



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS
BAJO ESCENARIOS A2 Y B1, CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL
PRECIS, EN EL DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ**

Javier Zepeda Mas

Asesorado por el MSc. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Guatemala, mayo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS
BAJO ESCENARIOS A2 Y B1, CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL
PRECIS, EN EL DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JAVIER ZEPEDA MAS

ASESORADO POR EL MSC. WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Daunno Walther Chew Dávila
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS A2 Y B1, CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS, EN EL DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 2 de julio de 2014.



Javier Zepeda Mas

Guatemala, febrero de 2016

Ingeniero

Carlos Wong

Director Escuela Ingeniería Química

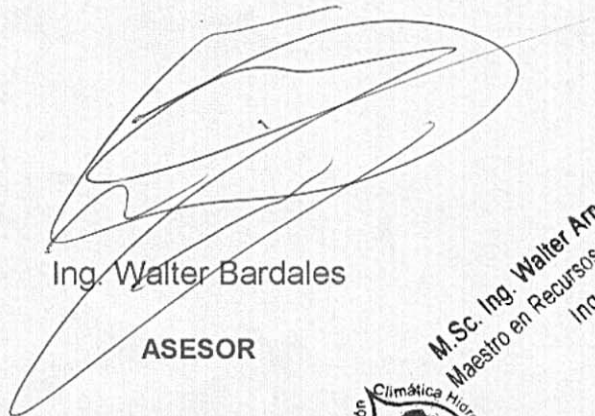
Facultad de Ingeniería

Me dirijo a usted, informándole por medio de la presente, que he revisado el documento titulado **"Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos bajo escenarios A2 y B1 con el modelo climático regional PRECIS en el departamento de Sacatepéquez"** elaborado por el estudiante Javier Zepeda Mas, carné 200614871.

Después de haber realizado la revisión del referido informe final de trabajo de graduación considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular y agradeciéndole su atención, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Walter Bardales

ASESOR



M.Sc. Ing. Walter Amoldo Bardales Espinoza
Maestro en Recursos Hidráulicos Opción Hidrología
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 4279



Guatemala, 09 de marzo de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.013.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **020-2014** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Javier Zepeda Más**.
Identificado con número de carné: **2006-14871**.
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL**.

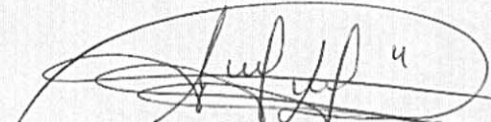
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS A2 Y B1 CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS EN EL DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Agrónomo: **Walter Arnoldo Bardales Espinoza**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jaime Domingo Caranza González
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.028.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la carrera de **Ingeniería Ambiental** de la estudiante, **JAVIER ZEPEDA MAS** titulado: **"IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS A2 Y B1, CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS, EN EL DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.214.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS A2 Y B1, CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS, EN EL DEPARTAMENTO DE SACATEPÉQUEZ**, presentado por el estudiante universitario: **Javier Zepeda Mas**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, mayo de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por el amor, el don de la vida, la inteligencia y la esperanza, porque ha puesto en mí la semilla de trabajar siempre por un mejor yo.
- Mis padres** Luis Arnoldo Zepeda López y María Ester Mas y Mas de Zepeda, por su amor, cariño y apoyo incondicional, e inculcarme con el ejemplo, los valores por los que rijo mi vida. Los amo.
- Mis hermanos** Vicente y Juan Luis Zepeda Mas, por la vida que hemos compartido, las diferencias, las molestaderas, las alegrías y por estar siempre ahí. Porque cada uno, con su forma de ser tan única, me ha dado ejemplos de éxito y perseverancia.
- Mis abuelos** Jesús Mas (q. e. p. d.) y Concepción Mas, Arnoldo Zepeda (q. e. p. d.) y Beatriz López, por los consejos, historias, cariño y ejemplo de vida, siempre están en mi corazón y pensamientos.
- Mis tíos y primos** Por ser parte importantísima de mi vida, que con la diversidad de caracteres, personalidades, visiones e ilusiones, han fomentado mi

crecimiento y ayudado a formar la persona que soy hoy.

Mis amigos

En especial a Silvia Méndez, Diana Mendoza, Alan Rodríguez, Francisco Melgar, Guillermo Culajay, Omar Lima, Carlos de León, Javier Llamas, Kenneth Murillo y Juan Pablo Zepeda, por las experiencias, el apoyo, las alegrías y tantos momentos compartidos, porque con su amistad soy mejor persona y más feliz.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por la oportunidad de nacer y vivir en Guatemala, pues los paisajes y las personas de este país son las razones que me inspiran a ejercer mi profesión.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter y mi segunda casa durante tantos años, por la formación académica y los conocimientos adquiridos.
Facultad de Ingeniería	Por la formación académica y la ética, fundamentos para ejercer mi profesión y servir a Guatemala.
Insivumeh	Por la oportunidad de realizar mis prácticas, hacer uso de mis conocimientos y adquirir nuevos.
Mis padres y hermanos	Por impulsarme a ser mejor, creer en mí en todo momento y ser ejemplo en mi vida.
Ing. Walter Bardales	Por asesorarme en el presente trabajo de graduación, por compartir de forma desinteresada sus conocimientos y su tiempo.

