

Susceptibilidad y amenaza asociadas a la subsidencia y colapsos en terrenos kársticos: Caso del estado de Campeche

Susceptibility and hazard associated with subsidence and collapses in karstic terrain: Case of the state of Campeche

¹Álvaro Gerardo Palacio Aponte

¹Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Industrias No. 101-A. Fracc. Talleres, C.P. 78399, San Luis Potosí, S.L.P. México. Correo electrónico: alvaro.palacio@uaslp.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5020-2482>

Recibido: 11 de octubre del 2022
Aceptado: 31 de marzo del 2023
Publicado: 31 de mayo del 2023
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2023894197>
e4197

Resumen

Este trabajo evalúa la susceptibilidad a la subsidencia y colapsos en terrenos kársticos de Campeche, México, asumiendo que bajo un conjunto de factores condicionantes estos fenómenos ocurren con mayor o menor intensidad y pueden representar una amenaza para la población y las actividades económicas. El modelo conceptual propone la ponderación relativa de zonas susceptibles mediante análisis multicriterio de jerarquías analíticas incluyendo factores litológicos, estructurales y ambientales que inciden en la geomecánica de la subsidencia y colapsos. El modelo conceptual se traduce a uno lógico en un Sistema de Información Geográfica (ArcMap) a partir del cual se obtiene un mapa de susceptibilidad con cuatro niveles, muy alta con el 13% de superficie estatal, alta 25%, media 30% y 32% baja. Los valores de susceptibilidad corresponden con los niveles de predisposición del terreno a la amenaza. Se concluye que el mapa de susceptibilidad es un documento cartográfico preventivo de amenaza, útil a nivel regional.

Palabras clave: susceptibilidad; geoformas epigeas; geoformas hipogeas; procesos corrosivo-erosivos; desplome; hundimiento.

Abstract

This paper evaluates the susceptibility to subsidence and collapses in karst terrains of Campeche, Mexico, assuming that under a set of conditioning factors these phenomena occur with greater or lesser intensity and may represent a hazard to the population and economic activities. The conceptual model proposes the relative weighting of susceptible areas through multicriteria analysis of analytical hierarchies including lithological, structural, and environmental factors that affect the geomechanics of subsidence and collapse. The

conceptual model is translated into a logical one in a Geographic Information System (ArcMap) from which a susceptibility map with four levels is obtained, very high with 13% of the state area, high 25%, medium 30% and low 32%. The susceptibility values correspond to the levels of predisposition of the terrain to hazard. It is concluded that the susceptibility map is a preventive threat cartographic document, useful at the regional level.

Keywords: susceptibility; epigeal geofoms; hypogeal geofoms; corrosive-erosive processes; collapse; sinking.

Introducción

Los hundimientos por subsidencia y colapsos en terrenos kársticos tienen génesis comunes y mecanismos combinados relacionados con la susceptibilidad a la disolución de las rocas por el agua, la respuesta geomecánica de las rocas, la predisposición morfoestructural y las condiciones ambientales asociadas (Waltham & Fookes, 2005). Aunque la especificidad de los mecanismos que los generan son particulares en cada paisaje kárstico existen en general, procesos corrosivo-erosivos repetibles en todos los terrenos afectables (Mateo, 1981). En los paisajes kársticos la subsidencia es un fenómeno que se expresa en asentamientos diferenciales generalmente lentos y superficiales ocasionados por la compactación de materiales finos ante la sufosión o disolución subsuperficial (Guerrero, Gutiérrez, Bonachea, & Lucha, 2008). La generación de dolinas de subsidencia no implica, necesariamente, la existencia de cavidades en profundidad. Por otra parte, los colapsos son derrumbes superficiales o profundos rápidos, normalmente asociados a la pérdida de soportes líticos subterráneos, que generan dolinas de colapso (Bloom, 1998). Estas pueden formarse, además por la existencia de cavidades en el sustrato, cuyo techo generalmente posee una geometría cupular. Cuando el peso del techo de la cavidad supera la resistencia mecánica del material, se genera un colapso comúnmente de forma brusca, dando lugar a dolinas de paredes subverticales (Guerrero et al., 2008).

Durante las últimas dos décadas los estudios del karst han mostrado una tendencia a analizar las causas u origen de los colapsos o hundimientos y sus efectos en zonas pobladas. Se delimitan zonas con diferentes niveles de riesgo mediante el análisis multicriterio de los factores naturales y antrópicos mediante percepción remota y sistemas de información geográfica (Koutepov, Mironov, & Tolmachev, 2008; Moreno Gómez, Pacheco, Liedl, & Stefan, 2018; Hu et al., 2021), a diferencia de anteriores estudios del karst en donde se enfatizaba la dinámica hidrogeológica.

En el estado de Campeche los procesos kársticos son los típicos del karst cubierto o estabilizado donde las paleoformas y geformas epigeas han alcanzado un amplio desarrollo vertical y horizontal debido a su edad geológico-geomorfológica, sin embargo, debido a la densa cobertura vegetal tropical y a los deluviones acumulados a partir de aguas meteóricas y de residuales de disolución, la neoformación en superficie es poco evidente a simple vista. Bajo estas condiciones ambientales se presentan principalmente procesos corrosivos de desplome y corrosivo-sufosivos que pueden generar inestabilidad en el terreno. En los corrosivos de desplome, a la acción corrosiva se adiciona subordinadamente los procesos gravitacionales de desplome de bloques y de hundimiento del techo de las cuevas o corazas calcáreas. Ocurren generalmente en condiciones de posiciones altas del nivel freático. Por otro lado, los corrosivo-sufosivos ocurren en rocas sedimentarias de granos insolubles con matriz carbonatada, o en lentes de rocas carbonatadas. La disolución se produce en la parte subsuperficial del cemento carbonatado y el arrastre mecánico hacia la profundidad a través de grietas (sufosión) de los sedimentos no carbonatados. A diferencia de la zona norte de la península de Yucatán (Moreno-Gómez, Liedl, & Stefan, 2019) donde existe una amplia distribución de dolinas secas e inundadas, en Campeche predomina un karst más desarrollado, compuesto por lomeríos y colinas karstificadas, mesetas, uvalas, poljes y bajos inundables.

