

# Delimitación de una unidad de reserva hidrológica en el karst del Estado de Yucatán considerando los servicios ambientales

Laura R. Quiñones.<sup>\*</sup>, Julia G. Pacheco A., Eduardo Batllori S., Carlos E. Zetina M., Santos A. Cabrera S.

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Avenida de industrias no contaminantes y periférico norte s/n. Mérida, Yucatán, México.*

*Fecha de recepción: 11 de octubre de 2017 – Fecha de aprobación: 06 de agosto de 2018*

## RESUMEN

La identificación de las reservas de agua permite el aseguramiento del agua y de los servicios ambientales. Existen estudios tanto de instituciones de gobierno como académicas, que han propuesto reservas hidrogeológicas en el estado de Yucatán; no obstante, es necesario integrar estas propuestas para una mejor comprensión. El objetivo de este trabajo es proponer una unidad de reserva potencial hidrológica para Yucatán, que considere los criterios metodológicos empleados por la CONAGUA, considerando la integración de los servicios ambientales. Este estudio se desarrolló en: el análisis de la metodología de la CONAGUA y los antecedentes de propuestas de reservas de agua en Yucatán; la recopilación, análisis y adecuación de la información para la aplicación de la metodología; la aplicación de la metodología integrando los servicios ambientales; y la comparación de las ubicaciones de las reservas propuestas para el Estado de Yucatán con los resultados de este trabajo. En el escenario lineal se identificaron cinco municipios; el escenario de árbol de decisión dio como resultado 32 municipios, también, se diseñó un árbol de decisión alternativo, sin embargo, su resultado fue similar al original; y el escenario de valoración ponderada mostró 31 municipios. Se concluyó que el escenario lineal es la mejor estrategia para definir una reserva hidrológica; tanto el escenario de árbol de decisión como el escenario de valoración ponderada sugirieron conjuntos de municipios para ser reserva hidrológica. Se proponen tres criterios para ser agregados a la metodología de CONAGUA. Los criterios y las variables en los escenarios de árbol de decisión y valoración ponderada deben ser revisados para un mejor resultado.

**Palabras clave:** reserva hidrológica, metodología CONAGUA, escenario lineal, escenario de árbol de decisión, escenario de valoración ponderada.

## Delimitation of a hydrological reserve unit in the karst of the State of Yucatan considering the environmental services

### ABSTRACT

Identifying water reserves allows the assurance of water and environmental services. Government and academic institutions have published proposals about the location of hydrogeological reserves in the state of Yucatan; however, it is necessary to make an effort to

---

<sup>\*</sup>[laly.quinones@gmail.com](mailto:laly.quinones@gmail.com)

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 22, No. 2, 2018, ISSN: 2448-8364.

integrate the proposals. The objective of this work is to propose a hydrological reserve potential for Yucatan that considers the methodological criteria used by the CONAGUA integrating the environmental services. This work was developed in: analysis of the methodology of CONAGUA and background of proposed water reserves in Yucatan; collection, analysis and adequacy of information for the application of the methodology; application of the methodology integrating environmental services; and, comparison of the locations of the reserves proposed for the state of Yucatan, with the results in this work. Scenarios were applied of the methodology used by CONAGUA. In the linear stage five municipalities were identified; the decision tree stage resulted in 32 municipalities, an alternative tree decision was also designed, nevertheless, its result wasn't significantly different from the original; and, the weighted assessment stage showed 31 municipalities. It was concluded that the linear stage is the best strategy to define a hydrological reserve; both the decision tree and the weighted assessment stages suggested sets of municipalities to be hydrological reserve. Three criteria are proposed to be aggregated to CONAGUA's methodology.

Criteria and variable of decision tree and weight assessment stages have to be improved for a better result.

**Keywords:** hydrological reserve, methodology CONAGUA, linear stage, decision tree stage, weighted assessment stage.

## INTRODUCCIÓN

La protección de las aguas subterráneas en áreas con suelo kárstico es diferente entre países, es decir, de acuerdo a sus propias leyes. Sin embargo, es posible identificar estrategias afines, ya que la protección de los recursos de aguas subterráneas debe tomar en cuenta la sensibilidad natural de estos sistemas. El Estado de Yucatán no tiene aguas superficiales debido al suelo kárstico que lo compone, ya que, en este tipo de suelo, el agua de lluvia se infiltra rápidamente hasta el manto freático. La fuente de abastecimiento de agua más importante en Yucatán es el agua subterránea; aunque sólo se extrae alrededor del 5% de su volumen almacenado, es un acuífero muy vulnerable y de alto riesgo de contaminación (Batllori 2009).

La identificación de las reservas de agua para el medio ambiente de México permite el aseguramiento del agua y de los servicios ambientales que tienen relación con la sociedad actual y las futuras generaciones.

Estos servicios ambientales o servicios de los ecosistemas son los beneficios tangibles e intangibles que la sociedad obtiene de las condiciones y procesos que se desarrollan en dichos ecosistemas, éstos sostienen la biodiversidad y la producción biológica, que se traduce en bienes (como el alimento) y servicios (como la depuración de aguas contaminadas) y que el ser humano utiliza directa e indirectamente a partir de sus funciones (Neville 2010).

Se han visto varios esfuerzos por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que es un organismo administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, cuya responsabilidad es administrar, regular, controlar y proteger las aguas nacionales. (CONAGUA 2011), así como de investigadores de diversas instituciones académicas, quienes han publicado propuestas sobre la localización de reservas hidrogeológicas en el estado de Yucatán (Escolero et al. 2000; Escolero et al. 2002;

Escolero et al. 2005; Gaceta CyT México 2013; Pacheco 2013). No obstante, es necesario realizar una integración de las propuestas bajo una perspectiva metodológica similar a la que se usó en la CONAGUA para la identificación de las unidades de reserva del resto del país. Por lo que, el objetivo de

este trabajo es proponer una unidad de reserva potencial hidrológica para Yucatán, que considere los criterios metodológicos empleados por la CONAGUA para la identificación de reservas de agua considerando la integración de los servicios ambientales.

## METODOLOGÍA

La metodología que siguió este estudio fue la propuesta por CONAGUA (2011), para la localización de Reservas Potenciales de Agua (RPA). La CONAGUA empleó tres escenarios metodológicos de selección y priorización (escenario lineal, escenario con árbol de decisión y escenario de valoración ponderada). De manera específica, este estudio se desarrolló en cuatro etapas: 1) análisis de la metodología de CONAGUA para la ubicación de RPA, el contexto de su aplicación en México y de las propuestas de reservas de agua para el Estado de Yucatán; 2) recopilación, análisis crítico y adecuación de la información existente relevante para la aplicación de la metodología de CONAGUA en Yucatán; 3) aplicación de la metodología

de CONAGUA integrando los servicios ambientales; y 4) comparación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de las ubicaciones de las RPA previamente propuestas para el Estado de Yucatán, con los resultados obtenidos en este trabajo. Los criterios se definieron a partir de los resultados obtenidos de las variables a considerar en el estudio. A partir de los criterios, se elaboró un mapa con la factibilidad de cada municipio para ser considerada como reserva hidrológica. El detalle del método se puede consultar en Quiñones (2016).