Mis catedráticos

Porque varios han dejado una huella indeleble, que me impulsa a ser un profesional con ética, una mejor persona y a continuar con mi vocación en esta rama de la ingeniería.

**Guillermo Zepeda,
Vinicio Santos y
Lidia Guzmán**

Por las oportunidades laborales, la confianza y la amistad, por las enseñanzas y conocimientos que he adquirido trabajando y compartiendo con ustedes.

Mis amigos

Por el apoyo incondicional y el ejemplo de perseverancia.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	4
1.3. Determinación del problema.....	5
1.3.1. Definición del problema	5
1.3.2. Delimitación del problema	5
1.4. Limitaciones del estudio	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Ciclo hidrológico	7
2.2. Recursos hídricos	8
2.2.1. Uso consuntivo del agua	9
2.2.2. Uso no consuntivo	9
2.3. Balance hídrico.....	9
2.3.1. Forma general de la ecuación del balance hídrico.....	10
2.3.2. Balance hídrico de suelos, metodología de Schosinsky.....	11

2.4.	Escenarios socioeconómicos de emisiones	11
2.4.1.	Escenario A1	11
2.4.2.	Escenario A2	12
2.4.3.	Escenario B1	12
2.4.4.	Escenario B2	13
2.5.	Modelos climáticos	14
2.5.1.	Modelos climáticos globales (MCG)	14
2.5.2.	Modelos climáticos regionales (MCR)	15
2.5.2.1.	HadRM3P	15
2.6.	Escenarios de cambio climático	17
2.6.1.	Criterios de un escenario.....	18
2.7.	Efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico.....	19
2.7.1.	Cambios en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos	19
2.7.2.	Aumento de precipitación	19
2.7.3.	Sequía	20
2.7.4.	Calidad del agua	20
2.8.	Área de estudio de Sacatepéquez	20
2.8.1.	Localización.....	20
2.8.2.	División político-administrativa	21
2.8.3.	Clima	22
2.8.4.	Fisiografía.....	22
2.8.5.	Recurso hídrico e hidrografía	22
2.8.5.1.	Uso del agua	22
2.8.5.2.	Gestión integrada del recurso hídrico...	23
2.8.5.3.	Cuencas y subcuencas	23
2.8.5.4.	Hidrografía.....	24
2.8.6.	Demografía.....	24
2.8.7.	Aspectos ambientales	24

	2.8.7.1.	Contaminación.....	24
	2.8.7.2.	Áreas protegidas.....	25
	2.8.7.3.	Cobertura vegetal	25
	2.8.7.4.	Suelo y su uso	26
	2.8.8.	Aspectos socioeconómicos.....	26
3.	MARCO METODOLÓGICO		29
3.1.	Variables.....		29
	3.1.1.	Variables independientes	29
	3.1.2.	Variables dependientes	29
3.2.	Delimitación del campo de estudio		30
3.3.	Recursos humanos disponibles.....		36
3.4.	Recursos materiales disponibles		36
3.5.	Técnicas		36
	3.5.1.	Cualitativa.....	36
	3.5.2.	Cuantitativa.....	37
	3.5.2.1.	Balance hídrico de suelos (metodología de Shosinsky)	37
	3.5.2.1.1.	Coeficiente de infiltración	37
	3.5.2.1.2.	Infiltración pluvial mensual.....	39
	3.5.2.1.3.	Escorrentía superficial ..	39
	3.5.2.1.4.	Evapotranspiración.....	40
	3.5.2.1.5.	Recarga potencial al acuífero	43
3.6.	Recolección de la información.....		45
3.7.	Análisis estadístico		46
	3.7.1.	Medidas de tendencia central	46

