos años los huracanes Gilberto en 1988 (categoría cinco), Opal y Roxanne 1995 (categorías cuatro y tres), Isidoro en 2002 (categoría dos), Ivan en 2004 (categoría dos), Emily y Wilma en 2005 (ambos categoría cinco), Dean en 2007 (categoría cinco), Ernesto en 2012 (categoría dos), dejaron fuertes afectaciones a la población (Martel-Dubois et al., 2012; CENAPRED, 2017)

En esta zona costera de México se registran las tasas de mayor crecimiento urbano y la creación de nuevas ciudades. Playa del Carmen, Cancún y Chetumal son las ciudades que tienen la tasa de crecimiento anual de población más alta del país 4,1 % (Figura 1), el promedio nacional es de 1,4 %, la Ciudad de México tiene la tasa de crecimiento 0,3 % (INEGI, 2015).

En los últimos 35 años estas ciudades costeras han crecido a un ritmo acelerado, cada año aparecen nuevas colonias, pero no necesariamente sobre las mejores zonas, algunos de los nuevos asentamientos están sobre suelos con mal drenaje y estacionalmente son más propensos a sufrir inundaciones.

La geopedología (entendida como el estudio del suelo en su contexto geomorfológico) es el principal elemento para la planificación de las ciudades, los atributos morfométricos (relieve, depresiones, fallas, densidad del drenaje y pendiente) son importantes en el uso práctico con fines de evaluación de impactos ambientales o planificación del uso de la Tierra (De Pedraza, 1996).

La cobertura de suelos, a través de sus propiedades (mecánicas, físicas, químicas, mineralógicas, biológicas) proporciona datos que contribuyen a estimar el balance morfogenético actual (erosión-sedimentación) y evaluar la vulnerabilidad del paisaje geopedológico (Zinck, 1992, 2012).



Ciudad	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Cancún	640.396	660.594	681.161	701.930	722.844	743.837
Playa del Carmen	152.795	162.038	17.,717	178.903	186.678	194.103
Chetumal	154.175	15.,812	161.640	165.596	169.656	173.796
Cozumel	78.674	80.313	82.103	84.003	85.986	88.031

Figura 1. Crecimiento poblacional de Quintana Roo y sus principales ciudades.
Fuente Comisión Estatal de población (COESPO, 2015)

En la planeación urbana se deben analizar los peligros naturales derivados de procesos exógenos como inundaciones, aludes, avalanchas, subsidencias y colapsos (De Pedraza, 1996; Ihl, et al, 2007; Perrin, et al, 2015), junto con los inducidos antrópicamente al alterar directa o indirectamente la dinámica natural (deforestación, incendios, cortes o taludes) para obras públicas, urbanización o minería y cambios en la dinámica litoral por obras portuarias (subsidencias o colapsos al extraer agua subterránea) (Day, 2010; De Waele et al., 2011).

La planeación del medio físico tiene como fin organizar y estructurar el territorio con base en el establecimiento de alternativas de uso, para enfocar adecuadamente el análisis y evaluación de riesgos naturales (De Pedraza 1996).

Desarrollo Objetivo

El objetivo de la presente investigación fue analizar el crecimiento de la ciudad de Chetumal, y las características geopedológicas en las que se ha desarrollado cada parte de ella para valorar la idoneidad de las áreas de crecimiento para el desarrollo urbano futuro.

Área de estudio

Chetumal es la capital del estado de Quintana Roo, fue fundada en 1898 como punto militar estratégico, para defender el territorio nacional contra los británicos y los piratas del Caribe (Romero y López, 2014), actualmente es la tercera ciudad en cuanto a su tamaño en el estado, con una población de 173 796 habitantes (COESPO, 2015).

Se ubica en la costa en el extremo sur del Caribe Mexicano, sus coordenadas son 18°30'13" latitud norte y 88°18'19" de longitud oeste. Se encuentra rodeada por cuerpos de agua: al este la Bahía de Chetumal, en el sur el río Hondo que es la frontera con Belice y al oeste con el sistema Lagunar de Bacalar (Figura 2).



Figura 2. Área de estudio. Imagen tomada de Google earth 2015.

La ciudad se ubica sobre la formación geológica Estero Franco del periodo Mioceno-Oligoceno donde predomina la roca caliza, una alta y rápida infiltración, la formación de depresiones cerradas y un sistema de agua subterránea poco profundo (López-Ramos, 1975), en algunas zonas de la ciudad el acuífero está a sólo un metro de profundidad (Figura 3).



Figura 3. Acuífero expuesto en la zona centro de la ciudad de Chetumal
Foto: P. Fragoso, 2015

El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw”1 g) con temperatura media anual de 26,7 °C, el mes más cálido es mayo. La precipitación media anual es de 1307.5 mm, las lluvias se presentan principalmente en los meses de junio a octubre (CNA, 2017).

En Chetumal la frecuencia de impacto de huracanes no es tan alta, como en la zona norte, en los últimos 60 años solo el huracán Janet en 1955 categoría cuatro pasó el ojo sobre la ciudad, los huracanes Carmen en 1974 (categoría cuatro), Dean en 2007 (categoría cinco) y Ernesto en 2012 (categoría dos) tocaron tierra entre 20 y 50 km al norte de la ciudad (CENAPRED, 2017).