En el contexto kárstico de Campeche, en donde las geformas de colapso y subsidencia no son tan evidentes y en donde cada vez es más intenso el aprovechamiento del territorio, es necesario delimitar condiciones territoriales de mayor o menor susceptibilidad ante la ocurrencia de amenazas kársticas. Esta necesidad surge de la carencia de una evaluación de las amenazas de este origen en un territorio calcáreo, en donde las localidades urbanas y rurales están creciendo y en donde las actividades económicas, sobre todo agrícolas, están demandando más terreno y agua. El presente trabajo propone un modelo conceptual para evaluar la susceptibilidad o predisposición intrínseca del territorio a ser afectado por amenazas de origen kárstico, jerarquizando la interacción diferencial entre el comportamiento disolutivo litológico, la expresión morfoestructural y el comportamiento ambiental. La susceptibilidad del terreno a procesos kársticos geomecánicos se puede traducir en un peligro o amenaza potencial a la población y las actividades económicas. De manera que como propuesta se desarrolla una evaluación territorial para la delimitación de zonas con diferente susceptibilidad o propensión a los procesos kársticos corrosivo-erosivos y de colapso. Se infiere que a mayor susceptibilidad la ocurrencia de fenómenos será potencialmente mayor y de mayor afectación, por lo que se asumen diferentes niveles

de peligrosidad para la población. Es una propuesta indicativa preventiva general para el ordenamiento regional de los asentamientos y las actividades humanas a partir de la cual se pueden hacer monitoreos locales dirigidos.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio es el estado de Campeche (Figura 1) se encuentra entre las coordenadas geográficas extremas 20° 50' y 17° 48' Norte, y 89° 07' y 92° 28' Oeste. Su ubicación zonal planetaria y la azonalidad condicionada por la poca energía del relieve determinan climas cálidos subhúmedos, con lluvias abundantes en verano y temperaturas medias alrededor de 26 °C. La precipitación total anual varía entre 1200 y 2000 mm y la vegetación corresponde a comunidades de selvas tropicales bajas y medianas subcaducifolias, subperennifolias e inundables.

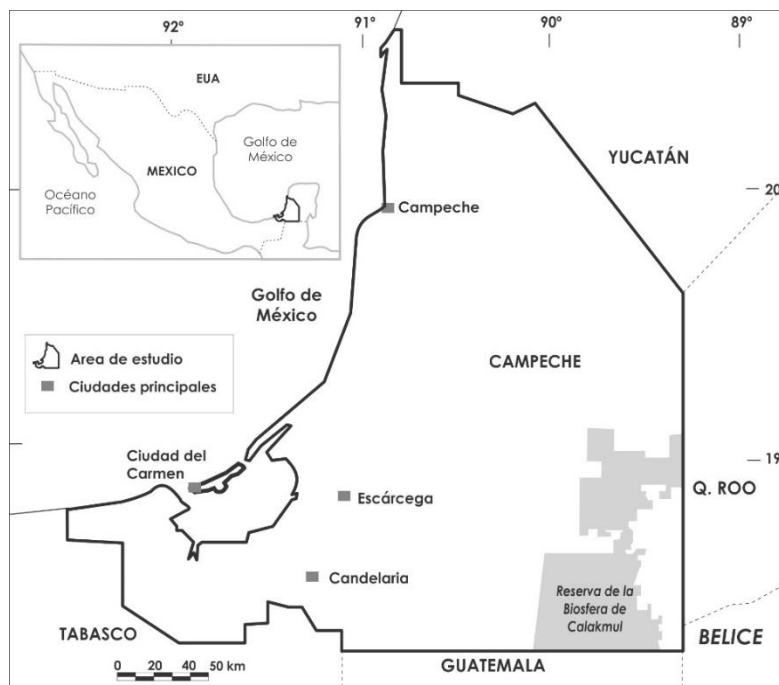


Figura 1. Ubicación del área de estudio.
Elaboración propia con base en datos cartográficos de la CONANP (2022).

Morfoestructuralmente el estado de Campeche es una mesa sedimentaria donde los estratos, predominantemente calcáreos, se encuentran dispuestos subhorizontalmente (inclinación menor a 12°). Debido al origen epigenético del relieve durante el mioceno

(hace 23 Ma), el territorio presenta poco desarrollo altitudinal alcanzando su punto más elevado en el cerro Champerico con 380 msnm (Bautista, Palacio, Ortiz Pérez, Batllori-Sampedro, & Castillo-González, 2005b). Las regresiones marinas (140 m de oscilación máxima) de finales del pleistoceno y las posteriores transgresiones, dejaron finalmente expuestas en superficie grandes extensiones de corazas calcáreas (Estrada Medina, Jiménez Osorio, Álvarez Rivera, & Medina Barrientos, 2019) que propiciaron el desarrollo de geofformas hipogeas y epigeas.