Las variables (Tabla 1) se recopilaron a través de diversas instituciones, así como de distintos documentos.

Tabla 1. Lista de variables para los escenarios lineal, árbol de decisión y valoración ponderada.

<b>Disponibilidad de recursos</b>	<b>Mérito ambiental</b>	<b>Otros</b>
Disponibilidad de agua subterránea	Húmedales de importancia internacional	Situación de veda
Cuerpos de agua	Áreas Naturales Protegidas	Pozos de extracción
Distritos de riego	Áreas importantes para la biodiversidad acuática	Actividades agrícolas
		Actividades porcícolas
		Actividades avícolas
		Población
		Vulnerabilidad
		Servicios ecosistémicos

Los servicios ambientales de Yucatán que se consideraron en el estudio son los relacionados con el agua, por lo que en conjunto se les denominó servicios ambientales hídricos (SAH). Los servicios de provisión fueron agua potable y agua para riego agrícola; los servicios de regulación estuvieron compuestos por capacidad de drenaje, control de inundaciones, depuración de masas de agua, barrera contra la intrusión salina y gradiente hidráulico; y los servicios de soporte incluyeron hábitat para peces, descarga de acuíferos. Del documento de Batllori (2014), se revisaron los valores de importancia de cada uno de los servicios, los cuales están asignados para cada unidad de paisaje o unidad de gestión ambiental (UGA). Para determinar por municipio el valor del servicio ambiental correspondiente, se revisó cada UGA.

Se construyeron las tablas correspondientes para cada servicio ambiental con la siguiente información: municipio, tipo de servicio ambiental, valor de cada UGA que tiene el municipio, suma de los valores de cada UGA ( $n \text{ Valor de UGA } 1 + n \text{ Valor de UGA } 2 \dots + n \text{ Valor de UGA } N$ ) y valor total (Suma de los valores de cada UGA / número de UGA del municipio).

A partir del valor total se estimó el grado del servicio del ecosistema en cada municipio por medio de la clasificación de Batllori (2014), es decir, alto (3), medio (2), bajo (1) y nulo (0).

Para obtener el valor general por servicio de provisión, regulación y soporte, se sumaron los valores totales de sus correspondientes servicios ecosistémicos y se clasificaron como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del valor general por tipo de servicio ambiental.

<b>Total de provisión</b>	<b>Total de regulación</b>	<b>Total de soporte</b>
Alto de 5 a 6	Alto de 11 a 15	Alto de 7 a 9
Medio de 3 a 4	Medio de 6 a 10	Medio de 4 a 6
Bajo de 1 a 2	Bajo de 1 a 5	Bajo de 1 a 3
Nulo 0	Nulo 0	Nulo 0

El valor de los SAH, se calculó sumando el total de provisión (TP), total de regulación (TR) y total de soporte (TS) presentes en el municipio. Por último, se agruparon de la siguiente manera: Alto de 16 a 20, Medio de 14 a 15, Bajo de 12 a 13 y Nulo de 0 a 11 (Quiñones 2016).

Escenario lineal. Las variables se emplearon de manera excluyente, es decir, si el sitio no obtenía una variable positiva se excluía de la selección. En la Tabla 3, se muestran los criterios que se utilizaron para la identificación de las reservas potenciales de agua en Yucatán.

Tabla 3. Variables del escenario lineal y su interpretación.

<b>Variable</b>	<b>Criterio</b>	<b>Interpretación</b>
Disponibilidad de agua subterránea	Disponibilidad > 0	Positivo
Presencia de cuerpos de agua	Presencia	Positivo
Presencia de distritos de riego	Presencia	Negativo
Presencia de sitios Ramsar	Presencia	Positivo
Presencia de ANP	Presencia	Positivo
Sitios importantes para conservación de biodiversidad acuática	Presencia	Positivo
Presencia de vedas	Presencia	Positivo
Vulnerabilidad alta	Presencia	Positivo
Presencia de pozos de extracción	Presencia > 500	Negativo
Presencia de actividades agrícolas	Presencia > 500	Negativo
Presencia de actividades porcícolas	Presencia	Negativo
Presencia de actividades avícolas	Presencia	Negativo
Alta densidad de población	Densidad > a 50,000 hab/km <sup>2</sup>	Negativo
Presencia de servicios ecosistémicos	Presencia baja o nula	Negativo

ANP: Áreas Naturales Protegidas

*Escenario árbol de decisión.* Es un modelo de predicción aplicado en la inteligencia artificial. Se recopiló una base de datos alfanumérica, se elaboró un diagrama de construcción lógica, que se utilizó para categorizar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva, para la resolución de un problema. Algunas de las variables se categorizaron de acuerdo con el orden de importancia y valor de conservación o por las

presiones en los sitios. Con lo cual se consiguieron cuatro categorías: (1) no candidatas a ser reservas; (2) con factibilidad media; (3) con factibilidad alta; y (4) con factibilidad muy alta (CONAGUA 2011).

Las reglas de decisión y los criterios se encuentran con detalle en Quiñones (2016). El árbol de decisión que se aplicó para este escenario se muestra en la Figura 1.

