



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“SIMULACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO
EN EL ACUÍFERO DE YUCATÁN”**

TESIS

PRESENTADO POR:
I.C. BERENICE JUÁREZ SANTANA

EN OPCIÓN AL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA
OPCIÓN AMBIENTAL

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2016

Aunque este trabajo hubiere servido para el
EXAMEN DE GRADO y hubiere sido
aprobado por el H. SÍNODO, sólo el
AUTOR es responsable de las doctrinas
emitidas en él.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de postgrado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán; así como por la beca mixta concedida para realizar una estancia de Movilidad en Texas A&M University, E.U.A.

Al grupo de Geo-ecohidrología de Texas A&M University, por su apoyo y asesoría durante la estancia de movilidad.

Parte de los resultados de este trabajo fueron aceptados para participar en eventos técnicos especializados.

- 2° Foro de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico, Innovación y Exposición Cultural del “Sistema Hidrológico de la Cuenca Península de Yucatán”. Del 10 al 12 de Octubre del 2016. Campeche, México. Organizado por el Consejo Cuenca de la Península de Yucatán, CONAGUA. Presentación oral con el título: “Modelación numérica del acuífero del estado de Yucatán”.
- VI Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, Sede Regional Sureste. 18 y 19 de Octubre del 2016. Mérida, México. Presentación oral con el título: “Impacto del cambio climático en la recarga y flujo subterráneo del acuífero del Estado de Yucatán”.

RESUMEN

Investigaciones recientes indican que el cambio climático está provocando un aumento en las temperaturas y variaciones en los patrones de precipitación, alterando el ciclo hidrológico natural. Debido a que el Estado de Yucatán se abastece principalmente de agua subterránea, es importante estudiar los posibles impactos que las variaciones climáticas podrían tener sobre el acuífero.

Para esto, es necesario conocer y entender los procesos hidrogeológicos que definen el comportamiento hídrico del sistema. Una forma de lograrlo es mediante la modelación numérica, la cual es una herramienta muy utilizada en investigación y gestión de los recursos hídricos porque permite simular el flujo subterráneo aplicando ecuaciones que representan lo que ocurre en la realidad.

El objetivo de esta investigación fue analizar las variaciones de la recarga futura bajo escenarios de cambio climático y su relación con el flujo subterráneo en el acuífero del Estado de Yucatán.

Para lograrlo se realizó primero un modelo de flujo de agua subterránea en régimen estacionario de la zona de estudio con ayuda del software PMWIN considerando al acuífero como un medio poroso equivalente (homogéneo e isótropo). Se recolectaron datos hidrogeológicos de la literatura, tales como potenciales hidráulicos en pozos, precipitación, temperatura, extracciones, líneas preferenciales de flujo y otras propiedades del medio como su geomorfología y geología. La recarga media anual y las extracciones fueron estimadas y con toda la información recabada se estableció un modelo conceptual del sistema. Para la modelación se definieron cuatro esquemas con características variadas para simular el comportamiento del flujo del aguas subterránea. El parámetro utilizado para la calibración fueron los niveles piezométricos de los pozos.

El modelo calibrado se utilizó para simular el comportamiento del flujo del agua subterránea en el acuífero bajo diferentes condiciones climáticas futuras. Se ejecutó manteniendo las mismas condiciones de calibración, pero variando la recarga, la cual se estimó utilizando las salidas de precipitación y temperatura de los escenarios de cambio climático del Ensemble multimodelo (REA) evaluando dos forzamientos radiativos RCP 4.5 (emisiones bajas) y 8.5 (emisiones altas), para dos horizontes: futuro cercano y lejano.

Los resultados obtenidos se compararon mediante un análisis de sensibilidad. La mejor calibración se logró con el esquema de cinco estratos, que considera cuatro zonas geohidrológicas con conductividades hidráulicas diferentes: plataforma caliza, anillo de cenotes, caliche y Sierrita de Ticul. La Zona de Ticul reportó una conductividad hidráulica mayor por un orden de magnitud que la plataforma caliza, posiblemente debido a la existencia de la falla de Ticul, la cual podría hacer cambiar las condiciones del flujo del agua subterránea en la zona y actuar como una frontera de flujo.

Por otro lado los escenarios de cambio climático proyectaron un descenso en las precipitaciones y un aumento de las temperaturas en la zona de estudio, generando una disminución general de las tasas de recarga. De acuerdo a las simulaciones, la reducción de la recarga provocará una disminución de los niveles piezométricos, siendo el escenario de emisiones altas a futuro lejano el de mayor descenso. Un decremento en el nivel freático supondría que el equilibrio hidrostático entre agua salada-agua dulce pueda verse afectado y como consecuencia la calidad del recurso hídrico.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	5
1.1.1. General	5
1.1.2. Particulares	5
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Balance hidrológico	6
2.2. Teoría de Flujo	8
2.3. Hidrogeología kárstica	10
2.4. Intrusión Marina.....	11
2.5. Modelación matemática de flujo de agua subterránea	13
2.6. Escenarios de cambio climático	18
2.7. Evolución de los Escenarios de Cambio Climático.....	19
2.7.1. Escenarios de Cambio Climático en México	22
2.8. Descripción de la zona de estudio.....	26
2.8.1. Localización y Extensión	26
2.8.2. Clima	27
2.8.3. Geología.....	27
2.8.4. Hidrogeología.....	30
2.8.5. Intrusión Marina	34
2.8.6. Fuentes de abastecimiento	35
2.8.7. Vulnerabilidad a la contaminación.....	36
2.8.8. Situación del acuífero.....	37
III. METODOLOGÍA.....	40
3.1. Primera etapa	41
3.1.1. Recopilación de la información y elaboración de la base de datos	41
3.1.2. Elaboración de mapas de contornos.....	46
3.1.3. Desarrollo del modelo conceptual.....	46
3.2. Segunda etapa	47
3.2.1. Selección del modelo matemático del flujo subterráneo.	47
3.2.2. Construcción del Modelo.....	49

3.2.3. Ejecución y calibración.....	50
3.3. Tercera Etapa.....	51
3.3.1. Integración del modelo de flujo calibrado con los escenarios de cambio climático	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1. Primera etapa	53
4.1.1. Cálculo de Recarga.....	53
4.1.2. Cálculo de Potenciales Hidráulicos	55
4.1.3. Extracciones.....	57
4.1.4. Modelo Conceptual	57
4.2. Segunda etapa	60
4.2.1. Construcción del modelo de flujo	60
4.2.2. Simulación como Medio Poroso Equivalente	61
4.2.3. Definición de fronteras	61
4.2.4. Definición de la cuadrícula	62
4.2.5. Espesor y estratos del acuífero.....	64
4.2.6. Parámetros del sistema.....	64
4.2.7. Consideraciones de la modelación.....	67
4.2.8. Esquemas y parámetros de calibración	67
4.2.9. Evaluación de la Calibración	74
4.3. Tercera etapa	77
4.3.1. Escenarios de cambio climático	77
4.3.2. Integración del modelo de flujo calibrado con los escenarios de cambio climático	86
V. CONCLUSIONES	90
VI. REFERENCIAS.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos de Circulación General utilizados para generar el ensamble multimodelo.....	24
Tabla 2. Rangos de valores de conductividad hidráulica reportados para la Península de Yucatán.	39
Tabla 3. Valores reportados de porosidad en el estado de Yucatán.	39
Tabla 4. Volumen de agua extraído en los Campos de Pozos que abastecen a la ciudad de Mérida.....	46
Tabla 5. Valores Estimados por PEST para el esquema 2.	69
Tabla 6. Valores Estimados por PEST para el esquema 3.	71
Tabla 7. Valores Estimados por PEST para el esquema 4.	73
Tabla 8. Errores medios de cada esquematización.....	75
Tabla 9. Comparación de los resultados promedios obtenidos entre los escenarios base y las simulaciones.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama conceptual de hidrología superficial.....	7
Figura 2. Relación de la carga hidráulica y la interfase salina. Tomada de Barlow (2003).....	12
Figura 3. Esquema de la metodología aplicada en la elaboración de un modelo. Tomado de Delgado et al. (2009).	17
Figura 4. Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia.....	26
Figura 5. Corte unidades geomorfológicas (Modificado de Villasuso y Méndez, 2000).	29
Figura 6. Estructuras hidrogeológicas del estado de Yucatán. Elaboración propia con archivos shape del INEGI y SEDUMA.	31
Figura 7. Líneas preferenciales de flujo subterráneo en la Península de Yucatán. Tomado de Bauer-Gottwein et al. (2011).....	33
Figura 8. Regiones Hidrogeológicas del Estado de Yucatán. Con archivos shape del INEGI.	34
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología.....	40
Figura 10. Ubicación de los pozos de observación. Elaboración propia.....	44
Figura 11. Escenario base de Precipitación para el período (1980-2012).....	54
Figura 12. Escenario base de Temperatura media anual para el período (1980-2012).	54
Figura 13. Escenario base de Recarga para el período (1980-2012).....	55
Figura 14. Líneas equipotenciales elaboradas con las bases de datos.	56
Figura 15. Localización de los Pozos de extracción del REPDA.....	57
Figura 16. Fronteras de flujo del modelo.	62
Figura 17. Cuadrícula del modelo y reubicación de la frontera de potencial constante.....	63
Figura 18. Ubicación del mapa de volúmenes de extracción de agua en el modelo.	66
Figura 19. Contornos equipotenciales para el esquema 1	68
Figura 20. Diagrama del esquema 2.	69
Figura 21. Contornos equipotenciales para el esquema 2.	70
Figura 22. Diagrama del esquema 3.	70
Figura 23. Contornos equipotenciales para el esquema 3.	72
Figura 24. Diagrama del esquema 4.	73
Figura 25. Contornos equipotenciales para el esquema 4.	74
Figura 26. Conceptualización de los escenarios de cambio climático.....	78
Figura 27. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro cercano.....	79
Figura 28. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro cercano	79
Figura 29. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro lejano.	80
Figura 30. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro lejano.	80

Figura 31. Escenario de Temperatura del Estado de Yucatán. Emisiones bajas futuro cercano.....	82
Figura 32. Escenario de Temperatura del estado de Yucatán. Emisiones altas futuro cercano.	82
Figura 33. Escenario de Temperatura del estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro lejano.	83
Figura 34. Escenario de Temperatura del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro lejano.	83
Figura 35. Escenario de Recarga en el Estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro cercano.	84
Figura 36. Escenario de Recarga en el Estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro cercano.	84
Figura 37. Escenario Recarga en el Estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro lejano.....	85
Figura 38. Escenario de Recarga del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro lejano.	85
Figura 39. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones bajas, futuro cercano.	88
Figura 40. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones altas, futuro cercano.	88
Figura 41. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones bajas, futuro lejano.....	89
Figura 42. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones altas, futuro lejano.....	89

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de la vida ya que está involucrada en todos los aspectos sociales, económicos, ambientales, políticos y culturales del ser humano. Sin embargo, su disponibilidad con calidad y cantidad sostenible se ve amenazada por factores como el clima, ya que ambos se vinculan entre sí, a través de un gran número de conexiones y ciclos de retroalimentación.

Uno de los principales retos que enfrenta la humanidad actualmente es la gestión del agua, encontrar un equilibrio entre el agua disponible y su uso en las actividades productivas, el abastecimiento público y servicios ambientales, tanto en el presente como en el futuro. Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) modificará las condiciones que rigen el clima, alterando el ciclo hidrológico natural.

En las últimas décadas, la preocupación por el cambio climático y los recursos hídricos se ha traducido en una gran variedad de estudios sobre impactos y adaptaciones posibles que, en la mayoría de los casos, han sido enfocados a los recursos hídricos superficiales. A pesar de que las aguas subterráneas son una parte esencial del ciclo hidrológico, el nivel de atención que se le ha prestado a este recurso, especialmente en los países en desarrollo, ha sido limitado. No obstante, en fechas recientes es posible encontrar una variedad de trabajos que se centran en la relación agua subterránea-cambio climático en diferentes regiones geográficas y climatológicas del mundo, que utilizan diversos métodos y enfoques, generando una amplia gama de resultados. De manera general, algunos de los riesgos potenciales esperados del cambio climático en las aguas subterráneas incluyen la reducción de la recarga, la intrusión de agua de mar a los acuíferos costeros, la contracción de los lentes de agua dulce y la exacerbación de la contaminación. Sumado a esto, las aguas subterráneas también se verían afectadas por impactos no climáticos

derivados de las actividades humanas como el crecimiento demográfico, la demanda de alimentos y el uso de la tierra (Clifton et al. 2010).

En algunos trabajos se han reportado impactos negativos en la recarga de los acuíferos. Según los escenarios de cambio climático utilizados, se espera que los patrones espacio temporales de la recarga se modifiquen y que la cantidad del recurso que llega a convertirse en agua subterránea disminuya, como consecuencia de una menor precipitación y una mayor evapotranspiración (Yusoff et al. 2002; Neukum y Rafiq 2012; Samper et al. 2005).

Contrario a lo anterior, algunas investigaciones indican que podría presentarse un aumento en la recarga del agua subterránea en regiones con climas fríos ubicadas al norte del globo, sobre todo durante la primavera debido a la reducción de las capas de hielo (Scibek y Allen 2006; Van Roosmalen et al. 2007; Stoll et al. 2011).

En otros casos se reporta que la variación cuantitativa de la recarga es mínima, pero la dinámica espacio temporal presenta grandes variaciones (Kirshen 2002; Allen et al. 2004; Wegehenkel et al. 2010; Raposo et al. 2013).

El acuífero del Estado de Yucatán es un sistema kárstico no confinado, a excepción de una región confinada conocida como “caliche” que corre paralela a la costa, donde se presenta el fenómeno de intrusión marina. Se caracteriza por un relieve casi plano, una alta permeabilidad y ausencia de corrientes superficiales, lo que permite una rápida infiltración que recarga el sistema (Sánchez-Pinto et al. 2005). Como consecuencia de lo anterior, la principal fuente de abastecimiento de agua para la población de Yucatán es subterránea.

Las modificaciones que el cambio climático provoque en las condiciones que dictan la composición del clima y que son parte fundamental del ciclo hidrológico, podrían tener un impacto en el flujo y almacenamiento del agua subterránea del Estado de Yucatán. Estas variaciones en los niveles de agua subterránea aunado al incremento

de la demanda, debido al crecimiento poblacional, podría provocar la modificación del fenómeno de intrusión salina y, consecuentemente, el deterioro de la calidad del agua afectando de manera directa a la población.

A pesar del creciente número de estudios realizados en todo el mundo, en México y en especial en el Estado de Yucatán, las investigaciones que relacionan el cambio climático y su influencia en las aguas subterráneas son escasas. Juárez (2012), estudió el impacto del cambio climático en la disponibilidad del agua del Estado de Yucatán con base en escenarios regionales de cambio climático, comparando la disponibilidad actual con escenarios futuros (2020 y 2050) construidos mediante proyecciones de precipitación, población, superficie sembrada y volúmenes de agua concesionada, para las cuatro regiones hidrogeológicas que componen el Estado. De manera general, los resultados mostraron una disminución de la disponibilidad del agua y un aumento del grado de presión sobre el recurso hídrico, en especial en la región Anillo de cenotes y, Cerros y Valles.

Cuantificar el impacto a los recursos hídricos subterráneos requiere no solo de pronósticos de la variación de los principales parámetros climáticos, sino también de una correcta estimación del balance hidrológico. Esto a menudo es una tarea difícil de realizar principalmente por la falta de mediciones directas de los parámetros que lo componen, y por la variación espacial y temporal de los mismos, debido a la complejidad natural del sistema.

Sin embargo, analizar los procesos hidrológicos que definen el comportamiento hídrico de una región es posible a través de la modelación matemática, la cual es una herramienta muy utilizada en la investigación, simulación, valoración, predicción, evaluación y gestión de los recursos hídricos, porque permite simular el flujo subterráneo aplicando un conjunto de ecuaciones y supuestos que expresan la naturaleza del sistema real.

Conocer el posible impacto del cambio climático sobre el acuífero de Yucatán utilizando un modelo hidrogeológico para simular el comportamiento del flujo del acuífero bajo diferentes condiciones climáticas futuras, permitiría tener una visión de qué tan vulnerable podría estar el agua subterránea si las condiciones climáticas actuales tuvieran variaciones. Los resultados servirían a los tomadores de decisiones como una referencia para estudios posteriores y para tomar medidas que ayuden a mitigar los posibles impactos y gestionar de manera más sustentable y eficiente el uso de este recurso.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. General

Determinar el impacto del cambio climático en la recarga del acuífero del Estado de Yucatán.

1.1.2. Particulares

- Revisión, recopilación y tratamiento de la información que permita desarrollar un modelo conceptual para el acuífero del Estado de Yucatán.
- Establecer, ejecutar y calibrar el modelo hidrogeológico del estado de Yucatán.
- Obtener los escenarios de cambio climático de recarga futura, integrarlos al modelo hidrogeológico calibrado, y simular los posibles impactos que las variaciones en la recarga tendrían en el acuífero del Estado de Yucatán.

II. MARCO TEÓRICO

En el subsuelo se encuentran formaciones geológicas consistentes a veces en rocas porosas o fracturadas, las cuales pueden contener agua en estos poros. A esta agua se le denomina agua subterránea y los terrenos que la contienen y la pueden transmitir se les conocen como acuíferos. El agua subterránea puede hallarse en espacios porosos de rocas sedimentarias y estratos no-consolidados y consolidados, en entradas y fisuras de roca dura, en zonas de falla o en cavernas kársticas, y constituye una de las fases o etapas del ciclo hidrológico (Deming 2002).

El agua subterránea circula a través de la roca con una velocidad proporcional al tamaño de los poros o conductos y a la presión a la que se encuentre sometida, finalmente se almacena saturando todos los orificios y alcanzando un cierto nivel próximo a la superficie llamado "nivel freático". El nivel freático está sujeto a oscilaciones de acuerdo con la recarga, desciende durante las épocas de sequía o de máximo estiaje por efecto de la evaporación, mientras que cuando la precipitación es abundante asciende.

2.1. BALANCE HIDROLÓGICO

El balance hídrico de un sitio se establece para un período dado, por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en un lugar y tiempo determinado. Se basa en el axioma de conservación de masa de Lavoisier, que en dinámica de fluidos se conoce como ecuación de la continuidad.

$$\textit{Entradas} - \textit{Salidas} = \textit{Variación en el almacenamiento} \quad (1)$$

Las aportaciones de agua (entradas) se efectúan gracias a las precipitaciones. Las pérdidas (salidas) se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la

transpiración de las plantas, lo cual se designa bajo el término evapotranspiración (Figura 1).

De manera más detallada, la ecuación de balance para un área específica puede expresarse como:

$$P = ETP + I - ES - \Delta S \quad (2)$$

Donde:

P= precipitación [mm]

ETP= evapotranspiración [mm]

I= infiltración [mm]

ES= escurrimiento superficial [mm]

ΔS = variación del almacenamiento [mm]



Figura 1. Diagrama conceptual de hidrología superficial. Elaboración propia.

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico, siendo el principal proceso por el cual el agua retorna a la Tierra. La precipitación es el agua liberada

desde las nubes que alcanza la superficie de la tierra en forma de lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve, aguanieve y granizo.

La evapotranspiración es el proceso físico que resulta de combinar la evaporación y transpiración. La transpiración es la emisión de agua en estado de vapor a la atmósfera, principalmente a través de los estomas de las hojas de las plantas, mientras que la evaporación es la emisión de agua en estado de vapor desde un suelo o superficie acuosa a la atmósfera (Martínez 2002). Aunque la evapotranspiración real es considerada como un elemento de gran importancia en un balance hídrico, su medición en campo es muy difícil; es por eso, que las mediciones que se tienen de este parámetro son insuficientes o inexistentes. Por ese motivo normalmente el valor de la evapotranspiración se estima a partir de la utilización de diferentes modelos empíricos (Pereyra et al. 2008).

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie y posteriormente, superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. Se denomina recarga a la porción de agua que efectivamente alcanza los mantos acuíferos y contribuye al almacenamiento de los mismos (Custodio y Llamas 1976).

2.2. TEORÍA DE FLUJO

La ecuación de flujo del agua subterránea se basa en dos principios fundamentales. El primero es el principio de balance de masas, el cual para un volumen de acuífero determinado se expresa como la cantidad de masa de fluido que entra y sale en un volumen elemental de control. El segundo es el principio del balance de momento, el cual se basa en la Ley de Darcy, que establece que el agua fluye de los niveles de mayor a menor carga hidráulica (energía mecánica) por lo que sus variaciones provienen principalmente de las diferencias de elevación y de presión.

La Ley de Darcy establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo (Tinajero 1982).

$$Q = K * i * A \quad (3)$$

Donde:

Q= cantidad de agua drenada a través de la muestra por unidad de tiempo [m³/s].

K= conductividad hidráulica medida en unidades de longitud por tiempo [m/s]

i= gradiente hidráulico (adimensional)

A= área de sección transversal en unidades cuadradas de longitud [m²]

Se llama gradiente hidráulico (i) a la razón de cambio de la carga hidráulica con respecto a la distancia. Corresponde a la pérdida de energía que sufre el agua por fricción durante su recorrido por el material geológico, por unidad de longitud.

La conductividad hidráulica (K) se define como el caudal que pasa por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente también unitario a una temperatura fija o determinada (Custodio y Llamas 1976). Aunque K tiene unidades de velocidad, en realidad no corresponde a la velocidad del flujo subterráneo. La conductividad hidráulica representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar agua, por unidad de área transversal a la dirección del flujo (Casares 2006). Si la conductividad hidráulica es la misma en cualquier punto de la formación geológica, ésta es homogénea y si además es la misma en cualquier dirección de la formación, se dice que es isótropa.

A su vez la transmisividad (T) representa la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través del espesor (b) saturado de un acuífero y está en función de la conductividad hidráulica (K) (Hudak 2005).

$$T = K * b \quad (4)$$

La porosidad representa el volumen de los intersticios granulares de un medio poroso con respecto al volumen total del material. Sin embargo, aunque la porosidad representa el volumen de agua que un acuífero puede almacenar no indica cuánta agua puede ser extraída. La porosidad efectiva es el porcentaje de volumen de una muestra de roca o sedimentos entre los cuales el agua puede fluir (Ernstson y Kirsch 2006).

Cuando un material saturado drena agua mediante la fuerza de gravedad, únicamente cede una parte del volumen total almacenado en él. La cantidad de agua que un volumen unitario del material deja escapar cuando esto sucede, se denomina rendimiento específico. Aquella parte del agua que no se puede remover por drenaje superficial, retenida contra la fuerza de gravedad por capilaridad y atracción molecular, se denomina retención específica. Valores grandes de rendimiento específico se asocian, por lo general, con sedimentos más gruesos pues las aberturas más grandes entre granos facilitan el drenado. Por el contrario, en sedimentos finos los valores son menores porque hay mucha área de superficie total a la cual el agua puede adherirse. El rendimiento específico sumado a la retención específica, es igual a la porosidad (Fetter 2001).

2.3. HIDROGEOLOGÍA KÁRSTICA

Un acuífero kárstico es un sistema hidrogeológico constituido por rocas sedimentarias consolidadas, cuyos poros o fisuras se han agrandado hasta formar grandes conductos y cuevas que dan lugar a una compleja red con una alta variabilidad dinámica en el espacio y tiempo. Este ensanchamiento es producido por un proceso químico de disolución de las rocas en presencia de agua y dióxido de carbono conocido como karstificación (Custodio y Llamas 1976).

Los acuíferos kársticos pueden desarrollarse en rocas solubles en cualquier región, desde zonas costeras al nivel del mar hasta zonas de montaña, siempre que se den condiciones geológicas, climáticas y morfológicas adecuadas.

Los acuíferos kársticos muestran singularidades que les diferencian del resto de los acuíferos en su exploración, explotación y gestión. Presentan, por un lado, características comunes a la red hidrográfica superficial debido a una red de fisuras, fracturas y conductos interconectados (drenaje organizado y heterogéneo) y, por otro, características propias de los acuíferos porosos. Esto da como resultado una alta heterogeneidad y anisotropía en los cuales se presentan dos tipos de infiltración: una difusa, a través de la porosidad y fisuras que implica una recarga lenta, y otra más localizada y rápida, a través de los conductos (Antigüedad 2000).

El análisis del flujo en los acuíferos kársticos resulta una tarea de gran complejidad, ya que la propia geometría y demás características de estos sistemas fracturados, por lo general, no han sido estudiados a detalle y por lo tanto no es posible modelar de un modo explícito y por separado las diferentes fracturas o matriz de bloques (Cortazar 2013).

2.4. INTRUSIÓN MARINA

Todo sistema kárstico es muy sensible, en general, a los procesos de contaminación. Los acuíferos kársticos que están conectados directamente con el mar, además de ser vulnerables a la contaminación proveniente de la superficie, tienen el riesgo de contaminación por intrusión marina (Custodio 1975).

La intrusión marina es un fenómeno que ocurre de manera natural en los acuíferos costeros, en donde el agua dulce flota sobre una zona de agua salada que se adentra al continente debido a las diferencias de presión y densidad de las masas de agua en contacto y está en función del caudal de agua dulce vertido al mar (Back y Lesser 1981). La relación Ghyben/Herzberg supone que existe equilibrio hidrostático entre el agua dulce y el agua salada en contacto. Entre las hipótesis que plantea, se tiene que el flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical; no existe flujo de agua salada, la interfaz

es un plano donde no existe una zona de mezcla y finalmente que en un punto cualquiera, las presiones deben equilibrarse (Fetter 2001).

La máxima penetración de la cuña de agua salada está limitada por el fondo impermeable del acuífero (Figura 2), que se produce cuando:

$$Z_o = \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \right) h_d \quad (5)$$

Donde:

Z_o = profundidad de la base del acuífero bajo el nivel del mar [m].

h_d = potencial sobre el nivel del medio del mar del punto en cuestión [m].

γ_s = peso específico del agua salada [g/cm^3].

γ_d = peso específico del agua dulce [g/cm^3]

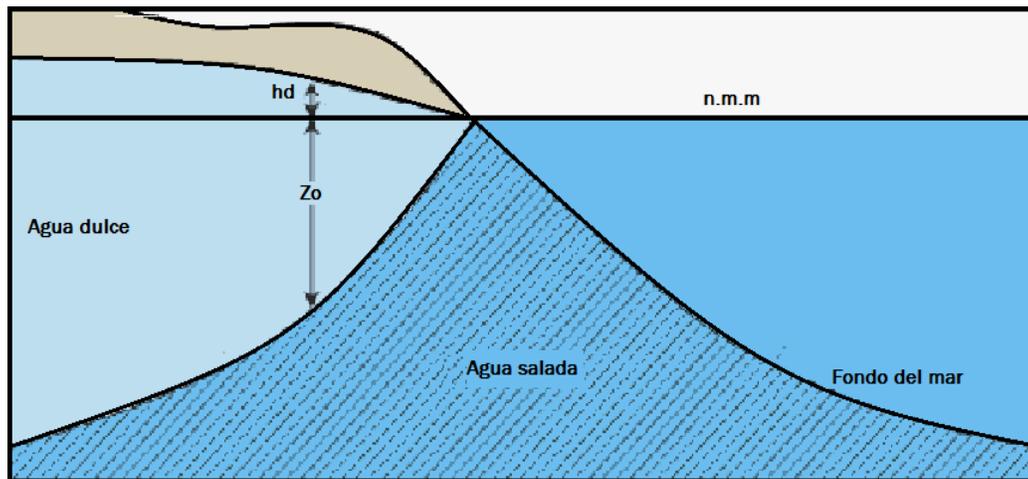


Figura 2. Relación de la carga hidráulica y la interfase salina. Modificado de Barlow (2003).

Aunque la diferencia entre la densidad del agua salada y agua dulce es pequeña, la ecuación anterior indica que este contraste de densidades sitúa la interfase salina a una profundidad bajo el nivel de mar igual a 40 veces la cota de agua dulce sobre el nivel del mar.

$$Z_o = 40h_d \quad (6)$$

La relación de Ghyben-Herzberg describe correctamente la posición de la interfase salina si el ancho de la zona de mezcla es pequeño comparado con la profundidad de la base del acuífero y el movimiento del agua es prácticamente horizontal.