En una buena parte de la ciudad los paisajes edáficos originalmente formados por Leptosols, Gleysols, Cambisols, Luvisols y Phaeozems (INEGI, 2005) ha cambiado a suelos antropogénicos (Antrosols), debido a los rellenos de muchas de las depresiones kársticas características de la zona (Fragoso-Servón et al., 2014) con materiales de desecho o traídos de otros sitios.

La vegetación alrededor de Chetumal es una mezcla de humedales con manglares, tazistales, pastizales y selvas bajas y medianas (CONAFOR, 2011).

Desde su fundación y hasta finales del siglo XX, la actividad económica principal de Chetumal fue el comercio, a partir de la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, esta actividad disminuyó considerablemente hasta casi desaparecer, en el nuevo siglo, Chetumal, como

capital del estado ha hecho del sector servicios y de la administración gubernamental su principal actividad económica (INAFED-CEDEMUN, 2010).

Metodología

La metodología consistió en dos etapas, la primera fue el estudio de las características geomorfológicas (altimetría, morfología, suelos, densidad kárstica y fallas) y la segunda fue el análisis de los cambios de la ciudad en el tiempo (expansión del área ocupada).

En la primera etapa se utilizó como base la información topográfica vectorial a escala 1:50000 del INEGI (2005) para la elaboración del modelo digital de elevación (MDE) y la detección de geoformas positivas mediante la evaluación de la disección vertical (Priego Santander et al., 2010), el análisis y descripción geomorfológica se complementó con la información de las geoformas negativas y su clasificación (depresiones, cuerpos de agua y zonas sujetas a inundación) en un Sistema de Información Geográfica.

Del mapa de fallas y lineamientos topográficos de Frausto e Ihl (2014) se obtuvieron las líneas de fallas y fracturas de la zona, las cuales se usaron para identificar zonas de debilidad estructural de los suelos superyacentes.

La densidad del karst y la densidad de fallas y fracturas se construyó mediante una interpolación usando un kernel de interpolación lineal (krigin) con resolución de 50m/pixel.

Para la verificación de las condiciones puntuales de sitios muestreados se usó un modelo digital de elevaciones de 30 m de resolución horizontal con 1 m de resolución vertical corregido a altura de terreno sobre nivel medio del mar

La información base de edafología se obtuvo a partir del mapa de suelos de Quintana Roo de Frago et al. (2017) y se hicieron verificaciones en 100 puntos en el interior y alrededores de la ciudad.

La segunda etapa, el análisis del crecimiento del casco urbano se llevó a cabo delimitando el crecimiento de la mancha urbana a partir de imágenes Landsat de 1972, 1983, 1992, 2001 y 2011, para obtener la mayor exactitud posible se usaron las bandas: azul, verde e infrarrojo cercano forzando la resolución a 25m por medio de la banda pancromática de 15m de resolución.

Toda la información cartográfica se transformó a la proyección Universal transversa de Mercator zona 16N para facilitar los cálculos de superficies y distancias.

Resultados

Características geomorfológicas

El MDE de 30 m de resolución muestra claramente el carácter platefórmico de la formación de Estero franco y las zonas de depresiones

colmatación asociadas a los lineamientos y fracturas identificados por Frausto e Ihl (2014) así como la franja de talud desde esta estructura plataforma hacia el mar (Figura 4).

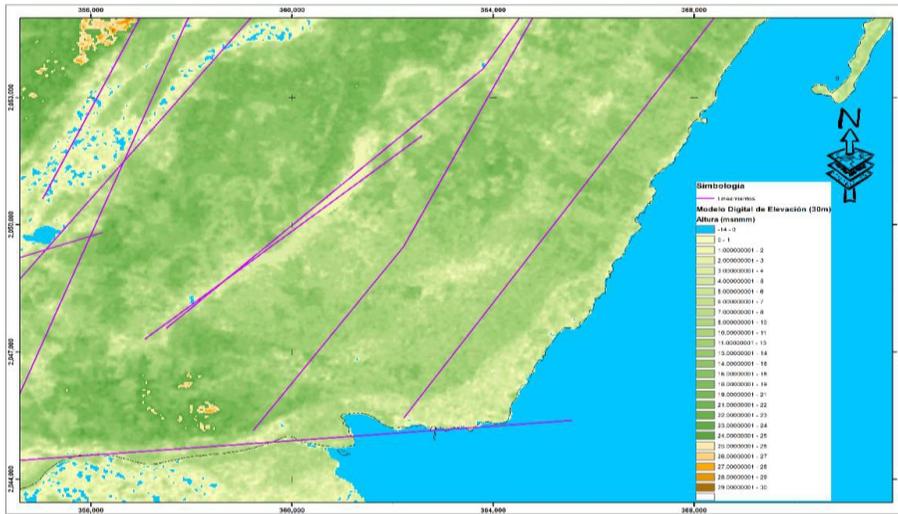


Figura 4. Modelo Digital de Elevación de la zona de Chetumal (elaboración propia).