En términos geomorfológicos, los paisajes kársticos en Campeche se encuentran en una etapa de paleogénesis kárstica (Ford, 2007) en donde destaca la presencia de mesetas, cerros aislados de cimas cupulares y planas, lomeríos de cimas planas o redondeadas y extensos bajos inundables continentales (Bautista et al., 2005b). Los lomeríos de la porción meridional de Campeche (lomeríos de Bolonchén), constituidos por colinas redondeadas semiplanas, de 100 a 300 m de altura, y poljes de fondo plano de hasta 5 km de anchura, cerrados, secos y rellenos por suelos de hasta 10 m de espesor (Lugo-Hubp, Aceves-Quesada, & Espinasa-Pereña, 1992). En el conjunto del territorio domina el karst de cúpulas (kuppenkarst) que localmente puede presentar inclinación de las capas de hasta 40°, favoreciendo el desarrollo de formas verticales (Lugo-Hubp et al., 1992).

Procedimientos de análisis

El procedimiento de análisis comprendió un modelo conceptual de susceptibilidad y su implementación a través de un modelo lógico. El modelo conceptual se basa en el análisis condicional sustentado en el teorema de Bayes (Sujatha, Kumaravel, & Rajamanickam, 2014), donde el discernimiento de la probabilidad de las causas se determina a partir de los efectos que han podido ser observados en el pasado. Así, conociendo la morfogénesis y morfodinámica asociadas a las condiciones geológico-geomorfológicas y ambientales para el área de estudio, se asume que, bajo un mismo contexto territorialmente homogéneo, se podrían esperar procesos y geofformas acordes de susceptibilidad. Los factores condicionantes para ponderar la susceptibilidad dentro del modelo conceptual de susceptibilidad se dividen en estáticos o pasivos y activos o dinámicos (Palacio Aponte, 2013). Los estáticos no presentan cambios en tiempo real ni en lapsos de tiempo corto y los principales son los litológicos y los estructurales. Por su parte, los dinámicos presentan cambios rápidos que presionan invariablemente a los factores estáticos que son principalmente los hidrogeológicos, litológicos, climáticos, estructurales y sismotectónicos.

Para los objetivos de evaluación de la susceptibilidad en este trabajo, se consideraron solo los factores pasivos litológicos (hidrogeológicos) y estructurales.

Para hacer cartográficamente operativo el modelo conceptual, se implementó un modelo lógico en un sistema de información geográfica (ArcMap 10.3), donde mediante un análisis multicriterio de jerarquías analíticas se asignaron pesos diferenciales a la litología y a los factores estructurales, según su contribución a la intensidad de los procesos kársticos corrosivo-erosivos y en consecuencia a la susceptibilidad. Los valores fueron asignados directamente de forma semicuantitativa y cualitativa a los formatos vectoriales de los mapas originales y transformados a formatos ráster para su suma lineal ponderada.

El modelo de susceptibilidad se expresa en tres mapas, dos parciales de ponderación litológica y de ponderación morfoestructural, y un mapa final o resultado de susceptibilidad a la subsidencia y colapsos kársticos. Los insumos cartográficos y los mapas se desarrollan en escalas medias 1:250,000 acordes a niveles regionales. El mapa de ponderación litológica sintetiza la solubilidad intrínseca de las rocas, impurezas y tamaño de las partículas por tipos litológicos. Las características de las rocas se delimitaron a partir de las unidades geológicas cartografiadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2007) en formato vectorial, y a partir de estas se realizó en campo un muestreo estratificado aleatorio de 42 muestras representativas que fueron analizadas en su composición general por difracción de rayos X en el Instituto de Geología de la UNAM en 2009. Confirmando la información del SGM, a cada tipo litológico se les asignó una ponderación numérica entre 0 y 1 según el criterio de solubilidad diferencial en tres niveles, bajo (0.33) medio (0.66) y alto (1.0).

Por otra parte, el mapa de ponderación morfoestructural incluye la porosidad secundaria y los planos de estratificación. Su importancia radica en que las rupturas o puntos de debilidad en fallas, diaclasas e intersecciones son detonadores de los procesos corrosivo-erosivos diferenciales. Se clasificaron en 10 clases normalizadas calculadas por la densidad kernel mediante el método natural breaks (Jenks), que permitió separar las zonas donde se muestra mayor o menor densidad de debilidades morfoestructurales. Para la densidad kernel se procedió a la suma de las líneas, puntos e intersecciones dentro de un área específica y se dividieron entre el área cubierta, generando un valor de densidad en formato ráster. Las celdas más cercanas del centro del área de búsqueda presentaron un mayor peso o valor de densidad que aquellas que estaban hacia los bordes. Esta condición refleja la predisposición diferencial a la disolución, en donde a medida que los valores de densidad sean mayores, mayor será la permeabilidad secundaria y, por tanto, la susceptibilidad a la disolución y la probabilidad de que un fenómeno ocurra. Se

seleccionaron tres clases normalizadas de densidad, baja (0.06-0.15) media (0.16-0.28) y alta (0.29-0.58).

Los mapas parciales en su delimitación por unidades homogéneas son resultado de la sobreposición y coincidencias entre unidades litológicas, rasgos morfoestructurales y paisajes geomorfológicos modificados a nivel estatal. Se utilizaron los paisajes geomorfológicos delimitados en una investigación anterior por Bautista, Batllori-Sampedro, Palacio, Ortiz Pérez y Castillo-González (2005a).

