



## EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE TIERRAS PARA EL DESARROLLO DE LA PORCICULTURA A ESCALA REGIONAL EN YUCATÁN, MÉXICO<sup>†</sup>

[ASSESSMENT OF THE SUITABILITY OF LAND FOR THE DEVELOPMENT OF SWINE FARMING AT A REGIONAL SCALE IN YUCATÁN, MEXICO]

Francisco Bautista-Zuñiga<sup>1\*</sup> and Yameli Aguilar-Duarte<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701. Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. C.P. 58190. Morelia, Michoacán, México. Email: leptosol@ciga.unam.mx

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Correa Rachó por calle 15, Col. Díaz Ordaz, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97130. Email: yaguilarduarte@gmail.com

\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background.** Pig farms are an important economic activity in the state of Yucatán, but they cause great environmental damage, such as groundwater contamination, air pollution, and soil degradation, which together affect both health and economy of local populations. **Objective:** The aim of this work was to spatially identify the surface suitable for the establishment of pig farms in the state of Yucatán where damage to the environment and human health are not a serious problem. **Methodology:** For the elaboration of the cartographic model, four maps were used as inputs that represent the evaluation variables, they are: altitude, karst depressions, soils and duration of the rainy season. They were converted to raster formats and handled in a geographic information system. Five classes of territorial aptitude for the establishment of pig farms were defined, 1 = very low; 2 = low; 3 = mean; 4 = discharge; and 5 = very high. The index and superposition method were used to integrate the four variables in a territorial aptitude model. To assign weights to each variable, a multi-criteria decision technique called "analytical hierarchies' method" was used. **Results:** The surface area of the territory of the state of Yucatán according to the suitability classes for the establishment of pig farms was: a very low with 21%; low with 50%; medium with 15%; high with 6%; and the very high zone with 8%. The areas of high and very high suitability for the establishment of pig farms are located in the south of the state. **Implications:** the map of the suitability for the establishment of pig farms on a regional scale will be an important input for updating the "program of ecological land management" of the state of Yucatan. However, due to the particularities of the karst, it is very necessary to carry the analysis to scales greater than 1:50 000 for the development of specific pig projects. **Conclusions:** The land evaluation model for the establishment of pig farms in the state of Yucatán on a regional scale, allows spatially identifying suitable and highly suitable areas for such activity. The most suitable territories are located in the south of the state, so it would be recommended that the growth of pig farming be those territories after consulting with the native populations.

**Keywords:** Karst; Underground water; Soils; Rain; Altitude.

### RESUMEN

**Antecedentes.** Las granjas porcinas son una actividad económica importante en el estado de Yucatán, pero causan grandes daños ambientales, como contaminación de aguas subterráneas, contaminación del aire y degradación del suelo, que en conjunto afectan tanto la salud como la economía de las poblaciones locales. **Objetivo:** identificar espacialmente la superficie apta para el establecimiento de granjas de cerdos en el estado de Yucatán donde los daños al ambiente y la salud humana no sean un problema grave. **Metodología:** Para la elaboración del modelo cartográfico se utilizaron como insumos cuatro mapas que representan las variables de evaluación: altitud, depresiones kársticas, suelos y duración del período de lluvias. Se convirtieron a formatos raster y se manejaron en un sistema de información geográfica. Se definieron cinco clases de aptitud del territorio para el establecimiento de granjas porcinas, 1= muy

<sup>†</sup> Submitted December 18, 2020 – Accepted January 14, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License. ISSN: 1870-0462.

baja; 2= baja; 3= media; 4= alta; y 5= muy alta. Se utilizó el método de índice y superposición para integrar las cuatro variables en un modelo de aptitud territorial. Para la asignación de pesos a cada variable se utilizó una técnica de decisión multicriterio denominada método de las jerarquías analíticas. **Resultados:** La superficie del territorio del estado de Yucatán según las clases de aptitud para el establecimiento de granjas porcinas fue: muy baja con un 21%; baja con un 50%; media con un 15%; alta con un 6%; y muy alta con un 8%. Las zonas de alta y muy alta aptitud para el establecimiento de granjas porcinas se localizan al sur del estado. **Implicaciones:** El mapa de la aptitud para el establecimiento de las granjas porcinas a escala regional será un insumo importante para la actualización del programa de ordenamiento ecológico del territorio del estado de Yucatán. Sin embargo, por las particularidades del karst se hace muy necesario llevar el análisis a escalas mayores a 1:50 000 para el desarrollo de proyectos porcícolas específicos. **Conclusiones:** El modelo de evaluación de tierras para el establecimiento de granjas porcinas en el estado de Yucatán a escala regional, permite identificar espacialmente las zonas aptas y muy aptas para dicha actividad. En el sur del estado se localizan los territorios de mayor aptitud por lo que sería recomendable que el crecimiento de la porcicultura sea esos territorios previa consulta con las poblaciones originarias.

Palabras clave: Karst; Agua subterránea; Suelos; Lluvia; Altitud.

## INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades productivas en Yucatán, México, es la cría de cerdos, el estado ocupa el quinto lugar a nivel nacional con el 5.8% de las 15 547 000 cabezas de cerdo producidas (Montero, 2015). Las ventajas territoriales de los recursos naturales (concesiones gubernamentales de bajo costo para el uso de aguas subterráneas, tierras baratas), leyes y regulaciones ambientales laxas y, que en algunos casos, no se aplican, mano de obra barata, una amplia área libre de enfermedades porcinas (cisticercosis porcina, sarna del cerdo, cólera porcino, erisipela porcina, neumonía, influenza, entre otras) y con experiencia en la cría y producción de carne de cerdo hacen que el Estado de Yucatán sea muy competitivo dentro y fuera del país. Sin embargo, las granjas porcinas son la causa de problemas ambientales importantes, como la contaminación del agua subterránea (Drucker *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2020), la contaminación de la atmósfera (Radon *et al.*, 2007; Wing *et al.*, 2008; Loftus *et al.*, 2015); degradación del suelo (Aguilar *et al.*, 2011); e incluso daños a la salud humana (Borlée *et al.*, 2015; Smit *et al.*, 2017) pues en Yucatán, cada año se reportan nuevos casos del virus AH1N1 (influenza porcina) (Secretaría de Salud, 2018).

En la actualidad, en el estado de Yucatán, el uso ganadero de la tierra ha generado problemas con las comunidades humanas cercanas a las granjas, principalmente las comunidades indígenas mayas que se dedican al turismo rural y de aventura.

Por otro lado, en los últimos años, información detallada sobre el entorno físico como los diversos tipos de clima y regímenes de lluvia e índices agroclimáticos (Delgado *et al.*, 2011, 2017), diversidad de suelos y geoformas y sus capacidades de depuración del agua residual (Aguilar y Bautista, 2011; Aguilar *et al.*, 2011; Bautista *et al.*, 2011, 2015) y la diversidad en la calidad del agua subterránea (Delgado *et al.*,

2010) han sido publicadas. Además, también se ha desarrollado un modelo geográfico para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación (Aguilar *et al.*, 2016b). Estos insumos deberían de ser considerados en la actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio de Yucatán (POETY, 2010).

La presencia de problemas de uso de la tierra y la existencia de bases de datos espaciales de alta calidad del entorno físico constituyen una oportunidad para el desarrollo de modelos de aptitud de la tierra con un enfoque espacialmente explícito y de tipo multicriterio utilizando los sistemas de información geográfica (Hartman y Goltz, 2002; Marinoni, 2004; Molero *et al.*, 2007; Fernández-Henao, 2011).