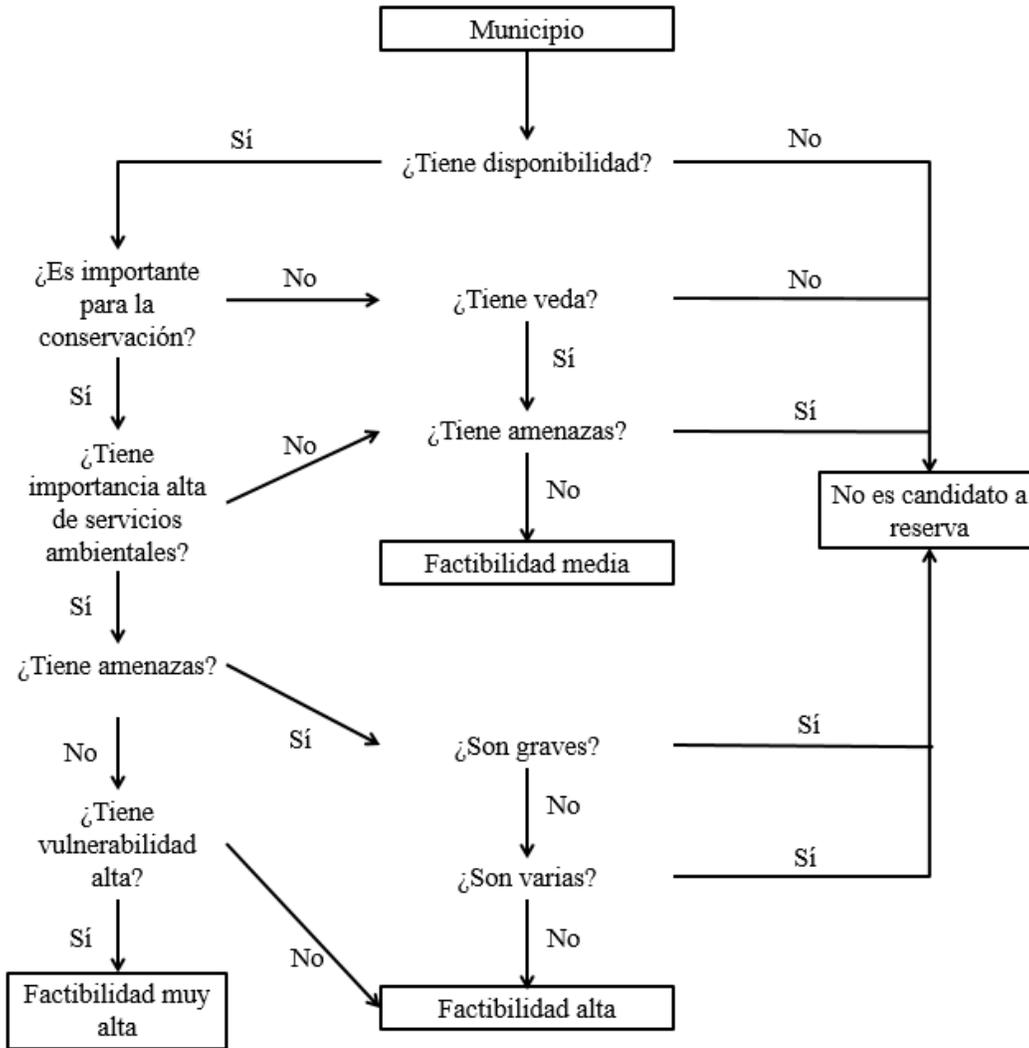


Figura 1. Diagrama de árbol de decisión para la identificación de las zonas con factibilidad para ser potenciales reservas de agua (modificado de CONAGUA 2011).

*Escenario de valoración ponderada.* Es un escenario que plantea un sistema de evaluación mixto, es decir, por una parte, hay una variable excluyente mientras que al resto de las variables se les otorga un peso (ponderación) (CONAGUA 2011).

Con este escenario se contempló una nueva variable, que relacionó la presión de uso en el municipio. Posteriormente con la asesoría de un experto, se definió una ponderación para determinar la variable presión por el uso. Las variables asociadas con la importancia de

conservación se agruparon en una variable conocida como Sitio importante para la conservación (CONAGUA 2011). En el caso de la disponibilidad del recurso hídrico se propuso dividir el volumen de extracción total de todos los pozos de extracción entre la extensión del municipio, para más información de las variables mencionadas anteriormente, consultar en Quiñones (2016). Las variables junto con su interpretación, criterio y ponderación en este escenario se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterios para el escenario de valoración ponderada (modificado de CONAGUA 2011).

Variable	Interpretación	Criterio	Ponderación
Presión por uso	Excluyente	Explotación $\geq$ 50%	(- , --)
Sitio importante para la conservación *	Positivo	Presencia	2
Presencia de veda	Positivo	Presencia	1
Presencia de cuerpos de agua	Positivo	Presencia	1
Presencia de servicios ecosistémicos	Positivo	Baja	0.5
		Media	0.75
		Alta	1
		Extrema	0.75
Vulnerabilidad	Positivo	Alta	1
		VEP / SupMun $\leq$ 25%	0
Disponibilidad del recurso hídrico	Negativo	VEP / SupMun $\leq$ 50%	-0.25
		VEP / SupMun $>$ 50%	-0.5
		SupDr / SupMun $\leq$ 25%	0
Presencia de distritos de riego	Negativo	SupDr / SupMun $\leq$ 50%	-0.25
		SupDr / SupMun $>$ 50%	-0.5
		Presencia 101 - 500	0
Presencia de pozos de extracción	Negativo	501 - 1,000	-0.25
		Mayor a 1,000	-0.5
		Densidad $\leq$ 10,000 habitantes/km <sup>2</sup>	0
Alta densidad de población	Negativo	Densidad $\leq$ 50,000 habitantes/km <sup>2</sup>	-0.25
		Densidad $>$ 50,000 habitantes/km <sup>2</sup>	-0.5

\* Presencia de sitios Ramsar o ANP o sitios prioritarios para la conservación acuática epicontinental.

VEP: Volumen de extracción de pozos; SupMun: Superficie del municipio; SupDr: Superficie del distrito

En este estudio, la integración y evaluación de la factibilidad se realizó mediante la suma del valor de las variables a partir del siguiente algoritmo:

$$\text{Nivel de factibilidad} = \text{SIC} + \text{PV} + \text{PCA} + \text{PSE} + \text{V} + \text{DRH} + \text{PDR} + \text{PPE} + \text{ADP}$$

En donde el nivel de factibilidad o prioridad para ser designada como reserva de agua se definió por: SIC, presencia de sitio importante para la conservación; PV, presencia de veda; PCA, presencia de cuerpos de agua; PSE, presencia de servicios ecosistémicos; V, vulnerabilidad; DRH, disponibilidad del

recurso hídrico; PDR, presencia de distritos de riego; PPE, presencia de pozos de extracción; ADP, alta densidad de población.

El resultado de la suma de la ponderación evaluó numéricamente cada municipio en un rango de valores desde 6 (municipios con una presión por el uso territorial menor al 50% con ninguna variable negativa) hasta 0 (municipios con una presión de uso territorial mayor a 50%, que no presentaron un interés para la conservación y se encontraron bajo diversas variables negativas).