3.7.2.	Medidas de dispersión	46
3.7.3.	Análisis de máximos y mínimos	47
4.	RESULTADOS.....	49
4.1.	Resultados para el escenario B1	49
4.2.	Resultados para el escenario A2	61
4.3.	Gráficas comparativas.....	73
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	75
5.1.	Escenario B1	75
5.2.	Escenario A2.....	78
5.3.	Interpretación de las gráficas comparativas	81
	CONCLUSIONES.....	83
	RECOMENDACIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	APÉNDICES.....	95
	ANEXOS.....	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico	8
2.	Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100.....	13
3.	Mapa de ubicación del departamento de Sacatepéquez.....	31
4.	Mapa de estaciones para el departamento de Sacatepéquez	32
5.	Mapa de pendientes, departamento de Sacatepéquez	33
6.	Mapa de texturas del suelo, departamento de Sacatepéquez	34
7.	Mapa de cobertura vegetal, departamento de Sacatepéquez.....	35
8.	Variables del movimiento del agua, escenario B1.....	50
9.	Temperaturas, escenario B1	51
10.	Recarga potencial de acuíferos y línea de tendencia, escenario B1	52
11.	Recarga potencial de acuíferos, década 2020, escenario B1	53
12.	Recarga potencial de acuíferos, década 2030, escenario B1	54
13.	Recarga potencial de acuíferos, década 2040, escenario B1	55
14.	Recarga potencial de acuíferos, década 2050, escenario B1	56
15.	Recarga potencial de acuíferos, década 2060, escenario B1	57
16.	Recarga potencial de acuíferos, década 2070, escenario B1	58
17.	Recarga potencial de acuíferos, década 2080, escenario B1	59
18.	Recarga potencial de acuíferos, década 2090, escenario B1	60
19.	Variables del movimiento del agua, escenario A2.....	62
20.	Temperaturas, escenario A2	63
21.	Recarga potencial del acuífero y línea de tendencia, escenario A2	64
22.	Recarga potencial de acuíferos, década 2020, escenario A2	65
23.	Recarga potencial de acuíferos, década 2030, escenario A2	66

24.	Recarga potencial de acuíferos, década 2040, escenario A2	67
25.	Recarga potencial de acuíferos, década 2050, escenario A2	68
26.	Recarga potencial de acuíferos, década 2060, escenario A2	69
27.	Recarga potencial de acuíferos, década 2070, escenario A2	70
28.	Recarga potencial de acuíferos, década 2080, escenario A2	71
29.	Recarga potencial de acuíferos, década 2090, escenario A2	72
30.	Comparación de temperaturas para ambos escenarios	73
31.	Comparación de precipitación pluvial para ambos escenarios	74
32.	Comparación de recarga potencial del acuífero para ambos escenarios	74

TABLAS

I.	Simbología de textura del suelo	35
II.	Coeficientes de infiltración propuestos por textura y pendiente	38
III.	Coeficientes de infiltración propuestos por cobertura vegetal	38
IV.	Resultados para el escenario B1	49
V.	Análisis estadístico, escenario B1	50
VI.	Resultados para el escenario A2	61
VII.	Análisis estadístico, escenario A2	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CC	Capacidad de campo
C2	Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.
C1	Coeficiente de humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración.
Ci	Coeficiente de infiltración
Kv	Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal
Kp	Coeficiente de infiltración por pendiente
Kfc	Coeficiente de infiltración por textura del suelo
ESC	Escorrentía superficial
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración real
ETR1	Evapotranspiración potencial real
°C	Grados Celsius
HSf	Humedad del suelo al final del mes
HSi	Humedad del suelo al inicio del mes
HD	Humedad disponible
HR	Humedad relativa
km²	Kilómetros cuadrados
m	Metro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro de agua
MCG	Modelo climático global

MCR	Modelo climático regional
DEM	Modelo de elevación digital
P	Precipitación
P_i	Precipitación que infiltra
PM	Punto de marchitez permanente
R_a	Radiación extraterrestre
R_p	Recarga potencial de acuíferos
T_{máx}	Temperatura máxima
T_{med}	Temperatura media
T_{mín}	Temperatura mínima

GLOSARIO

Balance hídrico	Equilibrio que existe entre el agua que ingresa al sistema y la que egresa del sistema, en un intervalo de tiempo determinado.
Cambio climático	Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado.
Capacidad de campo	Máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, la planta tiene su máxima capacidad de evapotranspiración.
Escenarios socioeconómicos	Escenarios que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando una serie de fuerzas causantes demográficas, económicas y tecnológicas y las emisiones de GEI resultantes.
Escorrentía	Agua que llega a la superficie del suelo y no infiltra.
Evapotranspiración	Porción de agua transpirada por las plantas y la evaporación proveniente del suelo.
Gases de efecto invernadero	Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de

radiación infrarroja, emitidos por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes.

GEI

Gases de efecto invernadero.

Humedad relativa

Relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener.

IEEE

Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones.

Infiltración

Fracción de la precipitación que penetra en el suelo.

IPCC

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.

Insivumeh

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Maga

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Milímetro de agua

Espesor de la lámina de agua que se formaría a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable y que equivale a un litro de agua por metro cuadrado de terreno (L/m^2).

Modelo de elevación digital

Representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar.