Para lograr los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los cambios en el uso del suelo deben ser impulsados por información científica reciente que considere los elementos del entorno físico (climas, geoformas, suelos y cuerpos de agua); las actividades productivas emprendidas tanto por comunidades como por empresarios; y los impactos que puedan generar al medio ambiente y a la salud humana.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo de evaluación de la tierra a escala regional en zonas kársticas del estado de Yucatán, con la finalidad de identificar espacialmente las áreas aptas para la cría de cerdos donde la contaminación del agua subterránea no sea un problema grave.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estado de Yucatán está ubicado en el sureste de México, es una plataforma kárstica que contiene planicies horizontales con Leptosols (LP), planicies

onduladas con LP, Cambisols (CM) y Luvisols (LV), planicies escalonadas con LP, LV, CM, Vertisols (VR), colinas alineadas con LP y LV, colinas aisladas con VR, Gleysols (GL) y LP y una gran área costera con Arenosols (AR), Regosols (RG) y Solonchak (SL) (Bautista *et al.* 2015; Ihl *et al.*, 2007).

El clima de Yucatán varía de semiárido a cálido y húmedo con lluvias en verano; hay zonas con tres a siete meses de lluvia estacional continua (Delgado *et al.*, 2011). Los meses húmedos son de interés agrícola (Delgado *et al.*, 2017). En tres zonas, el agua subterránea es salina, en las costas este y oeste, el agua está clorada con un alto contenido de sal (zonas I y II), y en el sur el agua es salina con sulfatos (zona III). En la parte media de la entidad hay dos zonas de calidad de agua moderada (zonas IV y V) y una zona con buena calidad de agua (zona VI) (Delgado *et al.*, 2010).

Los tipos de vegetación presentes tienen un gradiente que va desde la costa noreste hasta la región sur-sureste son: dunas de matorral, manglares rodeados de lagunas, bosques caducifolios bajos, pastizales, bosques caducifolios medianos y bosques semiperennes (Olmsted *et al.* 1999). El estado de Yucatán ha decretado que se deben proteger varias áreas naturales, ya sean tierras municipales o estatales, e incluye las reservas de la biósfera, algunos ejemplos son la Reserva Geohidrológica “Anillo de cenotes” (Gobierno del Estado de Yucatán, 2013) decretada para la protección de una importante zona de recarga del acuífero y la Reserva Ecológica “Cuxtal” (Gobierno del Estado de Yucatán, 1993) para proteger un campo de pozos de extracción de agua que sirve para abastecer a la zona metropolitana.

### Recopilación de insumos cartográficos

La evaluación de la aptitud del territorio yucateco para el desarrollo de la porcicultura incluyó la recopilación de insumos cartográficos previamente reportados y publicados. Se compiló una base de datos geoespaciales con archivos *shapefile* del entorno físico de Yucatán, con escalas de 1: 100 000 a 1:50 000 zona de proyección UTM 16 Norte con el Sistema Geodésico Mundial 84 (WGS84).

Para el contexto geomorfológico se tomaron las regiones geomorfológicas reportadas por Ihl *et al.*, (2007) el cual describe la diferenciación del relieve con base en la pendiente y la altitud. Adicionalmente se incluyó de la densidad y tipología de las depresiones kársticas publicadas por Aguilar *et al.*, (2016a) y el registro de “cuevas, cenotes y grutas” reportados por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA) ahora llamada Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS).

La variable edáfica se incluyó considerando el mapa de aptitud de los suelos como reactores para el tratamiento del agua residual porcina (Aguilar *et al.*, 2014; Aguilar *et al.*, 2016b; Aguilar y Bautista, 2011). Para incluir la variable climática, se tomó la duración del periodo de lluvias reportado por Delgado *et al.*, (2011 y 2017).

Otros insumos cartográficos de relevancia fueron las áreas naturales protegidas y la generación de zonas de influencia de 5 km alrededor de los cenotes y en general de los cuerpos de agua.

### Diseño del modelo conceptual de la aptitud territorial

Para el diseño de un índice de aptitud territorial, se tomaron cuatro variables principales: altitud, depresiones kársticas (densidad y tipo), paisajes edáficos y la duración del periodo de lluvias, descritos a continuación:

Altitud: es un indicador de la zona no saturada o espesor de la roca que se relaciona con la profundidad del acuífero. Se ha documentado que, a menor altitud, el espesor de la roca es reducido y por lo tanto el acuífero es menos profundo y viceversa (Marín-Stillman *et al.*, 2004). Por lo tanto, es un indicador de la distancia del acuífero. Las clases de aptitud de acuerdo a la altitud de las geoformas son: 1) muy baja, para geoformas con menos de 20 m; 2) baja, para geoformas de 20 a 40 m; 3) media, para geoformas de 40 a 60 m; 4) alta, de 60 a 80 m; y 5) muy alta, para geoformas por arriba de 80 m.

Depresiones kársticas (densidad y tipo): la densidad es un indicador del grado de karstificación, así como de la presencia del epikarst (una zona en el subsuelo cerca de la superficie que funciona como un vínculo crítico entre la precipitación y el transporte de agua hacia el acuífero). A mayor densidad de depresiones, indica un epikarst desarrollado, mayor recarga puntual y el acuífero más expuesto a la contaminación desde la superficie. También se considera el tipo de depresión; cenotes y dolinas abiertas con espejos de agua son más expuestas que dolinas cerradas (White y White, 1979; Plan *et al.*, 2009; Lindsey *et al.*, 2010; van Beynen *et al.*, 2012). Las uvalas son un caso intermedio y los poljes menos expuestos por poseer suelos de mayor espesor (Aguilar y Bautista, 2011; Plan *et al.*, 2009; Goeppert *et al.*, 2011). Las clases de aptitud van desde “nula o sin aptitud” (valor 0) para casos donde las geoformas tienen densidad media y densidad alta, con dominancia de cuerpos de agua (cenotes) y dolinas abiertas. “aptitud muy baja” (valor 1), para geoformas con densidad baja de depresiones y presencia de cuerpos de agua (cenotes), cuevas o lagunas costeras; “aptitud baja” (valor 2) para unidades geomorfológicas con densidad baja de depresiones que contengan cenotes, dolinas cerradas, uvalas y poljes; “aptitud

media” (valor 3) para unidades con densidad baja y media de depresiones con dominancia de uvalas y dolinas. “Aptitud alta” (valor 4) para geoformas con densidad baja y media de depresiones con dominancia de uvalas, poljés y algunos cenotes y “aptitud muy alta” (valor 5) para unidades con densidad baja y media con dominancia de poljés y uvalas.

Paisajes edáficos: los suelos se consideran como un factor de protección de las aguas subterráneas, ya que es en los suelos donde ocurren importantes procesos biogeoquímicos, sin embargo, la intensidad de estos procesos dependerá de los grupos y tipos de suelos presentes en el área. Estudios previos sobre la retención y mineralización de materia orgánica disuelta proveniente de aguas residuales porcinas en diferentes suelos de Yucatán, han revelado la aptitud de cada grupo de suelo para ser usado como receptores de estas aguas residuales (Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar y Bautista, 2011).