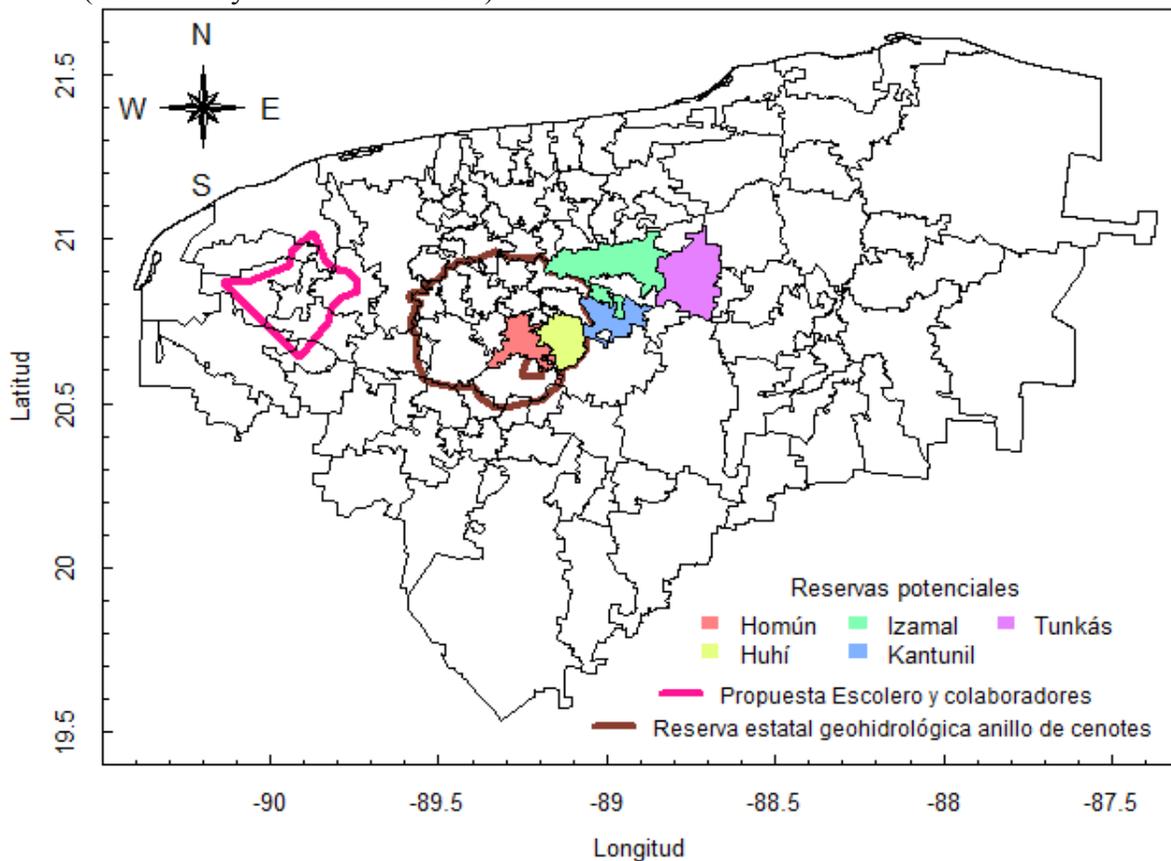
Finalmente, de acuerdo a CONAGUA (2011), se hicieron cortes de clases, en los cuales las calificaciones se dieron en intervalos de 0.25;

siendo el valor 6 la factibilidad más alta y el valor  $\leq 4.75$  no candidatos (ver más detalle en Quiñones 2016).

## RESULTADOS

*Escenario lineal.* El escenario lineal dio como resultado que los municipios de Homún, Huhí, Izamal, Kantunil y Tunkás, se pueden considerar como factibles o prioritarios para ser RPA, ya que reúnen todas las variables positivas y ninguna variable negativa. Comparando estas RPA del escenario lineal con la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes (Gaceta CyT México 2013) se

distinguen dos municipios, Homún y Huhí dentro de sus límites; además, tanto Homún e Izamal son municipios con alto valor para constituir la reserva hidrogeológica para la zona metropolitana de Mérida debido a que Huhí, Kantunil y Tunkás no están considerados por estar fuera del semicírculo de cenotes (Pacheco 2013); en cambio, no hay RPA coincidentes con la propuesta de Escolero et al. (2000) (Figura 2).



D

Figura 2. Reservas potenciales a partir del Escenario lineal y su comparación con otros estudios.

*Escenario árbol de decisión.* Este método al no ser tan restringido en la selección de los municipios que cumplan con las condiciones requeridas, permitió identificar 32 municipios con diferente nivel de factibilidad para ser

RPA, es decir, ocho municipios de categoría muy alta (Dzitás, Homún, Huhí, Kantunil, Kaua, Quintana Roo, Sudzal y Tunkás), ocho de categoría alta (Cenotillo, Chichimilá, Dzemu, Sinanché, Telchac Puerto, Tinúm,

Yaxcabá y Yobain) y 16 con categoría media (Cansahcab, Cuncunul, Chankom, Chikindzonot, Dzilam de Bravo, Dzoncahuich, Ixil, Maní, Mayapán, San Felipe, Suma, Tahdziú, Teabo, Tekom, Teya y Tixcacalcupul). 74 municipios se identificaron como no candidatos.

En este escenario se distinguen cuatro de los cinco municipios RPA del escenario lineal, cuatro de ellos con factibilidad muy alta (Homún, Huhí, Kantunil y Tunkás). Además, este escenario de árbol de decisión reconoce la identificación de municipios en zonas costeras (Dzemul, Dzilam de Bravo, Ixil, San

Felipe, Sinanché, Telchac Puerto y Yobain). Al comparar los 32 municipios RPA se distinguen dos municipios (Homún y Huhí) con factibilidad muy alta dentro de la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes (Gaceta CyT México 2013); en la propuesta de Pacheco (2013), solo once municipios pertenecen al semicírculo de cenotes, de los cuales los municipios con mejor calificación para ser reserva hidrogeológica son Cansahcab, Dzemul, Dzoncahuich, Homún, Ixil, Suma y Telchac Puerto; mientras que, en la propuesta de Escolero y colaboradores (2002) los municipios no están relacionados para ser RPA (Figura 3).