El mapa altimétrico muestra que la ciudad se encuentra entre 0 y 20 msnmm, se presentan dos pisos altimétricos generales a modo de escalones (0-10 m y 10-20 m), se ubica sobre una planicie ondulada ligeramente diseccionada y hacia el oeste sobre una planicie subhorizontal resultado de la colmatación de las fracturas y lineamientos detectados, estas zonas presentan vegetación predominante de humedales, lo que confirma la presencia de

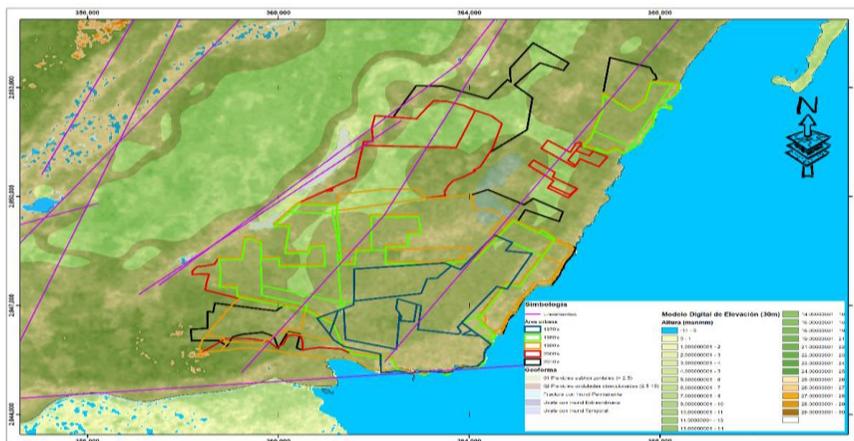


Figura 5. Relieve generalizado de la zona de Chetumal (elaboración propia).

aflorescimientos de agua a través de las fracturas de la roca y lineamientos de debilidad estructural, (Figura 5).

El material rocoso dominante en la zona son depósitos calcáreos del Terciario cubiertos en algunos lugares por materiales del Cuaternario, en ella hay una gran cantidad de depresiones kársticas que se clasifican por su tamaño y su forma, las más pequeñas y redondeadas son dolinas, las alargadas son uvalas y los poljes miden más de un kilómetro de diámetro (Aguilar, et al., 2015). En toda la ciudad abundan dolinas de diámetros menores a 30m por lo que no aparecen en la cartografía utilizada pero que fueron consideradas al analizar las condiciones de cada subzona de la ciudad, hacia el oeste se encuentran dolinas de mayor tamaño con inundación permanente llamadas cenotes y uvalas de inundación temporal que forman humedales, hacia el norte se ubica una gran úvala que en periodos de lluvia muy intensa se inunda (Figura 6).

La ciudad se encuentra en una zona con densidad media de fallas y fracturas respecto a las densidades reportadas para todo el Estado (Fragoso-Servón et al., 2014), el río Hondo, la laguna de Bacalar y otros cuerpos de agua alrededor de la ciudad son en realidad fallas alargadas en las cuales queda expuesto el manto freático que es muy superficial, bajo la ciudad hay tres fracturas en dirección suroeste a noreste aproximadamente (Figura 6).

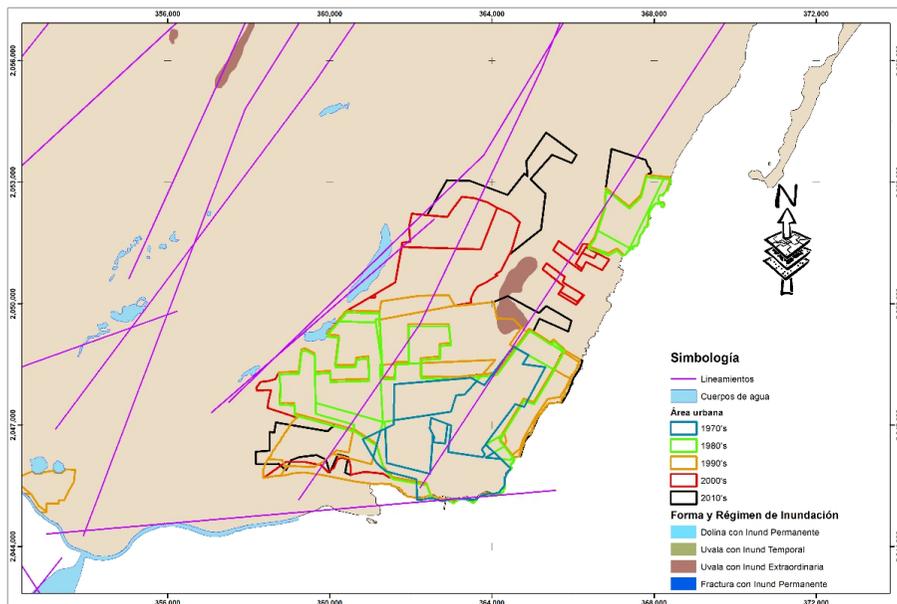


Figura 6. Depresiones kársticas mayores a 30m de diámetro y fallas (elaboración propia).