Los Histosols, Solonchaks, Gleysols y Arenosols, no tienen aptitud como receptores de aguas residuales porcinas. Los Leptosols poseen muy baja aptitud para recibir aguas residuales porcinas. El caso opuesto son los Vertisols tienen un gran porcentaje de arcillas expandibles que les permiten retener una gran cantidad de agua, así como también los sólidos solubles y disueltos que están contenidos en las aguas residuales descargadas por las granjas de cerdos, bien manejados pueden ser de alto potencial agrícola y altamente eficiente en el tratamiento de aguas residuales (Bautista *et al.*, 2011, 2015).

En zonas de karst, los patrones de distribución del suelo atienden a la variabilidad del meso-relieve, por lo que es común encontrar diferentes edafopaisajes a manera de mosaicos de grupos de suelos a cortas distancias. Aguilar *et al.*, (2016b) reportaron el índice de aptitud total (IAT) de los suelos considerando los paisajes edáficos que van de aptitud: 1) muy baja (IAT: de 3 a 11); 2) baja (de 12 a 20); 3) media (de 21 a 29); 4) alta (de 30 a 38) y 5) muy alta (mayor a 38).

Duración del período de lluvia (DPLI): El agua se considera como principal vector para el transporte de agua y contaminantes hacia el acuífero. La variable climática se incluyó a través del mapa de la “duración del periodo de lluvias” reportado por Delgado-Carranza *et al.*, (2011 y 2017). La duración del periodo de lluvias se expresa en meses húmedos consecutivos, iniciando cuando la precipitación pluvial (PP) excede a la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP) y finaliza cuando la PP es menor a la mitad de la ETP. Se asignaron las siguientes clases de aptitud: 1) muy baja (más de seis meses de DPLI); 2) baja (seis meses); 3) media (cinco meses); 4) alta (cuatro meses); 5) muy alta (igual o menor a 3 meses).

## Elaboración del modelo cartográfico

Se utilizó el método de índice y superposición para integrar las cuatro variables en un modelo de aptitud territorial. Los métodos apoyados con un índice asignan un valor numérico a cada clase de aptitud de cada variable basado en su magnitud. A su vez, a cada variable se le asigna una importancia relativa o peso comparada con las otras variables.

Cada uno de los mapas que representan las cuatro variables de evaluación (altitud, depresiones kársticas, suelos y duración del período de lluvias) y sus clases de aptitud fueron reclasificados con sus valores de aptitud (desde 0= nula; 1= muy baja; 2= baja; 3= media; 4= alta; y 5= muy alta, según corresponda) y convertidos a formatos raster.

Para la asignación de pesos a cada variable, se utilizó el método de las jerarquías analíticas (AHP, por sus siglas en inglés) que es una técnica de decisión multicriterio flexible que ayuda a los tomadores de decisiones a resolver problemas complejos a través de la comparación de los criterios o variables en relación al objetivo de decisión (Marinoni, 2004; Molero *et al.*, 2007; Fernández-Henao, 2011), en este caso, a la aptitud territorial para el establecimiento de granjas porcinas. El AHP funciona con tres principios básicos de pensamiento analítico: establecer jerarquías, prioridades y consistencia lógica (Hartman y Goltz, 2002).

Una contribución del método AHP es el desarrollo de un procedimiento interno para detectar las inconsistencias del juicio, al comparar una variable con otra y, asimismo, comprobar la coherencia del juicio de los expertos en el proceso de comparación de pares de las variables, por lo que un problema de inconsistencia en la asignación de pesos relativos puede ser demostrado mediante la tasa de inconsistencia (Banai-Kashani, 1989).

Para realizar esta evaluación se utilizó una matriz de 4 x 4 dentro de una plantilla de AHP Excel desarrollada por Goepel (2013) y validada con la versión en línea (Goepel, 2018). Al realizar las comparaciones se asignó el mayor peso a las “depresiones kársticas” debido a que controlan los tipos de recarga y flujos subterráneos del agua. Representan las principales zonas de absorción y recarga en los acuíferos kársticos, existiendo desde la recarga directa -hoyos de disolución, dolinas abiertas o en contacto con el acuífero (cenotes) en donde se omiten la función protectora de los suelos (Davis *et al.*, 2002; Plan *et al.*, 2009; van Beynen *et al.*, 2012) hasta aquellas donde se concentra la recarga funcionando como colectores o microcuencas como las dolinas cerradas, uvalas y poljés (Pavlopoulos *et al.*, 2009).

La formación de suelos se asocia al relieve (Zinck, 2012), por lo que se le asignó una preferencia ligeramente menor al de la variable “depresiones kársticas”, pero superior a la “altitud” (como indicador de la profundidad del acuífero) y a la “duración del periodo de lluvias”. Los suelos son una de las variables que, en cualquier proyecto de tipo agropecuario y en especial para hacer uso de las aguas residuales como aguas de riego, deben ser debidamente evaluados de acuerdo a sus aptitudes como retenedores y mineralizadores de nutrimentos que provengan de las aguas residuales. Básicamente los suelos representan la función protectora de los acuíferos, por lo que tiene la segunda prioridad después de las depresiones kársticas. A la altitud como indicador del espesor del subsuelo, se le asignó la tercera prioridad y finalmente, la duración del periodo de lluvias.

Una vez obtenidos los pesos de cada variable se realizó una suma ponderada con la herramienta “*Spatial analyst*” del ArcGis 10.4. El valor final de la aptitud territorial se obtiene como resultado de la sumatoria, para cada píxel, del producto de cada variable por su peso (Molero-Melgarejo *et al.*, 2007).

Para complementar el análisis de la aptitud del territorio para el desarrollo de la porcicultura, se incluyó un análisis de la densidad de localidades y de carreteras principales. Los archivos *shapefile* se tomaron de la cartografía base del POETY (2010). Para la densidad de localidades se utilizó una clasificación en cinco niveles considerando el método de “cortes naturales” (Jenks y Caspall, 1971) y expresa el número de localidades por cada 300 km<sup>2</sup>.

La densidad de carreteras principales se representó de manera general por medio de una gradación de mayor a menor, debido a que Yucatán es una entidad con buena conectividad pues cuenta con una red de carreteras adecuadamente distribuidas. Todas las comunidades tienen acceso terrestre por medio de carreteras federales, estatales o terracerías. De acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2017), la longitud de carreteras es de 8947.80 km lo que da una densidad de 22.56 km por cada 100 km<sup>2</sup>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### La aptitud de tierras para el desarrollo de la porcicultura

Los pesos obtenidos con el AHP fueron: 0.54 para las depresiones kársticas, 0.27 para los suelos, 0.11 para la altitud y 0.08 para la DPLL, con una relación de consistencia RC= 1.5 % considerado como adecuado ya que no excede el 10% (Goepel, 2013, 2018). La fórmula general es:

$$\text{ATEGP} = (0.11 * \text{Altitud}) + (0.54 * \text{DK}) + (0.27 * \text{SP}) + (0.08 * \text{DPLL})$$

Donde AEGPP= aptitud del territorio para el establecimiento de grajas porcinas; Altitud en msnm; DK= Depresiones kársticas densidad y tipo; SP= Suelos según grupos de los paisajes edáficos; DPLL= meses de la duración del periodo de lluvias

Los mapas para cada factor evaluado se presentan en la Figura 1. El mapa de altitud (Figura 1 A), depresiones (Figura 1 B) y suelos (Figura 1 C), siguen un patrón espacial similar que va de nororiental a sureste con aptitudes de menor a mayor, con diferencias en superficies y rasgos particulares, tal es el caso para las depresiones en donde resalta el patrón del anillo de cenotes y áreas de mayor densidad de dolinas en el oriente con nula aptitud para el desarrollo de la porcicultura. Considerando solo altitud, prácticamente todas las planicies kársticas de menos de 40 msnm tienen bajas y muy bajas aptitudes. Pero los suelos, en especial en el sur-oriental, le imprimen una aptitud moderada. Solo el factor clima, tiene un patrón espacial inverso (Figura 3 D) que va de mayor a menor de nororiental a sureste.