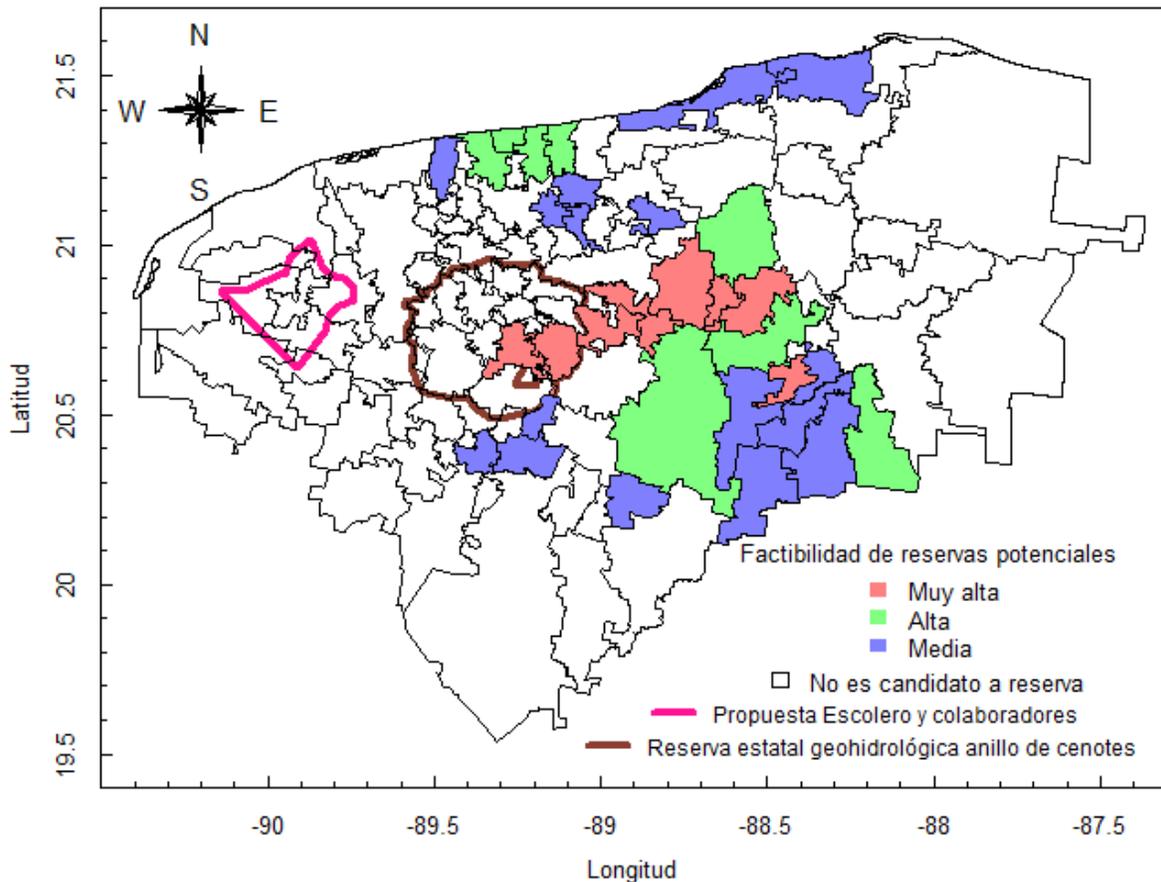


Figura 3. Reservas potenciales a partir del Escenario árbol de decisión y su comparación con otros estudios.

Se diseñó un árbol de decisión alternativo, en donde el tipo de vulnerabilidad tuviera más

importancia que los servicios ambientales. El resultado obtenido al intercambiar el orden de

las preguntas en el árbol de decisión, permitió identificar también 32 municipios con distinto nivel de factibilidad para ser RPA; sin embargo, se identificaron los mismos ocho municipios con categoría muy alta que en el árbol de decisión original (Dzitás, Homún, Huhí, Kantunil, Kaua, Quintana Roo, Sudzal y Tunkás); en cambio, para la categoría alta disminuyeron a seis (Cenotillo, Chichimilá, Izamal, Tekit, Tinúm y Yaxcabá); los municipios de categoría media aumentaron a 18 (Cansahcab, Cuncunul, Chankom, Chikindzonot, Dzilam de Bravo, Dzoncahuich, Ixil, Maní, Mayapán, San Felipe, Sinanché, Suma, Tahdziú, Teabo, Tekom, Telchac Puerto, Teya y Tixcacalcupul). Se identificaron como no candidatos 74 municipios. Con el cambio de árbol de decisión aparecen los cinco municipios RPA del escenario lineal, pero en este caso, cuatro de ellos con factibilidad muy alta (Homún, Huhí, Kantunil y Tunkás) y uno con factibilidad alta (Izamal). También se visualizan municipios en zonas costeras. El árbol de decisión alternativo, al comparar los 32 municipios RPA con la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes (Gaceta CyT México 2013) se encuentran dos municipios (Homún y Huhí) con factibilidad muy alta y un municipio (Tekit) con factibilidad alta; dentro de la zona propuesta por Pacheco (2013) los municipios de Cansahcab, Dzoncahuich, Homún, Ixil, Izamal, Suma y Telchac Puerto son los que tienen la mayor calificación para ser considerados RPA; en cambio, la propuesta de Escolero et al. (2002) no muestra relación alguna con este escenario (Figura 4).

Con este escenario se puede apreciar no sólo una RPA que se consideraría como la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes (Gaceta CyT México 2013) sino inclusive se podría considerar a Mayapán y Teabo como parte de ésta. Además, se logran distinguir más de un conjunto de municipios adyacentes para ser RPA, como en el caso de Izamal,

Kantunil, Sudzal y Tunkás, ó bien los municipios de Cuncunul, Chankom, Chikindzonot, Kaua, Tahdziú, Tekom y Yaxcabá, de acuerdo con el nivel de contaminación del agua subterránea (Pacheco et al. 2004) y los flujos preferenciales de sur a norte en Yucatán.

*Escenario valoración ponderada.* El resultado de este escenario fueron 31 municipios, de los cuales, nueve son municipios con nivel de factibilidad media (Cenotillo, Dzitás, Homún, Huhí, Kantunil, Kaua, Quintana Roo, Sudzal y Tunkás) y 22 municipios de factibilidad baja (Cuzamá, Chapab, Chemax, Chichimilá, Dzemul, Dzilam de Bravo, Ixil, Izamal, Peto, Río Lagartos, San Felipe, Santa Elena, Sinanché, Sotuta, Sucilá, Tekal de Venegas, Telchac Puerto, Temozón, Tinúm, Valladolid, Yaxcabá y Yobaín) para ser RPA; por lo que el número de municipios como no candidatos fueron 75, debido a la presión por uso o por el nivel de factibilidad, dificultando su consideración para ser RPA. Se pueden apreciar a los cinco municipios que se identificaron en el escenario lineal, sin embargo, cuatro de ellos corresponden a factibilidad media (Homún, Huhí, Kantunil y Tunkás) y uno a factibilidad baja (Izamal).

El uso de la variable excluyente relacionada con la presión por uso da importancia al resultado de este escenario, debido a que desde el inicio un gran número de municipios fueron descartados. La diferencia entre la variable utilizada en la CONAGUA (2011) y la de este estudio es muy amplia, ya que la CONAGUA utiliza los volúmenes siguientes: extracción de agua superficial, anual de exportaciones, anual de evaporación en embalses, anual de variación de almacenamiento en embalses, medio anual de escurrimiento natural y medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba. Por el contrario, en este estudio se utilizaron la densidad de las unidades de producción porcícola, avícola y agrícola de cada

municipio, obtenidas a partir de la población total de cerdos, la población total de aves y la superficie sembrada total, cada una dividida

entre la superficie del municipio, para conocer la explotación del agua por estas actividades en Yucatán.