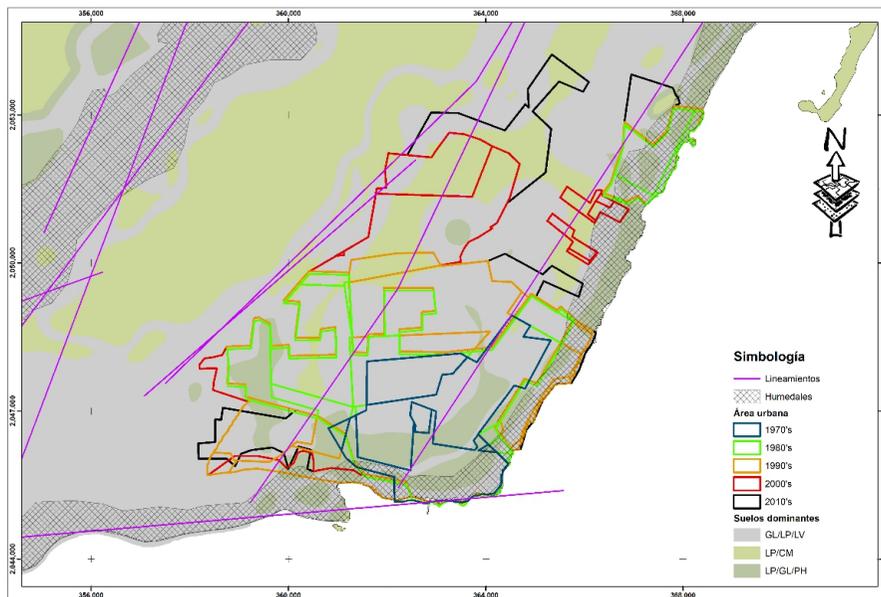
Los suelos originales sobre los que la ciudad se ha desarrollado son Leptosol, Gleysol, Phaeozem, Cambisols y Luvisols (Figura 7) sin embargo

durante los periodos de 1980 y 1990 hasta 2000, la expansión del área urbanizada y el crecimiento de la ciudad se dieron hacia el oeste, donde hay una predominancia de Gleysols. Actualmente la mayor parte de la ciudad en particular las zonas desarrolladas al final del siglo pasado están sobre Gleysols.

Los Leptosols son suelos delgados (menos de 25 cm) de color café oscuro, pedregosos, con buen drenaje y rápida infiltración. Los Gleysols son suelos más profundos, de color grisáceo, con mal drenaje, por ello están asociados principalmente a zonas que sufren inundaciones temporales o permanentes como en los humedales. Los Cambisols y Luvisols son suelos de color rojizo ricos en arcillas que muestran procesos de expansión y compresión dependiendo del grado de hidratación que los vuelven mecánicamente inestables para construcción y los Phaeozems son suelos oscuros ricos en materiales orgánicos, con buen drenaje, pero poco aptos mecánicamente para construcción, lo que frecuentemente conlleva a su remoción previa a la instalación de infraestructura.

Estudios para la determinación de la aptitud de los suelos para uso urbano son comunes en otras partes del país y del mundo (Aguilar et al., 2015; Pereyra et al., 2010; Fernández and Lutz, 2013), sin embargo, no hay hasta la fecha estudios de esta naturaleza para sustentar la planeación de la expansión de la mancha urbana de Chetumal.

En una buena parte de la ciudad por el mismo uso, el suelo natural ha cambiado a suelos antropogénicos, debido a los rellenos con materiales diversos, especialmente en las zonas con depresiones y humedales de los alrededores.





Leptosol

Gleysol

Figura 7. Tipos de suelos naturales frecuentes en el área de Chetumal (elaboración propia).

La Ciudad

La ciudad inició su desarrollo en la zona rocosa del sur, en la ribera norte del río Hondo y en los últimos años su crecimiento se ha extendido hacia el oeste, donde hay humedales, zonas pantanosas o zonas que se inundan durante la estación lluviosa.

Al comparar el crecimiento de la ciudad a lo largo de 40 años (Tabla 1 y Figura 8), se observa que ha crecido 4,5 veces en superficie y se ha multiplicado por seis su población (COESPO, 2015).

En el año 1970, la ciudad ocupaba un área de 896,86 hectáreas en la desembocadura del río Hondo y tenía una población de 23 685 habitantes, ocupando el 22,5 % de la superficie de lo que ocupaba en el 2010.

En 1980, creció principalmente hacia el norte, acercándose hacia los cuerpos de agua, en esta década la ciudad tuvo su mayor crecimiento 79,8 % y ocupaba el 40,5 % de superficie con respecto al 2010.

El color naranja en la Figura 6 representa el área de los nuevos asentamientos en 1990, puede observarse que la ciudad creció un 53,8 % hacia la zona costera, hacia las planicies aluviales y al norte alcanzando a ocupar el 62 % del área del 2010.

Para el año 2000 la ciudad creció un 35,7 % principalmente hacia el norte quedando los nuevos terrenos urbanos colindando con las lagunas e incluso al oeste entre zonas de humedales o entre lagunas (Figura 9), estas nuevas colonias reportan inundaciones en períodos de lluvia intensa y principalmente después del paso del huracán Dean, en este periodo la superficie ocupada alcanzaba un 84 % del área ocupada en 2010.

En el año 2010 con una población de 154.175 habitantes, la superficie ocupada por el área urbana era de 3984.2 hectáreas, había crecido solo un 18,3 % hacia la zona noreste.