El mapa con la evaluación integral se presenta en la Figura 2. Las generalidades de cada zona con su clase de aptitud, se describen a continuación.

**Zona de aptitud muy baja:** corresponde al 21% de la superficie estatal (819,458 ha), representada por el anillo de cenotes (Reserva Geohidrológica Anillo de Cenotes; Parque Estatal Lagunas de Yalahau que es un sitio RAMSAR; y el Anillo de cenotes (zona de alta biodiversidad y endemismos, CONABIO) y una zona del noreste de la entidad con un notable “campo de dolinas” (Figura 2). Debido a la cantidad y densidad alta de cuerpos de agua, se recomienda que sea una zona con estricta protección, pues representa un área importante de recarga directa de agua que alimenta a los acuíferos. Los suelos dominantes son diferentes unidades de Leptosols; en el oriente se asocian con otros suelos como los Cambisols. La zona está dispuesta en una serie de planicies kársticas desde cero hasta menos de 20 msnm; se presentan diversas situaciones de duración de periodo de lluvias.

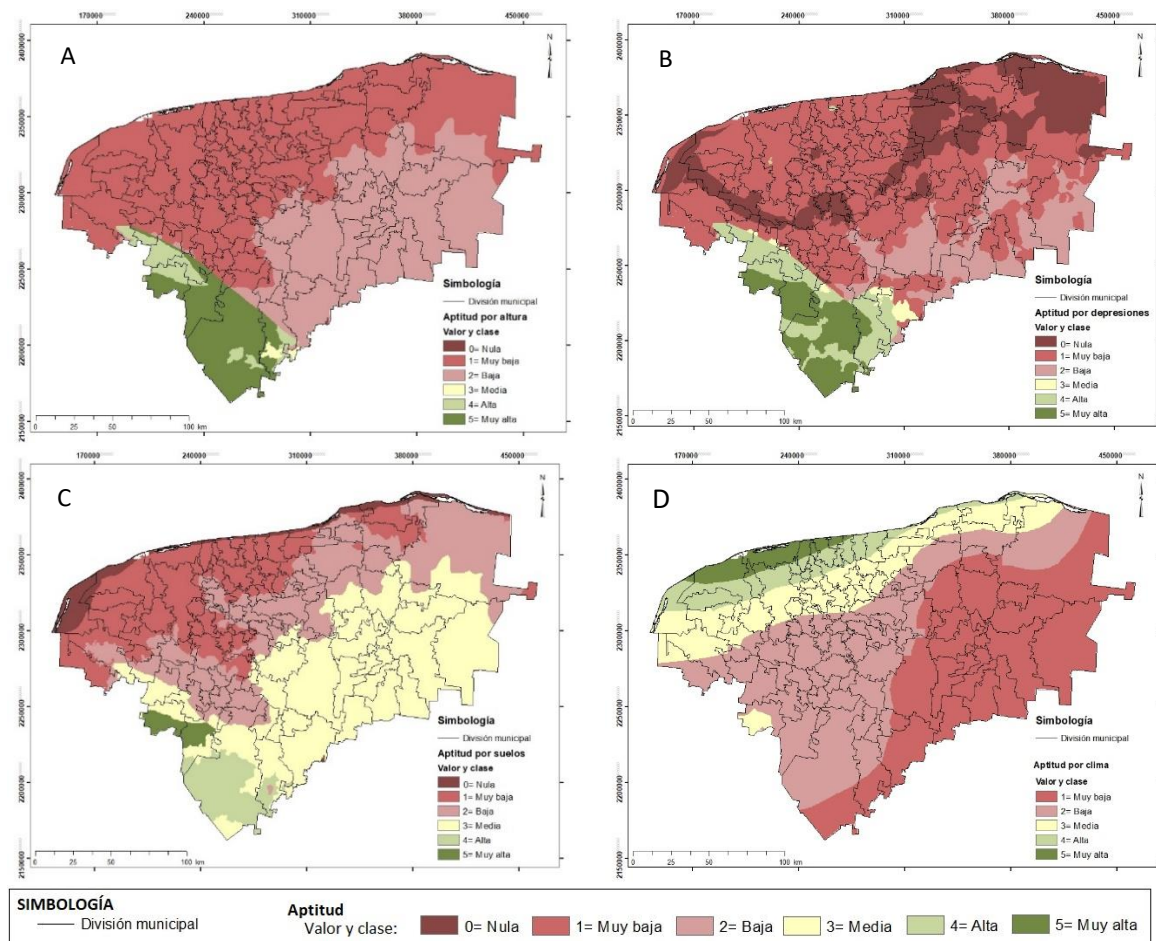
**Zona de aptitud baja:** es la más extendida con el 50% de la superficie de la entidad (1'953,696 ha), también con importantes cantidades de depresiones de diferentes dimensiones y tipos, por lo que la diversidad edáfica es notable, dominando los suelos Leptosols asociados con Cambisols y Luvisols, principalmente. Asimismo, la zona está dispuesta en una serie de planicies kársticas desde cero hasta menos de 40

msnm, con diferentes situaciones de duración de periodos de lluvias.