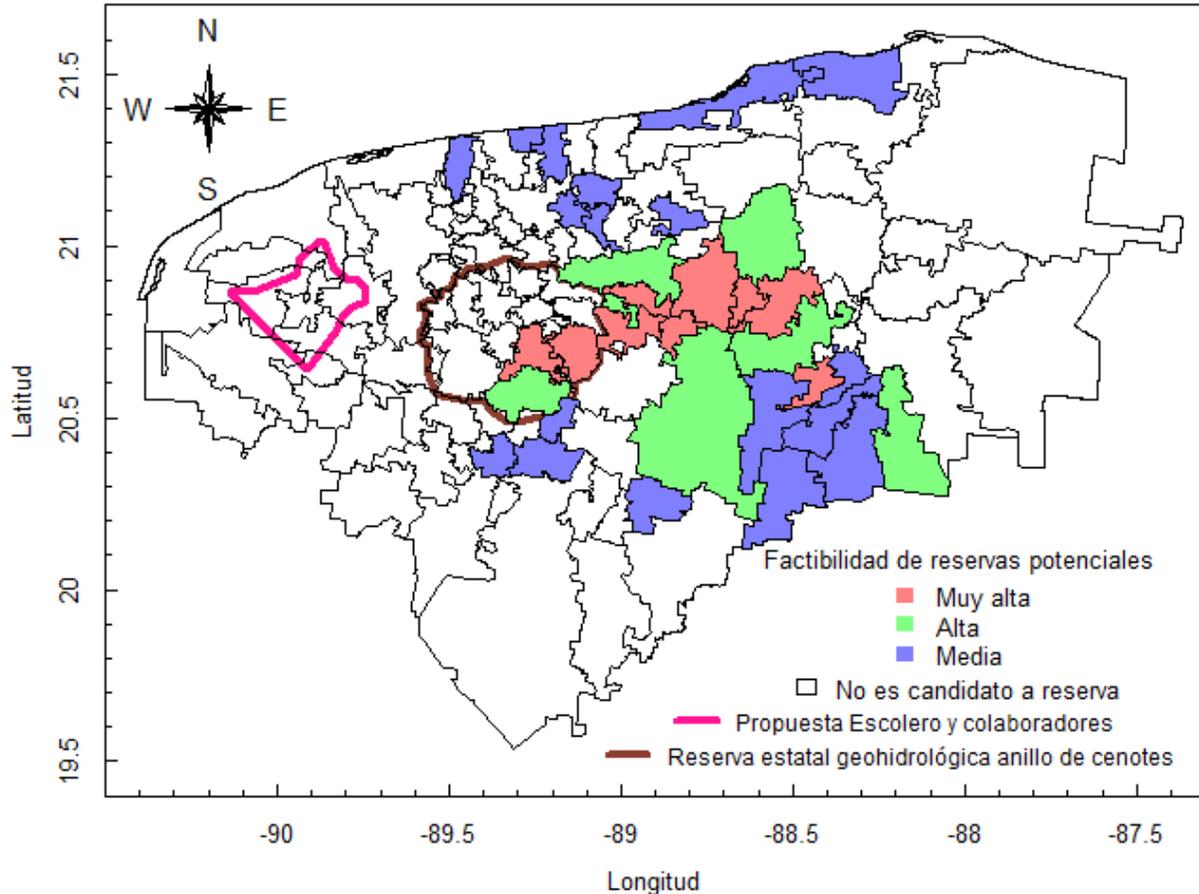


Figura 4. Reservas potenciales a partir del Escenario árbol de decisión alternativo y su comparación con otros estudios.

La variable disponibilidad del recurso hídrico tuvo una modificación en este estudio, debido a que en la CONAGUA (2011) esta variable tiene más peso según el volumen de agua de 500 hm<sup>3</sup>, en cambio en este trabajo se propone considerar el volumen de extracción total de todos los pozos de extracción entre la extensión del municipio para englobar la cantidad de agua que es destinada para los distintos usos que se le da en Yucatán.

La comparación de los 31 municipios RPA del escenario de valoración ponderada con la reserva geohidrológica, generó tres municipios coincidentes, dos con factibilidad media (Homún y Huhí) y uno con factibilidad baja (Cuzamá) en el interior de la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes (Gaceta CyT México 2013), los municipios que quedaron dentro de la propuesta de reserva hidrológica para la zona metropolitana de Mérida (Pacheco 2013) son Cuzamá, Dzemu, Homún, Ixil, Izamal, Tekal de

Venegas y Telchac Puerto, debido a que poseen la mayor calificación para ser considerados dentro de ésta; en cambio, la

propuesta de Escolero et al. (2002) no concuerda con algún municipio en este escenario (Figura 5).