Cabe mencionar que en la realidad, el agua dulce y el agua salada no se separan de manera abrupta, sino que se mezclan en una zona conocida como interfase. Esta zona de mezcla se puede desplazar por efecto de la disminución del flujo de agua dulce al mar, el aumento de la permeabilidad y heterogeneidad, la diferencia de densidades y de las oscilaciones de las mareas (Cooper 1959).

La explotación de las aguas dulces subterráneas tiende a incrementar el avance de la cuña salina y puede provocar la salinización de las aguas subterráneas del acuífero, debido al efecto de mezcla que se produce entre las aguas de mayor salinidad provenientes del mar y las aguas de menor concentración de sales del acuífero costero. La salinización se convierte entonces en un problema de calidad del agua pues es una de las formas de contaminación del agua, encareciendo los sistemas de tratamiento y por ello, en una restricción de la capacidad de los acuíferos de satisfacer la demanda de agua para consumo humano.

2.5. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

El hombre siempre ha tratado de explicar el mundo que lo rodea y con base en ello, reducir los peligros que le acechan o beneficiarse de los recursos a su alcance.

Los modelos describen de manera aproximada los fenómenos del mundo real, considerando sólo las propiedades más importantes y básicas de los sistemas a estudiar con un grado de precisión determinado. Al igual que el clima, los procesos hidrológicos que describen el comportamiento hídrico de una región son complejos y variables, pero también pueden ser analizados a través de la modelación. Por tal razón, se han desarrollado diferentes técnicas que permiten simular el flujo de los

recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, en una variedad de ambientes hidrogeológicos (Belmonte y Núñez 2006).

De manera general, la metodología clásica en modelación incluye el desarrollo de un modelo teórico o conceptual que es el que manifiesta el entendimiento de un proceso o sistema, la adquisición de datos sobre un sistema piloto, la calibración y validación del modelo con datos reales, y el refinamiento, la estandarización y la automatización de su aplicación.

Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación simplificada del sistema de flujo de agua subterránea, frecuentemente de manera gráfica (diagrama o sección transversal), que define las unidades hidroestatigráficas de interés y todas las fronteras del sistema (ERD 2000); comprende también las características de los parámetros hidráulicos de cada unidad, las posiciones de las superficies freáticas y piezométricas, y por tanto las condiciones del flujo subterráneo (Betancur y Palacio 2009).

Construir un modelo conceptual apropiado de un acuífero es una de las partes fundamentales de los procesos de modelación. Sin embargo, la cantidad de detalle requerido depende de la escala de interés (Ford y Williams 2007). En acuíferos kársticos se utilizan cuatro tipos de modelos conceptuales para caracterizar y simular el flujo de agua subterránea: modelos de parámetros combinados, modelos continuos, modelos discretos y modelos de doble porosidad (Rahnemaei et al. 2005; Painter et al. 2004).

- Los modelos de parámetros combinados incluyen un balance de agua simple y modelos de series de tiempo; estos modelos no están basados en hechos físicos ni emulan la física del flujo.
- Los modelos continuos asumen que el flujo de agua subterránea en acuíferos kársticos es similar al flujo en medios porosos no consolidados; para estos

modelos las celdas de la malla representan un conducto al cual se le asigna una alta transmisividad y bajo almacenamiento. Cuando se realiza la modelación de un medio poroso considerándolo como un medio continuo, se asume implícitamente que el dominio, para el que la ecuación de flujo se establece satisface la condición del volumen elemental representativo.

- Los modelos discretos, por otro lado, representan los conductos kársticos como tubos embebidos en un sistema de flujo difuso; estos modelos están vinculados intrínsecamente a los modelos de elemento finito pero son de uso limitado a escala de acuífero debido al número de intersecciones o nodos ya que requieren que la carga hidráulica sea calculada en cada intersección, lo que presupone un mayor esfuerzo de cálculo.
- Finalmente, en los de porosidad dual se modelan dos sistemas de flujo que representan un sistema de flujo difuso y otro de conductos. Son actualmente los modelos más útiles para simular las condiciones del acuífero observados en karst. En este modelo las celdas computacionales individuales se consideran lo suficientemente grandes para que la asignación de propiedades efectivas a la matriz rocosa sea significativa. A pesar de esta simplificación, la simulación numérica de acuíferos fracturados mediante este enfoque resulta bastante complejo y laborioso (Ford y Williams 2007).

Algunos experimentos se han llevado a cabo con el objetivo de identificar las limitaciones y ventajas de los modelos continuos y de porosidad dual para simular el flujo de agua subterránea en acuíferos kársticos. Los resultados sugieren que los modelos continuos son flexibles para un amplio rango de condiciones; sin embargo, resultan imprecisos si la densidad de los conductos se hace grande (Painter et al. 2004).

Un modelo matemático simula el flujo de agua subterránea indirectamente debido a la aplicación de una ecuación que puede representar lo que ocurre en el sistema y

puede resolverse analítica o numéricamente. El conjunto de comandos que se utilizan para resolver un modelo matemático de manera numérica mediante una computadora forma el “programa” o “código”. Este código es genérico, porque cada modelo incluye condiciones de frontera y condiciones iniciales tanto como mallas para poner en puntos específicos valores de algunos parámetros y esfuerzos hidrológicos (Flores et al. 2014).

En los últimos años se ha incrementado el uso de modelos determinísticos de simulación numérica de agua subterránea para analizar el flujo y transporte de los contaminantes, con el propósito de predecir las respuestas de los sistemas ante cambios en los esfuerzos hidrológicos y los contaminantes introducidos a estos sistemas. Los modelos numéricos de flujo subterráneo, también se han utilizado para interpretar la dinámica de los acuíferos con el fin de conocer los parámetros hidrogeológicos que controlan el flujo subterráneo (Anderson y Woessner 1992).

La metodología general aplicada en el desarrollo de un modelo implica la realización de diferentes actividades (Anderson y Woessner 1992):

1. Elaboración del modelo conceptual.
2. Resolución del modelo matemático.
3. Selección del código por computadora.
4. Construcción del modelo.
5. Calibración.
6. Análisis de sensibilidad.
7. Verificación del modelo.
8. Predicciones.
9. Análisis predictivo de sensibilidad.
10. Presentación del diseño del modelado y resultados.
11. Auditoría posterior.
12. Segundo diseño del modelo.

En la Figura 3 se presenta un esquema que resume la metodología para la modelación.

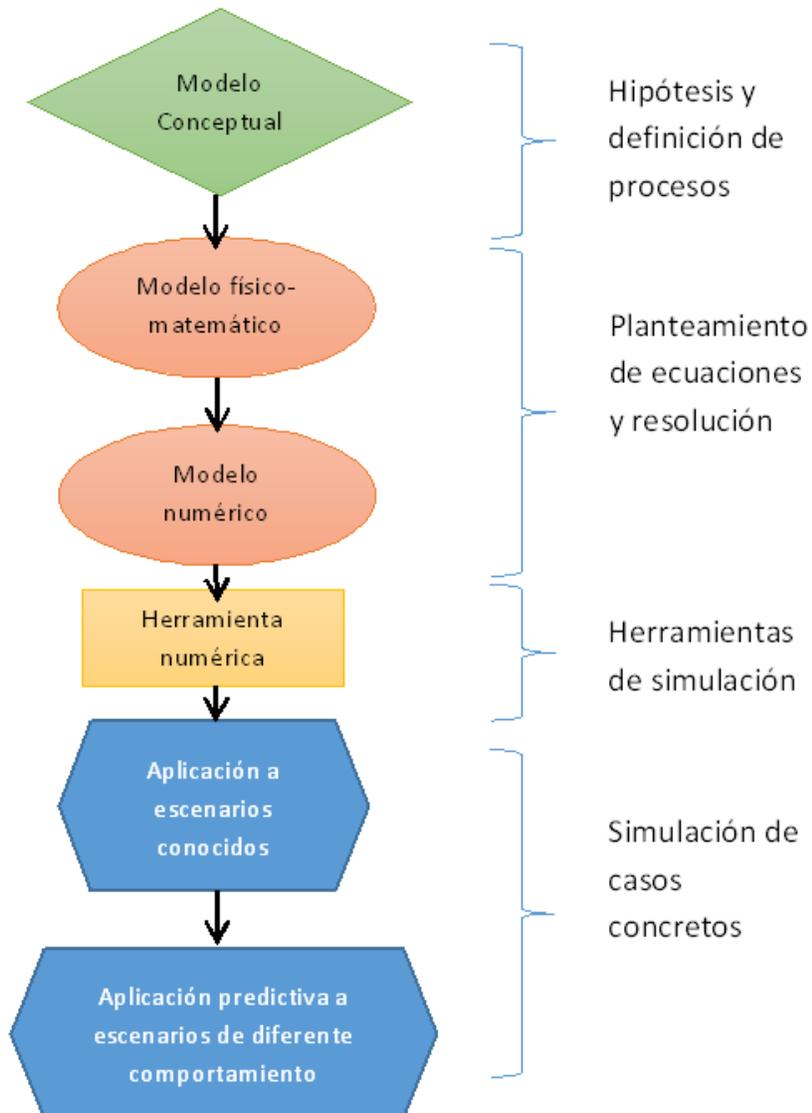


Figura 3. Esquema de la metodología aplicada en la elaboración de un modelo. Tomado de Delgado et al. (2009).

2.6. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El estudio del cambio climático y de los fenómenos con los que se relaciona, ha cobrado gran importancia en los últimos años. En la actualidad, el recurso más avanzado que se tiene para estudiar el clima es el conjunto de Modelos de Circulación General de la atmósfera y océano acoplados (GCM, por sus siglas en inglés).

Los GCM son representaciones matemáticas simplificadas del sistema climático basadas en leyes fundamentales de la física, que simulan una gran variedad de procesos que ocurren entre los diversos subsistemas climáticos en un amplio rango de escalas temporales y espaciales. Constituyen una herramienta para proyectar el clima, porque permiten crear escenarios de la condición climática más probable a futuro, frente al incremento de concentraciones de los GEI (Magaña 2010).

Los escenarios son una esquematización plausible y a menudo simplificada del clima futuro, se basan en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas que se construye con el objetivo de comprender las respuestas de los sistemas medio ambientales y sociales ante el futuro del cambio climático. Un escenario representa una alternativa de cómo se podría comportar el clima futuro y no se debe confundir con un pronóstico o una predicción. Su verdadero propósito es dar una idea de la incertidumbre, ya que ayudan a determinar posibles ramificaciones de un hecho a lo largo de uno o más caminos, plausibles pero indeterminados (Magaña y Caetano 2007).

La atmósfera es altamente influenciada por las características de los océanos o de las concentraciones de los GEI. Estas emisiones dependen de complejos sistemas dinámicos que están determinados por fuerzas motoras tales como el desarrollo demográfico, el desarrollo socio-económico y los cambios tecnológicos, los cuales no siguen reglas físicas sino decisiones humanas y por lo tanto su evolución a futuro es muy incierta (Conde y Gay 2008).

La influencia de un factor que puede causar un cambio climático, como por ejemplo, los GEI, se evalúa a menudo en términos de su forzamiento radiativo, que constituye una medida de cómo el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra se comporta cuando se alteran los factores que afectan el clima (IPCC 2007).

La palabra radiativo proviene del hecho de que estos factores cambian el equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente dentro de la atmósfera terrestre. Este equilibrio es el que regula la temperatura superficial en la Tierra. Los forzamientos radiativos se cuantifican por lo general como la tasa de cambio de energía por área de unidad del planeta medida en la parte superior de la atmósfera, y suelen expresarse en W/m^2 (Fernández et al. 2015).

2.7. EVOLUCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

En 1992, el IPCC publicó el primer paquete de escenarios de emisiones de GEI llamado IS92. Unos años más tarde en el 2000, se publicó una segunda generación de proyecciones conocidas colectivamente como el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés) que fueron usados en el Tercer y Cuarto informe de evaluación del IPCC (AR3 y AR4, por sus siglas en inglés).

Estos escenarios partieron de cuatro historias de desarrollo socioeconómico global, que describían las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas determinadas por las emisiones futuras de los GEI (Conde y Gay 2008).

Todos los escenarios basados en una misma historia evolutiva constituyen una “familia” (Magaña 2010). Existen dos grandes familias de escenarios. Los escenarios “A” que describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, y los escenarios “B” que representan un crecimiento moderado (Conde y Gay 2008).

El escenario A1 describe un mundo futuro que presenta crecimiento económico rápido, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de nuevas tecnologías. Existen convergencias regionales, capacidad de infraestructura, incremento de las relaciones culturales y sociales, con una reducción de las diferencias regionales en el ingreso per cápita. Este escenario se subdivide en tres grupos con direcciones alternativas en tecnología y energía. El grupo A1F1 considera el uso intensivo de combustible fósil, el A1T utiliza fuentes de energía no provenientes de combustible fósiles y finalmente el A1B conjuga un balance entre todas las fuentes (IPCC 2000). El escenario A2 por otro lado, describe un mundo muy heterogéneo, autosuficiente y que pondera la conservación de las identidades locales. Considera una población en continuo crecimiento, un desarrollo económico regional con un crecimiento más lento comparado a otras líneas evolutivas (IPCC 2000).

El escenario B1 describe un mundo convergente con la misma población global que alcanza un pico a mediados del siglo y después decrece como el escenario A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información, con reducciones en la intensidad de insumos, con introducción de tecnologías limpias y eficientes en recursos. Tiene como prioridad la sostenibilidad económica, social y ambiental, pero sin iniciativas para proteger el clima. Por otro lado, el escenario B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a los problemas de sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo con un crecimiento progresivo de la población a un ritmo menor que en el escenario A2, con niveles de desarrollo económico intermedios, y un cambio tecnológico más diverso y menos rápido que en los escenarios B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional (IPCC 2000).

Posteriormente, en el Quinto informe de evaluación del IPCC (AR5) se presentaron nuevos escenarios que identifican un marco de referencia en las emisiones denominados Proyecciones de Concentraciones Representativas (RCP, por sus

siglas en inglés). Los RCP son la última iteración del proceso de escenarios, que permiten obtener proyecciones de las concentraciones de GEI siguiendo su trayectoria a través del tiempo. Estos escenarios se dividen en cuatro grupos: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, que se refieren a la radiación global de energía y sustituyen a los escenarios del SRES (IPCC 2013).

Los GCM son modelos generales que fueron pensados para simular la respuesta global y de gran escala ante incrementos en las concentraciones de los GEI. Para poder analizar los efectos potenciales del cambio climático en una región en particular se tienen que generar escenarios que tengan una mayor resolución espacial, y que reflejen las características y tendencias del clima regional como la cobertura de suelo, la topografía y la hidrología (Magaña 2010).

La generación de escenarios regionales es una condición necesaria para tener una mejor estimación del riesgo ante el cambio climático. Sin embargo, reducir la escala espacial o regionalizar las salidas de los GCM, no es un proceso de simple interpolación, pues la incertidumbre en los escenarios aumenta cuando se incrementa la definición espacial. No existe una metodología estándar para la reducción de escala, el proceso a seguir dependerá en gran medida de la situación y datos disponibles (Magaña 2010).

Los escenarios de cambio climático regional se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala estadísticas o dinámicas y puede basarse en diferentes aproximaciones, que se dividen en cuatro formas principales: métodos de regresión, aproximaciones basadas en patrones de tiempo, generadores estocásticos de tiempo y modelos dinámicos de área limitada (Conde y Gay 2008).

Existe una gran cantidad de GCM desarrollados por los principales centros de pronóstico y predicción del clima del mundo. Cada uno considera diferentes parámetros, escalas y condiciones hidrológicas, provocando que sus proyecciones climáticas sean diferentes entre sí. Los escenarios de cambio climático se pueden

proyectar bajos diversos GCM y escalas espaciales, que permitirán conocer una imagen plausible del futuro a un período determinado. Esto provoca que la diversidad de escenarios de cambio climático sea muy grande.

En ocasiones, el desacuerdo entre diversos GCM y los escenarios y los impactos regionales del cambio de clima, indican que el trabajar con uno o dos modelos podría llevar a respuestas inadecuadas principalmente si el modelo elegido corresponde a un valor extremo de la distribución (Magaña 2010).

Es por eso que una de las estrategias que se recomiendan para generar escenarios del clima futuro es trabajar con diversos GCM, preparando experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes entre sí, bajo diversos forzantes radiativos resultado de escenarios de emisiones globales de GEI, para llegar a lo que se conoce como un ensamble multimodelo de cambio climático. Dicho ensamble permite conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima a partir de establecer en dónde se encuentra la mayor parte de las soluciones. El método de ensamble se desarrolló con el objetivo de dar mayor peso a los GCM que contengan los errores y sesgos más pequeños en comparación con las variables observadas en un punto de malla dado. Y así poder visualizar lo que la mayoría de los escenarios reportan que podría acontecer con el sistema climático a diferentes horizontes o periodos futuros (Magaña 2010).

2.7.1. Escenarios de Cambio Climático en México

En el estudio de País: México, y en la Primera Comunicación Nacional, se generaron escenarios de cambio climático ante una duplicación de bióxido de carbono, utilizando dos GCM (GFDLR30 y CCC), los cuales tenían una resolución muy baja ($2.22^\circ \times 3.75^\circ$ y $3.75^\circ \times 3.75^\circ$ respectivamente). Mediante estos modelos se obtuvieron escenarios de precipitación y temperatura (Gay 2000; Magaña et al. 1997).

En la Tercera Comunicación Nacional, para los sectores de agricultura y ecosistemas forestales, se generaron escenarios de cambio climático utilizando el software MAGICC. Los GCM elegidos fueron HADLEY3TR00, ECHAM4TR98 y el GFDLR90 distintos y los escenarios de emisiones A2 y B2, con una resolución de 5° x 5° a los horizontes 2020 y 2050 (Conde 2003).

Posteriormente para el Cuarto Reporte de evaluación del IPCC sobre el cambio climático, se desarrollaron escenarios para la República Mexicana utilizando las salidas de los modelos ECHAM5, HADEM1 Y GFDL CM2.0, para la temperatura y precipitación mensuales bajo escenarios de emisiones A1B, A2, B2 y B1. Los escenarios de cambio climático globales disponibles tenían una resolución de 2.5° x 2.5°, por lo que fueron interpolados a una resolución de 30" x 30", considerando la topografía de terreno para obtener una mejor distribución espacial (Conde et al. 2011).

En el año 2012 se desarrollaron nuevos escenarios climáticos regionales. Las instituciones que participaron fueron el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA, UNAM) en coordinación con el Instituto de Ecología y Cambio Climático (INEEC) los cuales llevaron a cabo el estudio "Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de la Quinta Comunicación Nacional del 5° Reporte del IPCC" (Fernández et al. 2015).

En dicho estudio se realizó un análisis regional del período histórico y de las proyecciones de 15 GCM (Tabla 1) del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés). Analizaron tres forzamientos radiativos (RCP): 2.5, 4.5 y 8.5 a un futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099), con una resolución espacial de 0.5° x 0.5° (55 x 55 km), aproximadamente. Con base en estos GCM, se generó un Ensamble ponderado (REA, por sus siglas en inglés) con el objetivo de dar mayor peso a los GCM que

tuvieran mejor desempeño comparativo con las variables observadas en un punto de malla dado. También emplearon el criterio de “convergencia”; es decir que los modelos empleados que dieran resultados similares tendrían un mayor peso en la construcción del ensamble (Cavazos et al. 2013).

Tabla 1. Modelos de Circulación General utilizados para generar el ensamble multimodelo. Tomado de Fernández et al. (2015).

Modelo	Institución	País
BCC_CSM1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CAnESM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Canadá
CNRMCM5	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM_CERFACS)	Francia
CSIRO_Mk3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)	Australia
GFDL_CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
GISS_E2_R	NASA Godard Institute for Numerical Mathematics	Estados Unidos
HADGEM2_ES	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Reino Unido
INM	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
IPSLcm5a_Ir	Institute Pierre Simon Laplace (IPSL)	Francia
MIROC_esm	Atmosphere and Ocean Research Institute (The university of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC_ESM_CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The university of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The university of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC)	Japón
MPI_ESM_LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Alemania
MRI_CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Japón
NCC_NorESM1	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute (NCC)	Noruega

A su vez, de los modelos anteriores a los modelos MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y el ensamble REA, se les aplicó un proceso de reducción de escala, incorporando el efecto topográfico conforme a la base Shuttle Radar Topography Mission (STRM). La resolución temporal de las salidas fue mensual, mientras que la resolución espacial se estructuró en celdas de (926m x 926m). Estos nuevos escenarios fueron evaluados para los horizontes 2015-2039 y 2075-2099, para cada uno de los cuales se desarrollaron bases de datos de promedios mensuales de temperatura media y precipitación (Fernández et al. 2015).

2.8. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.8.1. Localización y Extensión

El área de estudio es el Estado de Yucatán, el cual se ubica en la región sureste de la República Mexicana y ocupa el extremo septentrional de la Península que lleva el mismo nombre. Limita al norte con el Golfo de México, hacia el oeste-suroeste colinda con el Estado de Campeche y al este-sureste con el Estado de Quintana Roo, lo cual le confiere a la entidad una forma sensiblemente triangular (Figura 4).

El estado de Yucatán abarca una superficie territorial de 39,612 Km² que representa el 27.8 % de la Península de Yucatán y el 1.9 % respecto del total del país. Alberga una población de 1'955,577 habitantes distribuidos en 106 municipios, siendo Mérida la ciudad capital (INEGI 2010).



Figura 4. Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia.

2.8.2. Clima

El clima de la Península de Yucatán está controlado por los patrones de circulación atmosférica de las latitudes tropicales. Al estar localizado en el hemisferio norte se encuentra sujeto a las condiciones climáticas y fenómenos meteorológicos característicos de la zona, como los vientos alisios, nortes, ciclones, etc. De igual modo recibe las influencias marinas debido a su colindancia con el Golfo de México y su cercanía al mar Caribe (Duch 1991).

En la zona predomina una climatología tropical subhúmeda, con una precipitación anual que varía de aproximadamente 500 a 600 mm/año en la parte norte hasta valores superiores a los 1200 mm/año en la parte sur. La extensión del período de lluvias es larga, abarcando desde mediados de Mayo hasta mediados de Octubre, siendo Septiembre el mes más lluvioso. El período de lluvias continúa de Noviembre a Febrero (Schmitter-Soto et al. 2002).

Los períodos más cálidos se presentan de Mayo a Agosto, con temperaturas medias que oscilan entre los 25 a 28° C, con máximas alcanzando cifras que en ocasiones rebasan los 40°C (Casares 2006).

2.8.3. Geología

La Península de Yucatán es una unidad geológica constituida por sedimentos calcáreos marinos. Representan una extensa planicie que forma parte de la provincia geográfica de la llanura del Golfo y del Caribe, con características morfológicas y estructurales bastante uniformes. Se distingue por su configuración general de llanura ondulada, con escasa elevación sobre el nivel del mar, ligera inclinación de sus pendientes y leves contrastes topográficos (Duch 1991).

El área de estudio está cubierta por rocas carbonatadas de edad Terciaria, principalmente calizas, de origen marino, que siguen una configuración casi

horizontal con una ligera pendiente hacia el norte y descansan sobre carbonatos y evaporitas del Cretácico (Lesser y Weidie, 1988). Esta plataforma alcanza un espesor de 1500 m y se considera una plataforma tectónicamente estable (Back y Lesser 1981; Gondwe et al. 2010).

Las unidades litológicas superficiales en el estado de Yucatán, están compuestas por rocas sedimentarias originadas desde el Terciario hasta el Cuaternario (Figura 5). Las rocas más antiguas que afloran son las calizas y evaporitas (Paleoceno-Eoceno Indiferenciado) ubicadas al sur de la entidad. Estas rocas se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recristalizadas, y pertenecen a la formación Icaiché. Son rocas evaporitas ricas en sulfatos, constituidas por yeso y anhidrita (Bonet y Butterlin 1962; Butterlin y Bonet 1960).

Estos estratos en la zona sur del Estado, están cubiertos por el Miembro Pisté de la Formación Chichén Itzá (Eoceno Medio), los cuales también ocupan una gran porción del centro del estado de Yucatán. Al norte entran en contacto con las calizas masivas, blancas y muy cristalinas del Miembro Chumbec (Eoceno Superior).

Rodeando al Miembro Pisté al norte, este y oeste se localizan las calizas amarillentas (a veces arcillosas) de la Formación Carrillo Puerto (Mio-Plioceno). Estas rocas tienen una alta permeabilidad y porosidad aunque sean secundarias, ya que se encuentran muy fracturadas (Graniel 2010).

En términos geológicos, el subsuelo del estado de Yucatán está constituido por una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino que han estado bajo subsidencia lenta pero continua.

En la ciudad de Mérida los primeros 50 m de profundidad, están constituidos por calizas fosilíferas que alternan con delgadas capas de calizas densas recristalizadas y margas calcáreas, probablemente equivalentes a la formación Carrillo Puerto.

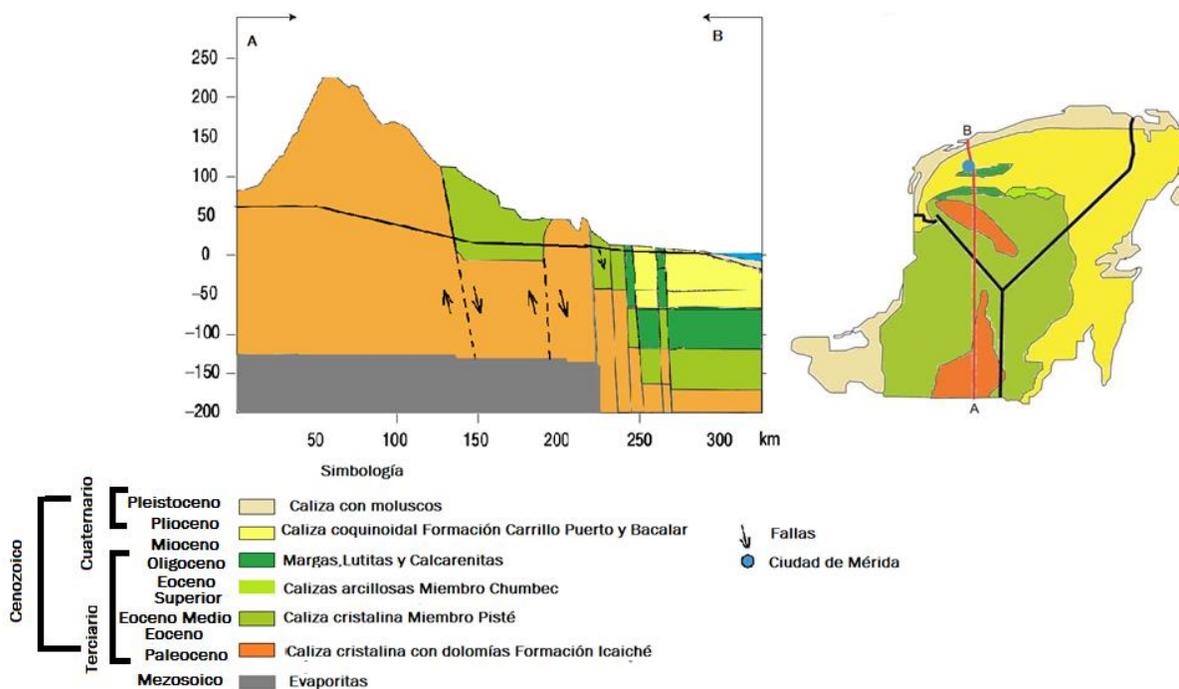


Figura 5. Corte unidades geomorfológicas. Modificado de Villasuso y Méndez (2000).

En la Península de Yucatán existen algunas características estructurales, que demuestran alineamientos definidos, que son el resultado de un sistema de fracturamiento bien ordenado. Se piensa que estas fallas pueden cambiar las condiciones del flujo del agua subterránea a nivel regional (Perry et al. 2002).