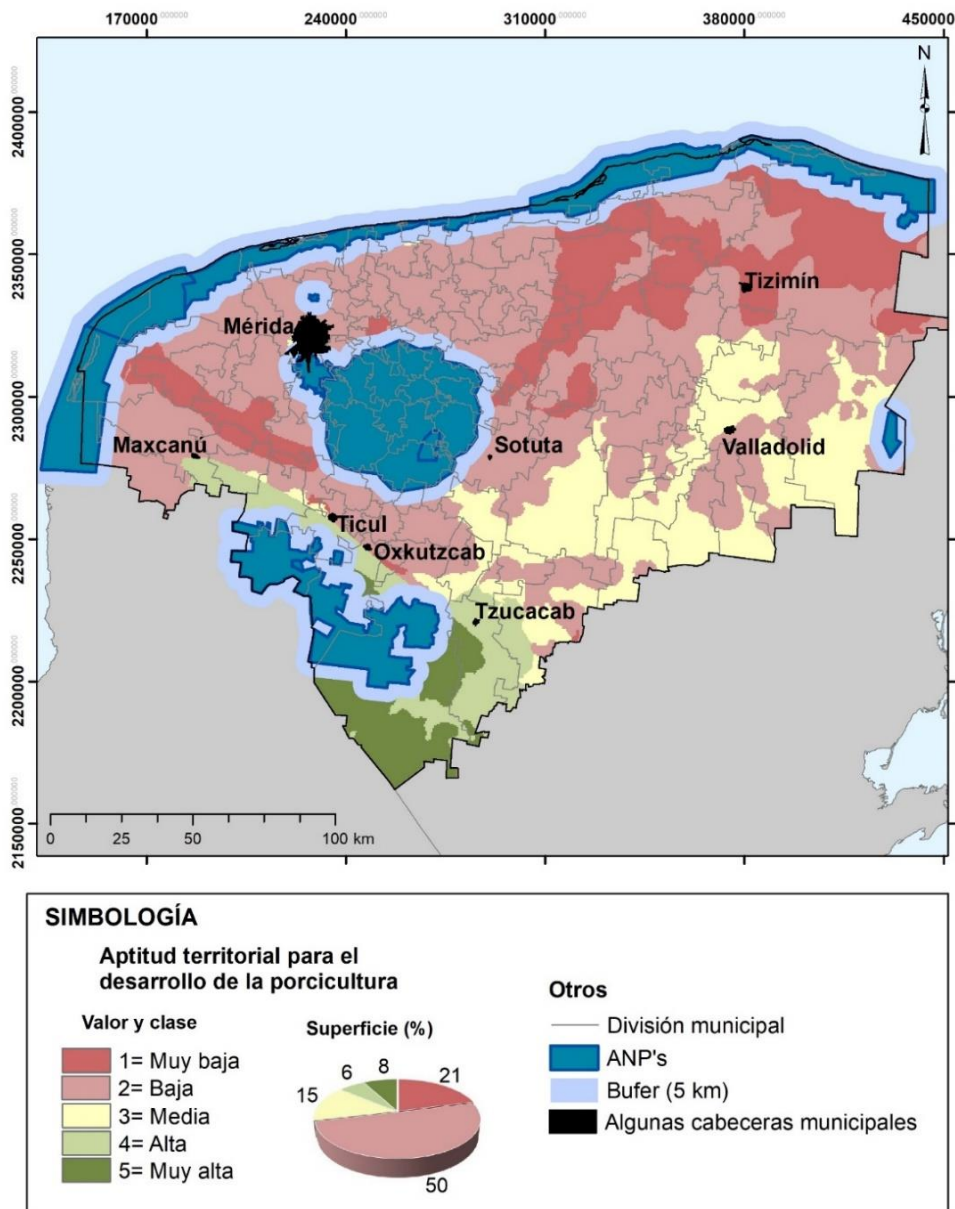
Entre ambas zonas están ubicadas la mayoría de las áreas naturales protegidas, destacando la “Reserva Geohidrológica del Anillo de Cenotes (RGHAC)” que se considera un sitio Ramsar para la conservación de humedales en donde se localizan 13 municipios rurales del centro de la entidad (Tahmek, Hochtún, Acanceh, Seyé, Timucuy, Hocabá, Xocchel, Cuzamá, Tecoh, Sanahcat, Homún, Huhí y Tekit) (Gobierno del Estado de Yucatán, 2013). La RGHAC ha sido identificada con características fisicoquímicas de agua definidas: valores de pH ligeramente ácidos, menor conductividad eléctrica y concentraciones de iones inferiores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) que sugiere poca interacción con el agua marina e indicando ser una importante zona de recarga del acuífero (Pérez-Ceballos *et al.*, 2012).

Una sección de la RGHAC colinda con la Reserva municipal “Cuxtal”, donde uno de sus objetivos es “contribuir a la protección de la zona de captación de agua para el suministro de la ciudad” ya que en él se ubica la planta “Mérida I” la principal zona con 25 pozos de extracción de agua subterránea con fines de abastecimiento para surtir a gran parte de la población de Mérida (Pacheco-Ávila *et al.*, 2004).

La ciudad de Mérida, cuenta con un sistema de abastecimiento de agua potable totalmente dependiente del agua subterránea, debido a la falta de corrientes superficiales. Sin tener fuentes alternativas, la pérdida de pozos de abastecimiento por la contaminación, podría tener como consecuencia un impacto inmediato a la economía y bienestar social; además de que los contaminantes no detectados a tiempo, representan un problema de salud pública (Pacheco-Ávila *et al.*, 2004).



**Figura 1.** Mapas de aptitud por variable: A) Altitud, como indicador del espesor del subsuelo; B) Depresiones kársticas, como indicador de exposición del acuífero; C) Suelos, como indicador de protección del acuífero; D) Clima, como indicador de transporte de agua y contaminantes.

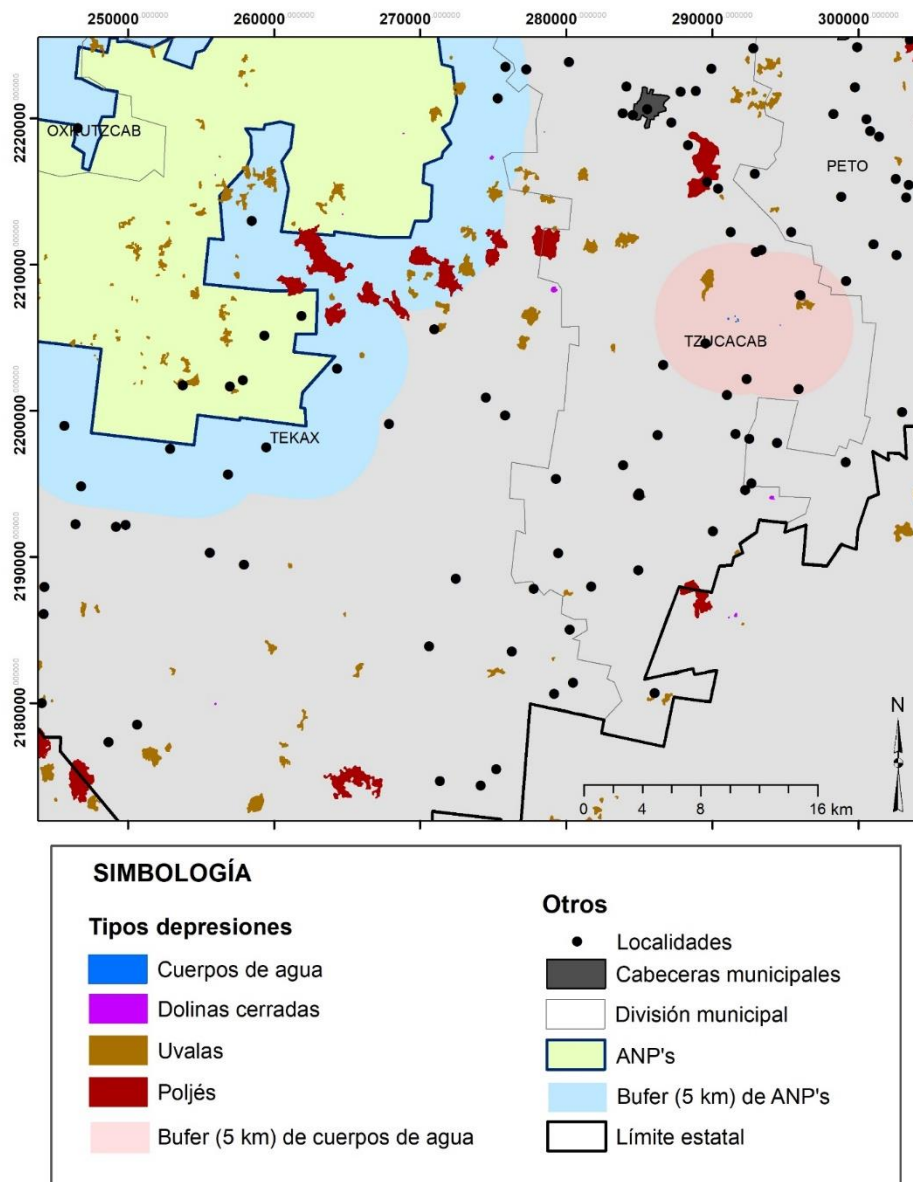


**Figura 2.** Mapa de la aptitud del territorio para el desarrollo de la porcicultura.

**Zona de aptitud media:** ocupa el 15% de la entidad (573,420.55 ha) situada al oriente en planicies kársticas entre 30 y 40 msnm, con menor densidad de depresiones principalmente úvalas, con suelos de los grupos Cambisols, Leptosols y Luvisols, con duración de periodo de lluvias de seis meses.