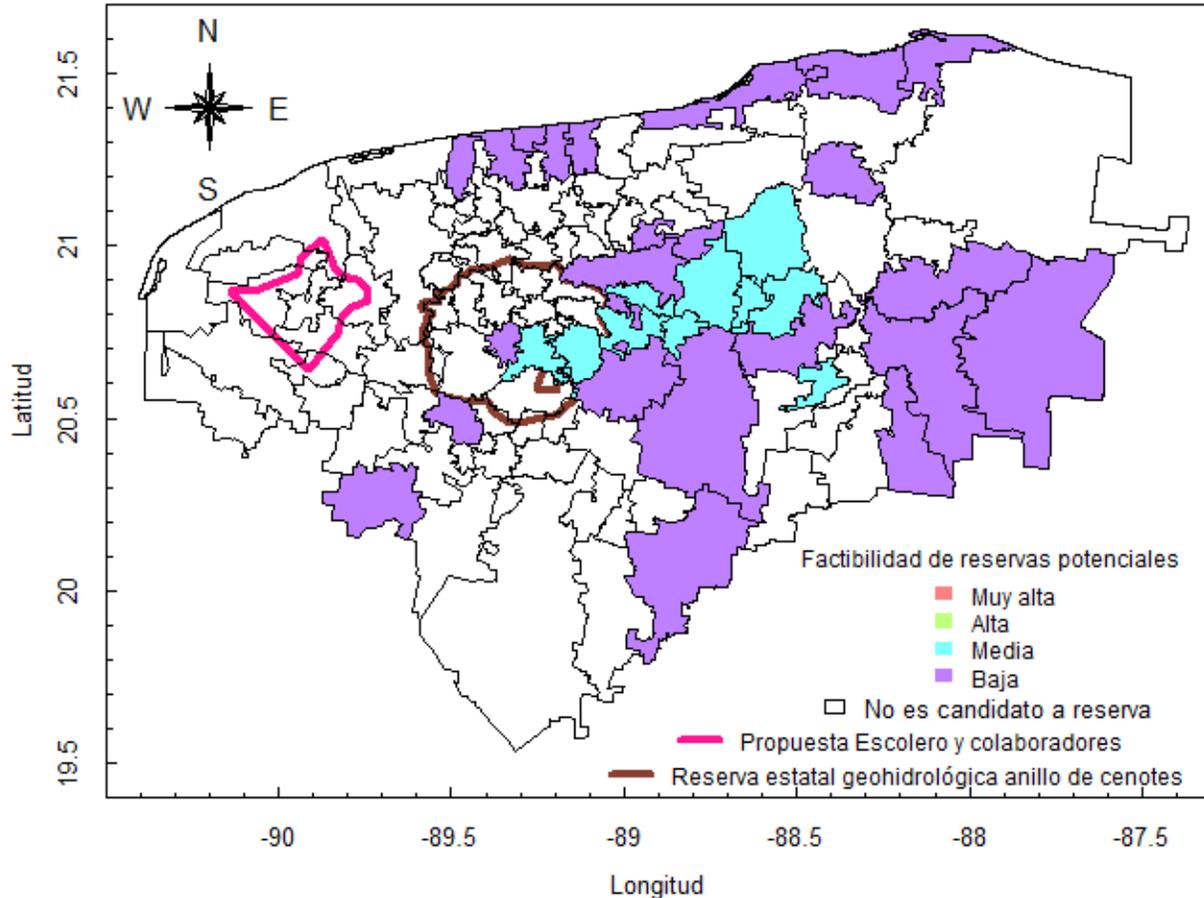


Figura 5. Reservas potenciales a partir del Escenario de valoración ponderada y su comparación con otros estudios.

De acuerdo con este escenario y valorando la calidad química del agua subterránea (Pacheco et al. 2004), se pueden distinguir a más de una RPA; la primera se consideraría como la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes (Gaceta CyT México 2013) con

tres municipios (Cuzamá, Homún y Huhí); la segunda con el conjunto de municipios a los que corresponden Cenotillo, Izamal, Kantunil, Sudzal, Tekal de Venegas y Tunkás; y, la tercera, los municipios Chemax, Chichimilá, Temozón y Valladolid, que son adyacentes.

## DISCUSIÓN

El desarrollo de este tipo de escenarios metodológicos es una herramienta útil para la

identificación de las RPA, además de que los datos que se necesitan para su construcción proceden de información existente, es decir, de datos publicados por dependencias de

gobierno, artículos de investigación, tesis, consultas de internet, consultas personales con expertos de diversas instituciones, etc.

La variable vulnerabilidad se propuso a partir del documento de Jiménez *et al.* (2012), que, aunque se relaciona con las zonas de protección, se incorporó debido a que un mapa que contenga esa información se basa en valorar el origen potencial de contaminación y la vulnerabilidad del acuífero. Además, en la propuesta de Pacheco (2013), uno de los criterios que empleó fue de igual manera, la vulnerabilidad, debido a que los mapas obtenidos resaltan zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación para el acuífero. Con lo que se hace énfasis en la importancia de esta variable para la identificación de reservas de agua con suelos kársticos. Sin embargo, en conversación con expertos, para el caso de algunos escenarios como el árbol de decisión, la vulnerabilidad no es muy selectiva para el tipo de factibilidad, debido a que la vulnerabilidad está más influenciada por el riesgo ambiental, es decir, si la vulnerabilidad es extrema o alta con bajo riesgo ambiental (escasas amenazas) podría tener una factibilidad mejor que si tuviera alto riesgo ambiental (numerosas amenazas), con lo que disminuiría la factibilidad para ser RPA; por lo que las amenazas serían más importantes que la vulnerabilidad ya que se podrían controlar por el uso de suelo en el futuro.

Con lo referente a las propuestas, existen diferencias: en Escolero *et al.* (2000, 2002, 2005) a través de los cinco años hubo un desarrollo para utilizar no sólo una metodología sino un conjunto de herramientas que la complementan para decretar una reserva de agua, es decir, además de incluir criterios hidrogeológicos y climáticos después agregó aspectos jurídicos, sociales, económicos, culturales y ambientales, y, finalmente añadió datos hidroquímicos, por lo que al ser tan amplia la metodología de

Escolero *et al.* (2002) en comparación con la metodología de los escenarios no coincidió su reserva con los resultados obtenidos en ellos. Los municipios de esta propuesta de reserva se descartaron por tener baja presencia de variables que los favorecieran como los sitios Ramsar, las ANP, los sitios importantes para la conservación y los servicios ambientales, además de tener en algunos casos variables negativas como los pozos de extracción y las actividades porcícolas y avícolas.

Es necesario resaltar que en los estudios de Escolero *et al.* (2000, 2005) se utilizaron las concentraciones de estroncio ( $\text{Sr}^{2+}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y la relación calcio/sulfatos ( $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ ) para determinar el área de la reserva, estos componentes se encuentran disueltos en el agua subterránea por la disolución de las rocas del acuífero de Yucatán. Ligado a lo anterior, los datos de conductividad hidráulica, las líneas equipotenciales, entre otros, proporcionaron información para que Escolero *et al.* (2000) escogieran la zona divisoria de aguas subterráneas como la mejor ubicación de la reserva de agua subterránea.

Otros autores, como Velázquez (1995), analizaron las distintas zonas del anillo, por medio de las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , cloruro  $\text{Cl}^-$  y la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ . Los iones como el  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , son trazadores naturales que ayudan a determinar la dirección de flujo local del agua subterránea y la división de la misma dentro del acuífero (Steinich *et al.* 1996); mientras que la relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  establece una distinción entre las aguas subterráneas (Velázquez 1995, Steinich *et al.* 1996).

Perry *et al.* (2002) con base en datos geoquímicos y la circulación del agua subterránea mostraron un modelo conceptual, en el que plantean la existencia de una división de aguas localizada entre Telchaquillo y Tekit; además hacen referencia a una zona de recarga, teniendo como base

que hacia las áreas de recarga se presenta un alto contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y bajo contenido de sólidos totales disueltos.

Además, Pérez *et al.* (2012) sugieren que el área central del anillo de cenotes es una zona de recarga del acuífero, esta zona tiene valores ligeramente ácidos de pH, baja conductividad eléctrica, y baja concentración de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), lo que proporciona evidencias de una débil influencia del agua de mar, concordando con lo sugerido por Perry *et al.* (2002) deducen que al presentar valores bajos en la relación  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ , de saturación de calcita, aragonita y dolomita el área está en equilibrio o subsaturada, lo que demuestra una zona de recarga (Batllori 2009). Por lo tanto, se deben tomar medidas relacionadas con las características del agua antes mencionadas, debido a que pueden ser útiles para la toma de decisiones de manejo y conservación, así como en las restricciones de actividades humanas, la selección de depósitos de basura, y la protección de áreas de recarga para ayudar a avanzar hacia el uso sustentable de los recursos del agua en esta área geográfica (Pérez *et al.* 2012).