Precipitación	Todas las formas de humedad que caen a la tierra, puede ser lluvia, llovizna, niebla.
PRECIS	Providing resources on climate investigation scenarios (por sus siglas en inglés), sistema de modelado climático regional
Punto de marchitez permanente	Mínima humedad que puede tener un suelo, la planta no transpira y muere.
Recarga potencial de acuíferos	Agua que, después de infiltrar al suelo y cubrir las demandas del suelo y las plantas, drena hacia el acuífero.
Recursos hídricos	Recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable.
SIG	Sistema de información geográfica.
Temperatura	Magnitud física que refleja la cantidad de calor del ambiente.
Vulnerabilidad	Incapacidad de un sistema de adaptarse al cambio provocado por un fenómeno o situación de magnitud superior a los parámetros normales.

RESUMEN

El estudio se centra en el departamento de Sacatepéquez, de la región central de Guatemala. Se evaluó el recurso hídrico de este departamento mediante la metodología de balance hídrico de suelos, elaborada por Gunther Schosinsky.

Para calcular el balance hídrico de suelos se creó un modelo para el sistema de información geográfica (SIG) en el que se introdujeron las variables de precipitación, cobertura vegetal del departamento, pendientes, textura del suelo, entre otras. Con el modelo se tuvo como resultado la escorrentía, la infiltración, la evapotranspiración real y la recarga potencial de agua a los acuíferos.

El análisis se realizó por medio de proyecciones climáticas, obteniendo las proyecciones de la temperatura media, máxima y mínima y de la precipitación, a partir del modelo climático regional PRECIS. Para obtener las proyecciones futuras de la temperatura y la precipitación se utilizaron los escenarios socioeconómicos A2 y B1 del IPCC, estos describen distintas alternativas de desarrollo, utilizando como base el crecimiento demográfico, las tendencias económicas y tecnológicas, que resultan en distintas emisiones de GEI. Se acopló la climatología base y la del modelo climático, para luego construir escenarios con los que se pueda pronosticar el comportamiento de las variables.

Para los escenarios futuros de cambio climático se espera que la temperatura máxima, media y mínima de ambos escenarios socioeconómicos (A2 y B1) mantengan un incremento constante, mayor para el A2 que para el B1. Para la precipitación futura se prevé una tendencia descendente, con cierta variabilidad en algunas décadas. La evapotranspiración es dependiente de la temperatura, por lo que tiene tendencia ascendente.

Se obtuvieron mapas de recarga potencial de acuíferos, para cada década del estudio y cada escenario. La tendencia para el escenario A2 es decreciente con cierta variabilidad, estimando una recarga de 481,9 mm por año para la década de 2020, mientras que para la década de 2090 la recarga habría disminuido a 223,0 mm por año. Para el escenario B1, la tendencia también es descendente, con una recarga estimada de 471,8 mm por año para la década de 2020 y de 352,0 mm por año para la década de 2090.

OBJETIVOS

General

Determinar los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, con base en los escenarios socioeconómicos A2 y B1, utilizando el modelo climático regional PRECIS en el departamento de Sacatepéquez.

Específicos

1. Estimar la precipitación futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.
2. Estimar la temperatura futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.
3. Estimar la humedad futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.
4. Estimar la evapotranspiración real futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.
5. Estimar la escorrentía futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.
6. Estimar la infiltración futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.

7. Estimar disponibilidad hídrica futura en el departamento de Sacatepéquez, sobre la base de los escenarios A2 y B1.

8. Mostrar por medio de mapas los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, con base en los escenarios A2 y B1.

INTRODUCCIÓN

La deforestación, la falta de legislación o su aplicación y el manejo inadecuado de los recursos hídricos, son causantes de la alta vulnerabilidad del país frente a los efectos del cambio climático.

El cambio climático afecta a los recursos hídricos en calidad y cantidad, lo que tiene como resultado la disminución de la calidad ambiental, la necesidad de tratamientos excesivos al agua previa a poder ser utilizada, y el aumento de la presión sobre los recursos hídricos.

Este trabajo pretende mostrar posibles escenarios futuros de los impactos que tendrá el cambio climático sobre los recursos hídricos, utilizando la metodología de Gunther Shosinsky para el cálculo del balance hídrico de suelos, como método para cuantificar la disponibilidad de recursos hídricos del departamento de Sacatepéquez. Como base para las condiciones futuras de emisiones de gases de efecto invernadero se utilizaron los escenarios socioeconómicos A2 y B1, del IPCC.

Los escenarios futuros de cambio climático otorgan una visión de las condiciones que se pueden esperar en el departamento de Sacatepéquez, basadas en las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los escenarios socioeconómicos A2 y B1. Los escenarios futuros de cambio climático pueden servir como base para la definición de acciones para la disminución de la vulnerabilidad, la toma de decisiones y la planificación del ordenamiento territorial.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

A partir de los cambios observados en el clima en las últimas décadas y sus efectos, se han realizados estudios, programas y leyes a nivel mundial, regional y nacional.

Nivel nacional

En Guatemala se tienen estudios sobre el cambio climático y su relación con los recursos hídricos y el desarrollo humano. En el 2013 se aprobó una ley marco que abarca temas de vulnerabilidad, adaptación y mitigación.