**Zona de aptitud alta:** es una superficie que ocupa el 6% (235482.4 ha) de la entidad yucateca; con una variedad de regiones geomorfológicas y edáficas pero que en su conjunto comparten ser áreas con baja densidad de depresiones kársticas. En esta zona se tienen algunas planicies kársticas entre 30 y 40 msnm, con CM/LP/LV, planicies intermontanas escalonadas

entre 30 hasta 80 msnm con LP/VR, o CM/ST/LP, ST/LP, VR/LP, montañas alineadas (menos de 100 msnm) con LP/CM o LP/LV/CM, montañas bajas entre 100 y 150 m con LP/LV, colinas pequeñas menores a 50 m, con CM/LP/VR, colinas medianas entre 50 y 70 m, con CM/LP/LV o VR y lomeríos en cono-cúpulas a menos de 90 m, con LV/LP/VR con periodos de lluvia por arriba de cinco meses, pero en general con presencia de suelos más profundos, arcillosos y desarrollados (Bautista *et al.*, 2015) con mayor potencial de retención y mineralización de aguas residuales con alta carga orgánica (Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar y Bautista, 2011).



**Figura 3.** Cuerpos de agua y depresiones kársticas a escala 1:50000.

**Zona de aptitud muy alta:** representa el 8% (306880.3 ha) de la superficie estatal, se ubican al sur de la entidad y se distribuye en geoformas con altitudes mayores a 70 msnm, como colinas, entre 70 y 100 m con CM/LP/LV, planicies intermontanas entre 80 y 90 m con VR/LP, lomeríos en conos entre 70 y 110 m con VR/LP, lomeríos en cono-cúpulas de 90 a 110 m con LV/LP/NT, lomeríos en conos de 90 a 150 m, con LV/LP/ST o LP/VR/ST, montañas bajas entre 100 y 150 m con LP/LV y montañas medianas mayores a 150 m con LP/VR/ST.

En esta región se presentan las mayores altitudes (por arriba de 50 hasta de 220 msnm) que indica un subsuelo con mayor espesor y por lo tanto acuíferos

profundos. Son regiones con menor densidad de depresiones, principalmente más desarrolladas como poljes y uvalas. Las geoformas cuentan con series de suelos de mayor a menor altura o catenas de tipo LP-CM-LV; LP-CM-VR; LP-CM-ST; LP-CM-NT. La DPLI es de cinco hasta de ocho meses.

Un aspecto importante a considerar es que, en la zona de muy alta aptitud, se estableció la Junta Intermunicipal Biocultural del Puuc (JIBIOPUUC) que integra seis municipios rurales del sur (Muna, Oxkutzcab, Santa Elena, Tekax, Ticul y Tzucacab) con una superficie de 135848 ha, y es una reserva encargada de preservar el patrimonio biocultural, así como restaurar y aprovechar los servicios ambientales

de los paisajes geográficos de esta región. Por esta situación, los permisos para el establecimiento de las granjas porcícolas requieren que las poblaciones indígenas sean consultadas.

El mapa estatal de la aptitud para el desarrollo porcícola es un insumo de planeación territorial a escala regional. Cada proyecto debe contemplar una evaluación a escala local ya sea 1:50000 o mayor; la Figura 3 presenta una aproximación a escala 1:50000 con un ejemplo en las zonas de aptitud alta. En la zona de aptitud alta en donde aún se pueden encontrar algunos cuerpos de agua y cenotes, será imprescindible establecer una zona buffer de 5 km alrededor de cada unidad kárstica, ya que estas formas externas del relieve son solo una manifestación de grandes extensiones de desarrollo kárstico en el subsuelo, por lo que su influencia es mayor a lo que se ve en superficie.

Los resultados de este trabajo sugieren que el desarrollo de la porcicultura debe darse en el sur del estado de Yucatán debido a que es allí donde se tienen las mejores condiciones ambientales para la conservación del agua subterránea y del ambiente en general. Sin embargo, se deben tomar en cuenta la cercanía de las granjas porcinas a las localidades ya que, si la población es de tipo indígena, la instalación de las granjas debe pasar por consulta pública según la ley. El sur del estado reúne las condiciones físicas (Figura 2) y sociales (Figura 4) para el establecimiento de las granjas porcinas.

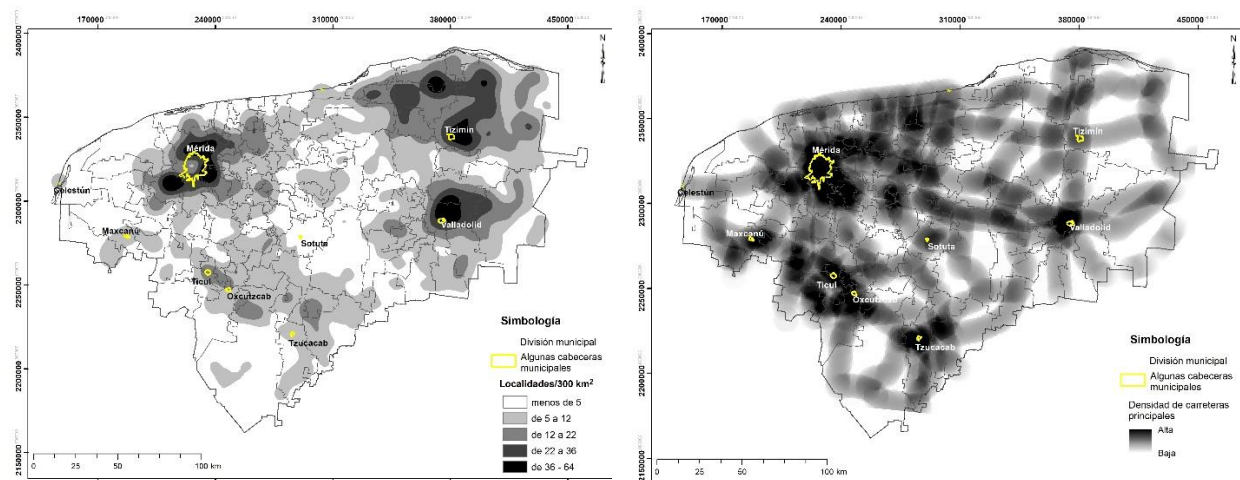
En la figura 4 mostramos la densidad de las localidades por 300 km<sup>2</sup>, para que este tema sea tomado en cuenta

en la planeación de la expansión e instalación de nuevas granjas porcinas. Este mapa de la densidad de las localidades no se incluye en el modelo de la evaluación de la aptitud porcina debido a que no es de carácter determinante, si se convence a las poblaciones indígenas cercanas con argumentos laborales, ecológicos y de salud.

### Otras consideraciones

La evaluación de la aptitud de las tierras para el desarrollo de la porcicultura toma en cuenta solamente el medio físico (altitud, densidad de depresiones kársticas, clima y suelos) con la finalidad de proteger a las aguas subterráneas. En este trabajo se utilizó el modelo clásico sugerido por la Organización Mundial de la Salud (FAO, 1996). El modelo de evaluación de la aptitud de tierras para la actividad porcícola puede mejorarse considerando las rutas de salida de la producción, la distancia a los centros de venta, la distancia a los sitios de exportación. Existen granjas en las zonas de aptitud media, alta y muy alta que hacen suponer que el crecimiento de la porcicultura no tendrá grandes impedimentos, como el acceso a carreteras debido a que el estado de Yucatán es de los que mejor comunicados están, ya que cuenta con una longitud de carreteras de 8,947.80 km, lo que da una densidad de 22.56 km por cada 100 km<sup>2</sup> (Figura 4).