Por lo anterior, la adecuación de una metodología como la de la CONAGUA, más la definición del tipo de agua con algunos trazadores naturales como  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , la relación de  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  y la localización de zonas de recarga por medio del pH, baja conductividad eléctrica y baja concentración

## CONCLUSIONES

El escenario lineal es la mejor estrategia para definir una reserva potencial de agua ya que selecciona los municipios con las condiciones más apropiadas y descarta los factores que son nocivos en una RPA. Los municipios con mayor factibilidad para ser una RPA para el Estado de Yucatán en el escenario lineal son Homún, Huhí, Izamal, Kantunil y Tunkás, ya

de iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) debe ser considerada en el caso de los sistemas kársticos especialmente en el acuífero de Yucatán.

La reserva estatal anillo de cenotes tuvo coincidencias con algunos municipios de los escenarios, debido, posiblemente, a que también se descartan zonas con actividades que amenazan al acuífero.

En la propuesta de Pacheco (2013), por medio del análisis multicriterio para la selección de la Reserva Hidrogeológica (RH) para la Zona Metropolitana de Mérida (ZMM), se utilizaron la distancia de la RH a la ZMM, volúmenes extraídos, vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, número de granjas porcinas, número de granjas avícolas, calidad bacteriológica del agua subterránea y calidad fisicoquímica, coincidiendo algunos de estos criterios con los propuestos en este trabajo, llegando a tener municipios en común que se encontraban dentro de la zona semicírculo de cenotes. Examinando lo anterior, el escenario lineal parece ser mejor para definir RPA, porque no considera los municipios que tienen variables negativas, además es eficaz y sencillo. Por lo tanto, los municipios con mayor factibilidad para ser RPA de acuerdo con el resultado del escenario lineal son Homún, Huhí, Izamal, Kantunil y Tunkás, debido a que todas las variables que los caracterizan son positivas.

que todas las variables que los caracterizan son las más adecuadas.

El escenario de árbol de decisión sugiere agrupar a Mayapán y Teabo dentro de la reserva estatal, además, destaca dos conjuntos de municipios para ser RPA, es decir, a Izamal, Kantunil, Sudzal y Tunkás como el primero, y el segundo a Cuncunul, Chankom, Chikindzonot, Kaua, Tahdziú, Tekom y

Yaxcabá, debido a que se encuentran contiguos y cumplen con ser de categoría media a muy alta, con factores negativos muy escasos.

En el escenario de valoración ponderada destacan tres conjuntos de RPA, el primero con los municipios Cuzamá, Homún y Huhí; el segundo corresponde a los municipios Cenotillo, Izamal, Kantunil, Sudzal, Tekal de Venegas y Tunkás; y, el tercero, considera a los municipios Chemax, Chichimilá, Temozón y Valladolid; aunque los municipios en este escenario tienen factibilidad media y baja, son los que tienen la menor presión por uso, mayor presencia de factores positivos y bajo contenido de factores negativos.

Los criterios propuestos para ser agregados a la metodología de CONAGUA son: la

vulnerabilidad, debido a las características del acuífero; los pozos de extracción, a causa del volumen extraído de agua y al número de pozos; y los servicios ecosistémicos, por el grado de importancia que tienen en Yucatán.

El escenario de árbol de decisión se puede mejorar, tanto en las reglas de decisión como en la secuencia de preguntas, debido a que los resultados pueden variar al cambiar el orden de las preguntas, por lo que es conveniente analizar con más detenimiento la posición de las preguntas. Y en el escenario de valoración ponderada, es importante que la variable excluyente sea definida de mejor forma, al igual que la variable disponibilidad del recurso hídrico, porque en consecuencia la mayoría de los municipios fueron descartados y la máxima calificación no se obtuvo.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con la beca otorgada por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para realizar los estudios de posgrado.

A la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA) del Gobierno del

Estado de Yucatán, a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Organismo de Cuenca de la Península de Yucatán y a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) Delegación Yucatán, por el apoyo de datos para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

Batllori S.E.A. (2009). Programa hídrico especial de la región geohidrológica metropolitana de Yucatán para el fomento de los servicios ambientales. Mérida, Yucatán, México: Secretaria de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Gobierno del Estado de Yucatán (en prensa).

Batllori S.E. (2014). Servicios de los ecosistemas para el bienestar humano. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán (en prensa).

CONAGUA (2011). Comisión Nacional del Agua. Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F.

- Escolero O.A., Marin L.E., Steinich B. and Pacheco J. (2000). Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: The Merida Yucatan example. "Landscape and Urban Planning" 51:53-62.
- Escolero O., Marin L., Steinich B., Pacheco J., Cabrera S. and Alcocer J. (2002). Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: The Merida, Yucatan, Mexico case study. "Water Resources Management" 16:351-367.
- Escolero O., Marin L., Steinich B., Pacheco J., Molina-Maldonado A. and Anzaldo J. (2005). Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, Mexico. "Geofísica Internacional" 44(3):301-314.
- Gaceta CyT México. (mayo 2013/Panorama mayo 2013). Tendrá Yucatán la primera reserva hidrogeológica del país Recuperada 2 de junio del 2013, de [www.gacetacyt.org](http://www.gacetacyt.org)
- Jiménez M.A., Carrasco C.F. and Martínez N.C. (2012). Protection of groundwater intended for human consumption: a proposed methodology for defining safeguard zones. "Environmental Earth Sciences" 65:2391-2406.
- Neville A. (2010). Ecosystems and human well-being: A manual for assessment practitioners. Washington, DC, Island Press.
- Pacheco A.J.G. (2013). Reserva hidrogeológica para el abastecimiento de agua con calidad para la Zona Metropolitana de Mérida, Yucatán. Informe final, Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Yucatán.
- Pacheco A.J., Cabrera S.A. y Pérez C.R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. "Ingeniería" 8(2): 165-179.
- Pérez C.R., Pacheco A.J., Euán A.J.I. and Hernández A.H. (2012). Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. "Journal of Cave and Karst Studies" 74(1): 90-102.
- Perry E., Velázquez O.G. and Marín L. (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. "International Geology Review" 44(3): 191-221.
- Quiñones R.L.R. (2016). "Delimitación de una unidad de reserva hidrológica en el karst del estado de Yucatán integrando los servicios ambientales". Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.
- Steinich B., Velázquez O.G., Marín L.E. and Perry E. (1996). Determination of the ground water divide in the karst aquifer of Yucatán, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data. "Geofísica Internacional" 35(2): 153-159.
- Velázquez O.G. (1995). "Estudio geoquímico del anillo de cenotes, Yucatán". Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.