Entre los estudios se pueden mencionar:

- *Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales: 2001.
- *Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos en Guatemala ante el Cambio Climático*, Departamento de Servicios Hídricos, Insivumeh: 2003.
- *Guatemala frente al Cambio Climático*, Proyecto Bosques y Cambio Climático en América Central FAO/CCAD: 2003.
- Acuerdo Ministerial 143-2003: *Creación del Programa Nacional de Cambio Climático*, MARN.
- *Análisis de la Vulnerabilidad Futura de los Recursos Hídricos al Cambio Climático*, Programa Nacional de Cambio Climático: 2007.

- *Proyecto de Estudios de Cambio Climático con Énfasis en Adaptación*, Programa Nacional de Cambio Climático: 2007.
- *El Cambio Climático y sus Efectos sobre el Desarrollo Humano en Guatemala*, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo: 2009.
- *Política Nacional de Cambio Climático*, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales: 2009.
- Decreto 7-2013: *Ley Marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero*, Congreso de la República de Guatemala.

Nivel regional

Documentos realizados a nivel centroamericano y latinoamericano:

- *Marco Regional de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos en Centroamérica*, Global Water Partnership Central America: 2002.
- *Centroamérica frente al Cambio Climático*, Proyecto Bosques y Cambio Climático en América Central FAO/CCAD: 2003.
- *Cambio Climático en Centroamérica*, Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), Sistema de la Integración Centroamericana (SICA): 2009.
- *Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático: Diagnóstico inicial, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica*, Banco Interamericano de Desarrollo: 2010.
- *Estrategia Regional de Cambio Climático*, Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), Sistema de la Integración Centroamericana (SICA): 2010.

- *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*, Global Water Partnership Central America: 2011.
- *Agua y Adaptación al Cambio Climático en las Américas: Soluciones del Diálogo Regional de Política*, Agua y Cambio Climático en las Américas: 2012.

Nivel internacional

Documentos sobre el cambio climático y recursos hídricos a nivel internacional:

- *Recursos Hídricos y Cambio Climático*, Resources for the Future - RFF:1997.
- *Cambio Climático y Recursos Hídricos Globales: emisiones SRES y escenarios socioeconómicos*: 2004.
- *Cambio Climático y Agua*, Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático: 2008.
- *Agua y Cambio Climático: la comprensión de los riesgos y toma de decisiones de inversión inteligentes con el clima*, Banco Mundial: 2009.
- *El Impacto del Cambio Global sobre los Recursos Hídricos: La Respuesta del Programa Hidrológico Internacional de la Unesco*, Programa Hidrológico Internacional -IHP-: 2011.
- *El Efecto del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos: una síntesis global de descubrimientos y recomendaciones*, Programa Hidrológico Internacional -IHP-: 2011.
- *Gestión de los Riesgos de Fenómenos Meteorológicos Extremos y Desastres para Mejorar la Adaptación al Cambio Climático*, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: 2012.

1.2. Justificación

Es de gran importancia para Guatemala realizar estudios y pronósticos sobre las condiciones climáticas futuras, debido a que es uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático. Asimismo, es considerada como un país megadiverso, con una cantidad inmensa de recursos genéticos que deben ser preservados.

El departamento de Sacatepéquez se encuentra en la parte alta, es decir, de captación de la subcuenca del río Pixcayá, tributario del río Motagua; de la subcuenca del río Guacalate, tributario del río Achiguate; y de la subcuenca del río Michatoya, tributario del río María Linda. El río Pixcayá abastece a la planta potabilizadora de agua Lo de Coy, que distribuye el agua a gran parte de la ciudad capital. Los ríos María Linda y Achiguate vierten al océano Pacífico, lo que los hace importantes para las actividades de agricultura que se realizan en la bocacosta y costa del país.

En el departamento de Sacatepéquez se encuentran las áreas protegidas de Zona de Veda Definitiva Volcán de Acatenango, Zona de Veda Definitiva Volcán de Fuego, Zona de Veda Definitiva Volcán de Agua, Zona de Amortiguamiento Volcán de Acatenango, Zona de Amortiguamiento Volcán de Fuego y Zona de Amortiguamiento Volcán de Agua.

El agua es un recurso necesario para el progreso de la sociedad. Las comunidades del departamento de Sacatepéquez se abastecen del agua captada dentro de sus límites, para sus actividades y desarrollo. La actividad productiva del departamento de Sacatepéquez es, en gran parte, la producción de hortalizas y café, siendo el agua un recurso de vital importancia para su economía.

Se seleccionó el modelo PRECIS debido a que simula con gran precisión los episodios de sequía durante la época lluviosa en la región de Centroamérica y el Caribe. El modelo PRECIS permite hacer predicciones después de la década de 2050, sin que los cambios en las temperaturas sean muy abruptos, por lo que se realizarán escenarios hasta la década de 2090.