Andrade (1984) cita que el geólogo Heinz Lesser Jones llevó a cabo mediciones en varios lugares, con las cuales logró determinar que existen tres tendencias principales de los planos de estructura o "fallas. Se piensa que la presencia de importantes estructuras como las fracturas, influye en el flujo del agua subterránea porque transmiten al agua mayores velocidades de flujo facilitando la infiltración al acuífero (Bauer-Gottwein et al. 2011).

Extendida en la porción suroeste, el principal rasgo fisiográfico del Estado está representado por la Sierrita de Ticul, dos cadenas paralelas de lomeríos alineados en dirección Oeste-Noroeste, Este-Sureste con una extensión aproximada de 110 km y

una elevación máxima de 275 metros sobre el nivel medio del mar (m.s.n.m) (SARH 1989).

En la zona de la costa, el acuífero está constituido por coquinas con escasa matriz calcárea, de color crema, con abundantes fragmentos de fósiles de moluscos (Holoceno) que forman una banda que corre a lo largo de la costa y la cual descansa sobre las calizas de la formación Carrillo Puerto. El espesor aproximado de la formación Carrillo Puerto es de 100 m (Velázquez 1986; Méndez 1991).

2.8.4. Hidrogeología

La hidrogeología de la entidad tiene unos rasgos muy particulares ya que se encuentra en un terreno de naturaleza kárstica, compuesto por rocas carbonatadas de alta permeabilidad que sufren disolución al reaccionar con el agua, formando en su interior cavidades y conductos cuyos tamaños varían desde pequeños poros y fracturas, hasta grandes cavernas o depresiones (SARH 1989).

La naturaleza del terreno, el relieve casi plano y la escasez de suelo provocan que el Estado de Yucatán carezca de corrientes superficiales. Una parte de la precipitación se infiltra rápidamente a través de las fracturas de la roca superficial, descendiendo al manto freático y favorece así la renovación del acuífero (Lesser y Weidie 1988).

La porosidad y permeabilidad primarias del acuífero dependen de su litología; sus valores son altos en los estratos constituidos por conchas y esqueletos de organismos, y bajos en los estratos de caliza masiva. A lo largo del tiempo, estas características originales han sido notablemente modificadas por fracturamiento, disolución y abrasión, dando lugar a la porosidad y permeabilidad secundarias que varían dentro de un amplio rango de valores altos y presentan una distribución muy irregular (SARH 1989).

La recarga del acuífero costero proviene del agua de lluvia que se infiltra y del flujo subterráneo proveniente del continente, que circula hacia el mar. La sierrita de Ticul juega un papel importante en el sistema de flujo de agua subterránea de la Península de Yucatán. El agua subterránea se mueve de las zonas de mayor precipitación, hacia las costas de forma radial, dispersándose hacia el noroeste, noreste y norte donde se realiza la descarga natural del acuífero (Doehring y Butler 1974).

Además de la Sierrita de Ticul (Figura 6), otra característica hidrogeológica importante del Estado es la zona semicircular conocida como el Anillo de cenotes. Esta es la manifestación superficial de una zona de alta permeabilidad; se considera un conducto importante para el agua subterránea, ya que funciona como un canal de flujo preferencial, debido a la alta conductividad hidráulica, transportando el agua subterránea del sur hacia las zonas de Celestún y Dzilam de Bravo, que son los lugares en los que el Anillo intersecta al mar (Perry et al. 2002; Perry et al. 1995).

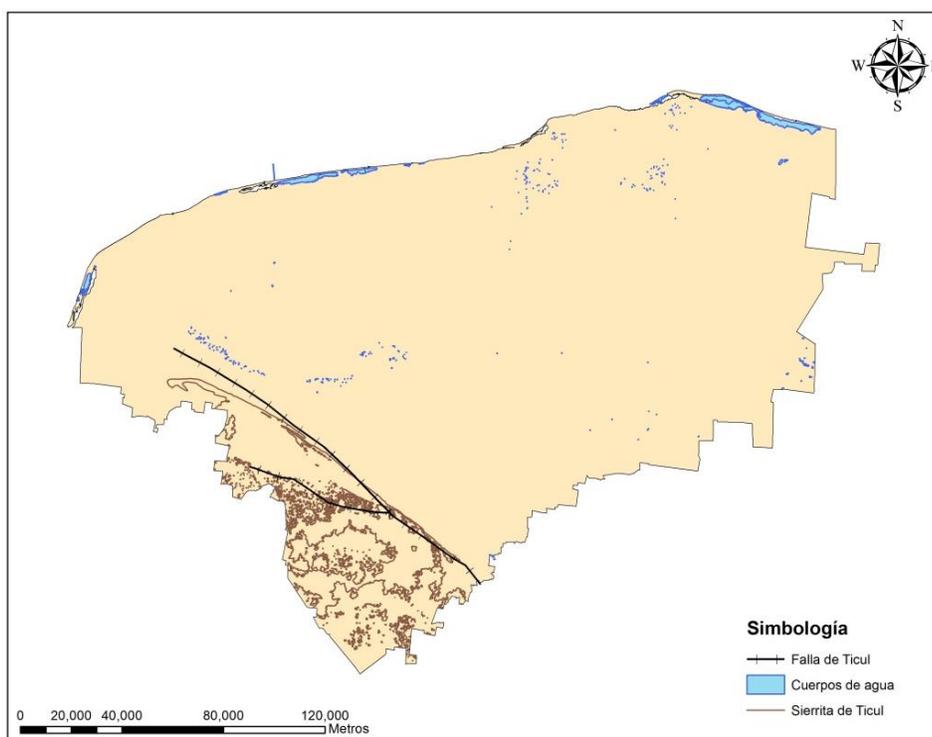


Figura 6. Estructuras hidrogeológicas del estado de Yucatán. Elaboración propia con archivos shape del INEGI y SEDUMA.

Los contornos de potenciales hidráulicos indican que una parte del agua subterránea atraviesa el Anillo de Cenotes y sigue su recorrido hasta descargar al mar (Sánchez-Pinto et al. 2005).

Existe evidencia hidrogeoquímica de flujos preferenciales entre el Anillo de Cenotes y la Sierrita de Ticul. Velázquez (1986), usando métodos hidrogeoquímicos y geoquímicos, estableció que la Sierrita de Ticul representa una frontera entre dos acuíferos localizados al noreste y sur de la falla de Ticul.

Bauer-Gottwein et al. (2011) estudiaron el acuífero kárstico de la Península de Yucatán y elaboraron un mapa de líneas de flujo preferenciales de agua subterránea basados en una modificación del modelo de la Península de Yucatán elaborado por Charvet (2009). Este mapa da una idea aproximada de las líneas de corriente del agua subterránea y las zonas de recarga y descarga. Cabe hacer notar que en la parte Noreste de la Península se observa una zona que funciona como un parte aguas (Figura 7).

La profundidad del nivel freático en el acuífero es variable, desde aproximadamente 120 m en la región de colinas y valles, a 30 m en la llanura, 5 m en una zona de 15 kilómetros paralela a la costa, hasta casi un metro en el litoral.

La transmisibilidad es elevada; este hecho se manifiesta en su extremadamente bajo gradiente hidráulico del orden de 7 a 10 mm/Km, sugiriendo permeabilidades muy altas (Marín 1990; Marín y Perry 1994).

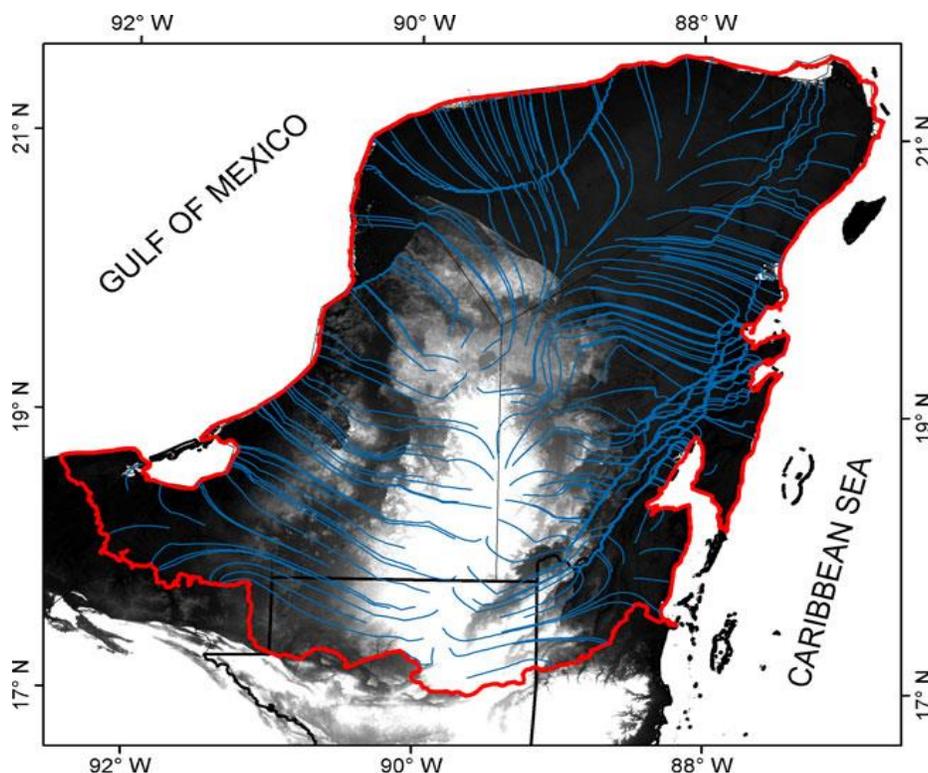


Figura 7. Líneas preferenciales de flujo subterráneo en la Península de Yucatán. Tomado de Bauer-Gottwein et al. (2011)

El acuífero se considera libre en su mayor extensión, a excepción de la zona costera. Según Perry et al. (1989) en esta zona existe una capa de roca caliza superficial de muy baja permeabilidad conocida como “Caliche” que le da un carácter de confinamiento. Esta zona (Figura 8), es prácticamente impermeable ya que su porosidad es menor al 1%, y actúa como una barrera que impide el movimiento hacia el mar del agua subterránea.

El caliche contiene muy poco suelo en su superficie y tiene un espesor comprendido entre 0.5 y 1.4 m. Corre virtualmente de manera continua a lo largo de la costa del Estado como una franja de ancho variable de 2 a 20 km tierra adentro. Por el lado del mar, esta capa confinante se extiende a más de 3 km, distancia a la cual se empieza a desintegrar bajo la influencia de organismos marinos incrustantes. La prolongación de esta capa confinante en el mar trae como consecuencia la existencia de descargas submarinas (Casares 2006).

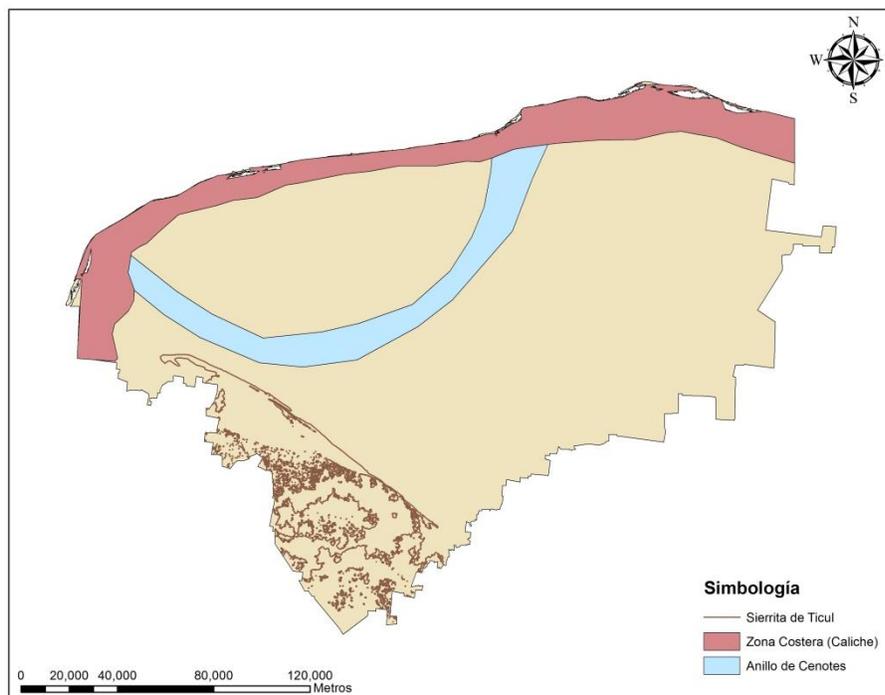


Figura 8. Regiones Hidrogeológicas del Estado de Yucatán. Con archivos shape del INEGI.

A consecuencia de este confinamiento, se presenta una elevación de las alturas hidrostáticas que varían de 0.32 a 0.77 m.s.n.m. a una distancia de 5 a 7 km desde la línea de costa hacia tierra adentro. Existe fuerte evidencia en el sentido de que la elevación de la superficie piezométrica del acuífero cerca de la costa es mayor al nivel medio del mar, debido a que la mayor descarga de agua dulce ocurre a varios kilómetros de la costa (mar adentro) y a varios metros de profundidad (Perry et al. 1989).

2.8.5. Intrusión Marina

La Península Yucatán está rodeada por agua de mar y por lo tanto está sujeta al fenómeno de intrusión marina. El agua dulce flota sobre agua de mayor salinidad, formando un lente que se ensancha tierra adentro, y se reduce gradualmente hasta desaparecer a medida que se aproxima a la línea de costa (Back y Lesser 1981).

La relación de Ghyben/Herzberg proporciona buenas estimaciones de la profundidad de la interfase, a grandes distancias tierra adentro (Perry et al. 1989; Steinich 1996). Reeve y Perry (1990), reportan que esta relación no se cumple en una franja de 5 km de la línea de costa hacia tierra adentro, esto debido a que las características hidrogeológicas en esta área no satisfacen los supuestos que sustentan este principio. Debajo de la ciudad de Mérida la interfase salina se localiza entre 45 m y 50 m de profundidad (Gaona et al.1980).

La dinámica de la interfase salina es temporal de acuerdo a la época de recarga y de descarga, encontrándose a una profundidad variable. Según Perry et al. (2002), la intrusión salina en el norte de la Península de Yucatán penetra al menos 100 km tierra adentro.

2.8.6. Fuentes de abastecimiento

El agua subterránea para el estado de Yucatán es de vital importancia para cumplir con las necesidades de la población. En la entidad, el agua subterránea se extrae de miles de aprovechamientos, ubicados la mayoría en las porciones Norte, Este y Suroeste del estado. El agua extraída se utiliza principalmente para uso agrícola, doméstico o de abrevadero.

No existe un registro que resuma todos los aprovechamientos públicos y particulares, que extraen agua del acuífero. Sin embargo, se estima que las extracciones alcanzan 1,983 millones de metros cúbicos al año (Conagua 2016). La hidráulica de pozos en el sistema se caracteriza por débiles abatimientos, un cono de influencia reducido y la rápida recuperación y estabilización del nivel dinámico, como resultado de la elevada transmisividad (Sánchez y Pinto 1999).

El agua subterránea que sirve de abastecimiento para la ciudad de Mérida, se extrae de diferentes zonas de extracción que se encuentran alrededor y dentro de los límites de la ciudad (Pacheco et al. 2004).

En la ciudad de Mérida, la extracción, potabilización, distribución y comercialización del recurso hídrico está a cargo de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán (JAPAY), exceptuando los sistemas de agua potable de las comisarías, donde cada Ayuntamiento se encarga de su mantenimiento. La JAPAY cuenta actualmente con cuatro zonas de pozos de extracción que, construidas desde la Mérida I (1966) hasta la Mérida IV (2014), abastecen a la población (Bonilla 2015). Los pozos de extracción tienen profundidades de 40 m (PRONACOSE, 2014).

2.8.7. Vulnerabilidad a la contaminación

El recurso subterráneo es la principal fuente de abastecimiento para todos los usos en el Estado. En la entidad no se tienen problemas de cantidad, ya que la recarga supera de una manera notable la extracción del acuífero y por lo tanto se tiene una alta disponibilidad. Sin embargo, esta disponibilidad puede verse comprometida debido a los problemas de calidad a causa de la alta permeabilidad del suelo y la poca profundidad a la que se encuentra el nivel freático, lo que hace al acuífero muy vulnerable a la contaminación (Graniel 2010).

En materia de saneamiento, la entidad sufre un rezago. El 84.82% de las aguas residuales generadas por las viviendas que cuentan con el servicio de agua potable en la ciudad de Mérida no recibe un tratamiento adecuado ya que son enviados a fosas sépticas individuales, lo cual representa un problema crítico ya que dichas fosas son poco eficientes, ocasionando que el agua se filtre al manto acuífero (Bonilla 2015).

Los conductos y oquedades del subsuelo y la falta de un material filtrante facilitan el acceso de los contaminantes al acuífero y su rápida difusión dentro de él. Además, la dureza de los materiales calcáreos dificulta el establecimiento de sistemas de drenaje en los principales asentamientos humanos de la región provocando que toda el agua residual generada por la población se descargue directamente al suelo o en fosas sépticas, muchas de las cuales no fueron construidas correctamente o no

reciben el mantenimiento adecuado y por lo tanto facilita que los contaminantes lleguen al acuífero (Villasuso y Méndez 2000).

Este problema de contaminación tiende a agravarse en las costas, por la intrusión marina, lo cual ha sido observado principalmente en el Nororiente y en el resto del acuífero debido a las extracciones excesivas de agua dulce que provocan el ascenso de agua salada subyacente, obligando en algunos casos a restringir los abastecimientos permisibles en el litoral (Alcaraz et al. 2015).

2.8.8. Situación del acuífero

Debido a la complejidad natural de los sistemas subterráneos, es posible incluso tener varios modelos conceptuales para un mismo sistema (Carrera et al. 2005). En el acuífero del estado de Yucatán se han realizado varios estudios enfocados al sistema de flujo subterráneo. Algunos de estos estudios se han encargado de definir las propiedades hidrogeológicas del medio kárstico (Hanshaw y Back 1980; Moore et al. 1992; Gondwe et al. 2010; Beddows 2004). Otros, por ejemplo se han enfocado en la modelación de flujo y de transporte de contaminantes en el área de Puerto Morelos, Quintana Roo (Vega 2012; Cortazar 2013).

Por otro lado, empleando el concepto de volumen elemental representativo, se han desarrollado tres modelos de flujo regional en el acuífero del Estado de Yucatán. Sánchez y Pinto (1999), González et al. (2002) y Marín (1990) aplicaron diferentes técnicas para modelar el acuífero kárstico. Todos estos autores encontraron que la mejor calibración se obtiene considerando el acuífero como un medio homogéneo e isótropo.

González et al. (2002) consideraron tres casos diferentes para su modelación:

- Primero, supusieron un acuífero completamente homogéneo con el fin de determinar si las características juegan un papel importante en el sistema.

Consideraron una recarga no uniforme con valores del 12% para la parte suroeste, 10% para el sur y 20% para el resto del área. Obtuvieron su mejor calibración para una $K=0.55$ m/s y una porosidad de 35%.

- En un segundo caso, se asignó una conductividad hidráulica alta al Anillo de cenotes de 6 m/s, y una baja conductividad, de 0.15 m/s, al resto del área; esto con el fin de demostrar si el Anillo de cenotes capta y conduce el agua subterránea hacia la costa (parte aguas en la parte inferior del anillo de cenotes). Se consideró también una recarga y porosidad similar al primer caso de estudio. Los autores reportaron que el Anillo de cenotes parece no actuar como un colector de agua subterránea que intercepta el flujo regional.
- Por último, en un tercer caso se simuló a la Sierrita de Ticul como una zona de baja conductividad hidráulica de 5.5×10^{-3} m/s y al resto de la región se le asignó una mayor conductividad hidráulica, de 1.115 m/s, para determinar la influencia de la geología en el sistema de flujo subterráneo. La recarga fue asumida espacialmente no uniforme en un rango de 20-24% y una porosidad de 35%. Se concluyó que la Sierrita de Ticul actúa como una barrera de flujo.

Sánchez y Pinto (1999) calibró un modelo en régimen estacionario con una configuración de las cargas hidráulicas obtenidas en un muestreo realizado en el periodo de sequía de abril 1989 y tomó en consideración una recarga del 15%. Obtuvo su mejor calibración para $K=23,000-45,000$ m/d. El autor indica que los resultados están influenciados por el espesor de la zona de descarga y por el valor de la recarga, tras realizar un análisis de sensibilidad.

Marín (1990) empleó los datos de elevación piezométrica correspondientes a julio de 1987 (época de lluvias), debido a que este mes se encuentra a la mitad del ciclo de recarga natural anual del acuífero. Asumió un modelo de dos capas, en régimen estacionario, con un acuífero isótropo, que se comporta como un medio poroso equivalente. A la capa superior le asignó una conductividad de 0.1 m/s y un espesor

de 55 m y a la capa inferior una conductividad de 1 m/s, con un espesor de 150 m. Consideró una recarga del 30%. Finalmente obtuvo su mejor calibración para $K=8,640-86,400$ m/d.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los diversos valores de conductividad hidráulica reportados para la Península de Yucatán. Algunos valores reportados con respecto a la porosidad se resumen en la Tabla 3.

Tabla 2. Rangos de valores de conductividad hidráulica reportados para la Península de Yucatán.

Autor	K (m/d)	Observaciones
González (1984)	0.08 a 432	Determinación en laboratorio mediante pruebas de permeámetros en núcleos.
Reeve y Perry(1990)	22 a 44,928	Análisis del efecto de las mareas sobre el nivel de agua subterránea al norte de Mérida.
Marín (1990)	8,640 a 86,400	Modelación numérica.
Brewerton (1993)	0.3 a 1.2	Determinación en laboratorio en núcleos de roca.
Sánchez y Pinto (1999)	23,000	Modelación numérica.
González et al. (2002)	96,336	Modelación numérica

Tabla 3. Valores reportados de porosidad en el estado de Yucatán.

Autor	Porosidad
González (1984)	5-50%
Brewerton (1993)	10-55%
González et al. (2002)	35%

III. METODOLOGÍA

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados, este trabajo se ha dividido en tres etapas, los cuales agrupan diferentes actividades que son dependientes entre sí (Figura 9).

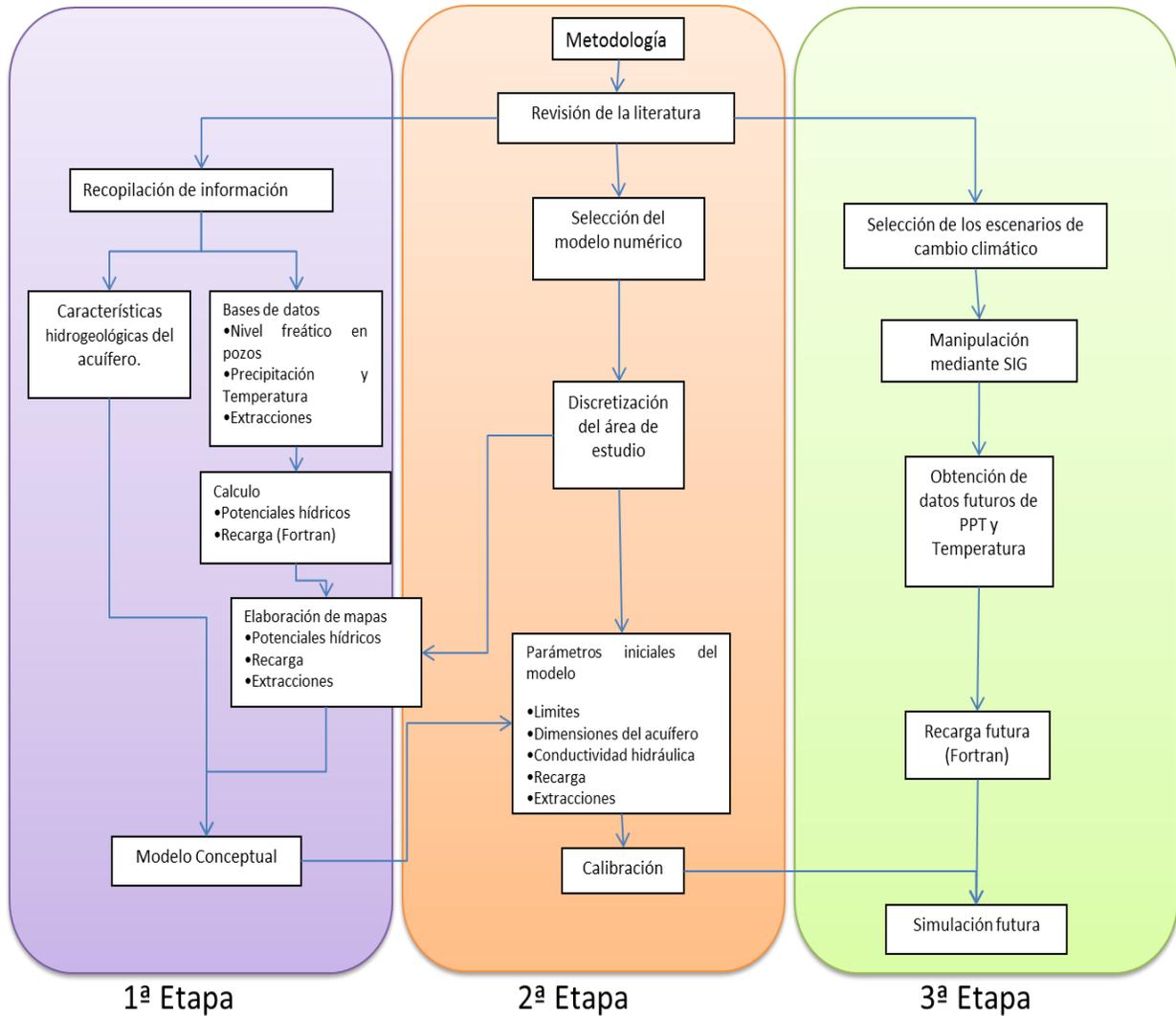


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología.

3.1. PRIMERA ETAPA

3.1.1. Recopilación de la información y elaboración de la base de datos

Una parte importante de este trabajo de investigación consistió en la recuperación de información mediante la revisión de la literatura. Los datos recabados incluyeron propiedades del acuífero (conductividades hidráulicas y porosidades), dimensiones del acuífero, registros de precipitación y temperatura, mediciones del nivel estático, potenciales hidráulicos, registros de extracción, así como aquella información que ayudara a comprender el acuífero del estado de Yucatán y que sustentara el modelo hidrogeológico.

La información fue obtenida de diferentes estudios y publicaciones, y de fuentes variadas como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA) del Estado de Yucatán, por mencionar algunas.

- **Recarga**

Para la recarga se adquirieron los registros de precipitación mensual y temperatura media mensual de 70 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro de los límites del Estado de Yucatán para el periodo de 1960 a 2012.

De acuerdo con Orellana et al. (2009) se requiere el registro de al menos 30 años de la región bajo estudio para elaborar mapas climáticos, por lo tanto se seleccionó el periodo 1980-2012 ya que es a partir del cual se cuenta con datos en la mayoría de las estaciones. Se depuraron aquellas estaciones con registros incompletos para el período seleccionado, o aquellas que presentaban incongruencias con su ubicación.

Se elaboró una base de datos con 53 estaciones meteorológicas, que incluyen las coordenadas de cada estación, y los registros de precipitación anual y temperatura media anual.

La recarga se estima en algunas ocasiones como un porcentaje de la precipitación, o bien, como el agua que se infiltra hacia el subsuelo y alcanza el nivel freático. En este trabajo la infiltración se consideró como la diferencia entre el volumen de agua que precipita, menos el volumen que se evapotranspira (si se toma en cuenta que no existen escurrimientos superficiales para el área de estudio). De la ecuación 2, para balance hidrológico, se despreciaron las variaciones del almacenamiento y el escurrimiento y se despejó para la infiltración obteniendo

$$I = P - ETP \quad (7)$$

Donde:

P = precipitación [mm]

I = infiltración [mm]

ETP = evapotranspiración real [mm]

Existen muchas metodologías y ecuaciones para calcular la evapotranspiración, cada una de ellas considera diversos parámetros como pueden ser la textura y estructura del suelo, los tipos de vegetación, el contenido de agua del suelo, la temperatura del suelo, la intensidad de la radiación solar, número de días soleados, temperatura ambiente y precipitación, produciendo que el cálculo de la evapotranspiración llegue a ser bastante complejo.