Finalmente, mediante funciones de análisis espacial (sobreposición en formatos ráster y suma ponderada lineal) de la herramienta álgebra de mapas en ArcGis, se combinan los mapas parciales (Hu et al., 2021) para obtener un mapa alternativo (final) de información asociada a la susceptibilidad.

Resultados

El estado de Campeche es susceptible al peligro por subsidencia y colapsos kársticos en diferentes intensidades. La coincidencia territorial morfológica y funcional entre las características litológicas, morfoestructurales y los paisajes geomorfológicos permitieron verificar unidades homogéneas en cuanto a la respuesta geomecánica de los terrenos kársticos. En los 27 paisajes geomorfológicos regionales se encontraron las mayores longitudes de fallas y diaclasas con alrededor de 934,147 m en los lomeríos cupulares de calizas con depresiones internas extendidas y los montículos kársticos residuales dispersos formados por calizas y margas; y las menores en las planicies acumulativas con altillos descubiertos, con alrededor de 2,232 m. Estas unidades del relieve presentan corazas calcáreas que coinciden con una densa red morfoestructural de diaclasas y fallas. Por otro lado, los ambientes acumulativos fluviales y palustres no presentan fracturas o diaclasas con expresión superficial evidente, por lo que en términos del modelo propuesto no se les asocia con la susceptibilidad.

Entre los resultados del componente litológico, destaca el diferente comportamiento disolutivo entre yesos, sales y carbonatos. La extraordinaria diferencia de las solubilidades respectivas oscila entre cientos de g L^{-1} para la sal, en torno a 2 g L^{-1} el yeso frente algunos centenares de mg L^{-1} de las calizas y las dolomías. Las calizas interestratificadas con yesos muestran en el estado de Campeche la más alta susceptibilidad a la disolución, y en menor grado, calizas con margas, calizas con conglomerados y depósitos palustres, aluviales y litorales.

Para hacer comparables las solubilidades de los minerales que existen en Campeche, se tomaron estándares teóricos promedio a 25 °C, presión de 1 atm, y en agua con pH7 con base en el trabajo de Best, Fielding, Jarvis y Mozley (2009). Sus solubilidades promedio y su relación con los niveles de susceptibilidad esperada, se presentan en la siguiente tabla 1.

Tabla 1 Solubilidad de los materiales líticos

Mineral	Solubilidad (mg L ⁻¹)	Litología en el estado de Campeche	Nivel de Susceptibilidad
Sedimentos recientes del cuaternario	<12	Depósitos palustres, aluviales y litorales	Baja
Calcita (CaCO ₃) Sílice (SiO ₂)	120	Caliza- Conglomerado	Media
Calcita (CaCO ₃)	100-500	Caliza	
Dolomita (CaMg (CO ₃) ₂)	90-480	Caliza-Marga	
Yeso (CaSO ₄)	2400-10000	Caliza-Yeso	Alta

Nota: Elaboración propia con base en datos de Best et al. (2009).

A partir del análisis de los datos litológicos y morfogenéticos se obtuvo el mapa de ponderación litológica (Figura 2). Los factores ambientales que presentaron comportamientos promedio sin variaciones significativas y homogeneidad relativa en todo el territorio estatal, no se utilizaron en la ponderación de factores condicionantes porque no contribuyeron a la delimitación diferencial de zonas con diferente susceptibilidad.

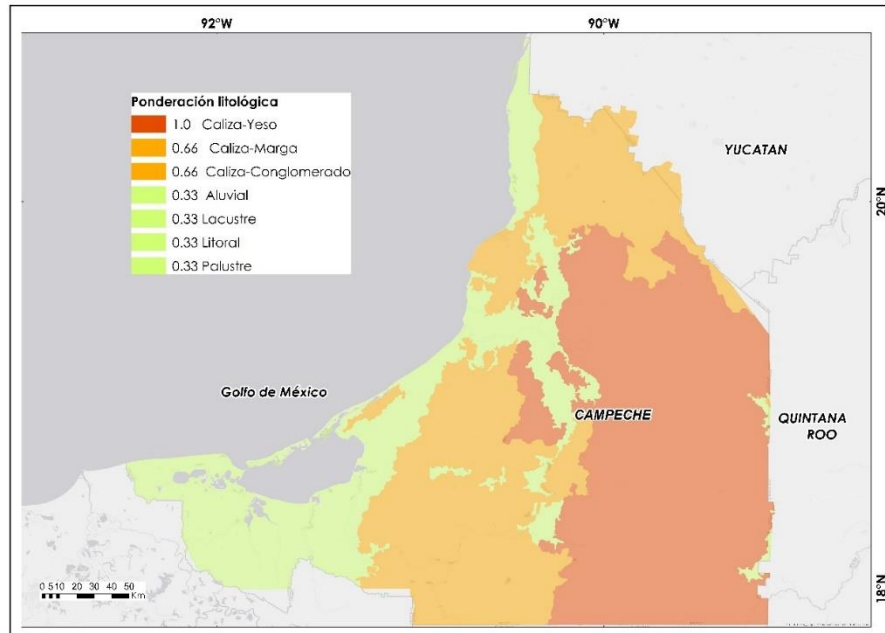


Figura 2. Ponderación litológica por tipos de rocas y sedimentos en Campeche.

Elaboración propia.