Los escenarios socioeconómicos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático seleccionados son el A2, por ser el de mayores emisiones de gases de efecto invernadero, y el B1, ya que es el de menores emisiones de esos gases.

1.3. Determinación del problema

En el presente trabajo se hace un análisis sobre la manera acertada de detectar y formular un problema científico, su objeto y objetivo en las investigaciones educacionales. Se ejemplifican los anteriores planteamientos y se explican los diferentes métodos investigativos que serían pertinentes utilizar.

1.3.1. Definición del problema

El cambio climático afecta la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, lo que afectará a los ecosistemas y las actividades agrícolas del departamento de Sacatepéquez y, en consecuencia, su economía y calidad ambiental.

1.3.2. Delimitación del problema

El estudio se delimita al departamento de Sacatepéquez, colinda al norte y este con Guatemala, al sur con Escuintla y al oeste con Chimaltenango. La red de estaciones hidrometeorológicas considerada para realizar este estudio está

compuesta por dos estaciones meteorológicas dentro del departamento y siete en los alrededores del mismo. Las estaciones dentro del departamento:

- Suiza Contenta
- Volcán de Agua

Estaciones en los alrededores:

- Lo de Coy, Mixco
- Amatitlán
- Insivumeh
- Alameda ICTA
- Sabana Grande
- Volcán de Fuego, Yepocapa
- Volcán de Fuego, Observatorio 2, Yepocapa

1.4. Limitaciones del estudio

El estudio utiliza la metodología de Shosinsky para el cálculo del balance hídrico de suelos, esta metodología no toma en cuenta la cantidad de agua que infiltra en los lechos de los cuerpos de agua.

Otra de las limitaciones de este estudio es que no se toma en cuenta el crecimiento urbano a lo largo del tiempo, el cambio de uso del suelo o las modificaciones a la topografía, tanto de origen antrópico como por eventos naturales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ciclo hidrológico

El agua se mantiene en constante dinamismo y atraviesa distintas fases, que se enlazan generando un ciclo, que se conoce como ciclo hidrológico o ciclo del agua¹. El ciclo hidrológico es: “Sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera”².

La atmósfera contiene agua en forma de vapor y de nube proveniente del agua evaporada, principalmente del mar. La humedad es transportada por los sistemas de vientos, hacia los continentes donde precipita. Durante la precipitación una porción de agua regresa a la atmósfera, al evaporarse mientras cae; otra porción es interceptada por plantas desde donde se evapora y regresa también a la atmósfera³.

El agua que llega a la superficie puede caer en cuerpos de agua o al suelo y escurrir, llegando finalmente al mar. Parte del agua que llega al suelo se evapora directamente del mismo, o se infiltra y alimenta las corrientes subsuperficiales que llegan a los cauces de los ríos, y finalmente al mar. “Por percolación el agua alimenta el flujo subterráneo que mantiene el caudal base de los ríos o llega directamente al mar. En el mar y otros cuerpos de agua, esta vuelve a evaporarse”⁴.

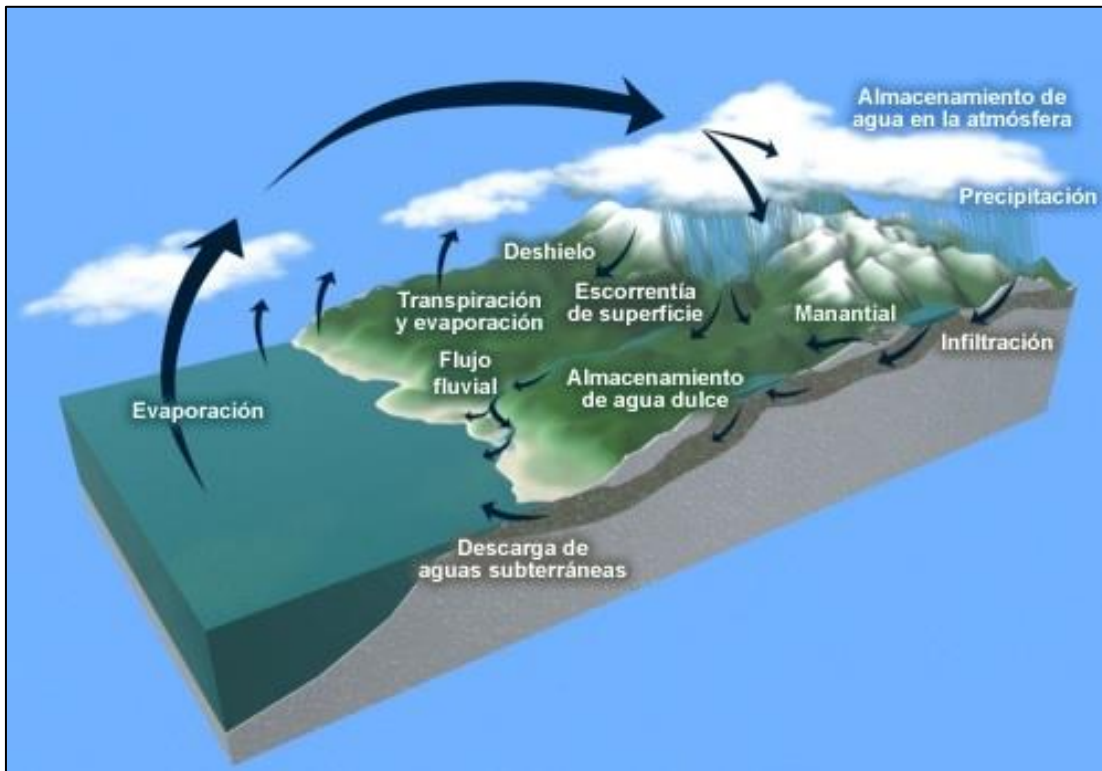
¹ MADEREY, L. *Principios de hidrogeografía. estudio del ciclo hidrológico*. p. 11.