Sin embargo, es posible estimar la evapotranspiración real aún cuando solamente se dispone de datos de precipitación y temperatura, utilizando la fórmula de Turc (Pereyra et al. 2011).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (8)$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real [mm/año]

P =precipitación [mm/año]

T = la temperatura media anual [°C]

$L = 300 + 25T + 0.05T^3$

Solo si, $\left(\frac{P}{L}\right)^2 \geq 1$ si no ETR=P (Valencia 2010)

Para la determinación de la evapotranspiración real se elaboró un código desarrollado en Fortran que utiliza la ecuación 8 para el cálculo de la evapotranspiración real, y luego estima la recarga como la diferencia entre ésta y la precipitación.

- **Potenciales Hidráulicos**

Uno de los parámetros necesarios para correr y calibrar el modelo hidrogeológico es el potencial hidráulico (carga hidráulica). La carga hidráulica representa la energía que tiene el acuífero en el punto y profundidad a la que fue medida. Ésta se obtiene restando las mediciones a nivel freático del valor de la cota topográfica.

El Organismo de Cuenca de la Península de Yucatán (OCPY) subdivisión de la CONAGUA, facilitó una base de datos que contiene los registros de 83 pozos pertenecientes a la Red Piezométrica Emergente y las mediciones de sus niveles estáticos en 4 años diferentes. Con esta información se prosiguió a calcular los potenciales hidráulicos; al revisar a detalle los archivos obtenidos, se encontró que la base de datos no especifica las cotas topográficas de cada pozo. Fue necesario obtener la elevación de cada pozo utilizando el Modelo de Elevación Digital del terreno (MED) del estado de Yucatán, el cual fue descargado con una resolución de 15m en formato Tiff del portal del INEGI. Sin embargo, la información obtenida no fue adecuada ya que las alturas sobre el nivel medio del mar del MED están reportadas en números enteros. Recordando lo expuesto con anterioridad, el Estado de Yucatán cuenta con un relieve casi plano donde las diferencias topográficas son pequeñas, y trabajar con los valores obtenidos del MED podría acarrear un gran error en el

cálculo de los potenciales hidráulicos. Aunado a lo anterior la base de datos de la Red Emergente no especifica si las mediciones registradas fueron hechas en pozos someros o profundos y tampoco cuenta con las alturas del brocal. Por lo tanto se tomó la decisión de no utilizar esta información y buscar otras opciones.

Se decidió trabajar con los datos reportados por Sánchez y Pinto (1999). Este trabajo tiene el registro de 50 pozos ubicados estratégicamente cubriendo la zona de Anillo de cenotes, cuenta con la altura de la cota topográfica de cada pozo y cuatro mediciones del nivel freático. Estos pozos se concentran en la zona noroeste del Estado, por lo tanto para tener una base de datos más robusta se utilizó además la información proporcionada por la CONAGUA en el documento de Red de Monitoreo de la Zona Costera que contiene el registro de potenciales hidráulicos en la zona costera para el período 2002 al 2015.

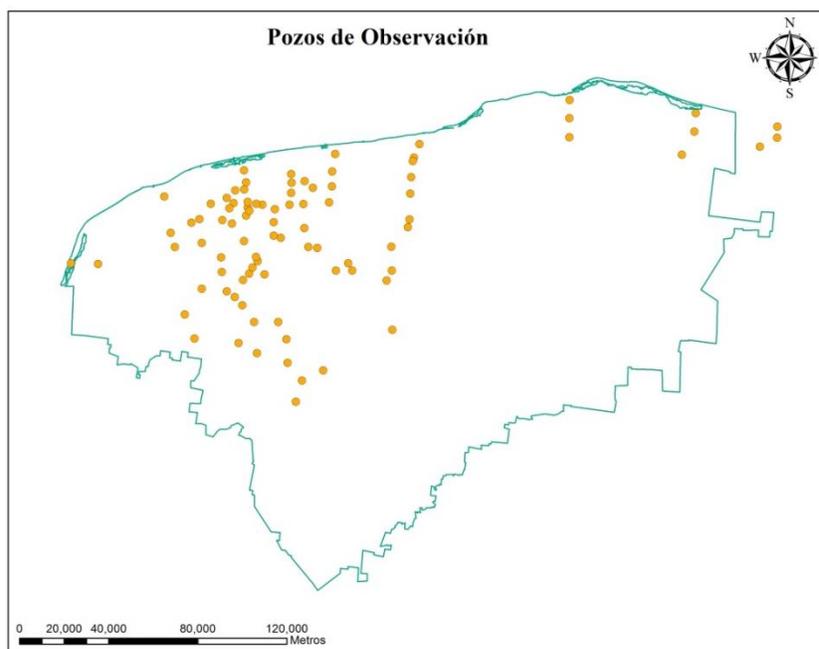


Figura 10. Ubicación de los pozos de observación. Elaboración propia.

La base de datos quedó conformada por 82 pozos con sus respectivas coordenadas geográficas y el potencial hidráulico promedio. Con esta información se elaboró un archivo en formato shape de puntos mediante el software ArcGis 10 (Figura 10). Se

hace notar que los tres puntos situados al este, fuera de los límites del estado de Yucatán fueron tomados en cuenta para una mejor interpolación.

- **Extracciones**

Una de las salidas de agua más importantes del acuífero es el agua utilizada para diferentes actividades de desarrollo de la Península. En Yucatán no se tiene en realidad una red de observación del comportamiento espacial y temporal del agua subterránea, por lo que se desconocen las condiciones exactas de explotación y operación del acuífero (Alcaraz et al. 2015).

Sin embargo, la base de datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) cuenta con los registros de los niveles del agua reportados por los concesionarios en el momento de una nueva instalación. Es decir, se tiene información sobre el gasto aproximado de agua que se extrae al año en cada pozo registrado. La base de datos del REPDA fue proporcionada por CONAGUA, ésta contiene registros de 22,575 aprovechamientos clasificados como cenotes, ojos de agua, norias y pozos, además de descripciones de su localización geográfica, mediciones del nivel estático, y volúmenes de extracción. Se depuraron los datos que no eran reportados como pozos de extracción tales como los ojos de agua y cenotes. Los registros restantes se trasladaron a un archivo de Excel que fue importado en ArcGis10 para su representación espacial utilizando el Datum WGS84. Se sobrepuso el polígono con los límites del Estado al mapa de pozos y se eliminaron aquellos que quedaban fuera del área de estudio resultando una base de datos de pozos de extracción con un total de 21,109 registros.

Al mapa de puntos se le agregaron los volúmenes de extracción de agua de los 4 campos de pozos que abastecen a Mérida (Tabla 4) y se creó una nueva base de datos.

Tabla 4. Volumen de agua extraído en los Campos de Pozos que abastecen a la ciudad de Mérida (PRONACOSE 2014)

	Mérida I	Mérida II	Mérida III	Mérida IV
Volúmenes de extracción de agua (m³/año)	47,304,000	12,768,000	26,805,600	7,884,000

3.1.2. Elaboración de mapas de contornos.

Los valores de recarga y potenciales hidráulicos se relacionaron con sus respectivas coordenadas geográficas para su distribución espacial discreta usando el software ArcGis 10 definiendo un sistema de coordenadas geográficas con Datum WGS84.

Para representar la variación espacial continua los valores fueron interpolados mediante el método Kriging utilizando el Software Surfer 10. Los resultados de la interpolación fueron manipulados y editados para su representación cartográfica con ArcGis 10. Se obtuvieron mapas de isovalores para recarga y de líneas equipotenciales para los potenciales hidráulicos.

3.1.3. Desarrollo del modelo conceptual.

Se realizó una revisión bibliográfica en diferentes tesis y publicaciones relacionadas con la modelación de agua subterránea en sistemas kársticos, con énfasis particular en aquellos estudios que fueron realizados en la Península de Yucatán.

A su vez, se investigaron las diferentes características que componen la zona de estudio como su geología, clima, y características hidrogeológicas con el fin de entender los diferentes componentes del sistema hidrológico así como las características que intervienen en la generación y variación de la recarga. Esto con el fin de identificar sus diferencias y similitudes, conocer las condiciones de

aplicabilidad de las metodologías y utilizar esta información como una base para poder desarrollar un modelo conceptual.

Una vez realizada la revisión bibliográfica y la recolección de la información, se elaboró el modelo conceptual con el cual se definen las fronteras del sistema y los datos de entrada que se aplicarán al modelo, tales como recarga, conductividades hidráulicas, espesor del acuífero y algunos datos relevantes que pueden aportar condiciones especiales al sistema.

3.2. SEGUNDA ETAPA

La segunda etapa se centra en la modelación del flujo del acuífero de Yucatán. Para ello se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre los diversos modelos numéricos (softwares) que existen y que han sido utilizados para simular el comportamiento de los recursos hídricos en diferentes regiones, haciendo énfasis en acuíferos kársticos o con características similares a la zona de estudio. Esta información sirvió para familiarizarse con los diferentes enfoques de trabajo de cada plataforma, comparar sus ventajas y desventajas, y finalmente seleccionar la herramienta más conveniente para trabajar.

3.2.1. Selección del modelo matemático del flujo subterráneo.

Con la información obtenida y plasmada en el modelo conceptual, se cuenta con las herramientas necesarias para desarrollar el modelo de flujo con la ayuda de un software especializado.

El código más conocido en hidrogeología y con mayor difusión es MODFLOW. MODFLOW es un modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por su siglas en inglés), consiste de un código fuente que resuelve mediante iteraciones la ecuación de flujo del agua

subterránea. Se usa en hidrogeología para simular el flujo de cualquier acuífero (Harbaugh 2005).

La mayoría de los expertos dedicados al estudio del movimiento de los flujos de agua subterránea se refieren al MODFLOW como el programa computacional más utilizado en el mundo para resolver problemas de flujo subterráneo y su éxito se atribuye a su amplia documentación y estructura modular, que lo hace fácil de modificar y complementar, y a la disponibilidad pública del software y código fuente (Vega 2012).

Este código es capaz de simular el flujo de agua subterránea en dos o tres dimensiones y considera los principales procesos físicos relacionados con el régimen de agua subterránea como recarga, evapotranspiración, bombeo, drenaje, etc. Su accesibilidad al público es otro factor que lo ha hecho tan popular, a diferencia de otros software, como FEFLOW, que no son tan económicamente accesibles.

MODFLOW resuelve la distribución de potenciales hidráulicos en el dominio del modelo y a partir de los resultados calcula los componentes de la velocidad de flujo. El movimiento en tres dimensiones del agua subterránea de densidad constante, a través del medio poroso en el suelo, puede ser descrito por la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{dh}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{dh}{dy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{dh}{dz} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (9)$$

Donde:

S_s =almacenamiento específico [m^{-1}]

h = potencial hidráulico [m]

t = tiempo [s]

K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} = valores de conductividad hidráulica en las direcciones x, y, z [m/s]

W = representa el suministro o descarga de agua donde los valores negativos indican extracción de agua y los positivos inyección de agua (s^{-1}).

Existen infinidad de interfases gráficas para pre y post procesar la información del modelo de flujo utilizando MODFLOW. Algunas de ellas son libres y de fácil acceso, y otras no. Por mencionar algunas está el Visual MODFLOW, Model Muse, GMS y Processing Modflow for Windows (PMWIN).

La elección del software (interfase) se realizó considerando las ventajas, desventajas, ecuaciones en que se basa, técnicas de resolución, cantidad de datos disponibles y parámetros que el modelo requiere.

3.2.2. Construcción del Modelo

El proceso de construcción del modelo en el software requiere primero establecer las dimensiones del área de estudio y la malla o cuadrícula. Esta tarea se realizó considerando la extensión del acuífero y la capacidad de celdas permitidas en el modelo numérico. Los mapas de líneas equipotenciales elaborados previamente dieron pauta para el establecimiento de las fronteras de flujo que delimitan la zona a modelar.

Una vez llevada a cabo la discretización y delimitación del sitio, se procedió a la construcción de los mapas necesarios para la ejecución del modelo, el cual acepta archivos en formato matricial que coincidan con los límites y malla del modelo.

El mapa de recarga se ajustó para que su resolución concordará con la cuadrícula del modelo, se exportó como formato ASCII.

Al mapa de pozos de extracción, se le sobrepuso la cuadrícula del modelo. Se calculó el volumen total de extracción de cada celda en donde se tenían pozos. Este valor se le asignó a cada celda y se transformó a un archivo en formato Raster para poder ser exportado a un archivo ASCII.

Otros parámetros requeridos para la construcción del modelo fueron:

- Estratos que componen el acuífero.
- Espesor del acuífero (Capa de fondo y techo).
- Conductividades hidráulicas.
- Porosidad Efectiva.

3.2.3. Ejecución y calibración

El modelo se ejecuta en estado estacionario con el fin de obtener un modelo que represente las condiciones actuales de flujo del acuífero. Durante la modelación se realizan varias repeticiones modificando los valores de entrada hasta que se obtengan resultados parecidos a los planteados en el modelo conceptual; es decir, lograr la calibración.

La calibración del modelo tiene como objetivo establecer que los potenciales medidos en campo y el flujo puedan ser reproducidos por el software. Para la calibración se utiliza la herramienta de Estimación de Parámetros (PEST, por sus siglas en inglés), la cual tiene como propósito el asistir en la interpretación de los datos y estimación de parámetros con MODFLOW. PEST toma el control del modelo y ajusta ciertos parámetros especificados para hacer que las diferencias, entre los valores de potenciales hidráulicos generados por el modelo y los valores reales, sean reducidas al mínimo; esto se realiza cuantas veces sea necesario hasta lograr un conjunto óptimo de parámetros.

Sin embargo, hay que considerar que aún lograda la calibración existe una incertidumbre propia de la incapacidad de definir exactamente la distribución espacial de los valores de cada parámetro.

Se ejecutó el programa varias veces utilizando PEST, variando diferentes parámetros y condiciones físicas e hidráulicas específicas que describen la conceptualización del

acuífero, hasta encontrar el ajuste que más se acerque a los potenciales medidos en campo (pozos de observación) y se compararon los parámetros resultantes de la calibración con los valores reportados en la literatura para poder elegir el esquema que reportara una mejor calibración.

Una vez definido el modelo de flujo calibrado, se tiene la base para realizar la simulación con los escenarios de cambio climático.

3.3. TERCERA ETAPA

3.3.1. Integración del modelo de flujo calibrado con los escenarios de cambio climático

En el tercer apartado se integra el modelo hidrogeológico con los escenarios futuros de cambio climático. Para esta etapa, se realizó una revisión bibliográfica en diferentes artículos y portales web de organismos oficiales enfocados en el estudio de los escenarios de cambio climático y las técnicas de acoplamiento de éstos con modelos hidrogeológicos. Esto con el objetivo de decidir cuáles son los escenarios regionales idóneos para simular el comportamiento futuro del flujo subterráneo.

Una vez decididos los escenarios a utilizar se obtuvieron sus bases de datos en formato GeoTIFF, las cuales se encuentran disponibles para su descarga libre y gratuita en la página del Atlas Climático Digital de México (ACDM) de UNIATMOS/UNAM para los RCP y horizontes seleccionados. Se descargaron los 12 mapas mensuales de precipitación y temperatura para cada uno de los escenarios elaborados para México.

El procesamiento de la información de los mapas se realizó con la ayuda del software ArcGis 10. Primero se cortó cada escenario para obtener solo los valores del estado de Yucatán y luego se calculó la precipitación y la temperatura media anual para cada escenario.

Se extrajeron los valores de precipitación y temperatura para cada estación meteorológica y con estas bases de datos se calculó la recarga futura, utilizando la misma metodología para la determinación de la recarga base. Los valores de recarga fueron interpolados mediante el método Kriging con ayuda de Surfer 10.

Las simulaciones se realizaron al correr el modelo hidrológico calibrado con cada escenario de recarga futura.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRIMERA ETAPA

4.1.1. Cálculo de Recarga

Para la estimación de la recarga, primero se obtuvieron los mapas de precipitación y temperatura media anuales. La distribución de la precipitación media anual para el período 1980-2012 se visualiza en la Figura 11. Se puede apreciar que la precipitación varía ampliamente en toda la entidad.

Los valores más altos de precipitación se presentan en la región Noreste a la altura de las poblaciones de Valladolid y Dzan (1450 mm) y al Suroeste, al pie de la Sierrita de Ticul. En contraste, la región costera es la zona donde se registran las menores precipitaciones del Estado (590 mm).

Con respecto a las temperaturas son bastante uniformes (Figura 12), los valores más altos se registran en la región Noroeste del Estado, en las poblaciones donde se tiene la mayor concentración poblacional tal es el caso de la Ciudad de Mérida y su zona conurbada. Las temperaturas más bajas se concentran en dos zonas, la primera al oriente, coincidiendo con las áreas de mayor precipitación, y la segunda en el cono sur del Estado.

En el mapa de recarga (Figura 13) se puede observar que los valores más altos se concentran al Noreste y Suroeste de la entidad coincidiendo con las áreas de mayor precipitación. El máximo valor de recarga calculado es de 434.627 mm/año. Por otro lado, la recarga mínima se da principalmente en la zona costera en los poblados de Celestún y Chixchulub Puerto con valores muy pequeños.

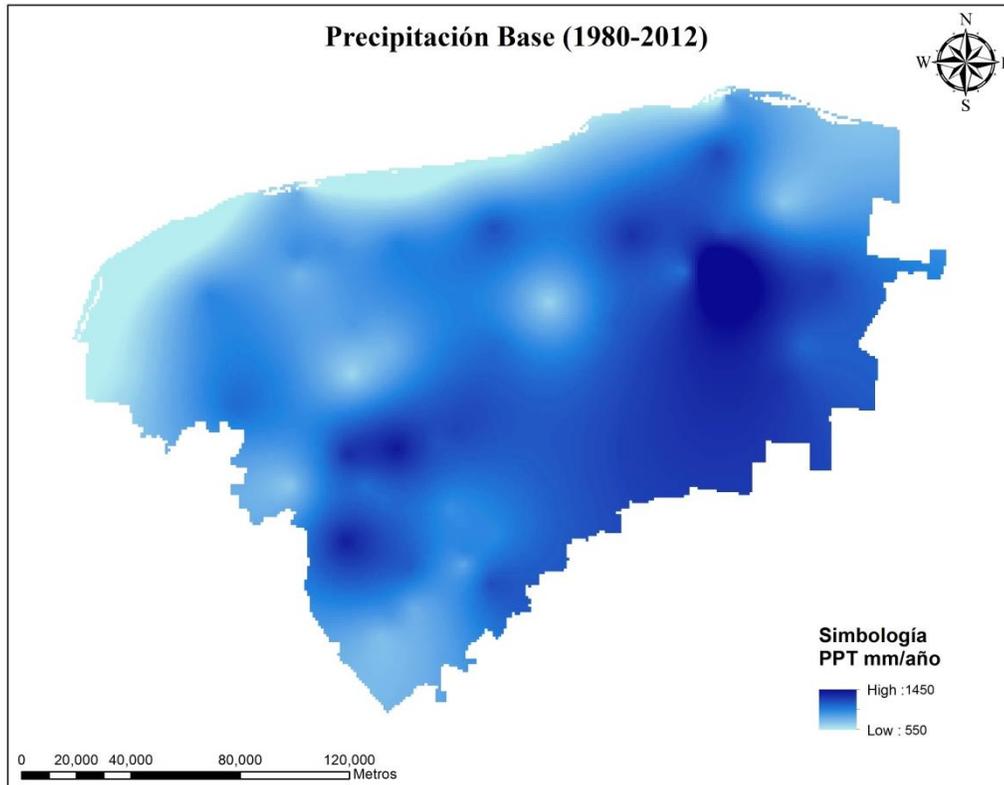


Figura 11. Escenario base de Precipitación para el período (1980-2012).

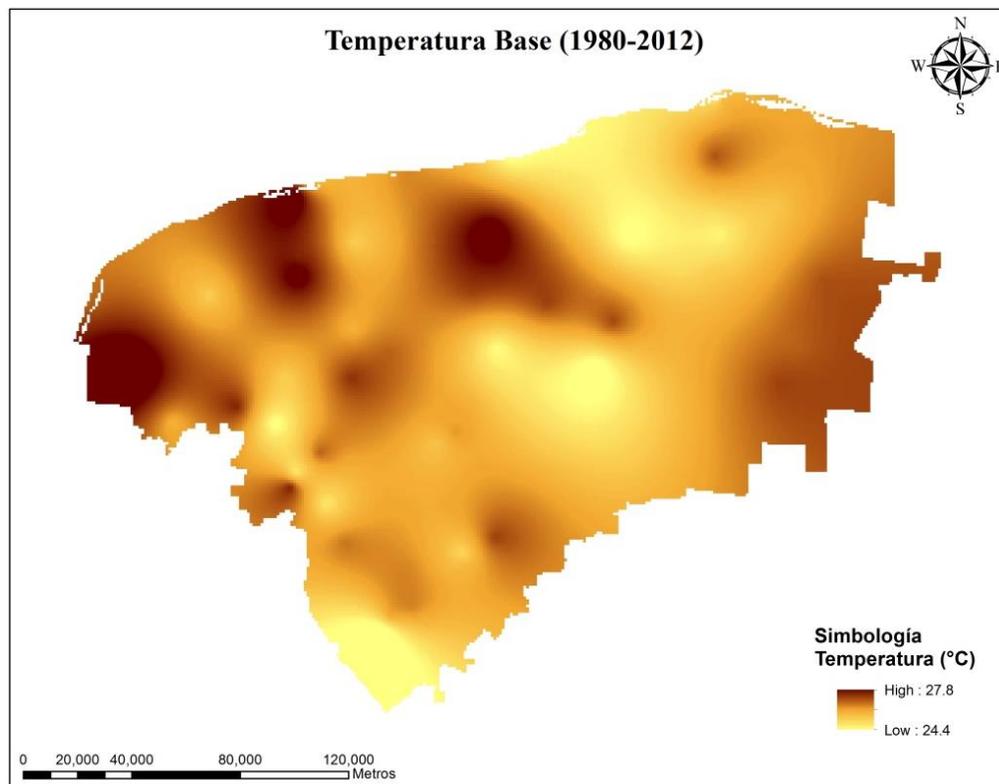


Figura 12. Escenario base de Temperatura media anual para el período (1980-2012).

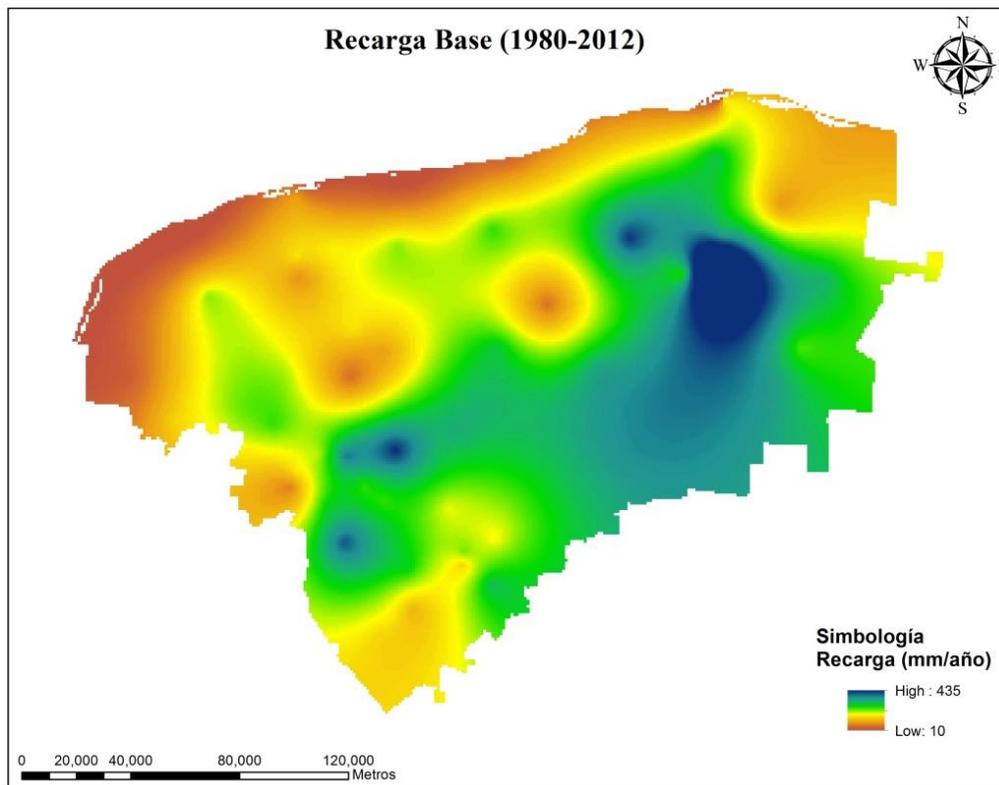


Figura 13. Escenario base de Recarga para el período (1980-2012)

4.1.2. Cálculo de Potenciales Hidráulicos

Con los datos de potenciales hidráulicos y las ubicaciones de los pozos se elaboró el mapa de líneas equipotenciales, o redes de flujo, con el cual se puede observar el movimiento de agua subterránea a simple vista.

El mapa de contornos fue elaborado con datos de distintos puntos de observación, la mayoría concentrados en la costa y en la parte Noroeste del Estado. La escasez de datos en el área de estudio (Sureste y zona central) provoca que los contornos sean calculados arbitrariamente mediante la interpolación por el software. Es decir que los contornos obtenidos pueden no representar correctamente los potenciales reales y por lo tanto deben ser tomados con reserva.

Como se mencionó anteriormente, el agua fluye de los puntos de mayor a menor potencial, por lo tanto en la Figura 14 se puede observar que el flujo es desde tierra adentro hacia el mar, ya que los potenciales hidráulicos disminuyen conforme se acercan hacia la costa. Los valores más altos alcanzan los 3 m y se localizan al Sur-Sureste.

De igual manera, es evidente que en el área donde se localiza la Ciudad de Mérida, se tiene una disminución de potencial que coincide con la zona donde se ubican los campos de pozos que abastecen a la población. También se aprecia un pequeño flujo preferente en las áreas donde la literatura reporta que el anillo de cenotes descarga al mar.

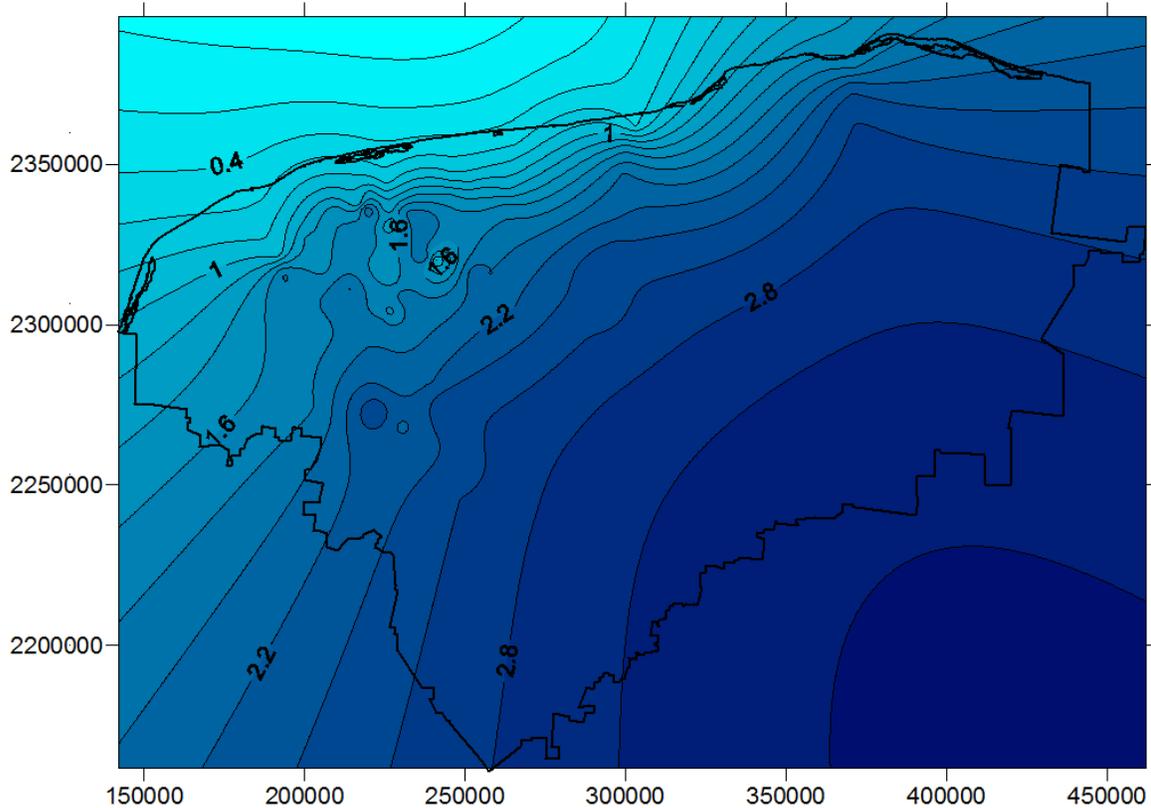


Figura 14. Líneas equipotenciales elaboradas con las bases de datos.