Los rasgos micro y macromorfológicos asociados a las áreas de rupturas litológicas que favorecen la disolución en la zona de estudio, se encuentran con separaciones entre diaclasas de 30 a 100 cm bastante próximas, y espesores masivos en los estratos (Tabla 2), (Quiles, 2002, pp. 115-224).

Tabla 2 Espesor de estratos rocosos y separación de diaclasas

Espesor de estratos (cm)	Nivel de Susceptibilidad	
> de 100 muy potente	Alta	
30-100 potente	Media	
10-30 potencia media		
3-10 delgados		
1-3 muy delgada	Baja	
< 1 laminada	Baja	
Separación entre diaclasas (cm)		
> 300 muy separadas		Baja
100-300 separadas		

30-100 bastante próximas

Media

5-30 próximas

< 5 muy juntas

Alta

Nota: Elaboración propia con base en datos de Quiles (2002).

Derivado del análisis de los datos disponibles se generó el mapa de ponderación morfoestructural, que muestra la concentración por zonas, de rupturas litológicas (diaclasas, fallas y puntos de intersección) que incrementan proporcionalmente la susceptibilidad al intemperismo fisicoquímico y los procesos corrosivo-erosivos (Figura 3). La variable condicionante de disolución asociada al espesor de los estratos presenta espesores potentes y muy potentes para todo el estado de Campeche, por lo que, aunque no contribuye a la delimitación diferencial de la susceptibilidad si a la ponderación global.

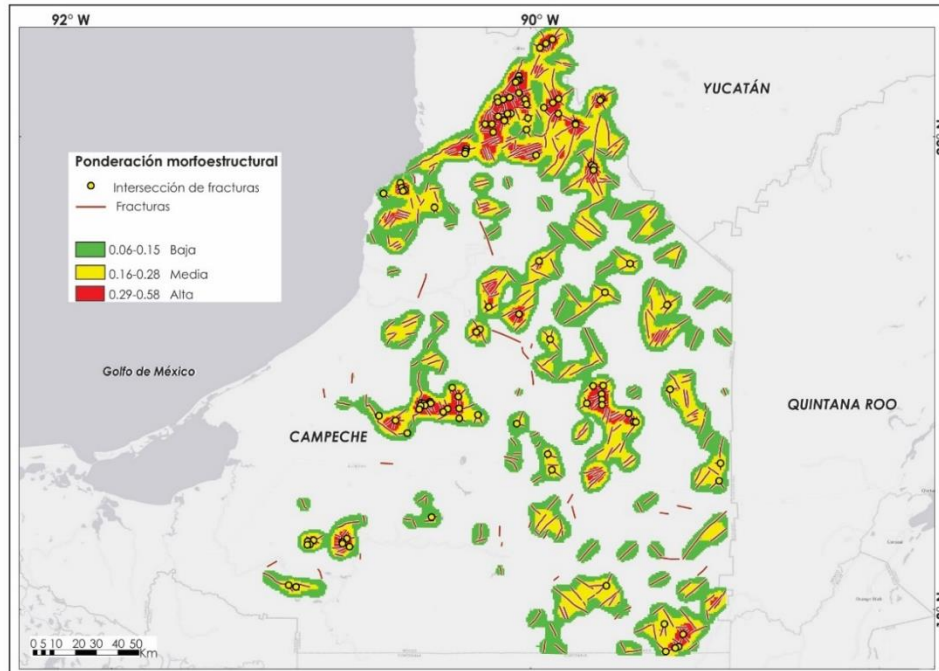


Figura 3. Ponderación morfoestructural por tipos litológicos en Campeche. Elaboración propia.

En el mapa final de susceptibilidad para el estado de Campeche (Figura 4), se observa para la subregión centro-sur del Estado, niveles de susceptibilidad "muy alto" y "alto", lo que implica la conjunción de todos elementos ponderados en su máxima expresión, por lo que para cualquier obra de infraestructura de importancia o asentamientos humanos que ahí se propongan debe realizarse estudios hidrogeológicos puntuales que den mayor

detalle sobre las condiciones del terreno a nivel local. Para la subregión suroeste del Estado domina un nivel bajo de que el terreno falle por disolución debido a que sus componentes líticas están asociados a depósitos fluviales y palustres. Estos depósitos son producto del arrastre y acumulación de los residuales de disolución por lo que es poco probable que ocurra otra disolución en estos, sin embargo, se pudieran presentar algunos procesos corrosivo-sufosivos subsuperficiales o de subsidencia.

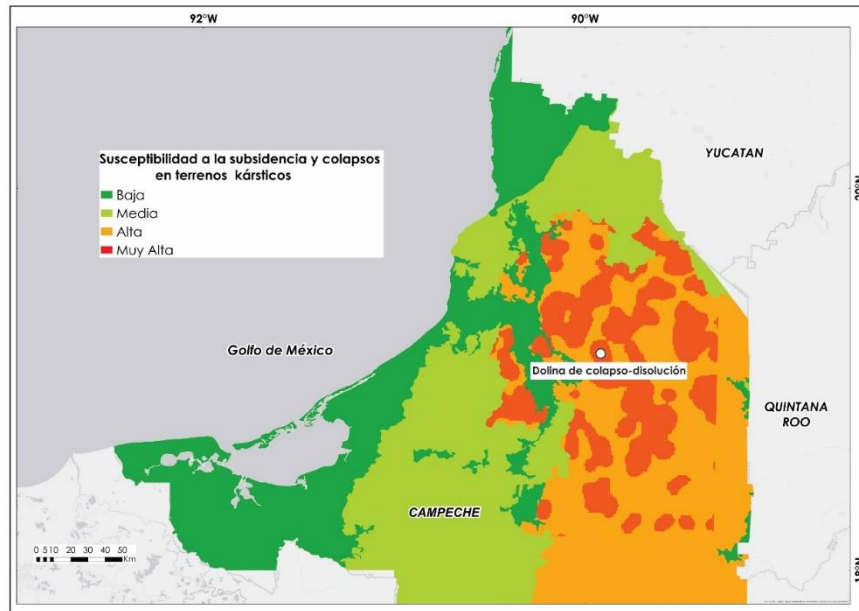


Figura 4. Susceptibilidad a la subsidencia y colapsos en terrenos kársticos en Campeche. Elaboración propia.