Tabla 1. Superficie ocupada por la ciudad de 1970 a 2010.			
Año	Superficie en Hectáreas	% de Crecimiento	% de la superficie actual
1970	896,860		22,51
1980	1612,445	79,8	40,47
1990	2480,3459	53,8	62,25
2000	3366,9384	35,7	84,51
2010	3984,2354	18,3	100

Fuente: Elaboración propia

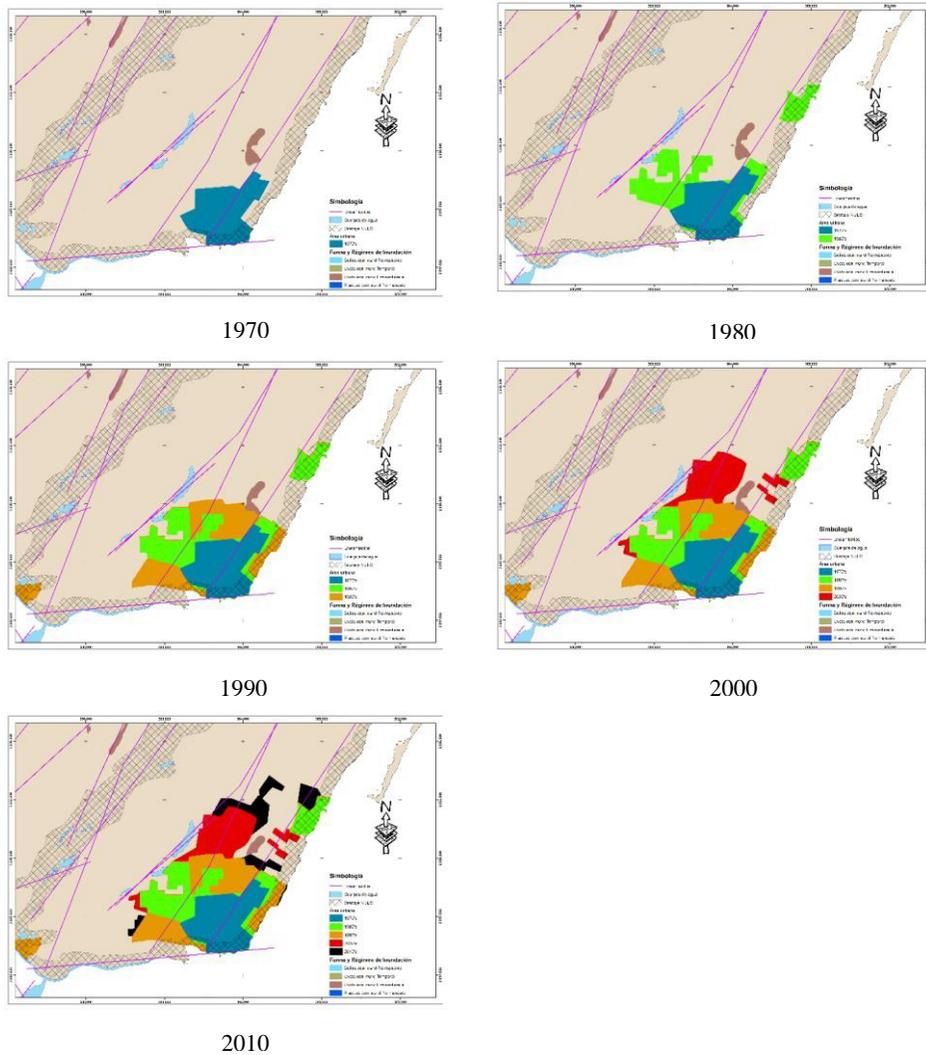


Figura 8. Chetumal crecimiento de 1970 a 2010 (elaboración propia)

Discusión

En los últimos años ha adquirido relevancia el estudio de las zonas kársticas por los beneficios que se obtienen de ellas como la captación de agua, el desarrollo de actividades económicas como el turismo de cuevas y cenotes y la obtención de materiales para construcción, entre otras.

En todo el mundo diversas instituciones públicas y privadas realizan estudios para el mejor aprovechamiento y conservación de las zonas kársticas como es el caso de los estudios de captación de agua en el sur de España (Andreo et al., 2007; Sánchez et al., 2015), estudios sobre el impacto de fenómenos naturales y antrópicos en los ecosistemas kársticos (UQRoo, 2004a; Fragoso, et al., 2014; Pereira, et al., 2017) , estudios geológicos para la obtención de roca para construcción, entre otros.



Figura 9. Algunos cuerpos de agua que rodean Chetumal
Photo: P. Fragoso 2015.

Los procesos kársticos también pueden producir pérdidas humanas y materiales (Mateo, 2002) por ello es necesario identificar los riesgos, las causas y los lugares en que pueden producirse.

En el caso de Chetumal se manifiestan dos problemas concurrentes y sinérgicos de las zonas kársticas, los hundimientos o subsidencias del terreno producidos por la disolución de los materiales del subsuelo en sitios donde el suelo es altamente permeable como los Leptosols y las inundaciones derivadas del escurrimiento subsuperficial hacia zonas bajas en las cuales los suelos son impermeables como los Gleysols o el manto freático se encuentra cerca de la superficie (Figura 10).



Figura 10. Inundaciones y hundimientos en Chetumal
Photo: P. Fragoso 2015

Las áreas en las que se manifiestan frecuentes inundaciones son las que se encuentran en las planicies subhorizontales producto de la colmatación de las fracturas en la plataforma kárstica, al mismo tiempo estas zonas se encuentran ligeramente por debajo del nivel promedio de la plataforma en la parte inferior de las ondulaciones, lo que ha facilitado el proceso de acumulación de materiales finos y por lo tanto sella parcialmente los poros del sustrato, aquí el suelo dominante es Gleysol.