El tamaño de la granja debe tenerse en cuenta ya que entre mayor sea la población de cerdos mayor será la dificultad de tratar los desechos sólidos orgánicos como, por ejemplo, una población de 50 000 cerdos producirá alrededor de 50 toneladas de estiércol por día o unas 1500 toneladas por mes, cantidades que difícilmente podrían ser tratadas en biodigestores sin contaminación al ambiente (aire, suelo y agua subterránea).



**Figura 4.** Densidad de localidades en cinco clases por 300 km<sup>2</sup>, muy alta (36 a 64), alta (22 a 36), media (12 a 22), baja (5 a 12) y muy baja (menos de 5).

La instalación de biodigestores para el tratamiento de las excretas es una opción de tratamiento que solo resuelve parcialmente el problema porque requiere personal y tiempo para la digestión y producción de metano (Garzón-Zúñiga y Buenla, 2014; Venegas *et al.*, 2017). Seguirá habiendo residuos que desechar y entre más grande la granja menos eficiente es esta opción de manejo de desechos. En Yucatán, los biodigestores no están bien manejados, falta una constante capacitación de la mano de obra, asesoría y vigilancia (Pérez-Espejo y Cervantes-Hernández, 2018).

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988) prohíbe descargar a cuerpos de agua, ya sea estiércol o aguas residuales sin un tratamiento previo (Acevedo *et al.*, 2017). El estiércol fresco no debe ser aplicado a los suelos agrícolas debido a que contiene antibióticos, hormonas, patógenos y compuestos orgánicos derivado de los medicamentos administrados, por lo que representarían una fuente de degradación de los suelos y de las aguas subterráneas; por estas razones, los residuos deberían pasar, al menos, por biodigestores y/o sistemas de compostaje para luego ser utilizados como abono en suelos agrícolas (Aguilar *et al.*, 2011; Aguilar y Bautista, 2011).

Otras afectaciones al ambiente derivadas de la contaminación del agua subterránea deben ser tomadas en cuenta, como la desaparición de fauna autóctona que habita las cuevas (Sosa-Escalante y Chablé-Santos, 2013), la destrucción de sitios sagrados (cenotes) (Tec\_Pool, 2011), la destrucción del registro fósil que albergan las cavernas, la eliminación del empleo en el turismo rural (Galicia-Zamora, 2010), la dificultad de abasto de agua potable (Pacheco *et al.*, 2004), los olores desagradables producto de la descomposición de las excretas y de las aguas residuales (Hoogesteijn-Reul *et al.*, 2015), los daños a la salud (Polanco Rodríguez *et al.*, 2015), entre otros.

Además, el desarrollo de la ganadería debe estar asociado a la producción agrícola para el reciclaje de los residuos orgánicos; y a una drástica reducción del volumen de agua usada en las granjas.

## CONCLUSIONES

El modelo de evaluación de tierras para la porcicultura del estado de Yucatán a escala regional, permite identificar espacialmente las zonas aptas y muy aptas para dicha actividad. Este mapa puede ser de gran utilidad en la actualización del programa de ordenamiento ecológico del territorio del estado de Yucatán. Sin embargo, por las particularidades del karst y la gran cantidad de localidades indígenas en el estado se hace muy necesario llevar el análisis a escalas mayores a 1:50 000 para el desarrollo de proyectos

porcícolas específicos, así como la incorporación de otros elementos al análisis de evaluación de tierras como, por ejemplo, distancia a las carreteras, distancia al aeropuerto, distancia a ciudades, entre otros aspectos. El sur del estado es donde se localizan las zonas aptas y muy aptas para la porcicultura debido que el terreno es alto, hay menor densidad de depresiones kársticas y suelos profundos. El crecimiento de la porcicultura podría ser en esos territorios previa consulta con las comunidades originarias y con el cumplimiento pleno de la normatividad ambiental.

**Funding.** DGAPA-Universidad Nacional Autónoma de México, project “Generación de modelos de evaluación ambiental de perfiles de suelos en zonas volcánicas y kársticas”, Number IN209218.

**Conflict of interest.** None.

**Compliance with ethical standards.** The research presents original data that have not been submitted to other journals at the same time.

**Data availability.** Data are available from the corresponding author (leptosol@ciga.unam.mx) upon reasonable request.

## REFERENCIAS

- Acevedo A. I., Leos, J.A., Figueroa, U., Romo J.L. 2017. Política ambiental: uso y manejo del estiércol en la Comarca Lagunera. *Acta Universitaria*, 27, 3-12. doi: 10.15174/au.2017.1270
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., T. Ihl. 2016a. Density of karst depressions in Yucatán State, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 78, 51-60. <https://caves.org/pub/journal/PDF/v78/cave-78-02-51.pdf>
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Ihl, T., Delgado, C. 2016b. IVAKY: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15, 913-933. <http://www.redalyc.org/pdf/620/62048168021.pdf>
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M., Ihl, T., Frausto, O. 2014. Propuesta del IVAKY: índice de vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación, p. 112-135. En: “10 Soluciones para el manejo sustentable del agua, Península de Yucatán”. Fundación ICA, México D. F. 220 pp. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/26>

- 7038479\_Propuesta\_de\_Ivaky\_indice\_de\_vulnerabilidad\_del\_acuifero\_karstico\_yucateco\_a\_la\_contaminacion
- Aguilar, Y., Bautista, F. 2011. Extrapolating the suitability of soils as natural reactors using an existing soil map: application of pedotransfer functions, spatial integration and validation procedures. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 221-232.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Díaz-Pereira, E. 2011. Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems* 13, 199-210.
- Banai-Kashani, R. 1989. A new method for site suitability analysis: The Analytic Hierarchy Process. *Journal of Environmental Management*, 13, 685-693.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., Aguilar, Y. 2015. Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2, 303-315.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, A.J., 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 135, 308-321.
- Borlée, F., Yzermans, C. J., van Dijk, C. E., Heederik, D., Smit, L. A. M. 2015. Increased respiratory symptoms in COPD patients living in the vicinity of livestock farms. *The European Respiratory Journal*, 46, 1605-1614.
- Cheng, D., Hao Ngo, H., Guo, W., Woong, S., Duc, D., Liu, Y., Wei, Q., Wei, D. 2020. A critical review on antibiotics and hormones in swine wastewater: Water pollution problems and control approaches. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121682. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121682>
- Davis, A.D., Long, A.J., Wireman, M. 2002. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifer in karst terrain. *Environmental Geology*, 42, 65-72. Doi: 10.1007/s00254-002-0531-1
- Delgado, C., Bautista, F., Ihl, T., Palma-López, D. 2017. Evaluación de la aptitud de tierras para la agricultura de temporal usando la duración del periodo de lluvia en el estado de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4, 485-497.
- Delgado, C., Bautista, F., Orellana-Lanza, R., Reyes Hernández, H. 2011. Clasification and agroclimatic zoning using the relationship between precipitation and evapotranspiration in the state of Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas*, 75, 51-60. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112011000200005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000200005)
- Delgado, C., Pacheco, A.J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., Bautista, F. 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, Mexico. *Agricultural Water Management*, 97, 1423-1433.
- Drucker, A., Semerena, R., González, V., Magaña, S. 2003. La industria porcina en Yucatán: Un análisis de la generación de aguas residuales. *Problemas Del Desarrollo*, 34(135), 105-124. Retrieved January 6, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/43839065>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1996. Agro-ecological zoning: Guidelines. FAO Soil Resources, Management and Conservation Service, Land and Water Development Division. Rome, Italy. 78 P.
- Fernández, S. A. 2011. Implementación del análisis jerárquico analítico. *Scientia et Técnica* 16, 45-49.
- Galicia-Zamora, E. 2010. El potencial de Yucatán para el ecoturismo. En R. Durán y M. Méndez (eds.), Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán (pp. 107-130). México: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Garzón-Zúñiga M.A., Buelna, G. 2014. Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30 (1) 65-79.
- Gobierno del Estado de Yucatán. (28 de octubre). 2013. Decreto que establece el Área Natural Protegida Denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes (Ley No. 117) Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán. [http://www.yucatan.gob.mx/gobierno/diario\\_oficial.php?f=2013-10-28](http://www.yucatan.gob.mx/gobierno/diario_oficial.php?f=2013-10-28)
- Gobierno del Estado de Yucatán. (14 de julio). 1993. Declaratoria de la zona sujeta a Conservación Ecológica "Reserva Cuxtal". Ayuntamiento de Mérida, México. [https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema\\_nacional/documentos/A\\_NPL/Yuc/9-DECRETO-CUXTAL.pdf](https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/A_NPL/Yuc/9-DECRETO-CUXTAL.pdf)
- Goepel, K.D. 2018. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy

- Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10, 469-487, <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>
- Goepel, K. D. 2013. Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making In Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs, Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kuala Lumpur 2013 DOI: <https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047>
- Goeppert, N., Goldscheider, N., Scholz, H., 2011. Karst geomorphology of carbonatic conglomerates in the Folded Molasse zone of the Northern Alps (Austria/Germany). *Geomorphology*, 130, 289-298.
- Hartman, D., Goltz, M. 2002. Application of the analytic hierarchy process to select characterization and risk based decision making and management methods for hazardous waste sites. *Journal of Environmental Engineering and Policy*, 3, 1-7.
- Hoogesteijn-Reul, A. L., Febles-Patrón, J.L., Nava-Galindo, V. A. 2015. La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Ingeniería*, 19, 169-175. <http://www.redalyc.org/html/467/46750926004/>
- Ihl, T., Frausto, O., Rojas, J., Giese, S., Goldacker, S., Bautista, F., Bocco, G. 2007. Identification of geodisasters in the state of Yucatan, Mexico. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen*, 246, 299-311.
- Jenks, G. F., Caspall, F. C. 1971. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers*. 61, 217-244.
- LGEEPA. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación, México D.F. 28 de enero de 1988.
- Lindsey, B.D., Katz, B.G., Berndt, M.P., Ardis, A.F., Skach, K.A. 2010. Relations between sinkhole density and anthropogenic contaminants in selected carbonate aquifers in the eastern United States. *Environmental Earth Sciences*, 60, 1073-1090. Doi: 10.1007/s12665-009-0252-9
- Loftus, C., Yost, M., Sampson, P., Torres, E., Arias, G., Breckwich, V., Hartin, K., Armstrong, J., Tchong-French, M., Vedal, S., Bhatti, P., Karr, C. 2015. Ambient ammonia exposures in an agricultural community and pediatric asthma morbidity. *Epidemiology*, 26, 794–801. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000368>
- Marín-Stillman, L.E., Pacheco-Ávila, J.G., Méndez-Ramos, R. 2004. Hidrogeología de la Península de Yucatán. In: Jiménez, B., Marín, L., (Eds.), El agua en México, vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F. pp. 159-176.
- Marinoni, O. 2004. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, 30, 637-646.
- Molero, E., Grindlay, A. L., Asensio, J. J. 2007. Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus*, 7, 120-147.
- Montero, E.M. 2015. Características de la producción porcina. En: Alternativas a la producción porcina a pequeña escala. Martínez R. y Herradora M.A (Eds). Universidad Nacional Autónoma de México. pp 17-33.
- Olmsted, I, González-Iturbe, J.A, Granados, J, Durán, R, Tun, F. 1999. Vegetación. In García de Fuentes A, Córdoba J, Ordoñez Y, Chico Ponce de León PA (eds) Atlas de Procesos territoriales en Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. pp. 282-293.
- Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., Vassilopoulos, A. 2009. Mapping Geomorphological Environments. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pacheco, J., Cabrera, A., Pérez, R. 2004. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8, 165-179. <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen8/diagnostico.pdf>
- Pérez-Ceballos, R., Pacheco-Avila, J., Euan-Avila, J.I., Hernandez-Arana, H. 2012. Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74, 90–102. DOI: 10.4311/2011es0222
- Pérez-Espejo, R. H., Cervantes-Hernández, G.I. 2018. Estrategias de mitigación. El programa de biodigestores en Yucatán, México. *Península*, 13, 235-262.

- [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1870-57662018000200235&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1870-57662018000200235&lng=es&nrm=iso)
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., Grasmann, B. 2009. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. *Environmental Geology*, 58, 285-297. Doi: 10.1007/s00254-008-1605-5
- POETY. 2010. Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Yucatán. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Gobierno del estado de Yucatán. <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/ordenamiento-ecologico/index.php> [Acceso 15 de agosto 2014].
- Polanco, A. G., Navarro, J.A., Solorio, J., Mena, G.L., Marrufo, J., Del-Valls-Casillas T.A. 2015. Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water and Environment Journal*, 29, 140-150. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12080>
- Radon, K., Schulze, A., Ehrenstein, V., van Strien, R. T., Praml, G., Nowak, D. 2007. Environmental exposure to confined animal feeding operations and respiratory health of neighboring residents. *Epidemiology*, 18, 300-308. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000259966>.
- Secretaría de Salud. 2018. Boletín Epidemiológico del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica, vol. 35, no. 46, semana 46. Recuperado de:
- <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/415172/sem46.pdf>
- Smit, L. A. M., Heederik, D. 2017. Impacts of intensive livestock production on human health in densely populated regions. *GeoHealth*, 1, 272-277, <https://doi.org/10.1002/2017GH000103>.
- Tec, F. 2011. El uso de las cuevas mayas a través del tiempo. En: Thomas C. (Ed.) Las cuevas de Yucatán (pp. 42-55). Francia: Ediciones Xibalba.
- van Beynen, P.E., Niedzielski, M.A., Bialkowska-Jelinska, E., Alsharif, K., Matusick, J. 2012. Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. *Applied Geography*, 32, 868-877. Doi: 10.1016/j.apgeog.2011.09.005
- Wing, S., Avery, R., Marshall, S.W., Thu, K., Tajik, M., Schinasi, L., Schiffman, S. S. 2008. Air Pollution and Odor in Communities Near Industrial Swine Operations. *Environmental Health Perspectives*. 116, 362-1368. doi: 10.1289/ehp.11250
- White, E. L., White, W. B. 1979. Quantitative morphology of landforms in carbonate rock basins in the Appalachian Highlands. *Geological Society of America Bulletin*, 90, 385-396. Doi: 10.1130/0016-7606(1979)90<385:QMOLIC>2.0.CO;2
- Zinck, J. A. 2012. Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC. The Netherlands.