Se calcularon las áreas y porcentajes correspondientes a los niveles de susceptibilidad de la subsidencia y los colapsos a nivel estatal obteniéndose las cifras que se muestran en la Figura 5.

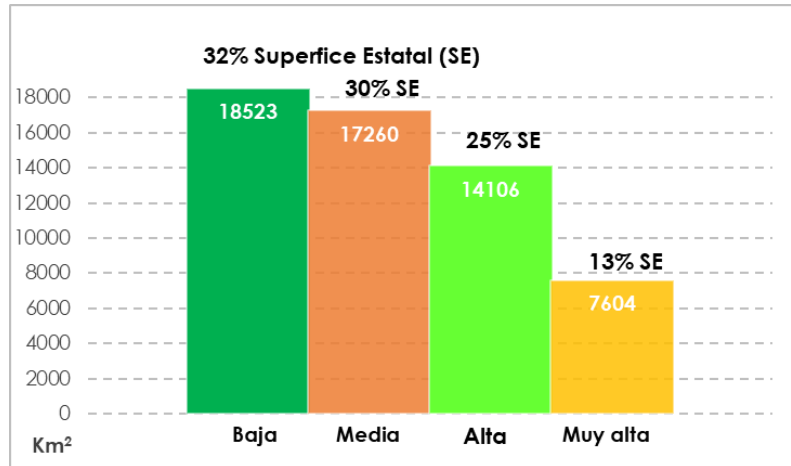


Figura 5. Cobertura areal y porcentual de la susceptibilidad a la subsidencia y colapsos en Campeche.

Elaboración propia.

El 38% de zonas con susceptibilidad alta y muy alta requieren una atención especial a nivel local por lo que implican en términos de peligro debido a la alta predisposición de estos terrenos a los procesos kársticos. La susceptibilidad media con el 30% de cobertura estatal implica procesos en gestación o en desarrollo de factores condicionantes detonadores. Finalmente, el nivel bajo con el 32%, no implica ausencia absoluta de susceptibilidad, pero si una probabilidad baja debido a la presencia de importantes espesores de sedimentos residuales sin minerales susceptibles a la disolución.

Las evidencias de subsidencia y colapsos en Campeche son difíciles de monitorear debido al predominio de karst cubierto o estabilizado por selvas tropicales primarias y secundarias, no obstante, se pudo comprobar la utilidad de la presente propuesta al detectar recientemente una dolina de colapso-disolución con forma cónica inversa y fragmentos de brecha en su fondo. En la Figura 6 se muestra la dolina de colapso-disolución que se originó en julio de 2010 en el municipio de Hopelchén (19° 09' 2'' Norte y 89° 55' 19'' Oeste, ubicada en Figura 4). Corresponde con zonas de susceptibilidad muy alta con alta densidad de fracturas y litología altamente susceptible a la disolución. La poca movilidad superficial del agua en los bajos inundables implica mayores tiempos de contacto entre el agua y las rocas, propiciando mayores niveles de disolución en rocas subyacentes. En los depósitos intermedios se encontraron esmectitas que son arcillas que incluyen la montmorillonita, con un coeficiente de expansión lineal de > 0.9 muy alto que corresponde con una alta propiedad expansiva por humedad, y un índice de plasticidad de > 15 que son suelos sin cohesión con baja plasticidad. En el fondo se encontraron depósitos brechosos a 23 m de profundidad.



Figura 6. Foto evidencia de una dolina de colapso-disolución de reciente formación en Hopelchén, Campeche. Fotografía tomada por Álvaro Gerardo Palacio Aponte.

Discusión

La mayoría de los estudios que expresan cartográficamente la amenaza de colapsos y subsidencia en terrenos kársticos, lo hacen a nivel de localidades urbanas y se basan en criterios como la densidad de las dolinas (número de dolinas por unidad de área) y los cambios hidrológicos drásticos naturales o inducidos en los niveles de agua subterránea (Amin & Bankher, 1997; Lei, Jiang, & Yu, 2002; Koutepov et al., 2008; Hu et al., 2021). A diferencia de los mapas locales que identifican amenazas puntuales, los mapas regionales de susceptibilidad muestran el conjunto de condiciones ambientales que pueden inducir amenazas potenciales, para después focalizar estudios a mayor detalle, evitando así buscar patrones de amenaza de forma aleatoria.

Lei, Jiang y Yu (2002), encontraron en una ciudad China que cambios drásticos en los niveles freáticos por sobre extracción de agua, con espesores de 31 m en rocas karstificables y alta densidad de dolinas o paleodolinas propician peligro de colapso en espacios contiguos. A diferencia de este enfoque, en este trabajo se delimita la susceptibilidad regional a los colapsos basados en paisajes geomorfológicos de karst maduro o desarrollado de colinas y lomeríos, donde las paleodolinas se encuentran sepultadas y las dolinas en neoformación son más bien escasas en Campeche (Lugo-Hubp et al., 1992).