Por su parte, los hundimientos se asocian con laderas y cimas de las ondulaciones donde los suelos originales eran Leptosols, en estas zonas, el suelo delgado y altamente permeable sobre materiales calcáreos no consolidados, con un manto freático a poca profundidad y condiciones ácidas favorecidas por las altas precipitaciones traen como consecuencia la disolución de los materiales del subsuelo, tanto la roca caliza, como la caliza no consolidada conocida como sascab y que forma buena parte del subsuelo superior en la mayor parte de la región, este conjunto de condiciones y procesos sinérgicos favorece la aparición de hundimientos que afectan calles y edificios por igual.

Un caso ligeramente distinto lo conforma la “parte baja de la ciudad” es decir el margen costero, esta zona a pesar de ser una zona baja, no acumula materiales finos al no estar confinada, es decir al no tener una estructura de cuenco. En esta zona los materiales que de manera natural eran arrastrados por los escurrimientos no se acumularon ya que fueron vertidos hacia el cuenco formado por la Bahía de Chetumal-Corozal, posteriormente con la construcción de la ciudad y la impermeabilización parcial del terreno con las construcciones, el fenómeno de arrastre de materiales hacia la bahía simplemente se ha visto incrementado. La situación descrita favorece que el agua de lluvia que se llega a infiltrar en esta zona disuelva más rápidamente el sascab al fluir inmediatamente por debajo de la capa impermeable formada por las construcciones, haciendo que sean frecuentes los hundimientos, y en ocasiones la formación de oquedades de tamaño considerable (se han reportado oquedades y hundimientos de hasta 20 m en diámetro y hasta 10m en profundidad).

Gutiérrez (2008) y Gutiérrez, et al. (2014) reportan riesgos kársticos en las construcciones en varias ciudades producida por dolinas de colapso (pequeñas) y en dolinas de subsidencia (de mayor tamaño) inducidas por la actividad humana debida principalmente a la extracción de agua y al incremento en el contenido de CO₂ en los suelos (Day 2010).

Los daños en las ciudades pueden ser desde ruptura de tuberías (agua, luz, drenaje) hasta la formación de grietas y hundimientos en las construcciones, igualmente pueden afectar carreteras, vías de ferrocarril y canales de riego como lo ocurrido en Zaragoza en 2003 (Guerrero et al., 2004) y en la carretera Tulum-Cancún en 2015 (Figura 11).



Figura 11. Carreteras destruidas. Hundimiento con exposición del manto freático en el norte de Quintana Roo. Los costos por afectaciones son de millones de pesos.

Foto: Tomada de El Universal 27/08/2015

Las inundaciones y hundimientos también se ven favorecidos por la presencia de fallas como lo menciona Stepisnik (2015) para Eslovenia, Gao, et al. (2005) para Minnesota y Siart et al. (2009) en Creta.

Numerosos autores, entre ellos Norra y Stüben (2003), Frausto et al. (2006), Lehmann y Stahr (2007), Day (2010), Goldscheider (2012), Gutierrez et al. (2014) recomiendan la elaboración de planes y programas de desarrollo urbano, programas de manejo y políticas de uso de suelo acordes con las características geomorfológicas y del suelo, para evitar daños como los mencionados anteriormente, sin embargo, estos programas, las medidas de prevención y las recomendaciones que hay en los mismos no son seguidas adecuadamente por la administración, fenómeno que es observable en todo el mundo (De Waele, et al., 2011).

Otro de los aspectos con problemas son los mismos planes y programas ya que buena parte de ellos no consideran las características y propiedades de los suelos en los ejercicios de planeación (Lehman y Stahr, 2007), por ello, es de vital importancia la gestión de diferentes áreas en entornos urbanos para construir criterios multidisciplinarios en el tratamiento de estos problemas y su inclusión como normas de observancia obligatoria, no como simples recomendaciones.

En Chetumal el suelo natural ha cambiado a suelos antropogénicos (Antrosols), debido a los rellenos de depresiones y humedales de los alrededores con materiales exógenos, sin embargo, Antrosols es una denominación genérica, ya que las propiedades del suelo serán diferentes en función del tipo de suelo que era originalmente y los procesos que ha sufrido durante su transformación, ya sea por la remoción o adición de elementos, la mezcla o compactación, pero siempre será importante tener la información relativa a los suelos originales del sitio ya que dan cuenta de los procesos que tienen lugar en la región lo cual a su vez tiene gran importancia para la planificación del uso de la tierra (Lehmann y Stahr, 2007; Efland y Pouyat, 1997; Norra y Stüben, 2003).

En Chetumal actualmente está vigente el Plan de Desarrollo Urbano (PDU) elaborado en el año 2005, en el se hace hincapié en que el uso de suelo debe orientarse de acuerdo a las características físicas prevalecientes en el área metropolitana, de tal manera que son aptos para el crecimiento urbano las áreas al nororiente de Chetumal, por ser las menos susceptibles a inundaciones señalando que la porción noroeste y suroeste de Chetumal no es adecuada para la extensión urbana por ser susceptibles a inundación, lo que concuerda con los hallazgos de este estudio.

Sin embargo, gobierno y desarrolladores han favorecido la construcción de complejos habitacionales en el oeste de la ciudad (PDU, 2005a; 2005b), en zonas de inundación con Gleysols (Figura 9). En esta zona, han relleno humedales para la construcción de viviendas, rellenos sanitarios y otras obras de infraestructura urbana, causando innumerables problemas de inundación en ellas, así como la contaminación de cuerpos de agua cercanos y de las aguas subterráneas a medida que las zonas ocupadas se acercan a las corrientes de agua que drenan del sistema lagunar Bacalar hacia la bahía.