² CAMPOS, D. *Procesos del ciclo hidrológico*. p. 4.

³ MADEREY, L. *Principios de hidrogeografía. estudio del ciclo hidrológico*. p. 11.

⁴ *Ibíd.*

Figura 1. **Ciclo hidrológico**



Fuente: UCAR. *Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica*.
Consulta: mayo de 2014.

2.2. Recursos hídricos

“Recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable”⁵.

⁵ Organización Meteorológica Mundial. *Glosario hidrológico internacional*. p. 377.

“Los recursos hídricos son las aguas dulces, superficiales y subterráneas, de una zona geográfica, que se renuevan anualmente. Son usadas por el ser humano para satisfacer sus demandas, que se pueden clasificar en dos grupos según su uso: los consuntivos y los no consuntivos”⁶.

2.2.1. Uso consuntivo del agua

Son aquellos que reducen su cantidad o calidad, y por lo tanto, el agua usada así no puede ser utilizada de nuevo sin un tratamiento previo. Los usos consuntivos incluyen tres grandes actividades humanas: agrícolas, industriales y urbanas⁷.

2.2.2. Uso no consuntivo

Aquellos que no reducen la cantidad ni calidad del agua usada y, por lo tanto, puede ser utilizada de nuevo. Los usos no consuntivos pueden ser: energéticos y recreativos⁸.

2.3. Balance hídrico

Es el equilibrio que existe entre el agua que ingresa al sistema y el agua que egresa del sistema, en un intervalo de tiempo determinado⁹. Es un método de evaluación de la cantidad y disponibilidad de los recursos hídricos¹⁰.

⁶ Instituto de Enseñanza Secundaria Felo Monzón Grau Bassas. *Recursos hídricos*. p. 215.

⁷ *Ibíd.*

⁸ *Ibíd.*

⁹ HERNÁNDEZ, M. *Curso subregional. Manejo Integrado de agua y áreas costeras*. p. 3.

¹⁰ *Op. Cit.* p. 2.

2.3.1. Forma general de la ecuación del balance hídrico

El estudio del balance hídrico se basa en el principio de conservación de la masa, el cual establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada¹¹.

La ecuación del balance hídrico tiene como entradas la precipitación que llega a la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la unidad de estudio. Las salidas de la ecuación son la evaporación desde la superficie y la salida de corrientes de aguas superficiales y subterráneas. Si las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada aumenta, de lo contrario, disminuye. Debido a errores de medida o estimación que se puedan cometer, la ecuación incluye un término residual¹².

Forma general de la ecuación del balance hídrico

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta S - v = 0 \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde

P: precipitación que llega a la superficie del suelo

Q_{sl} : corriente superficial que entra

Q_{ul} : corriente subterránea que entra

E: evaporación desde la superficie

Q_{so} : corriente superficial que sale

Q_{uo} : corriente subterránea que sale

¹¹ Instituto de Hidrología de España. *Métodos de cálculo del balance hídrico*. p. 18.

¹² Op. Cit. p. 19

ΔS : volumen de agua almacenada

v: término residual

2.3.2. Balance hídrico de suelos, metodología de Schosinsky

La recarga de los acuíferos se calcula por medio de un balance hídrico de suelos. Para el cálculo de este balance hídrico de suelos, primero se debe conocer la infiltración del agua de lluvia, generada por la precipitación que llega a la superficie. Con datos del tipo suelo se debe calcular un balance hídrico, que permita estimar el agua que drena del suelo al acuífero¹³.

2.4. Escenarios socioeconómicos de emisiones

El informe especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE) propone escenarios agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1, B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando una serie de fuerzas causantes demográficas, económicas y tecnológicas, y las emisiones de GEI resultantes¹⁴.