Debido al contexto morfoestructural y de desarrollo del karst, la densidad de dolinas no aplica como criterio de diferenciación espacial de la susceptibilidad, de manera que además de las características litológicas, esta investigación destaca la importancia

fundamental del sistema de diaclasas y fallas, así como la densidad de los puntos de intersección. Esta condición es documentada en investigaciones como la de Koutepov, Mironov y Tolmachev (2008), en donde se asocian las debilidades geotectónicas, con un mayor cantidad y desarrollo en el diámetro de las dolinas.

Otros trabajos demuestran que la alta variabilidad o el abatimiento abrupto de los niveles del acuífero superior y la cabeza hidráulica del agua kárstica son fundamentales para determinar la amenaza potencial de colapsos a nivel local (Koutepov et al., 2008; Podobnikar, Schöner, Jansa, & Pfeifer, 2009), sin embargo, en Campeche no se dispone de esta información además de ser, por lo pronto, económicamente inviable. No obstante, como hipótesis no se descarta la sobreexplotación de los mantos acuíferos en algunas subregiones agrícolas de riego como el valle de Hopelchén, donde es probable que se hayan generado conos de abatimiento que incidan en la reducción abrupta del gradiente hidráulico ocasionando subsidencia y colapsos.

Por otra parte, el emplazamiento estratigráfico estructural y la inclinación de los estratos condiciona favorablemente la formación de dolinas cuando el buzamiento es menor a 12° , y también determinan la variedad de formas y desarrollo del sistema kárstico (Veni, 1987). Sin embargo, para la zona de estudio esta etapa evolutiva se encuentra en un estado avanzado, donde las dolinas sobre todo de colapso, se presentan de forma puntual.

Cuando la porosidad primaria es baja (inferior al 15 %) la morfología e hidrología del karst están condicionadas por la porosidad secundaria interconectada por fisuras, conductos subterráneos y cavernas (Quiles, 2002). Para el área de estudio se corroboró que los procesos de disolución son más intensos en las aéreas con altas densidades de rupturas litológicas y más aún en los puntos de intersección de fracturas.

Asimismo, los planos de estratificación y su espesor propician o interrumpen los flujos de agua, su presión hidrostática y su capacidad disolutiva. Si la estratificación es delgada el agua penetra pocos metros, pero si la estratificación es masiva o potente puede alcanzar cientos de kilómetros lo que podría ocasionar en el área de estudio un importante desarrollo sobre todo de geoformas hipogeas.

La identificación en el estado de Campeche de áreas susceptibles y con amenazas asociadas a la subsidencia y colapsos en terrenos karst se pudo establecer gracias a que los mapas de susceptibilidad son un antecedente para el estudio local del peligro, la vulnerabilidad y el riesgo asociados a procesos kársticos descritos en estudios anteriores por autores como Lei et al. (2002), Nguyet y Goldscheider (2006), Koutepov et al. (2008), Andreychouk y Tyc (2013) y Hu et al. (2021).

Conclusiones

El mapa de susceptibilidad a la subsidencia y colapsos en Campeche es un documento cartográfico preventivo en términos de amenaza a la población y las actividades humanas. Aporta directrices de uso y manejo del territorio a nivel regional, señalando zonas en donde la probabilidad de ocurrencia e intensidad está determinada por la suma ponderada de factores y condiciones favorables o inhibitorias, que se pudieron corroborar con las evidencias en campo. A partir de los resultados se puede aseverar que, para los alcances regionales, el modelo conceptual planteado cumplió con las expectativas previstas.

Las unidades morfológica y funcionalmente homogéneas permiten establecer analogías geográficas extrapolables sobre todo en terrenos con carencia de información y difícil acceso. El estado de Campeche tiene poca información hidrogeológica a detalle, por lo que el presente trabajo resulta útil en la identificación de zonas en donde existe mayor o menor probabilidad potencial de ocurrencia de colapsos y subsidencias, para dirigir en forma prioritaria los monitoreos hidrogeológicos a detalle sobre las zonas más susceptibles. En Campeche los patrones de susceptibilidad a la subsidencia y los colapsos por disolución resultaron ser heterogéneos en función de las condiciones ambientales, estructurales y de la naturaleza litológica específica de los paisajes kársticos. Destacan sobre todo zonas de cobertura restringida donde alternan calizas con yesos, esmectitas y altas densidades de fracturas e intersecciones.

El modelo conceptual fue correctamente planteado al encontrar al menos una evidencia en campo acorde a los niveles de susceptibilidad delimitados en el mapa. Resultó de utilidad para ordenar y detectar los factores condicionantes de disolución a nivel regional según su importancia en la intensidad de los procesos corrosivo-erosivos y de colapso.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a la Mtra. Ivette Liliana Torres Castro por el apoyo en la corrección de estilo.

Referencias

- Amin, A. A., & Bankher, K. A. (1997). Karst hazard assessment of eastern Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 15(1), 21-30. doi: [10.1023/A:1007918623324](https://doi.org/10.1023/A:1007918623324)
- Andreychouk, V., & Tyc, A. (2013). Karst Hazards. En C. W. Finkl (Ed.), *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 571-576). New York: Springer Nature.

- Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., Palacio, G., Ortiz Pérez, M., & Castillo-González, M. (2005a). Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la península de Yucatán. En F. Bautista, & G. Palacio (Eds.), *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales* (pp. 33-58). México D.F: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- Bautista, F., Palacio, G., Ortiz Pérez, M., Batllori-Sampedro, E., & Castillo-González, M. (2005b). El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la península de Yucatán. En F. Bautista, & G. Palacio (Eds.), *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales* (pp. 21-32). México D.F: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- Best, J. L., Fielding, C. R., Jarvis, I., & Mozley, P. (Eds.). (2009). *Sedimentology: Millennium reviews - The Journal of the International Association of Sedimentologists*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Bloom, A. L. (1998). *Geomorphology: a systematic analysis of late cenozoic landforms* (3rd ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas. (2022). Información espacial de las áreas naturales protegidas. México: Autor. Recuperado de http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
- Estrada Medina, H., Jiménez Osorio, J. J., Álvarez Rivera, O., & Medina Barrientos, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria*, 29, 1-18. doi: [10.15174/au2019.2292](https://doi.org/10.15174/au2019.2292)
- Ford, D. (2007). Jovan Cvijić and the founding of karst geomorphology. *Environmental Geology*, 51, 675-684. doi: [10.1007/s00254-006-0379-x](https://doi.org/10.1007/s00254-006-0379-x)
- Guerrero, J., Gutiérrez, F., Bonachea, J., & Lucha, P. (2008). A sinkhole susceptibility zonation based on paleokarst analysis along a stretch of the Madrid-Barcelona high-speed railway built over gypsum- and salt-bearing evaporites (NE Spain). *Engineering Geology*, 102(1-2), 62-73. doi: [10.1016/j.enggeo.2008.07.010](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.07.010)
- Hu, J., Motagh, M., Wang, J., Qin, F., Zhang, J., Wu, W., & Han, Y. (2021). Karst Collapse Risk Zonation and Evaluation in Wuhan, China Based on Analytic Hierarchy Process, Logistic Regression, and InSAR Angular Distortion Approaches. *Remote Sensing*, 13(24), 1-20. doi: [10.3390/rs13245063](https://doi.org/10.3390/rs13245063)

- Koutepov, V. M., Mironov, O. K., & Tolmachev, V. V. (2008). Assessment of suffosion-related hazards in karst areas using GIS technology. *Environmental Geology*, 54(5), 957-962. doi: [10.1007/s00254-007-0888-2](https://doi.org/10.1007/s00254-007-0888-2)
- Lei, M., Jiang, X., & Yu, L. (2002). New advances in karst collapse research in China. *Environmental Geology*, 42, 462-468. doi: [10.1007/s00254-001-0506-7](https://doi.org/10.1007/s00254-001-0506-7)
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J. F., & Espinasa-Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista Instituto de Geología UNAM*, 10(2), 143-150.
- Mateo, R. J. (1981). *Morfología Cársica*. Facultad de Geografía, La Habana: Universidad de La Habana.
- Moreno Gómez, M., Pacheco, J., Liedl, R., & Stefan, C. (2018). Evaluating the applicability of European karst vulnerability assessment methods to the Yucatan karst, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(19): 1-13. doi: [10.1007/s12665-018-7869-5](https://doi.org/10.1007/s12665-018-7869-5)
- Moreno-Gómez, M., Liedl, R., & Stefan, C. (2019). A new GIS-Based model for karst dolines mapping using LiDAR; application of a multidepth threshold approach in the Yucatan karst, Mexico. *Remote Sensing*, 11(10), 1147-1161. doi: [10.3390/rs11101147](https://doi.org/10.3390/rs11101147)
- Nguyet, V. T. M., & Goldscheider, N. A. (2006). A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology Journal*, 14, 1666-1675. doi: [10.1007/s10040-006-0069-5](https://doi.org/10.1007/s10040-006-0069-5)
- Palacio Aponte, G. (2013). Identificación y caracterización de la subsidencia y/o colapso de terrenos kársticos. En G. Posada Vanegas, B. E. Vega Serratos, & R. Silva Casarín (Eds.), *Peligros naturales en el Estado de Campeche cuantificación y protección civil* (pp. 169-181). Campeche: Secretaría de Gobernación-Gobierno del estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche.
- Podobnikar, T., Schöner, M., Jansa, J., & Pfeifer, N. (2009). Spatial analysis of anthropogenic impact on karst geomorphology (Slovenia). *Environmental Geology*, 58(2), 257-268. doi: [10.1007/s00254-008-1607-3](https://doi.org/10.1007/s00254-008-1607-3)
- Quiles, A. E. (2002). Tratamiento de terrenos kársticos mediante inyecciones. En C. J. López (Ed.), *Ingeniería del terreno* (pp. 115-224). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

- Servicio Geológico Mexicano. (2007). *Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:500,000*. México: Autor. Recuperado de http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/117_E16-1_GM.pdf.
- Sujatha, E. R., Kumaravel, P., & Rajamanickam, G. V. (2014). Assessing landslide susceptibility using Bayesian probability-based weight of evidence model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 147-161. doi: [10.1007/s10064-013-0537-9](https://doi.org/10.1007/s10064-013-0537-9)
- Veni, G. (1987, Feb 9-11). Fracture permeability: implications on caves and sinkhole development and their environmental assessment [Conference session]. *Karst hydrology: engineering and environmental applications*. Proceeding of second multidisciplinary conference on sinkholes, Massachusetts, United States.
- Waltham, A. C., & Fookes, P. G. (2005). Engineering classification of karst ground conditions. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, 3(1), 1-20.