A estos problemas directamente relacionados con los atributos físicos del territorio se agregan otros problemas de índole social y económica que los agravan, si bien los documentos no tienen todos los elementos técnicos necesarios, igualmente grave es el que esos instrumentos sean ignorados por las mismas entidades gubernamentales que pagaron su elaboración, y para ello bastan unos cuantos ejemplos ya que es un problema actual en la mayor parte del mundo, las presiones económicas y la corrupción tienen prioridad sobre la

seguridad de la población y muchas más prioridad que la conservación de los recursos para las generaciones futuras.

Entre muchos otros ejemplos se puede ver que ya no hay espacio entre el borde de los humedales y la vivienda a pesar de que el PDU indica que la distancia mínima debe ser de 500 m entre ellos (UQRoo, 2004b).

Dentro de los planes de gobierno se contemplaba hacer redes de infraestructura de drenaje, bordes de protección de la zona noroeste y generar zonas de amortiguamiento, sin embargo, no se aportan los elementos técnicos para la adecuada ubicación de esta infraestructura.

Conclusion

Chetumal es una ciudad en el Caribe mexicano ubicada en una planicie costera entre cero y 20 msnm. los problemas de inundaciones y hundimientos recurrentes se encuentran ligados a problemas de planeación derivados de un conocimiento insuficiente de las características del suelo y subsuelo en los que se ha llevado a cabo el desarrollo de la mancha urbana.

Se verificó cartográficamente que hay una relación espacial entre las condiciones de suelo y subsuelo con la aparición de los problemas de hundimientos e inundaciones.

Las inundaciones son más comunes y recurrentes en lugares donde los suelos originales corresponden a la parte inferior de las ondulaciones y a las fracturas y lineamientos de debilidad estructural que forman hondonadas colmatadas por sedimentos finos que sellan parcialmente los poros del sustrato haciéndolo impermeable, aquí el suelo dominante es Gleysol.

Los hundimientos se asocian a lugares donde los suelos originales eran Leptosols con gran porosidad y permeabilidad, en ellos la capa de suelo es delgada sobre materiales calcáreos no consolidados que, combinados con un manto freático a poca profundidad y las altas precipitaciones favorecen la disolución de la roca y materiales del subsuelo provocando el hundimiento de calles y construcciones.

La extrapolación de las relaciones entre las condiciones geopedológicas y el área que ocupa la ciudad, permite suponer que las áreas que el Programa de Desarrollo Urbano vigente propone para el desarrollo futuro de la ciudad presentarán los mismos problemas de hundimientos e inundaciones que las áreas ya desarrolladas actualmente en sitios con condiciones similares.

Es de particular importancia modificar los criterios constructivos y mejorar la distribución de espacios para el desarrollo urbano con base en esta información, finalmente debe ser incorporado en instrumentos de observancia obligatoria, y dar a conocer dichos instrumentos a la población en general para que puedan exigir su cumplimiento y evitar en el futuro poner en riesgo la

infraestructura construida o más importante aún, la vida y los bienes de la población.

Este trabajo resalta la importancia de tomar en cuenta algunos aspectos fisiográficos no siempre evidentes en la planeación del desarrollo de la ciudad, no solo los aspectos urbanísticos, de transporte o los de índole económica o política.

References:

1. Aguilar, J.R.V., Granados, E.M.L., Olivera, J.A.Á., Cantú, M.E.M., 2015. *Aptitud Territorial Para La Expansión Urbana De La Ciudad De Morelia* 7.
2. Andreo, B., Vías, J. M., Mejías, M., Ballesteros, B. J., & Marín, A. I. (2007). *Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero jurásico de El Maestrazgo (Castellón, NE España)*. Los acuíferos costeros: retos y soluciones, 1, 2.
3. CENAPRED - Centro Nacional de prevención de desastres. (2017). *Atlas Nacional de Riesgos*. Secretaría de gobernación, México <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/aplicaciones.html>
4. CNA – Comisión Nacional del Agua - *Servicio Meteorológico Nacional* (2017). URL <http://smn.cna.gob.mx/> (acceso 1.12.17).
5. COESPO – Consejo Estatal de Población. (2015). Gobierno de Quintana Roo – *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. México
6. CONAFOR - Comisión Nacional Forestal. (2011). *Inventario Forestal Nacional*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
7. Day, M. (2010). *Human interaction with Caribbean karst landscapes: past, present and future*. Acta Carsologica 39/1, 137-146. Postojna.
8. De Pedraza, G. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Rueda, España.
9. De Weale, J., Gutiérrez, F., Parise, M. Lukas, P. (2011). *Geomorphology* 134. 1-8.
10. Effland, W. R., Pouyat, R. V. (1997). *The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas*. Urban Ecosystems, 1(4), 217-228.
11. Fernández, D.S., Lutz, M.A., 2013. Cartografía De La Aptitud De Los Suelos Con Fines Ingenieriles En La Ciudad De San Miguel De Tucumán, Provincia De Tucumán, in: *Simposio 3 Los Riesgo De Desastres Y La Sustentabilidad Territorial*. Presented at the Congreso Internacional sobre riesgos de desastres y desarrollo territorial sostenible CiRiDe, Argentina, p. 9.
12. 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.*
13. Fragoso-Servón, P., Pereira, A., Bautista, F., Zapata, G. (2017). *Digital soil map of Quintana Roo, Mexico. Journal of Maps, 13(2), 449-456.*
 14. Frausto, O., Ihl, T. 2014. *Mapa de Fallamientos y Fracturas de Quintana Roo.* (no publicado)
 15. Frausto, O., Ihl, T., Rojas, J., Goldacker, S., Chale, G., Giese, S., Wurl, J., Careaga, P., Bacab, R. (2006). *Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán. Teoría y praxis 2, 87-103.*
 16. Gao, Y., Alexander, A. Barnes, R. (2005). *Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. Environ Geol 47: 1083-1098*
 17. Goldscheider, N. (2012). *A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. AQUA mundi, 3, 117-124.*
 18. Guerrero, J., Gutiérrez, F., Lucha, P. (2004). *Paleosubsidence and active subsidence due to evaporate diwssolution in Zaragoza city area. Engineering Geology, 72, 309-329.*
 19. Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., Jourde, H. (2014). *A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. Earth-Science Reviews 138. 61-88.*
 20. Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología.* Pearson/Prentice Hall, Madrid.
 21. INAFED-CEDEMUN - Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Centro Nacional de Estudios Municipales de la Secretaría de Gobernación. (2010). Estado de Quintana Roo, en: *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México.* <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM23quintanaroo/index.html>
 22. Ihl, T., Frausto, O., Rojas, J. (2007). *Identification of geodisasters in the state of Yucatan, Mexico. N.Jb. Geol. Paläunt. Abh. Vol. 246/3, p. 299-311. Stuttgart.*
 23. INEGI - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2015) *Censo de población y vivienda 2010-15.* México.
 24. INEGI. 2005. *Cartas Topográficas, 1:50000.* Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
 25. Lehmann, A., Stahr, K. (2007). *Nature and significance of anthropogenic urban soils. Journal of Soils and Sediments, 7(4), 247-260.*