4.1.3. Extracciones

Los pozos de extracción de agua del REPDA (Figura 15), están dispersos por toda la entidad; sin embargo, puede apreciarse áreas de concentración como en la región Noreste donde se encuentran las zonas ganaderas y agrícolas del Estado. Otro conjunto de pozos se agrupan en el área interna del anillo de cenotes, en la zona Noreste donde se localiza Mérida y sus alrededores. Finalmente en el Sur se puede apreciar otro grupo de aprovechamientos. Los mayores volúmenes de extracción se registran en la Zona Metropolitana de la ciudad de Mérida.

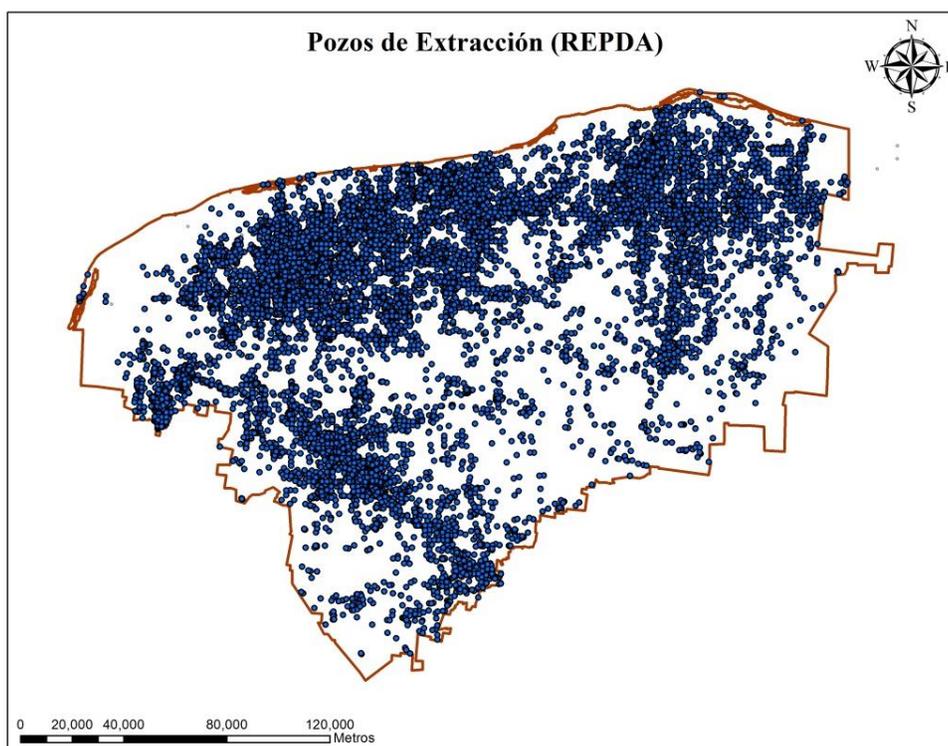


Figura 15. Localización de los Pozos de extracción del REPDA

4.1.4. Modelo Conceptual

Tomando en cuenta lo expuesto en las secciones anteriores el modelo conceptual para el sistema a analizar se define como:

- Un acuífero kárstico no confinado desarrollado en un suelo joven y poroso, de origen calcáreo constituido durante el Cenozoico y Mesozoico, compuesto principalmente por una plataforma de caliza dura, formada por la disolución y precipitación de carbonato de calcio (Lesser y Weidie 1988). Cuenta con numerosas cavidades, cuevas subterráneas y conductos de disolución cuyos tamaños varían desde pequeñas oquedades hasta grandes depresiones, lo que lo convierte en un sistema heterogéneo y anisótropo con una alta porosidad y permeabilidad.
- Tiene un espesor medio de 150 m y se encuentra limitado inferiormente por rocas arcillosas de baja permeabilidad (Casares 2006). Cuenta con un relieve casi plano, con pendientes muy suaves que se incrementan hacia el suroeste y disminuyen hacia la línea de costa.
- Las porosidades en todo el acuífero varían en un amplio rango que va desde el 5 al 55% (González 1984; Brewerton 1993; González et al. 2002).
- El acuífero presenta un amplio rango de conductividades hidráulicas que dependen del tipo de material geológico. Algunas conductividades reportadas para la región van desde los 8,640 m/d (Marín 1990) hasta 96,336 m/d (González et al. 2002). Para la zona costera se tienen valores representativos de conductividad de 8,905 a 49,000 m/d (Casares 2006).
- Las estructuras fisiográficas más importantes del acuífero son la falla denominada Sierrita de Ticul a 70 Km al sur de la ciudad de Mérida y la estructura semicircular conocida como el Anillo de cenotes.
- No presenta corrientes superficiales debido a la poca pendiente y alta permeabilidad, lo cual permite que el agua que precipita se infiltre rápidamente y recargue el sistema (Perry et al. 1989).

- La precipitación es variable, en la costa se reciben 550 mm/año. Conforme se avanza tierra adentro la precipitación aumenta hasta 1440 mm/año en la parte sur.
- La recarga se da principalmente por infiltración y por los flujos provenientes aguas arriba. Algunos autores reportan diferentes porcentajes de recarga que van desde 9 % a 21 % (Juárez 2012). El mapa de recarga elaborado muestra que los valores más altos se concentran al Noreste y Suroeste de la entidad coincidiendo con las áreas de mayor precipitación, con un valor de recarga que alcanza 434.627 mm/año.
- El agua fluye por los conductos de disolución en la roca, eligiendo los senderos preferenciales presentes en las fisuras y cavidades. El flujo subterráneo en el acuífero se mueve desde las zonas de mayor potencial hidráulico, al sur de la entidad, hacia la costa, en forma radial, encontrando a su paso el Anillo de cenotes, el cual se le considera que funciona como un canal de flujo preferencial para las aguas subterráneas, conduciéndolas hacia las zonas de Celestún y Dzilam de Bravo, que son los lugares en los que el Anillo intersecta al mar (Martínez 2012).
- El acuífero es considerado como libre en su mayoría, excepto una franja estrecha paralela a lo largo de la costa compuesta por una delgada capa de caliza poco profunda y prácticamente impermeable conocida como “caliche” de espesor variable no mayor a 3 m, que le da un carácter de confinamiento al acuífero.
- Esta franja confinante se introduce hasta 3 kilómetros mar adentro donde comienza a desintegrarse por efecto de organismos marinos. En la parte continental esta franja varía entre 5 y 7 kilómetros. Este confinamiento produce una elevación de la superficie piezométrica de alrededor de 0.32 a 0.77 m.s.n.m.(Casares 2006; Perry et al. 1989).

- Al ser un acuífero costero presenta el fenómeno de intrusión marina, el cual se da por el equilibrio de agua dulce-agua salada. Este equilibrio está en función del caudal de agua dulce descargado al mar. El agua dulce forma un lente que flota sobre agua salina con un espesor que aumenta gradualmente a medida que se aleja de la línea de costa.
- La profundidad y distancia a la que se encuentra es variable, se adentra en los períodos de menor recarga y retrocede hacia el mar cuando la recarga se incrementa.
- Se consideran dos fronteras de flujo nulo, una al Oeste delimitada por los contornos de flujo y otra al este siguiendo el parteaguas de flujo en la Península de Yucatán.

4.2. SEGUNDA ETAPA

4.2.1. Construcción del modelo de flujo

Con la información obtenida y plasmada en el modelo conceptual, se cuenta con las herramientas necesarias para desarrollar el modelo de flujo con la ayuda de un software especializado. Se decidió trabajar con PMWIN, el cual es un software de libre acceso, relativamente amigable en su plataforma que resulta ser una herramienta eficaz para analizar casos con potenciales impactos ambientales, y de alta repercusión social, ya que permite describir el flujo subterráneo y el transporte de contaminantes.

En el proceso de construcción del modelo de flujo se requiere el diseño de la red o cuadrícula, establecer tiempos, fronteras, espesores, condiciones iniciales y seleccionar valores para los diferentes parámetros del acuífero como conductividad hidráulica, porosidad, recarga y extracciones.

4.2.2. Simulación como Medio Poroso Equivalente

Como se mencionó el acuífero de Yucatán es un sistema heterogéneo, donde la porosidad secundaria provocada por los conductos y oquedades determina el flujo; sin embargo, precisamente debido a la elevada heterogeneidad que muestra, realizar análisis de flujo resulta una tarea de gran dificultad ya que en la mayoría de los casos la información acerca de las fracturas y posición de los ductos, la conductividad y su interconexión es limitada o nula y por lo tanto no es posible modelar de un modo explícito y por separado las diferentes fracturas.

Marín (1990) menciona que la aplicación de métodos numéricos en sistemas kársticos requiere de una metodología de modelación con ciertas adaptaciones especiales, como considerar el sistema como un medio poroso equivalente (homogéneo e isótropo); esto es, sin tomar en cuenta las heterogeneidades implícitas. Por otro lado González (1992) señala que esto es posible suponiendo que:

- El Volumen Elemental Representativo es muy grande con respecto al espaciamiento de los conductos.
- La superficie freática y/o piezométrica está bien definida.

Varios autores han realizados estudios en la Península de Yucatán, usando este concepto y han obtenido resultados satisfactorios (Sánchez y Pinto 1999; González et al. 2002; Gondwe et al. 2010). Para este trabajo se decidió considerar al acuífero como un medio poroso equivalente, homogéneo e isótropo.

4.2.3. Definición de fronteras

Las redes de flujo obtenidas a partir de los potenciales hidráulicos, sirvieron para definir las fronteras hidráulicas a las cuales se sometió el modelo.

Se definieron dos zonas de flujo nulo. La primera se localiza al pie de la Sierrita de Ticul, la cual se obtuvo trazando líneas perpendiculares a las líneas equipotenciales (Figura 15), colocadas de manera tal que fueran lo más paralelas posibles entre sí.

La segunda se definió utilizando el mapa de líneas de corriente, trazando una línea sobre el parte aguas ubicado al Este de la entidad (Figura 7). Ambas líneas se prolongaron hasta su intersección. Adicionalmente se definió una frontera de potencial constante, ubicada a lo largo de la línea de costa y con un potencial igual a cero. En la Figura 16 se observa un mapa con las fronteras de flujo del modelo.

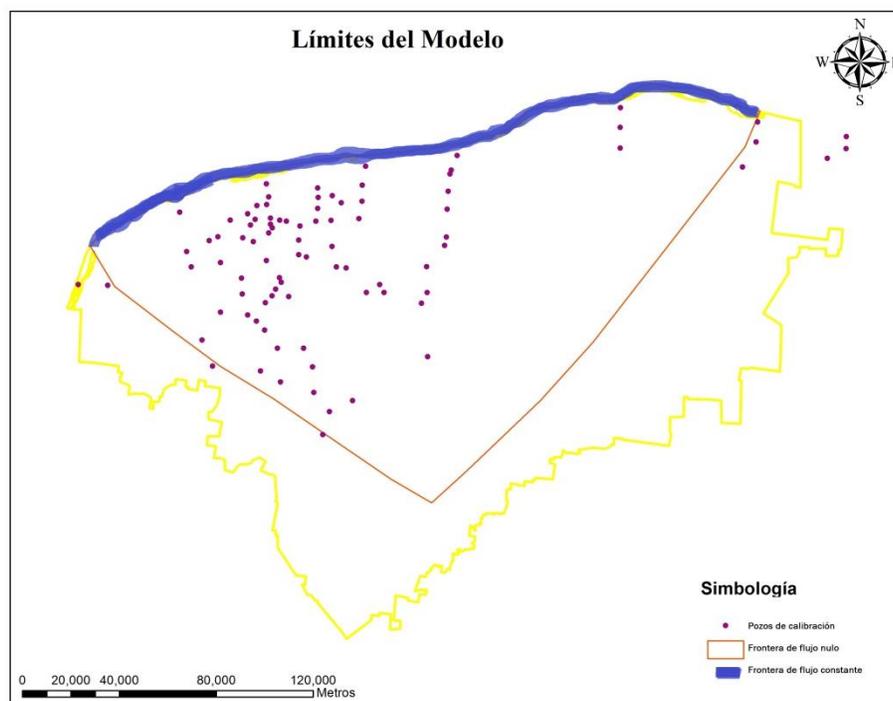


Figura 16. Fronteras de flujo del modelo.

4.2.4. Definición de la cuadrícula

La cuadrícula se definió teniendo en cuenta la extensión del área de estudio y considerando que mientras más fina sea la malla, el proceso de cálculo es más complejo y tardado. La extensión del área de estudio ocupa un rectángulo de 320 x

230 km, por lo que se tomó la decisión de utilizar celdas de 2 x 2 km. El modelo quedó compuesto por 90 filas y 143 columnas que equivalen a 12,870 celdas, de las cuales 6,700 se encuentran activas y ocupan un área de 26,800 Km².

Por otro lado, en la zona costera del área de estudio, se observó que los potenciales hidráulicos calculados no concuerdan con el potencial de valor 0 en la línea de costa. Esto se le atribuye al incremento de los potenciales hidráulicos en esa zona debido al confinamiento provocado por el caliche, que da como resultado la presencia de descargas de agua dulce en el mar a aproximadamente a 3 km de distancia del litoral. Como se observa en la Figura 17, se modificó la frontera de potencial constante, desplazándola mar adentro a una distancia aproximada de 4 km asignándole un valor de 0m, de tal manera que se pudiera simular las descargas submarinas.

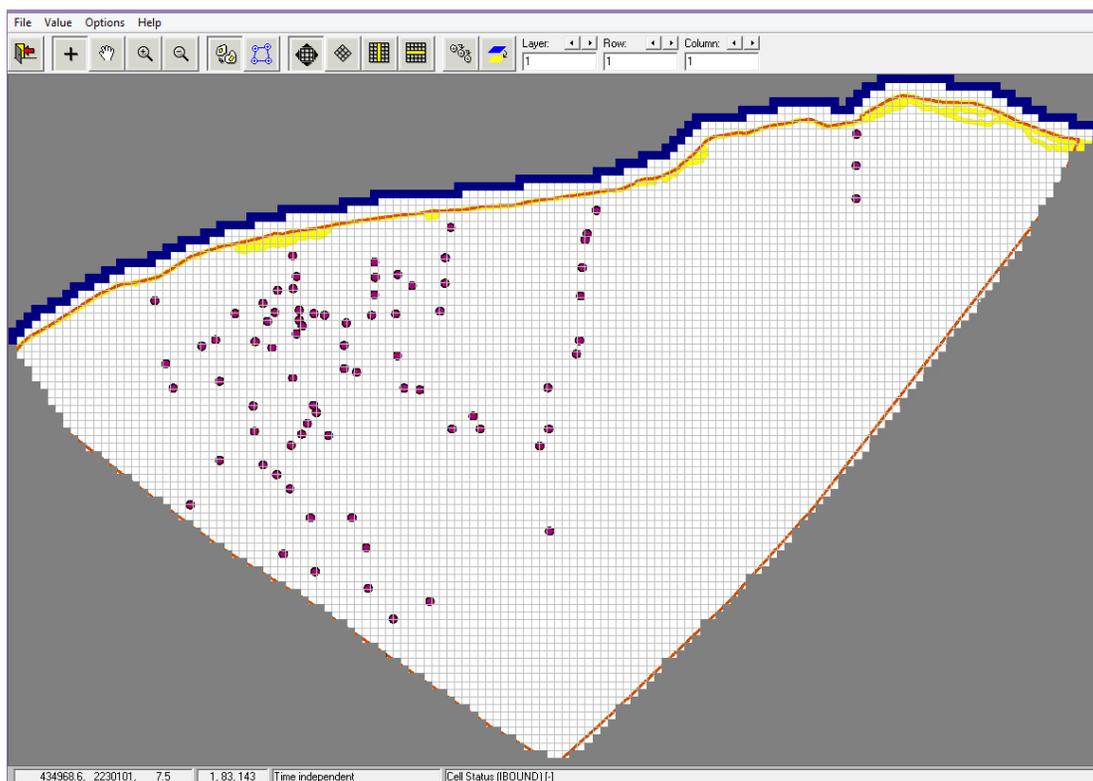


Figura 17. Cuadrícula del modelo y reubicación de la frontera de potencial constante.

4.2.5. Espesor y estratos del acuífero.

El espesor del acuífero se especifica en el programa, proporcionando valores de profundidad tanto para la capa de techo (Top Layer) como para la base o fondo (Bottom Layer) de cada estrato a considerar. Según la literatura el acuífero alcanza en promedio una profundidad de 150 m, se tomó este valor como referencia para el fondo del modelo (Casares 2006).

El valor de techo, en un principio se definió con la topografía general de la zona de estudio mediante el DEM; sin embargo, al hacer las primeras simulaciones se tuvieron problemas de convergencia y celdas secas. Por lo tanto, y considerando que el área de estudio yace sobre una superficie relativamente plana, se tomó el techo del acuífero como un valor constante y se le asignó el valor de 20 m que es la altura que alcanza el punto más alto del modelo, al pie de la Sierrita de Ticul. Se utilizaron inicialmente tres estratos o capas para el modelo, los valores de techo y fondo de cada capa se definieron considerando la estructura geológica del acuífero.

4.2.6. Parámetros del sistema

- **Potenciales Hidráulicos**

El mapa de flujo se ajustó para que su resolución concuerde con la cuadrícula del modelo, luego se exportó como formato ASCII de tal manera que pudiera incluirse en el modelo como una matriz, la cual sirvió para definir los parámetros iniciales de la simulación. Esto con la finalidad de que el software ejecute en menor medida los cálculos y alcance la convergencia en menor tiempo.

A su vez se ingresaron al modelo la base de datos de los potenciales hidráulicos obtenidos anteriormente. Estos fueron el principal criterio de calibración.

- **Porosidad efectiva**

Las porosidades en el acuífero varían en función del tipo de formación geológica y su grado de consolidación. Diversos autores han reportado valores diferentes, como se explicó anteriormente; sin embargo, ya que el modelo de flujo de agua subterránea se realizó en régimen estacionario, la porosidad efectiva no es un parámetro que influya en la simulación.

- **Recarga regional**

El mapa de recarga se ajustó para que su resolución concordara con la cuadrícula del modelo, se exportó como formato ASCII y se ingresó al modelo.

- **Conductividad hidráulica (K)**

Como se mencionó en el modelo conceptual, para el acuífero de Yucatán se han reportado varios valores de conductividad hidráulica. Ésta depende de la formación de la roca y su permeabilidad. Por lo tanto en el proceso de ejecución se definieron varias zonas con diferentes valores de conductividad. Se le pidió al programa que con base en esas zonas calculara las conductividades hidráulicas con las que se obtenía la mejor calibración.

Los valores reportados en la literatura sirvieron para establecer los rangos en los que se presume que las conductividades deben encontrarse.

- **Extracciones**

Para poder simplificar la información y utilizarla en la construcción del modelo, se sobrepuso la cuadrícula del modelo al mapa de pozos de extracción. Se calculó el volumen total de extracción de cada celda en donde se tenían pozos y se le asignó este valor a su celda correspondiente creando una nueva base de datos. Este

archivo se transformó a formato Raster y luego se exportó a un archivo ASCII compatible con el modelo (Figura 18).

Sin embargo, durante la ejecución del modelo, se tuvieron algunos problemas ya que se obtuvieron celdas vacías (secas) en algunas regiones como por ejemplo la zona metropolitana de la ciudad de Mérida y en la zona costera, ya que el programa toma el valor asignado a cada celda como si el volumen de extracción fuese realizado por un único pozo localizado al centro de la celda y con un área de influencia muy grande, lo que genera un abatimiento muy grande que no sucede en la realidad.

Por tal motivo se decidió trabajar con un volumen representativo y esto se consiguió al dividir el volumen de extracción guardado en cada celda entre el área correspondiente a la cuadrícula ($4 \times 10^6 \text{ m}^2$) y así el volumen de extracción se reduce a un área de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.

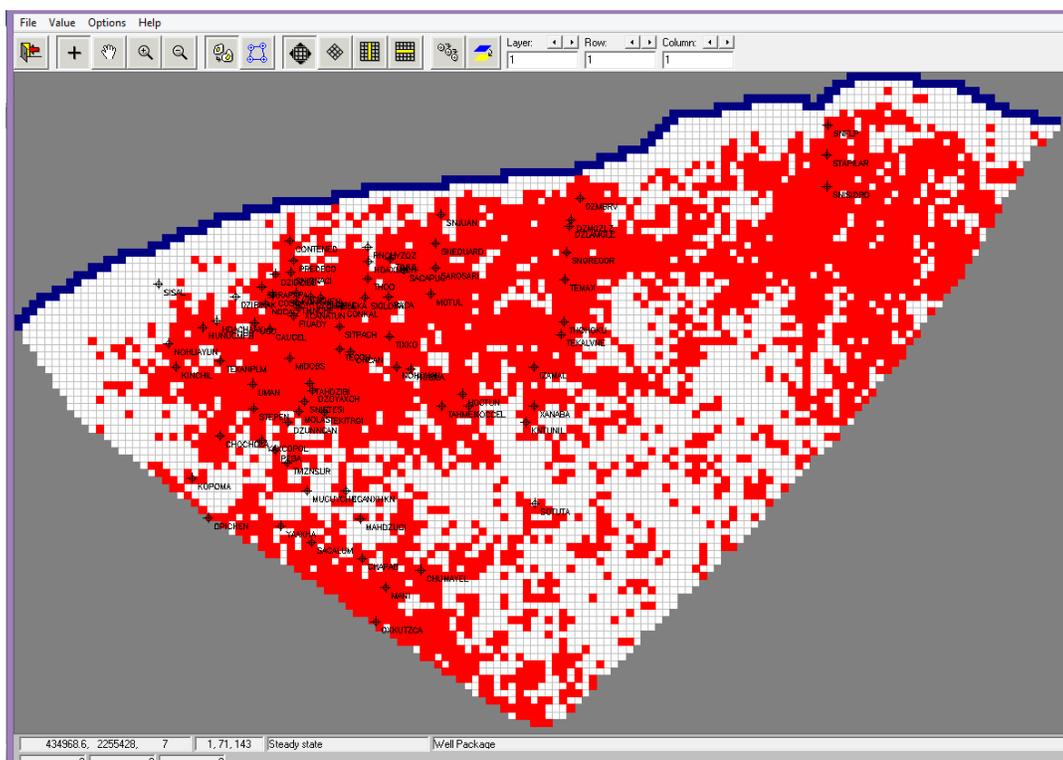


Figura 18. Ubicación del mapa de volúmenes de extracción de agua en el modelo.

4.2.7. Consideraciones de la modelación

- El acuífero fue modelado como homogéneo e isótropo.
- Todos los parámetros utilizados en la construcción del modelo fueron convertidos a unidades compatibles.
- El modelo se ejecutó en estado permanente, por lo que valores como la porosidad no fueron definidos.
- Las extracciones se ubicaron a una profundidad de 30-40m siguiendo lo reportado por PRONACOSE (2014) y Bonilla (2015).

4.2.8. Esquemas y parámetros de calibración

Para realizar la calibración del modelo se plantearon diferentes esquemas con parámetros hidráulicos y condiciones físicas específicas, tratando de describir el acuífero lo mejor posible.

La conductividad hidráulica fue el parámetro que sirvió para la calibración. Se le asignó un rango de valores a PEST y éste ejecutó el programa hasta que logró la mejor calibración. Para ello se consideraron los valores de conductividad hidráulica reportados en la literatura (Sánchez y Pinto 1999; González et al. 2002; Marín 1990)

Se definieron 4 zonas geohidrológicas principales para el modelo. La Sierrita de Ticul, el área de confinamiento en la costa, la plataforma caliza y el anillo de cenotes (Figura 8).

Esquema 1

Este primer concepto considera que el acuífero es completamente homogéneo, por lo tanto se le asignó un único parámetro de conductividad hidráulica. Se trabajó con valores entre 0.1 y 1 m/s.

Aunque el modelo se definió como un estrato o plataforma, por facilidad en la simulación se dividió en tres capas. Se asignó un valor de 20 m.s.n.m para el “Top Layer” y la profundidad del acuífero se definió como 150 m. Los pozos de extracción se ubicaron a 35 m por debajo del nivel medio del mar.

La mejor calibración arrojada por PEST se obtuvo para una conductividad hidráulica de 6.35×10^{-2} m/s. El mapa de contornos para este modelo (Figura 19) muestra una distribución uniforme de las líneas equipotenciales, las cuales tienden a tomar la forma de línea de costa. El flujo se mueve desde el sur hacia el litoral, con un potencial hidráulico máximo de 4.10 m.

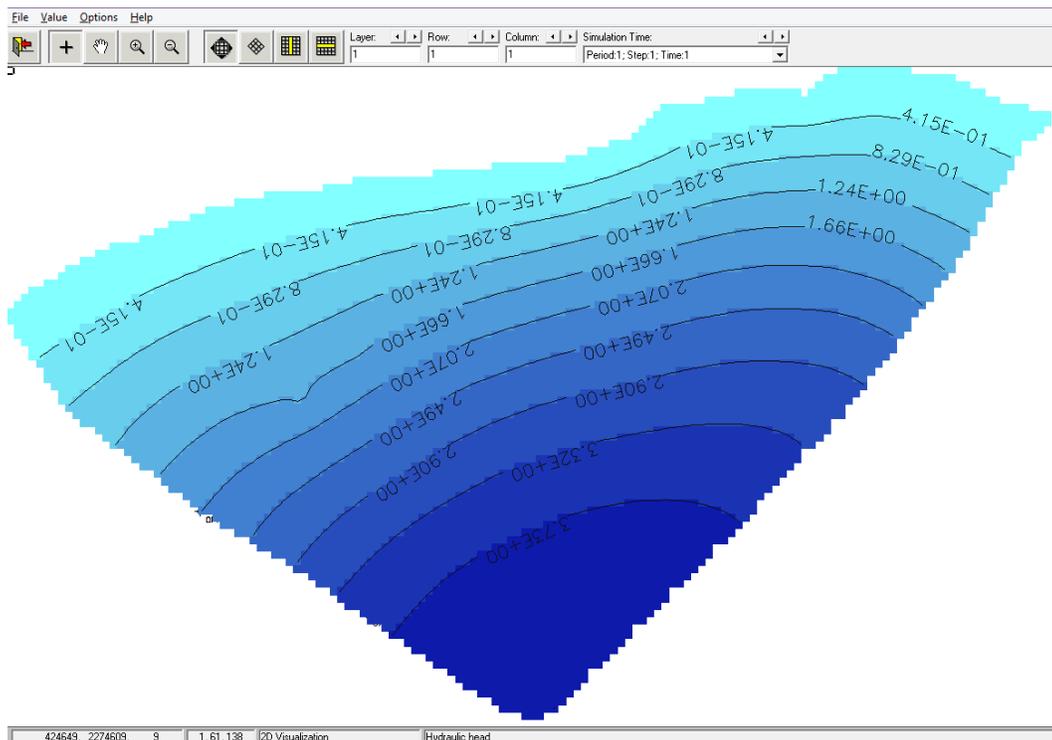


Figura 19. Contornos equipotenciales para el esquema 1

Esquema 2

Para este modelo, se utilizó el concepto de 3 capas o estratos. En este modelo se definieron tres zonas geohidrológicas con diferentes conductividades hidráulicas: la

caliza que ocupa la mayor área del modelo, la capa confinante de caliche en la costa y la estructura geológica del anillo de cenotes.