26. Lopez-Ramos, E. (1975). Geological Summary of the Yucatan Peninsula. In: Nairn, A.E.M., Stehli, F.G. (Eds.), *The Gulf of Mexico and the Caribbean*. Springer US, pp. 257–282.
27. Martell-Dubois, R., Mendoza-Baldwin, E., Mariño-Tapia, I., Silva-Casarín, R., Escalante-Mancera, E. (2012). *Impactos de corto plazo del huracán Dean sobre la morfología de la playa de Cancún, México*. Tecnología y ciencias del agua, 3(4), 89-111.
28. Mateo, M. (2002). *Geografía de los paisajes*. Universidad de la Habana, Ministerio de Educación Superior, Cuba.
29. Norra, S., Stuben, D. (2003). *Urban soils*. Journal of Soils and Sediments, Vol 3 No.4, 230-233.
30. PDU - *Programa de desarrollo urbano del área metropolitana de Chetumal, Calderitas, Xul-há*. (2005a). Honorable ayuntamiento del municipio de Othón P. Blanco, del estado de Quintana Roo. México
31. PDU - *Programa de desarrollo urbano del municipio de Othón P. Blanco*. (2005b) Gobierno de Quintana Roo, México.
32. Pereira, A., Fragoso-Servón, P., Frausto, O. (2017). *Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México*. Geos Vol 36 No. 2. 275-290.
33. Pereyra, F., Boujon, P., Gómez, A., Tello, N., Tobío, M.I., Lapido, O., 2010. *Estudio Geocientífico Aplicado a La Evaluación De La Aptitud Para La Urbanización En La Cuenca Carbonífera De Río Turbio, Santa Cruz*. Revista de la Asociación Geológica Argentina 66, 505–519.
34. Perrin, J., Cartannaz, C., Nouty, G., Vanoundheusden, E. (2015). *A multicriteria approach to karst subsidence hazard mapping supported by weights-of-evidence analysis*. Engineering Geology 197, 296-305.
35. Priego Santander, Á., Bocco, G., Mendoza, M.E., Garrido, A., 2010. *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes*, 1st ed, Planeación Territorial. Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
36. Romero M., R. I., López, J. B. (2014). *El proceso histórico de conformación de la antigua Payo Obispo (Hoy Chetumal) como espacio urbano fronterizo durante la etapa de Quintana Roo como territorio federal*. Península, 9(1), 125-140.
37. Sánchez, D., Andreo, B., López, M., González, M. J., & Mudarra, M. (2015). Characterization of Carbonate Aquifers (Sierra de Grazalema, S Spain) by Means of Hydrodynamic and Hydrochemical Tools. In *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems* (pp. 171-180). Springer Berlin Heidelberg.
38. Siart, Ch., Bubenzer, O., Eitel, B. (2009). *Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird)*

- and GIS for geomorphological mapping: A multi-componente case study on Mediterranean karst in Central Crete. Geomorphology 112. 106-121.*
39. Stepisnik, U. (2015). *The problem of dissolution doline definition. Dela 43. 29-40.*
 40. UQRoo - Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo (2004b). *Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Laguna Bacalar (Reporte técnico). Quintana Roo, México.*
 41. UQRoo – Universidad de Quintana Roo. (2004a). *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (Reporte técnico). Quintana Roo, México.*
 42. Zinck, J.A. (1992). *Soil survey: Perspectives and strategies for the 21st century. FAO-ITC Netherlands.*
 43. Zinck, J.A. (2012). *Geopedología. ITC, Enschede, Netherlands.*