Estas zonas se definieron siguiendo la distribución marcada en el mapa de geomorfología. La literatura reporta que el caliche tiene una profundidad variable, pero en esta simulación se le asignó un valor de 2m. Los pozos de extracción se mantuvieron a la misma profundidad que el esquema anterior (Figura 20).

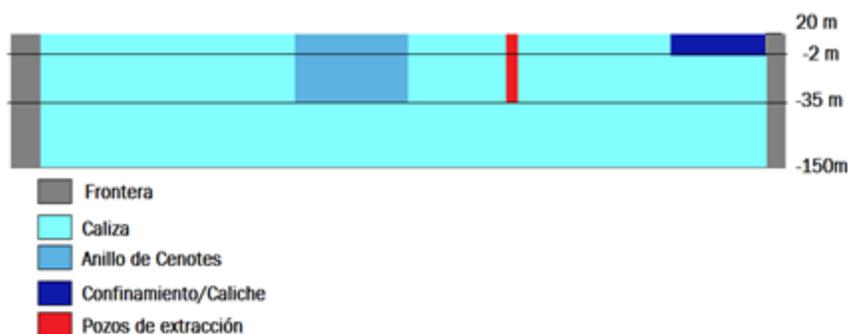


Figura 20. Diagrama del esquema 2.

Los valores obtenidos con la mejor calibración se presentan en la Tabla 5. Este mapa de contornos (Figura 21) muestra una configuración parecida a la anterior, los mayores potenciales hidráulicos se ubican también al sur; sin embargo, están ligeramente inclinados y desplazados hacia el norte alcanzando un valor máximo de 4.60m. A su vez en este mapa se puede apreciar una ligera tendencia de los contornos, en donde se definió el anillo de cenotes.

Tabla 5. Valores Estimados por PEST para el esquema 2.

Valores estimados	
Zona	K (m/s)
Plataforma caliza	3.80E-02
Costa /Caliche	9.80E-08
Anillo de Cenotes	9.20E-01

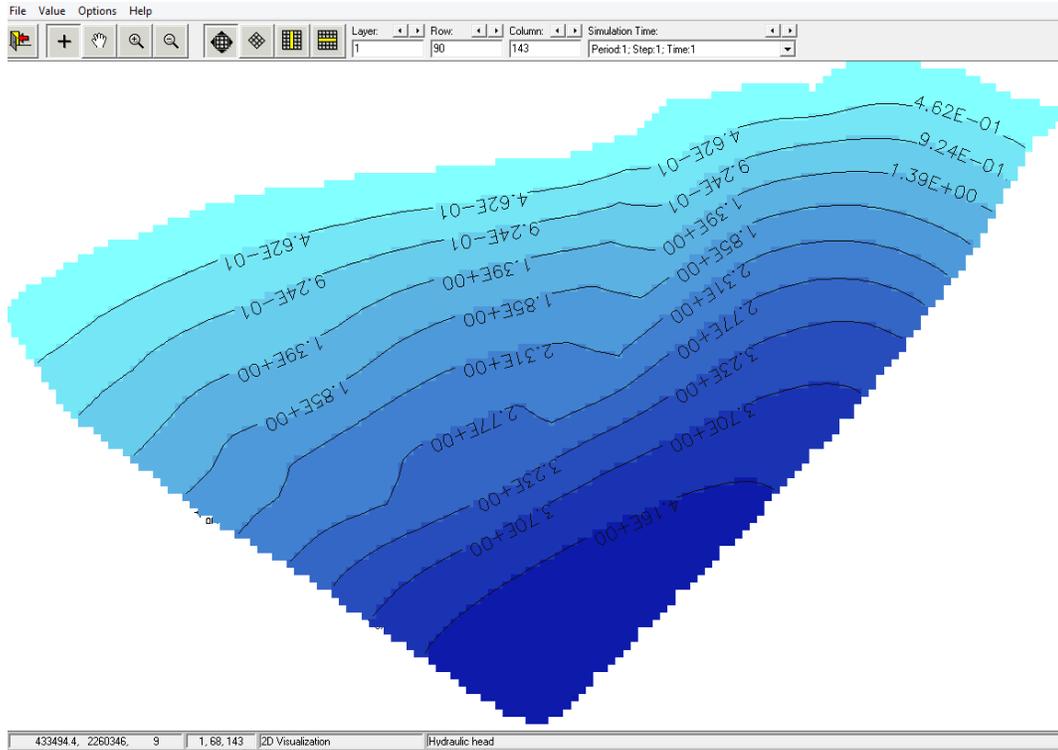


Figura 21. Contornos equipotenciales para el esquema 2.

Esquema 3

Para este modelo se trabajó con las zonas del concepto anterior y además se agregó la zona de la Sierrita de Ticul. La configuración de las capas así como la distribución de las zonas a evaluar se aprecian en la Figura 22.

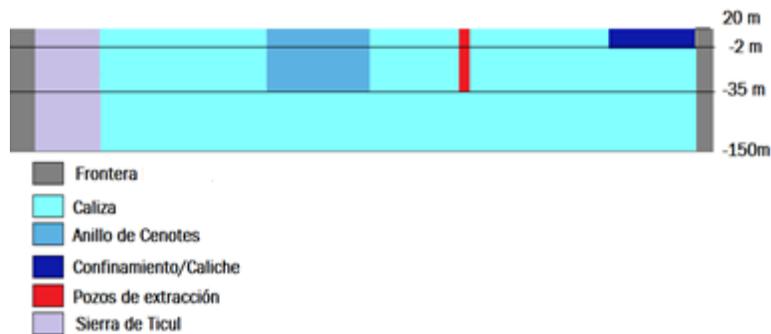


Figura 22. Diagrama del esquema 3.

Al ejecutar inicialmente este esquema y permitir que PEST calculara la conductividad hidráulica para las cuatro zonas, los valores estimados por el programa no coincidían con lo reportado en la literatura.

Por ejemplo, las mejores calibraciones dieron como resultado que la conductividad hidráulica para la Sierrita de Ticul era mayor que la caliza, por dos órdenes de magnitud. Contrario a lo obtenido por González et al. (2002), en el que obtuvieron una buena calibración definiendo la Sierrita de Ticul con una conductividad hidráulica menor de 0.005 m/s.

Por lo tanto, se decidió asignar este valor de conductividad hidráulica a la región de la Sierrita de Ticul y mantenerlo fijo. Los parámetros estimados por el programa para la mejor calibración se exponen en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores Estimados por PEST para el esquema 3.

Valores estimados	
Zona	K (m/s)
Plataforma caliza	4.08E-02
Costa /Caliche	8.55E-07
Anillo de Cenotes	6.02E+00
Sierra de Ticul	5.00E-03

Los contornos calculados por el modelo (Figura 23) muestran una cierta similitud con los obtenidos en los esquemas anteriores. Los potenciales son mayores al Sureste del modelo, generando un flujo que se mueve hacia la costa. Sin embargo, con este esquema los contornos se agrupan en la costa debido al alto valor de conductividad hidráulica estimada para esta zona.

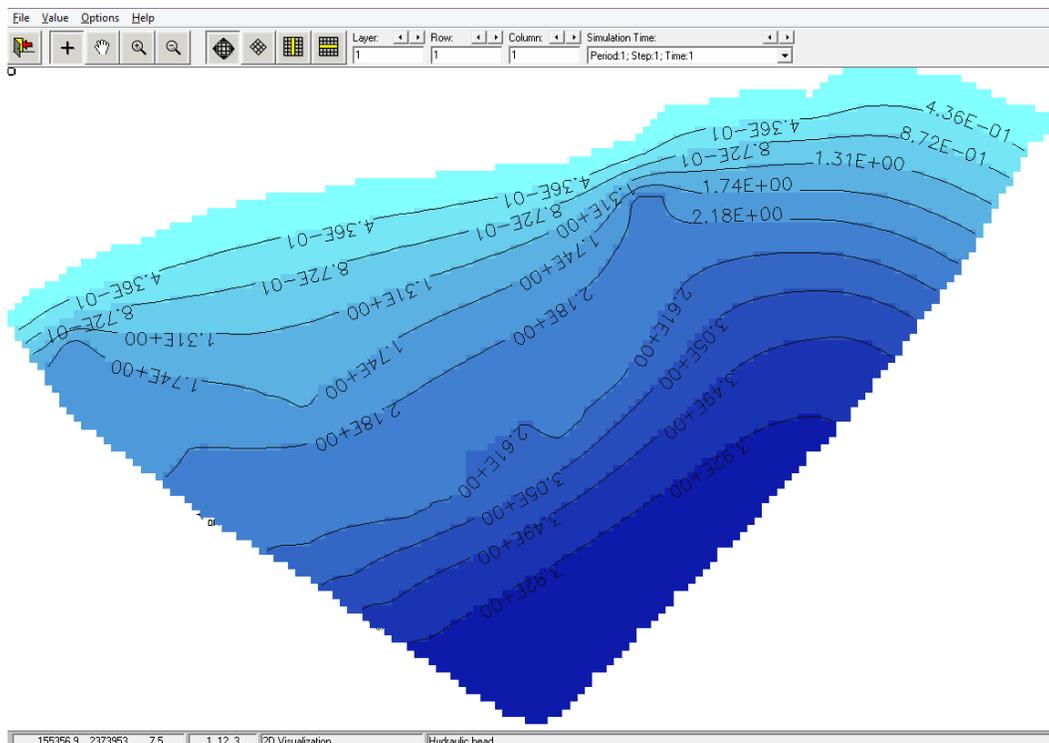


Figura 23. Contornos equipotenciales para el esquema 3.

Esquema 4

Para este modelo, se consideraron al igual que el modelo anterior 4 zonas geohidrológicas, pero a diferencia de los anteriores en este modelo se definieron 5 estratos, para tener un mayor detalle y definir mejor las zonas en el modelo. En la Figura 24 se muestra una esquematización donde se puede observar la configuración de los estratos así como sus límites superiores e inferiores.

El mapa de estructuras geomorfológicas muestra que la Sierrita de Ticul pertenece a la formación Icaiché, la cual alcanza una profundidad aproximada de 60m y luego se mueve hacia el norte siguiendo una configuración escalonada que se presume es debido a las fracturas.

Siguiendo la distribución marcada en el mapa de geomorfología se definió la geometría y distribución de las 4 zonas geohidrológicas. Los pozos de extracción se colocaron a una profundidad de 35m debajo del nivel medio del mar.

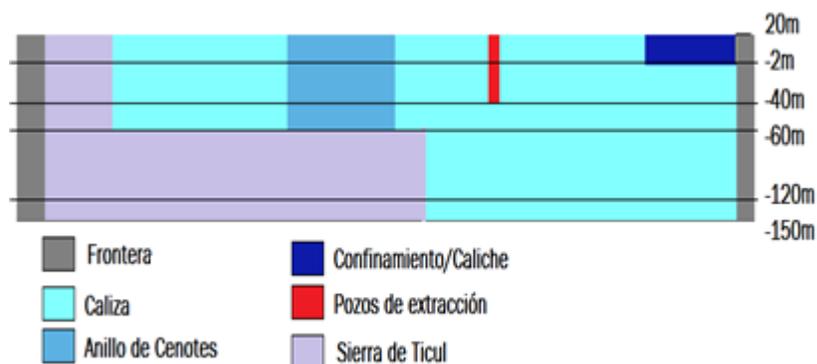


Figura 24. Diagrama del esquema 4.

La mejor calibración estimada por PEST se alcanzó con las conductividades hidráulicas que se presentan en la Tabla 7.

El mapa de contornos (Figura 25) muestra que los potenciales hidráulicos alcanzan su mayor valor en la zona Noreste del modelo, siendo éste de 5.1 m. También se observa el flujo preferente debido al anillo de cenotes.

Tabla 7. Valores Estimados por PEST para el esquema 4.

Valores estimados	
Zona	K (m/s)
Plataforma caliza	1.71E-02
Costa /Caliche	2.54E-09
Anillo de Cenotes	1.69E+00
Sierra de Ticul	2.10E-01

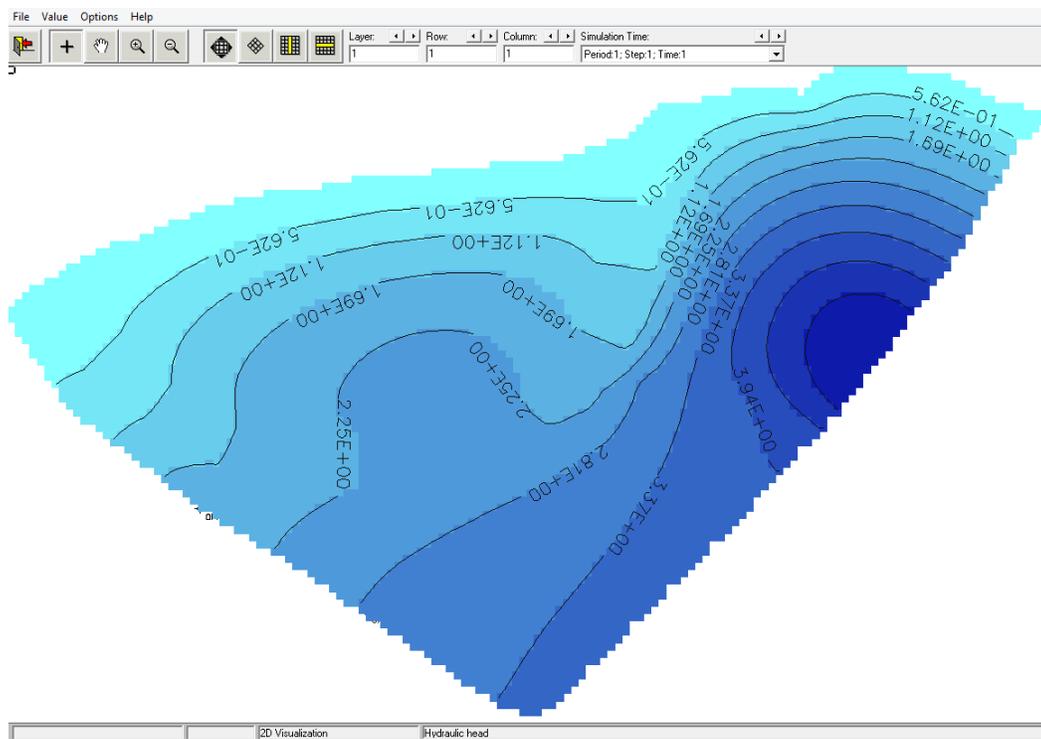


Figura 25. Contornos equipotenciales para el esquema 4.

4.2.9. Evaluación de la Calibración

Los resultados de la calibración fueron evaluados cualitativamente comparando los mapas resultantes de cada esquema con los contornos de flujo calculados con los pozos de observación. Esta comparación da una idea de la distribución espacial de los errores en la calibración.

Visualmente los mapas de contornos muestran semejanzas, y hasta cierto punto todos se parecen al mapa de líneas equipotenciales y por lo tanto decidir el mejor esquema calibrado puede llegar a ser muy subjetivo.

Además se debe tomar en cuenta que debido a la falta de pozos de observación en la región Sureste del Estado las líneas equipotenciales en esta zona son generadas por el programa utilizando la interpolación Kriging y por lo tanto no se tiene certeza de que en la realidad sigan esa configuración.

El cálculo de los errores promedios entre las diferencias de potenciales es una herramienta más objetiva que permite evaluar los esquemas y tomar una mejor decisión al respecto. El error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) es la raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado entre potenciales medidos y simulados (Anderson y Woessner 1992):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2} \quad (10)$$

Donde:

h_m = potenciales medidos [m]

h_s = potenciales calculados [m]

n = número de observaciones

Por lo general el RMSE es la herramienta mejor y más precisa para medir los errores además de ser la más utilizada para tomar una decisión de entre un conjunto de valores.

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para cuantificar la incertidumbre de los modelos calibrados provocados por las diferentes condiciones que definen cada esquema. La Tabla 8 ilustra los errores calculados para los 4 esquemas planteados.

Tabla 8. Errores medios de cada esquematización.

	Esquema 1	Esquema 2	Esquema 3	Esquema 4
RMSE	0.5567	0.5192	0.4279	0.3427

Como se puede apreciar el error fue disminuyendo con cada esquema. El esquema 4 fue el que obtuvo la mejor calibración con el menor RMSE. Este error es comprensible y se acerca a los errores reportados por González (1992) y Sánchez y Pinto (1999).

Cabe mencionar que las diferencias que existen entre los potenciales calculados y los medidos en campo, pueden atribuirse a las heterogeneidades locales presentes en el acuífero. Se debe recalcar que aunque el modelo se pudo realizar considerándolo como un medio poroso homogéneo, en realidad el acuífero se trata de un sistema kárstico.

Los valores estimados en el esquema 4, sugieren que la Zona de Ticul tiene una conductividad hidráulica mayor (2.1×10^{-1} m/s) por un orden de magnitud que la conductividad de la caliza (1.71×10^{-2}). Sin embargo, esto podría deberse a que cercano a esa zona, se presume la existencia de la Falla de Ticul, la cual podría hacer cambiar las condiciones del flujo del agua subterránea (Perry et al. 2002; Velázquez 1986; Bauer-Gottwein et al. 2011).

Esto justificaría los valores estimados por el modelo. Se podrá decir que debido al fracturamiento en esa zona se tiene una frontera de flujo que permite el incremento de la conductividad hidráulica.

En resumen el modelo que mostró el mejor ajuste con los datos observados fue el Esquema 4, el cual está definido por 5 estratos. Es un sistema en el que se consideran las 4 zonas geohidrológicas con conductividades hidráulicas diferentes, las cuales se definieron siguiendo el mapa de estructuras geomorfológicas del estado de Yucatán.

Para el caliche de la costa se obtuvo una conductividad hidráulica de 2.54×10^{-9} m/s, lo cual es un valor bastante pequeño que coincide con materiales consolidados y de baja permeabilidad. Se estimó una conductividad hidráulica de 1.69 m/s, 2.1×10^{-1} y 1.71×10^{-2} m/s para el anillo de cenotes, la Sierrita de Ticul y para el resto del área (caliza), respectivamente.

4.3. TERCERA ETAPA

4.3.1. Escenarios de cambio climático

Entre los escenarios disponibles para México, se consideró trabajar con los nuevos escenarios de cambio climático que en lugar de proyectar emisiones de GEI considerando escenarios socioeconómicos (SRES), utilizan los forzamientos radiativos o RCP, y permiten obtener proyecciones de las concentraciones de GEI siguiendo su trayectoria a través del tiempo.

A pesar de que cada una de las simulaciones obtenidas con los GCM aportan una imagen plausible del clima a futuro, sus resultados se encuentran muy dispersos debido a que cada modelo fue construido considerando simplificaciones y características distintas del sistema atmosférico. La dispersión entre estos experimentos habla de la confianza o incertidumbre del pronóstico. Se recomienda que para generar escenarios del clima futuro se trabaje con diversos GCMs acoplados, con la finalidad de conocer el rango más probable de condiciones futuras del clima a partir de establecer en dónde se encuentra la mayor parte de las soluciones y de esta manera tener una menor incertidumbre (Magaña 2010).

Considerando lo anterior se decidió utilizar en esta investigación los escenarios generados a partir del Ensamble multimodelo (REA). Este ensamble fue generado con base en 15 MGC, cuenta con una resolución espacial de 926 x 926 km en la cual consideraron la topografía regional. La climatología base que utilizaron para su construcción pertenece al WorldClim-Global Climate Data para el período 1950-2000.

Este REA se evaluó para dos forzamientos radiativos RCP de 4.5 y 8.5, considerando los horizontes futuro cercano y lejano (Figura 26).

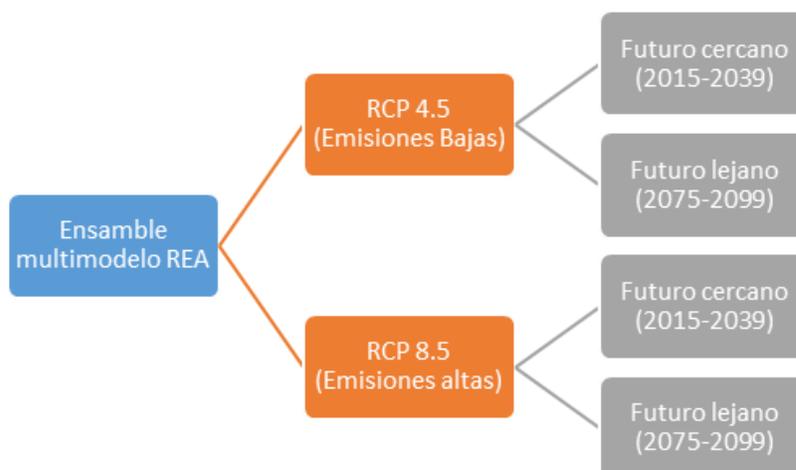


Figura 26 . Conceptualización de los escenarios de cambio climático.

En las Figuras 27 a 30 se muestran los cuatro mapas de los escenarios regionales de precipitación anual para el estado de Yucatán. Se puede apreciar que los cuatro escenarios proyectan una disminución de la precipitación. Como se mencionó anteriormente la precipitación base (Figura 11) se distribuye en un rango de 550 a 1450 mm anuales.

El escenario que reporta el menor descenso corresponde al escenario de Emisiones bajas a futuro cercano con valores de precipitación que van desde 411 a 1311 mm anuales. Las precipitaciones proyectadas para los escenarios de Emisiones bajas a futuro lejano son parecidas a los valores obtenidos con el escenario de Emisiones altas a futuro cercano, los cuales reportan 415 a 1298 mm/año y 412 a 1295 mm/año, respectivamente.

El escenario de Emisiones altas a futuro lejano es el más desfavorable, en él se aprecia una disminución de la precipitación que va de 350 a 1190 mm anuales.

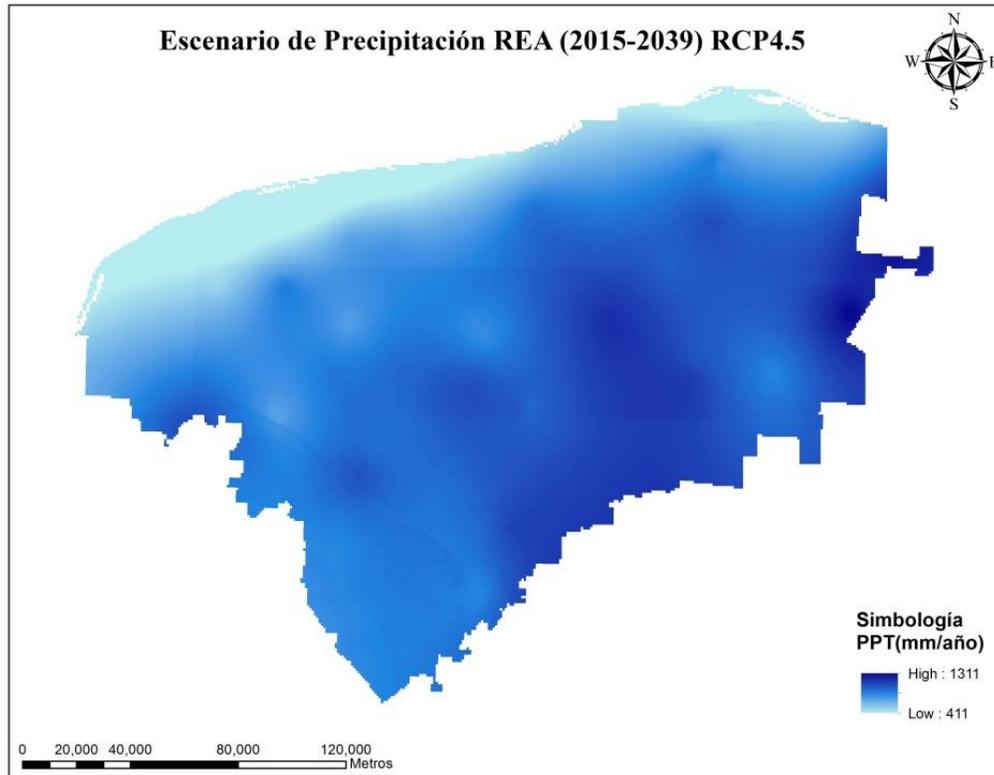


Figura 27. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro cercano

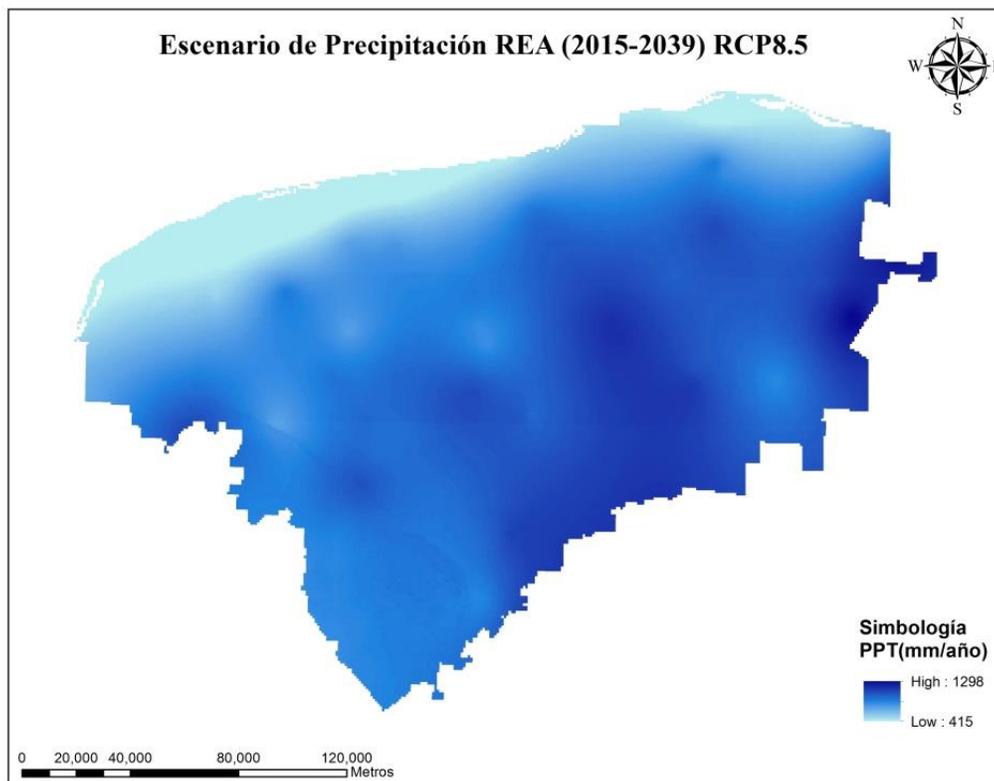


Figura 28. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro cercano

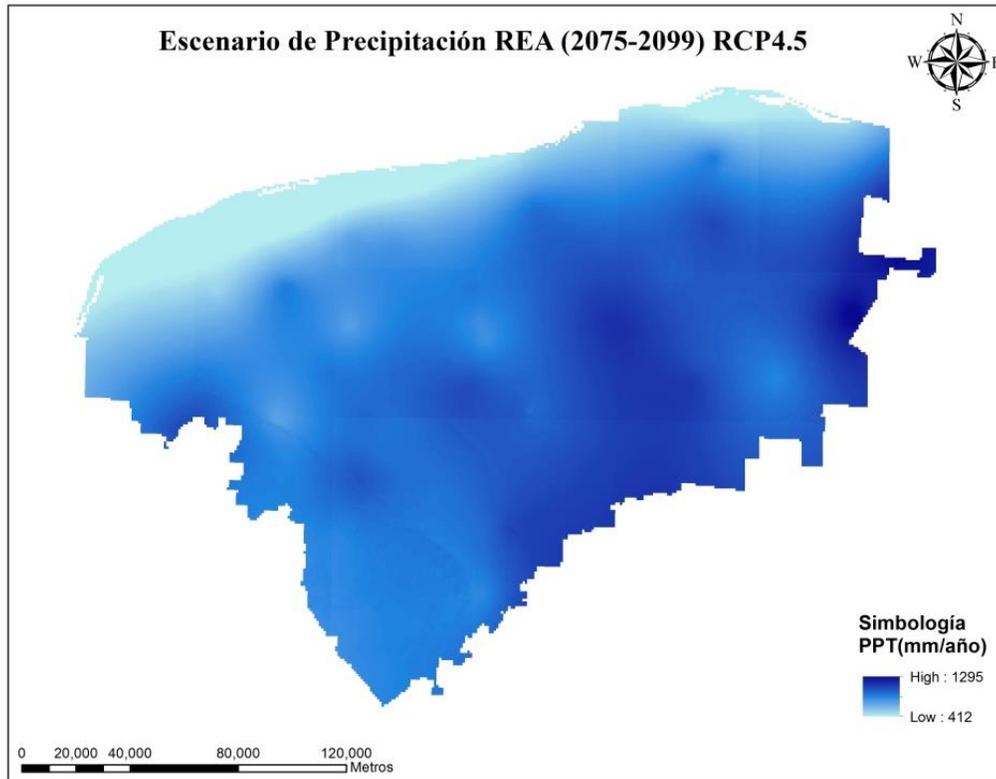


Figura 29. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro lejano.

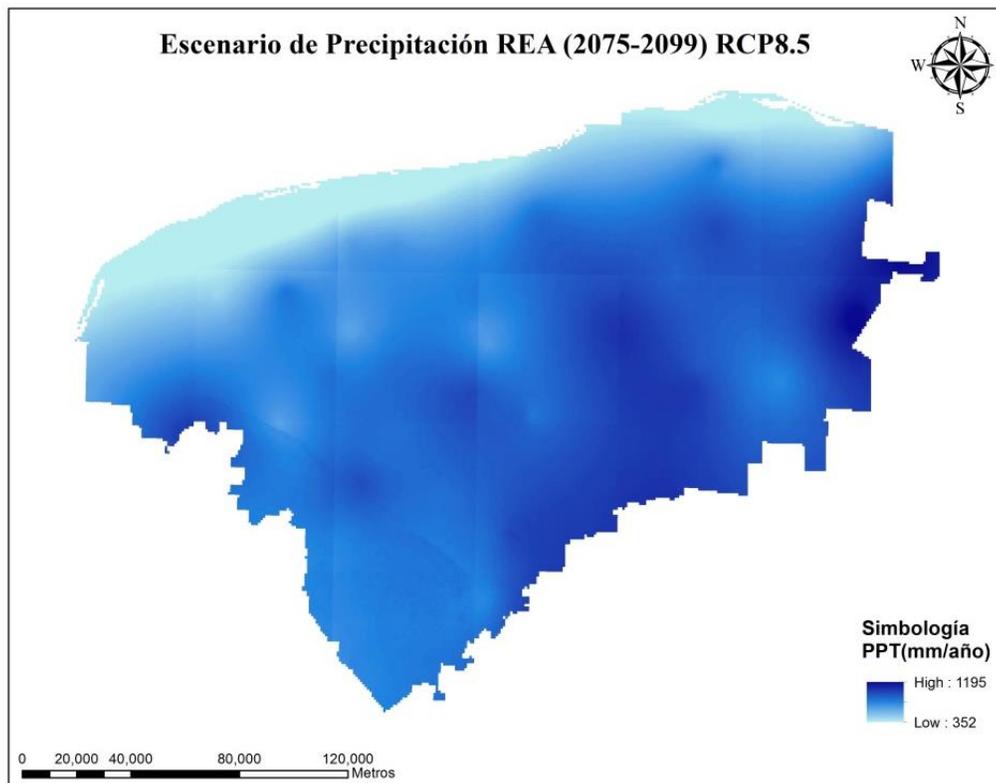


Figura 30. Escenario de Precipitación del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro lejano.

En las Figuras 31 a 34, a su vez, se presentan los cuatro mapas de los escenarios regionales de temperatura media anual para el estado de Yucatán. Se puede apreciar que los cuatro escenarios proyectan una elevación en las temperaturas medias, concentrando los valores más altos en dos zonas principalmente al centro y Noroeste de la entidad. En el mapa de temperatura base elaborada previamente se observa que los valores en la entidad están en un rango de 24.3 a 27.3 °C (Figura 12).

El escenario que reporta el menor aumento de temperatura corresponde al escenario de Emisiones bajas, futuro cercano. En contraste, el mayor aumento de la temperatura media se reporta en el escenario de emisiones altas a un futuro lejano con temperaturas medias que podrían oscilar entre los 28.2 a 30.6°C.

Con la información de temperatura y precipitación de cada escenario se calculó la recarga utilizando el método de Turc (Figuras 35 a 38). Los cuatro escenarios coinciden con una disminución de la recarga en relación a la recarga base, la cual alcanza un valor máximo de 434 mm al año (Figura 13).

La recarga máxima que proyecta el escenario de emisiones bajas al horizonte cercano disminuye hasta 204 mm al año. El escenario de emisiones bajas a futuro cercano proyecta un descenso en la recarga, que alcanza un valor máximo de 170 mm. El escenario de emisiones altas reporta recargas máximas de 197 y 106 mm para futuro cercano y lejano, respectivamente.

Esta disminución de la recarga se debe que los escenarios de cambio climático proyectan un aumento generalizado de las temperaturas medias, y un descenso en la precipitación, provocando una mayor evapotranspiración.

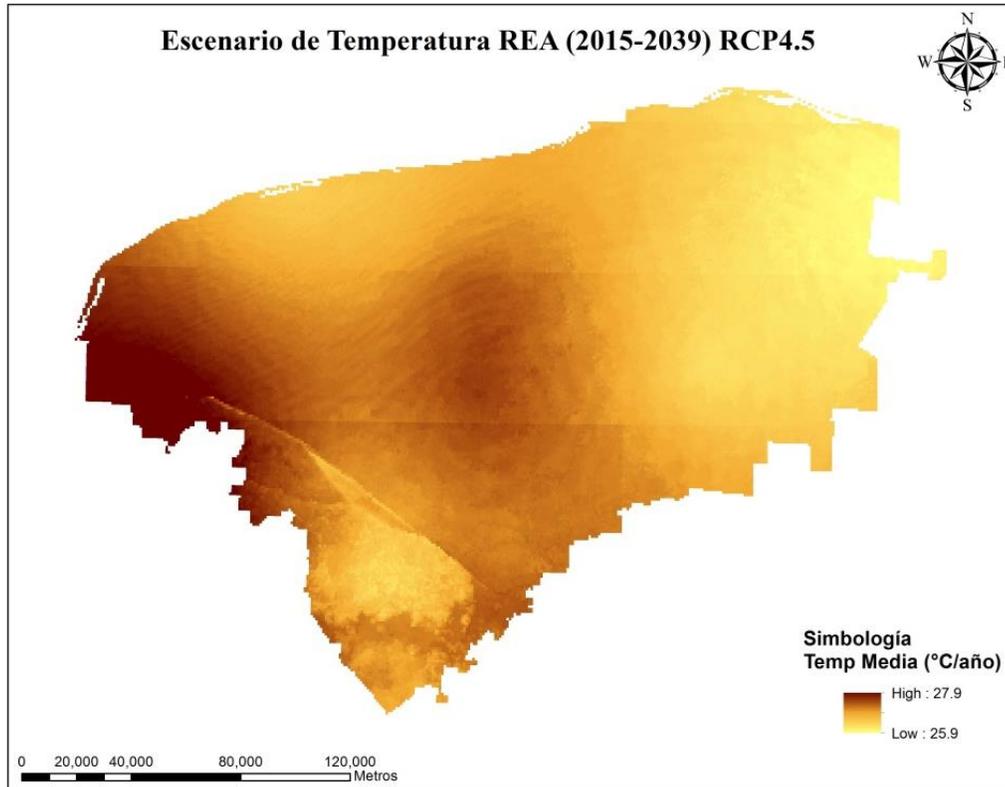


Figura 31. Escenario de Temperatura del Estado de Yucatán. Emisiones bajas futuro cercano

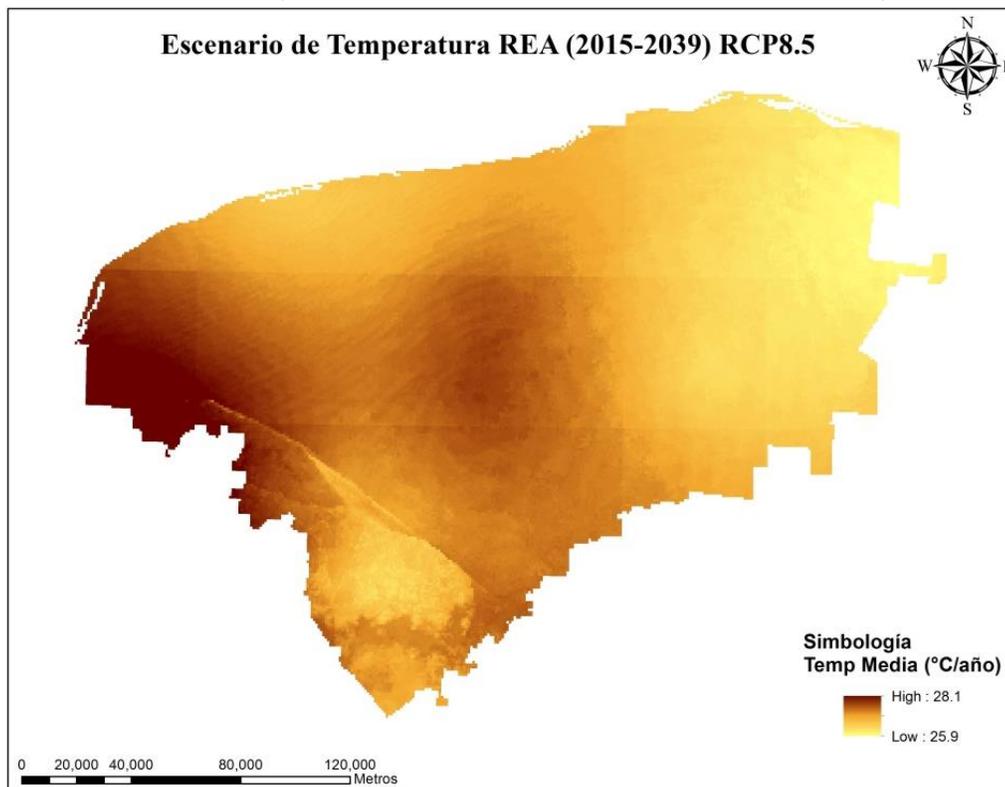


Figura 32. Escenario de Temperatura del estado de Yucatán. Emisiones altas futuro cercano.

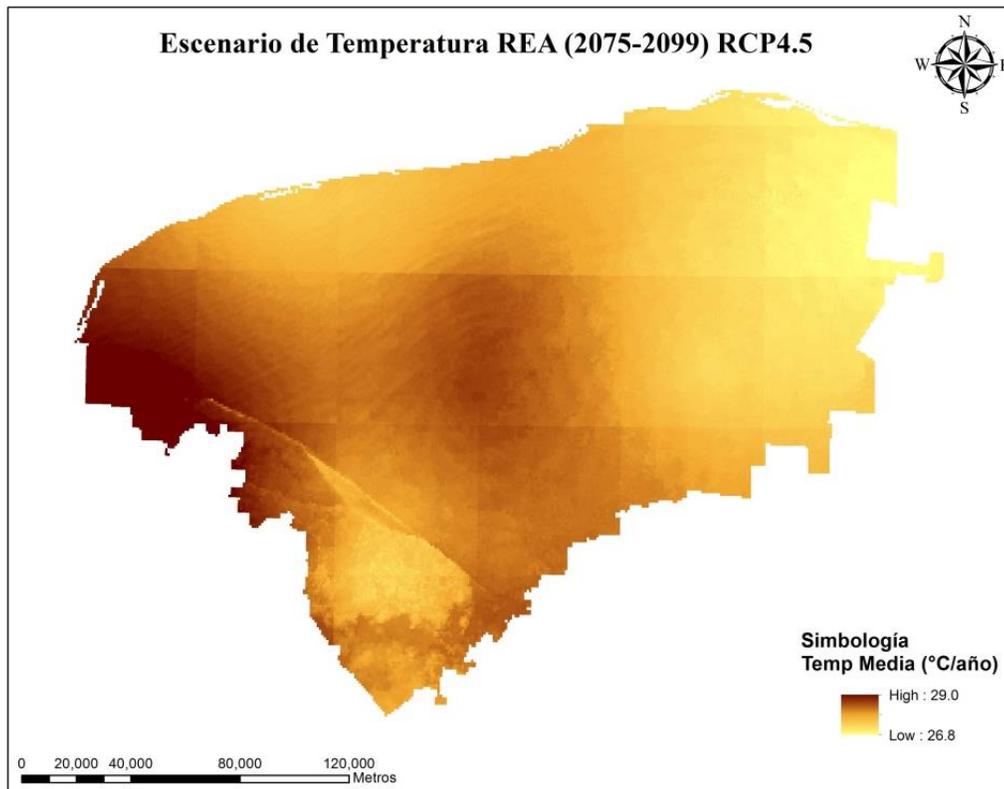


Figura 33. Escenario de Temperatura del estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro lejano.

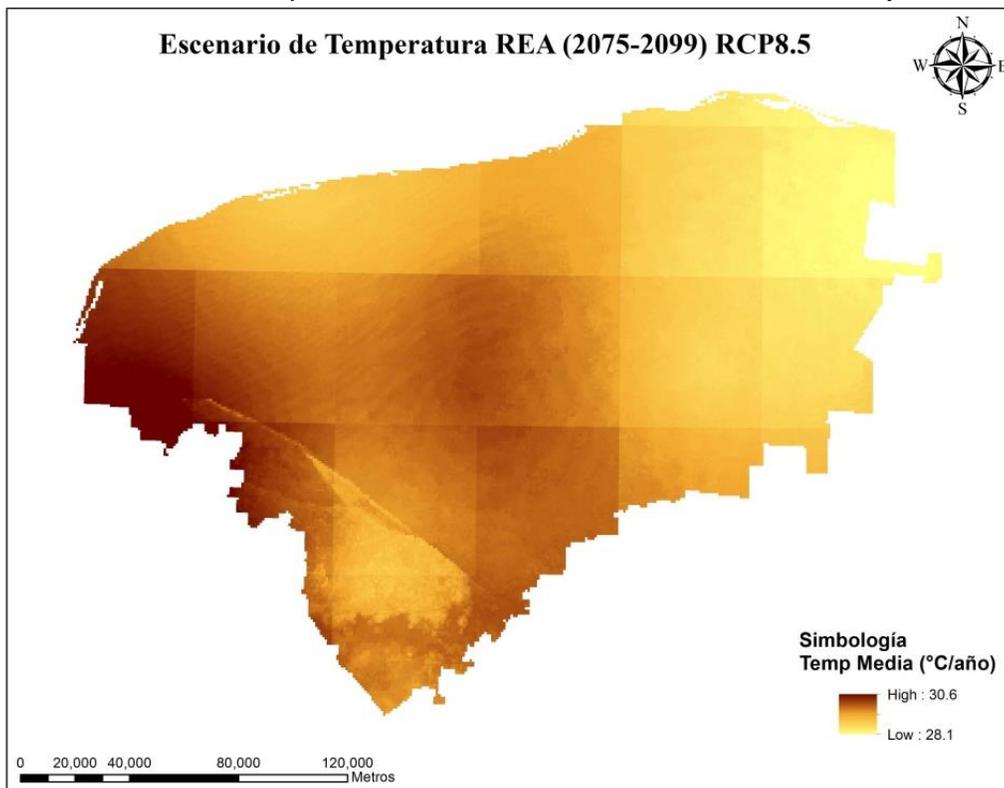


Figura 34. Escenario de Temperatura del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro lejano.

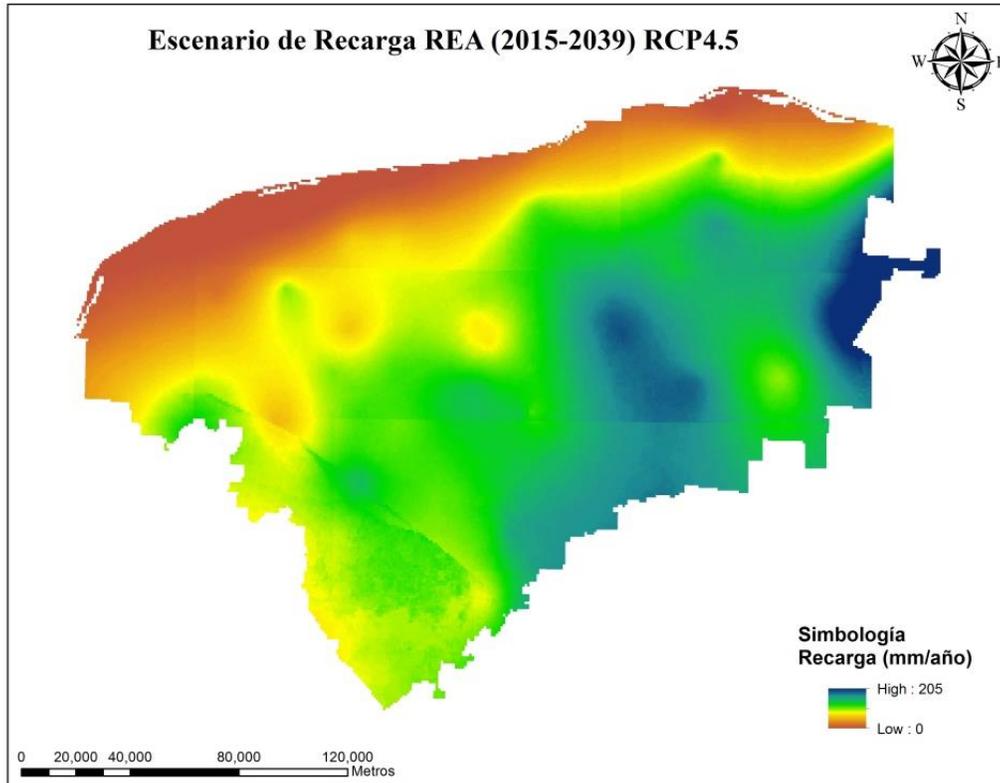


Figura 35. Escenario de Recarga en el Estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro cercano.

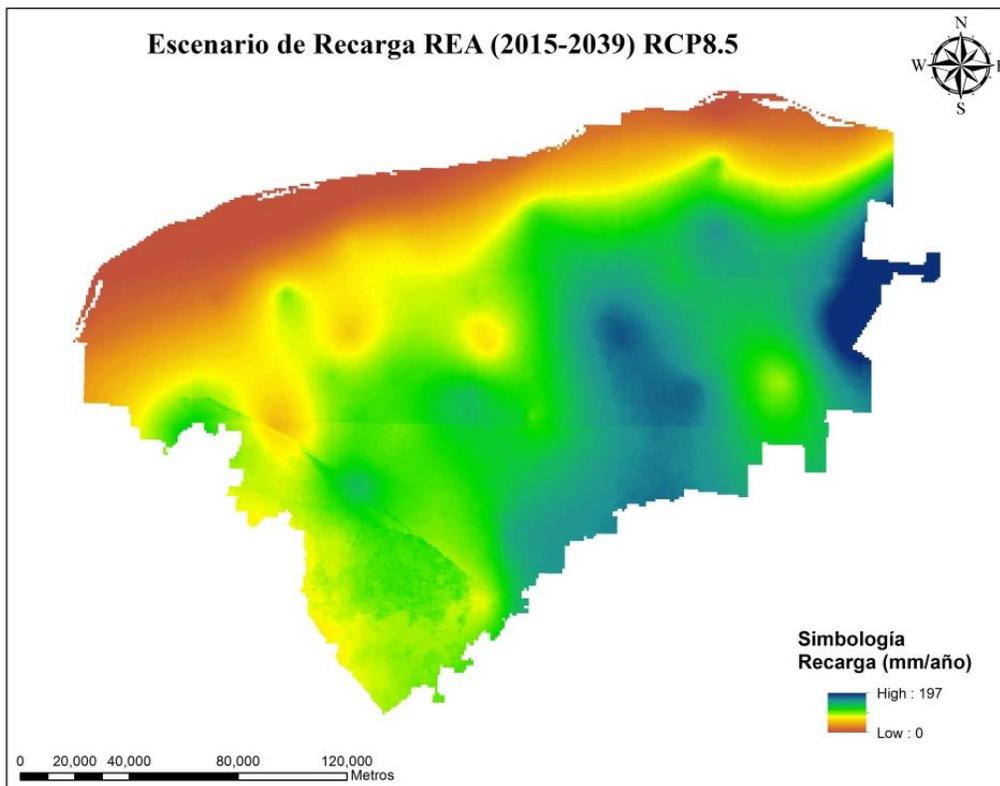


Figura 36. Escenario de Recarga en el Estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro cercano.

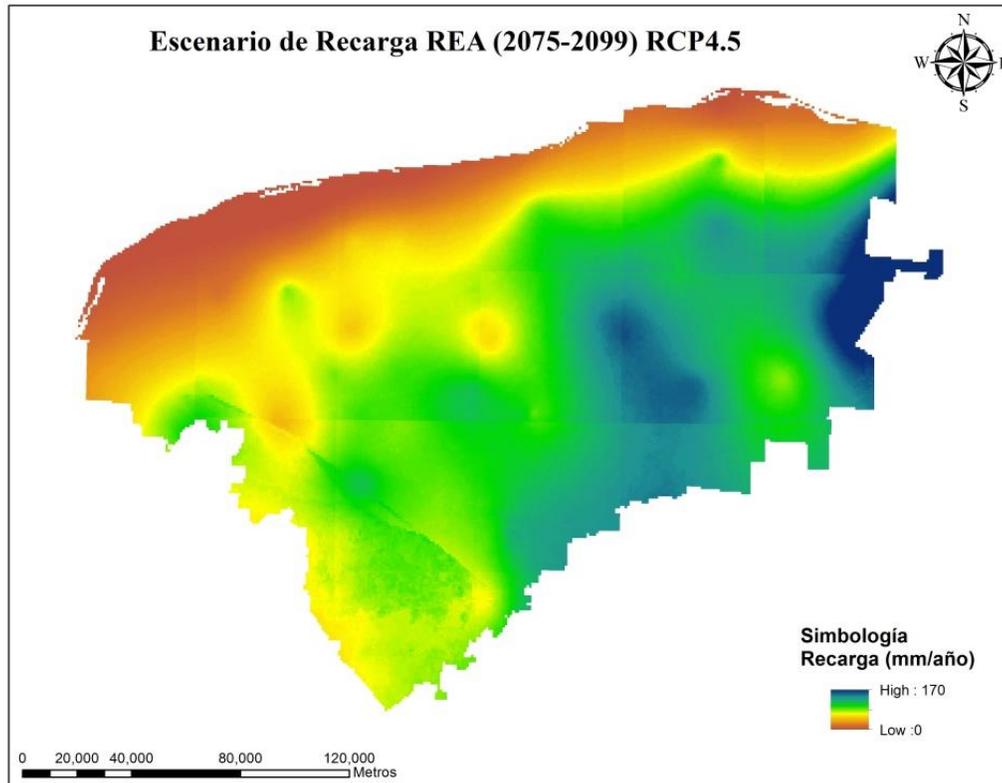


Figura 37. Escenario Recarga en el Estado de Yucatán. Emisiones bajas, futuro lejano.

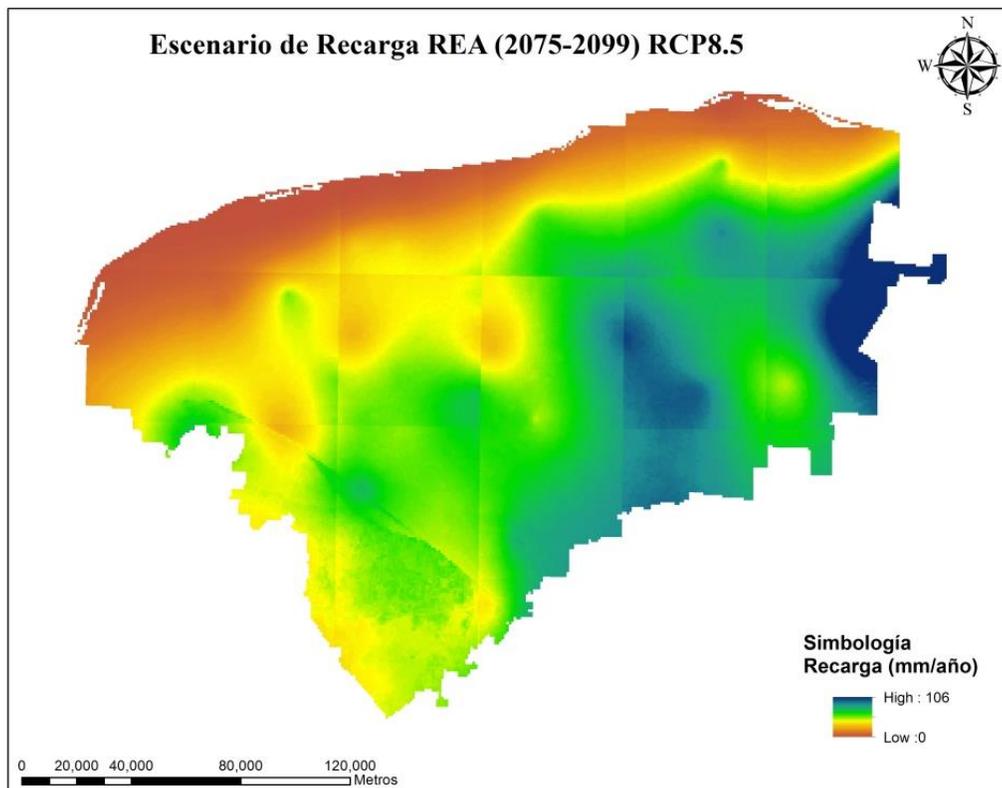


Figura 38. Escenario de Recarga del estado de Yucatán. Emisiones altas, futuro lejano.

En la Tabla 9 se resumen los resultados de temperatura, precipitación y recarga promedio de los escenarios base y se comparan con los resultados obtenidos por las simulaciones con cambio climático.

Según el escenario más desfavorable, se podría esperar un aumento de la temperatura promedio de 3° C aproximadamente. Con respecto a la precipitación el escenario más desfavorable proyecta un descenso promedio del 21% de la precipitación base, con lo que la recarga promedio podría sufrir una disminución cercana al 80% del escenario base.

Tabla 9. Comparación de los resultados promedios obtenidos entre los escenarios base y las simulaciones.

Escenario		Temperatura (°C)	Precipitación (mm/año)		Recarga (mm/año)	
Base		26.02	1,108		130	
Futuro cercano	RCP4.5	26.69	984	-11.2%	78	-40.0%
	RCP8.5	26.77	979	-11.6%	75	-42.3%
Futuro lejano	RCP4.5	27.71	966	-12.8%	59	-54.6%
	RCP8.5	29.13	875	-21.0%	25	-80.8%

4.3.2. Integración del modelo de flujo calibrado con los escenarios de cambio climático

Una vez elaborados los mapas de recarga, se procedió a transformarlos en archivos ASCII para su integración con el software. Se tomaron los parámetros estimados para la mejor calibración y se corrió el modelo de flujo una vez más en estado estacionario.

Se ejecutó el modelo, manteniendo las mismas condiciones de calibración, pero variando la recarga. Los mapas de recarga de cada escenario simularon el efecto

que las variaciones espaciales de la recarga tendrían sobre el flujo de agua subterránea en el acuífero.

En las Figuras 39 a 42 se presentan los contornos calculados por el software para cada escenario de cambio climático. Los cuatro mapas de contornos obtenidos de las simulaciones, muestran una configuración similar. Las líneas equipotenciales se agrupan en la zona Noreste, zona en la cual el programa proyecta los potenciales hidráulicos mayores.

El modelo proyecta una disminución de los potenciales para todos los escenarios de recarga. Para el horizonte a futuro cercano, el modelo estima un potencial máximo de 2.70 m con el escenario de emisiones bajas, mientras que con el escenario de emisiones altas calcula un potencial máximo de 2.62 m.

Para los escenarios a futuro lejano, el modelo estima un potencial máximo de 2.12 m y 0.96 m con los escenarios de emisiones bajas y altas, respectivamente.

Los escenarios de recarga futura proyectaron una reducción en todas las simulaciones. Los mayores descensos están relacionados con escenarios de emisiones altas a futuro lejano.

Las simulaciones de flujo futuro permitieron observar que bajo escenarios de cambio climático los potenciales hidráulicos podrían reducirse notablemente. Como consecuencia del descenso del nivel piezométrico, el límite de la interfase salina podría desplazarse tierra adentro y salinizar los pozos de abastecimiento.

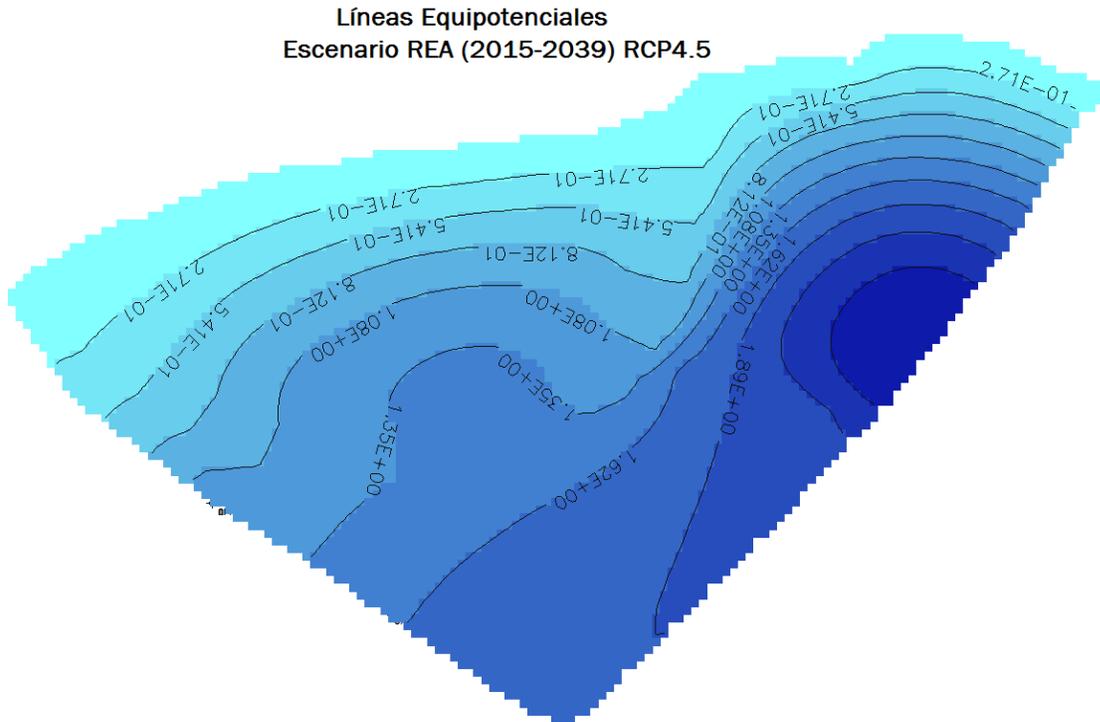


Figura 39. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones bajas, futuro cercano.

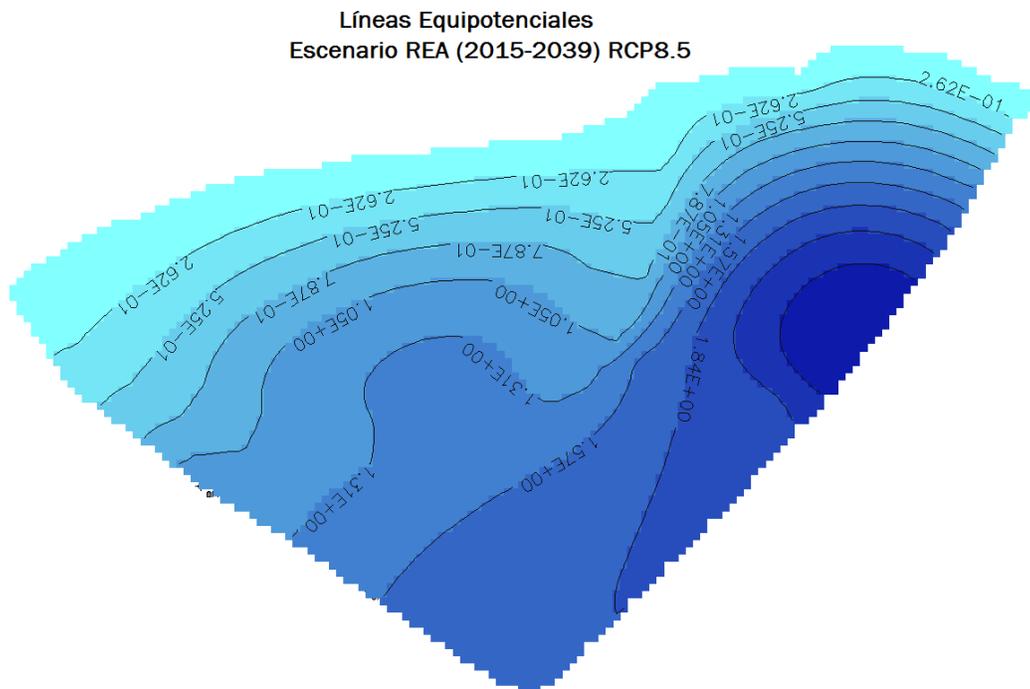


Figura 40. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones altas, futuro cercano.

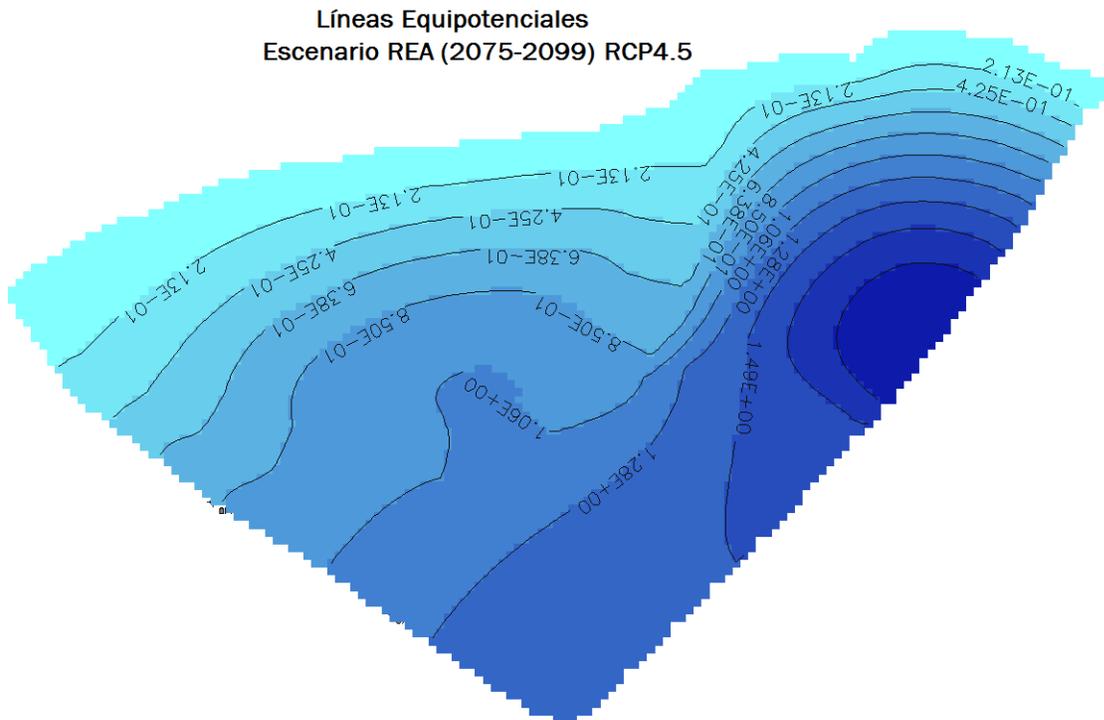


Figura 41. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones bajas, futuro lejano.

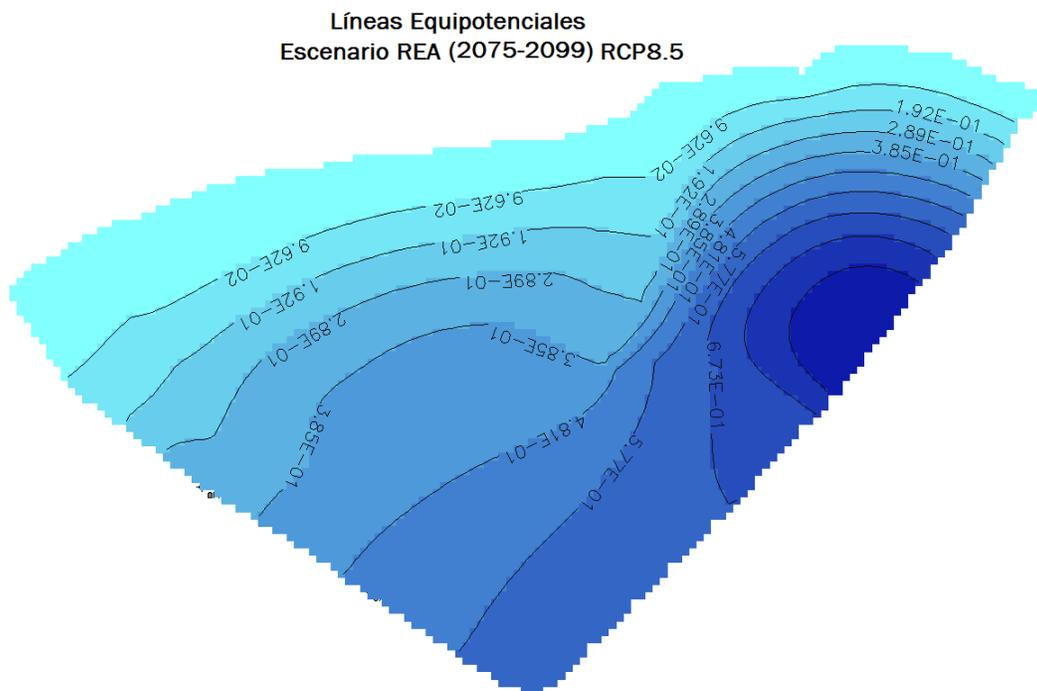


Figura 42. Líneas equipotenciales bajo escenarios de cambio climático. Emisiones altas, futuro lejano.

V. CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo conceptual actualizado del acuífero considerando las características geológicas y fisiográficas de la zona de estudio. Una zona de flujo preferencial delimitada por el Anillo de cenotes, el confinamiento en la costa y la Sierrita de Ticul, tomando en cuenta las extracciones y la recargas medias anuales.

Los resultados de la calibración del modelo de flujo mostraron que, independientemente de la naturaleza kárstica del sistema, éste pudo ser modelado como un sistema homogéneo e isótropo.

La mejor simulación se logró con el Esquema 4, el cual es un sistema definido por cinco estratos, en el que se consideran cuatro zonas geohidrológicas con conductividades hidráulicas diferentes. La mejor calibración se alcanzó con conductividades hidráulicas de 1.71×10^{-2} m/s, 2.54×10^{-9} m/s, 1.69 m/s y 2.1×10^{-1} m/s; para la plataforma calcárea, el caliche de la costa, el Anillo de cenotes y la Sierrita de Ticul, respectivamente. El modelo estimó un valor de conductividad hidráulica mayor en la Zona de Ticul, que para el resto del sistema calcáreo. Se sospecha que esto podría deberse a la existencia de la Falla de Ticul.

El análisis de sensibilidad reportó que para el Esquema 4, el error cuadrático medio fue de 0.3427, el cual se aproxima al error reportado por otros modelos del acuífero. Cabe mencionar que las diferencias entre los valores medidos y calculados pueden atribuirse a las heterogeneidades del sistema.

Los escenarios de cambio climático del ensamble multimodelo proyectaron un descenso en las precipitaciones y un aumento de las temperaturas en la zona de estudio. Esto afectaría de manera directa la evapotranspiración del sistema, provocando variaciones en los niveles de recarga.

Los escenarios de recarga bajo cambio climático reportan una disminución para todas las simulaciones. Los mayores descensos están relacionados con el escenario de emisiones altas a futuro lejano.

Las simulaciones de flujo con escenarios de cambio climático permitieron observar que los potenciales hidráulicos podrían reducirse notablemente. Si se modifican las condiciones naturales de flujo subterráneo debido al cambio climático, el equilibrio hidrostático entre agua salada-agua dulce se vería modificado. Esto provocaría el deterioro de la calidad de las reservas de agua dulce afectando a la población, situación que podría verse agravada por el aumento del nivel medio del mar.

VI. REFERENCIAS

- Alcaraz R., Graniel E., Castro A. F., Vadillo I. (2015). Assessment of Groundwater Contamination in Yucatan Peninsula (Mexico) by Geostatistical Analysis. En "Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems" Springer . Alemania, 433-439.
- Allen D. M., Mackie D. C., Wei M. (2004). Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. "Hydrogeology Journal", 12, 270-290.
- Anderson M. P., Woessner W. W. (1992). Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport. 1a edicion, Academic Press, E.U.A.
- Andrade L. (1984). Análisis de fluctuaciones y balance hídrico del acuífero de la zona de pozos de la JAPAY. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Antigüedad I. (2000). El acuífero kárstico: Metodología de investigación y protección de sus recursos. Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst. Vol (1). España.
- Back W., Lesser, J.M. (1981). Chemical constraints of groundwater management in the Yucatan Peninsula. "Journal of Hydrology", (51) 119-130.
- Barlow P. M. (2003). Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic coast. "US Geological Survey", Circular 1262, 113 p. Disponible en : http://www.nurserycropscience.info/water/source-water-quality/other-references/barlow1262-groundwater-in-fresh-water-salt-water.pdf/at_download/file
- Bauer-Gottwein P., Gondwe B., Charvet G., Marín L., Revolledo-Vieyra M., Merediz-Alonzo G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. "Hydrogeology Journal". 19, 507-524.
- Beddows P. A. (2004). Groundwater hydrology of a coastal conduit carbonates aquifer: Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. Tesis Doctoral, Universidad de Bristol, Inglaterra.
- Belmonte S., Núñez V. (2006). Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. "GeoFocus", (6) 15-27.

- Betancur T., Palacio, C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: bajo cauca antioqueño). "Dyna". 76, 39-49.
- Bonet F. and Butterlin J. (1962). Stratigraphy of the northern part of the Yucatan Peninsula. Guidebook, fieldtrip to peninsula of Yucatan. "New Orleans Geological Society". Nueva Orleans.
- Bonilla M.A. (2015). Descripción del sistema de agua potable y saneamiento de la ciudad de Mérida. Memoria para obtener el grado de Licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Brewerton L.J. (1993). Aquifer properties of samples of Merida Yucatan Mexico. U.K. : British Geological Survey. (Technical Report wd/93/50.Hydrogeology Series).
- Butterlin, J., and Bonet, F. (1960). Las Formaciones Cenozoicas de la parte Mexicana de la Peninsula de Yucatán. Instituto de Geología, UNAM, México.
- Carrera J., Alcolea A., Medina A., Hidalgo J., Sliotén, I. (2005). Inverse problem in hydrogeology. "Hydrogeology Journal". 13:206–222.
- Casares S. R. (2006). Hidrogeología de la zona de descarga del acuífero del estado de Yucatán y sus aplicaciones ambientales. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Cavazos T., Salinas J., Martínez B., Colorado G., De Grau P., Prieto R., Conde A., Quintanar A., Santana J., Romero R., Maya M., Rosario J., Ayala M., Carrillo H., Santiesteban O., Bravo M. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. CICESE. IMTA. INECC. SEMARNAT.
- Charvet G. (2009). Exploration, modeling and management of groundwater resources in northern Quintana Roo, Mexico. MSc Thesis, Technical University of Denmark, Denmark.
- Clifton C., Evans R., Hayes S., Hirji R., Puz G., Pizarro C. (2010). Water and Climate Change: impacts on groundwater resources and adaptation options. "Water Working Notes", (25).

- CONAGUA. (2016). Comisión Nacional del Agua. Títulos y volúmenes de aguas nacionales y bienes inherentes por uso de agua. Yucatán. Disponible en <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=5&n2=37&n3=35&n4=19&n5=77>
- Conde A.C. (2003). Cambio y Variabilidad climáticos. Dos estudios de caso en México. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Físicas de la Atmósfera). Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México. 227 pp.
- Conde A., Estrada P. F., Martínez L. B., Sánchez O., Gay G.C. (2011). Regional Climate change scenarios for Mexico. "Atmósfera", 24(1), 125-140.
- Conde A., Gay C. (2008). Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Cooper, Jr. (1959). A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. "Journal of Geophysical Research". (64), 461-467.
- Cortazar M.H. (2013). Modelación del transporte de contaminantes en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Custodio E. (1975). Metodología y resultados del estudio hidrogeológico del macizo kárstico de Garraf, Barcelona. "Boletín Geológico y Minero". 86 (1): 31-44. Madrid.
- Custodio E., Llamas M. (1976) Hidrología subterránea, 2ª edición, Tomo I, Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- Delgado J., Juncosa R., Vázquez A. (2009). Capítulo 2. Aplicación de modelos numéricos en hidrogeología. En "Monografías sobre Geología Aplicada I". ICOGA, España.
- Deming D. (2002). Introduction to Hydrogeology. Mc GrawHill, Nueva York. EUA.
- Doehring D., Butler J. (1974). Hydrogeologic constrains on Yucatan development. "Science", 186, 591-595.
- Duch J. (1991). La conformación territorial del Estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán.
- ERD (2000). Protocol Groundwater modeling in the RCRA/CERCLA Process. Environmental Restoration Division. Disponible en: <http://www.srs.gov/general/programs/soil/ffa/rdh/p112.pdf>

- Ernstson K., Kirsch R. (2006). Geoelectrical methods in groundwater geophysics-a tool for hydrogeology. "Springer Heidelberg". Alemania.
- Fernández E. A., Zavala H. J., Romero C. R., Conde A. A., Trejo V. R. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. UNIATMOS, Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, INECC. Disponible en <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>
- Fetter C. (2001). Applied Hydrogeology. 4a. edición, Prentice Hall Inc., Nueva Jersey, E.U.A.
- Flores G., Sánchez S., Correa A., Ávila J. (2014). Modelos matemáticos de agua subterránea y su importancia en México. En "Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica", México.
- Ford D., Williams P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. Jhon Wiley & sons Ltd. 1a. edición. Inglaterra.
- Gaona V. S., Gordillo de A.T., Villasuso P.M (1980). Cenotes. Karst característico: Mecanismos de Formación. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista, Vol (4) p. 32-36.
- Gay C. (2000). México: Una Visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Resultados de los Estudios de Vulnerabilidad del País Coordinados por el INE con el apoyo de U.S. Country Studies Program. SEMARNAP, UNAM, USCSP. 220 pp
- Gondwe BRN, Lesser S., Stisen S., Marín L., Rebolledo-Vieyra M., Merediz-Alonso G., Bauer-Gottwein P. (2010). Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: new insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. "Hydrology Journal" 389 (1), 1-17.
- González H. R. (1984). Correlación de muestras de roca en pozos de la ciudad de Mérida. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- González R. (1992). Evolution of Groundwater contamination in the Yucatan Karstic aquifer. Tesis de Maestría. Universidad de Waterloo. Canadá.
- González R.A., Sánchez y Pinto I., Gamboa-Vargas J. (2002). Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico. "Hydrogeology Journal", 10(5), 539-552.

- Graniel C.E. (2010). Hidrología. En: "Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán". Durán R. y M. Méndez (Editores). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Hanshaw B., Back W. (1980). Chemical mass-wasting of the northern Yucatan peninsula by groundwater dissolution. "Geology", 8(5), 222-224
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular groundwater model: The ground-water flow process. "U.S. Geological Survey Techniques and Methods", 6-A16, Reston, Virginia.
- Hudak P. (2005) Principles of Hydrogeology. CRC Press. E.U.A
- INEGI (2010). Censo de población y vivienda 2010. Instituto Nacional de estadística y Geografía.
- IPCC (2000). IPCC Special Report Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. WHO. UNEP.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri R.K. y Reisinger A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- IPCC (2013). IPCC 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker T. F., Qin D., Plattner G. K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Midgley B. M.
- Juárez B. (2012). Escenarios de disponibilidad de agua para el Estado de Yucatán con base en escenarios regionales de cambio climático. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
- Kirshen P. H. (2002). Potential impacts of global warming on groundwater in Eastern Massachusetts. "Journal of Water Resources Planning and Management", 128 (3), 216-226.
- Lesser J., Weidie A., (1988). Region 25, Yucatan Peninsula . En "Geology of North America". Hydrogeology, Vol. 02. 237-241.
- Magaña V. (2010). Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Instituto Nacional de Ecología INE, Embajada Británica en México, CEDAN Tecnológico de Monterrey.

- Magaña V. y Caetano E. (2007). Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Dirección General de Investigación sobre Cambio Climático, SEMARNAT-INE.
- Magaña V., Conde C., Sánchez O., Gay, C. (1997). Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. "Climate Research". 9(2): 107-114.
- Marín L.E. (1990). Field investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico. Tesis de Doctorado, Universidad Illinois del Norte, E.U.A.
- Marín L.E., Perry E.C. (1994). The hydrogeology and contamination potential of northwestern Yucatan, Mexico. "Geofísica Internacional". UNAM, 33(4), 619-623.
- Martínez Cob A. (2002). Evaluación de métodos de cálculo de la evapotranspiración de referencia diaria y mensual de Aragón. Información Técnica Económica Agraria y Vegetal, 126-132.
- Martínez E. (2012). Hidrogeología ambiental en la zona metropolitana de la ciudad de Mérida, Yucatán, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Méndez R. (1991). Modelo de Comportamiento del Acuífero de la ciudad de Mérida, Yucatán. CONAGUA, Gerencia Estatal Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Moore Y., Stoessell R., Easley D. (1992). Freshwater/sea water relationship within a groundwater flow system, northeastern coast of the Yucatan peninsula. "Groundwater", 30(3), 343-350.
- Neukum C., Rafig A. (2012). Impact of climate change on groundwater recharge in a small catchment in the Black Forest, Germany. "Hydrogeology Journal", 20, 547-560.
- Orellana R., Espadas C., Conde C., Gay C. (2009). ATLAS. Escenarios de cambio climático en la península de Yucatán. 1° ed. CICY. México.
- Pacheco Ávila J., Calderón Roche L., Cabrera Sansores A. (2004). Delineación de la zona de protección hidrológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la

- ciudad de Mérida, Yucatán México. "Ingeniería". Revista Académica de la Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. 8-1. pp 7-16.
- Painter S.T., Sun A., Green R.T. (2004). Enhanced characterization and representation of flow through karst aquifers. "American Water Works Association". E.U.A.
- Pereyra Díaz D., Cruz Torres, D.G., Pérez Sesma, J.A.A. (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. "Investigaciones geográficas", (75), 37-50.
- Pereyra Díaz D., Pérez-Sesma J. A. A., Hoyos-Reyes C., Sánchez-Orea, J., González, J. (2008). Instalación de red hidroluviométrica en la cuenca del río La Antigua y transmisión de datos en tiempo real con fines de alerta temprana. Informe Final. Universidad Veracruzana-COVECYT.
- Perry E., Velázquez-Oliman G., Marín L. (2002) The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the Northern Yucatan peninsula, Mexico. "International Geology Review", 44(3), 191-221.
- Perry E.E., Swift J., Gamboa J., Reeve A., Sanborn R., Marín L.E., Villasuso M. (1989). Geological and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico. "Geology", 17, 818-821.
- Perry, E.C., Marín L.E, McClain J. y Velázquez-Olimán G. (1995). The Ring of Cenotes (sinkholes) northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. "Geology", 23, 17-20.
- PRONACOSE. Programa Nacional Contra la Sequía (2014) "Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la sequía: Ciudad de Mérida." Disponible en <https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjw5eaivljNAhXGNiYKHa9KDGEQFgghMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.pronacose.gob.mx%2Fpronacose14%2Fcontenido%2Fdocumentos%2FPMPMS%2520Merida%2520ultima%2520version%2520040315%2520FINAL%2520IMPRESO.pdf&usg=AFQjCNG-UIqd2IUvnbXLeEPkjkK57U7m0A>
- Rahnemaei M., Zare M., Nematollahi A. R., Sedghi H. (2005). Application of spectral analysis of daily water level and spring discharge hydrographs data for comparing physical characteristics of karstic aquifers." Journal of hydrology", 311(1), 106-116.

- Raposo J., Dafonte J., Molinero J. (2013). Assesing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia-Costa Spain. "Hydrogeology Journal", 21, 459-479.
- Reeve A.S., Perry E.C. (1990). Aspects and tidal analysis along the western North coast of the Yucatan peninsula, Mexico. En "AWRA:International Symposium on tropical hydrogeology", San Juan, Puerto Rico.
- Samper J., Alvares D., Pisani B., García M. (2005). Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro con GIS-BALAN. "Estudios de la zona no saturada del suelo", (3) 269-274.
- Sánchez y Pinto I. (1999). Modelo numérico del flujo subterráneo de la porción acuífera N-NW del Estado de Yucatán: Implicaciones hidrogeológicas. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua, México.
- Sánchez-Pinto I., González-Herrera R., Perry E. (2005) Hydrodynamic behavior of the Yucatan aquifer. A perspective on the hydraulic conductivity estimation. "Espelunca Digital". No.2, Cuba.
- SARH. (1989). Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos. México, D.F.
- Schmitter-Soto J.J., Comín F.A., Escobar-Briones E., Herrera-Silveira J., Alcocer H., Suárez-Morales E., Elías-Gutiérrez M., Díaz-Arce V., Marín L.E., Steinich N. (2002) Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan peninsula (SE Mexico). "Hydrobiology", 467, 215-228.
- Scibek J., Allen D. M. (2006). Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. "Water Resources Research", 42, W11405, 18p.
- Steinich B. (1996). Investigaciones geofísicas e hidrogeológicas en el noroeste de la Península de Yucatán, México. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias de la Tierra (Aguas Subterráneas) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Stoll S., Hendricks Franssen H. J., Butts M., Kinzelbach W. (2011). Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multimodel

- approach including different downscaling methods. "Hydrology and Earth System Sciences", 15(1), 21-38.
- Tinajero J.A. (1982). Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea. Comisión del Plan Nacional Hidráulico, México, D.F.
- Valencia, V. M. (2010). Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca. Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana. Colombia.
- Van Roosmalen L., Christensen B. S., Sonnenborg T. O. (2007). Regional differences in climate change impacts on groundwater and stream discharge in Denmark. "Vadose zone Journal", 6(3), 554-571.
- Vega A.E. (2012). Modelo de flujo del acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Velázquez A. L. (1986). Aplicaciones de principios geoquímicos en la hidrología cárstica de la Península de Yucatán. "Ingeniería Hidráulica en México".
- Villasuso P.M., Méndez R.R. (2000). A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula. Research report- International Institute for Applied Systems Analysis. IIASA RR, (14), 120-139.
- Wegehenkel M., Heinrich U., Jochheim H., Kersbaum K., Röber B. (2010). Evaluation of three different regional climate change scenarios for the application of a water balance model in a mesoscale catchment in Northeast Germany. "Advances in geosciences", (27), 57-64.
- Yusoff I., Hiscock K., Conway D. (2002). Simulation on groundwater resources in eastern England. "Geological Society", London, Special Publications, 1, 325-344.