2.4.1. Escenario A1

Presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo que después decrece, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Los patrones regionales específicos tienden a desaparecer como resultado del aumento de la interacción cultural. La brecha existente entre regiones en relación con los ingresos per cápita se reduce sustancialmente¹⁵.

¹³ SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 14.

¹⁴ Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. *Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones*. p. 4.

¹⁵ *Ibíd.*

Partiendo del escenario A1 se han desarrollado tres alternativas que describen diferentes fórmulas de aprovisionamiento de energía: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B)¹⁶.

2.4.2. Escenario A2

Describe un mundo muy heterogéneo basado en la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, lo que se traduce en un aumento de población constante. El desarrollo económico está orientado regionalmente, y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están más fragmentados que en otras líneas evolutivas¹⁷.

2.4.3. Escenario B1

Representa un mundo convergente con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. Describe reducciones en el consumo y la introducción de tecnologías limpias y eficientes. Se pone énfasis en soluciones globales hacia la sostenibilidad, incluyendo la mejora de la equidad, pero sin iniciativas adicionales respecto al clima¹⁸.

¹⁶ Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. *Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones*. p. 4.

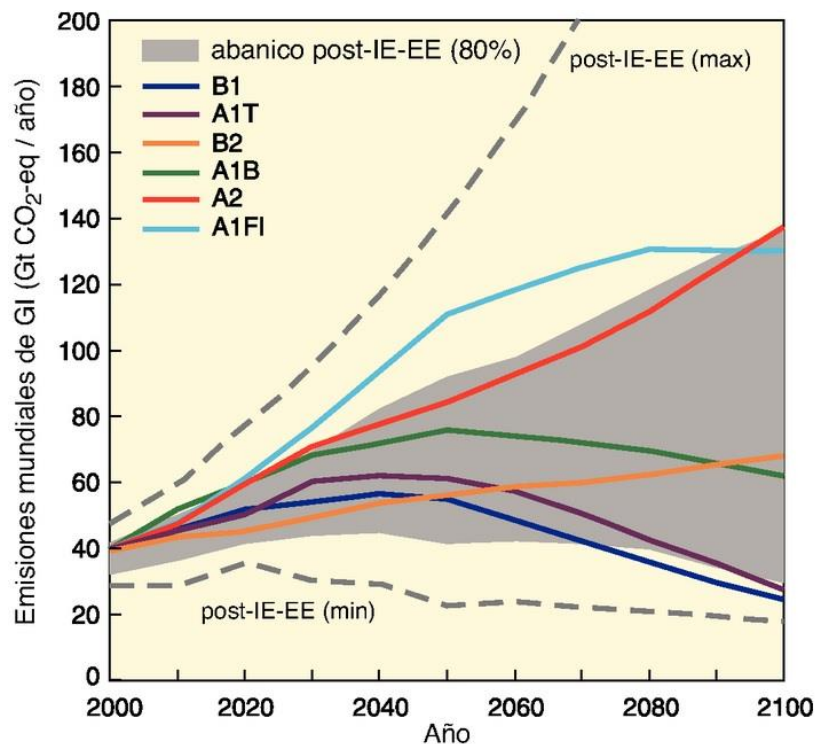
¹⁷ Op. Cit. p. 5.

¹⁸ *Ibíd.*

2.4.4. Escenario B2

Describe un planeta donde el énfasis se pone en las soluciones locales dirigidas hacia la sostenibilidad social, económica y ambiental. Es un mundo con una población creciente, pero a tasas más lentas que en los otros escenarios, con niveles de desarrollo económico intermedios, y un cambio tecnológico lento, pero variado. La sociedad está orientada hacia la protección ambiental y la equidad social, y prioriza los ámbitos local y regional¹⁹.

Figura 2. Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100



Fuente: *Cambios observados en clima y sus efectos*.

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/fig/figure-3-1-l.png.

Consulta: 4 de mayo de 2014.

¹⁹ Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. *Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones*. p. 5.

2.5. Modelos climáticos

Son representaciones matemáticas de la realidad del sistema climático, con enfoques predictivos. Para funcionar utilizan datos meteorológicos, conocimientos de los procesos físicos que determinan el comportamiento de los sistemas climáticos, técnicas para cálculos, y el acoplamiento de los sistemas océano y atmósfera²⁰.

2.5.1. Modelos climáticos globales (MCG)

Es una representación matemática del sistema climático con base en las propiedades físicas de sus componentes, sus interacciones y procesos de retroalimentación. Pueden simular características del clima y reproducir cambios a gran escala observados en el pasado reciente. Además, son usados para proyectar la respuesta del clima a las actividades humanas.

Los MCG integran los componentes atmósfera, océano, suelo y hielo de mar. Últimamente han sido introducidas las representaciones del ciclo del carbono y la química atmosférica. Los MCG hacen proyecciones en una malla con una resolución, con la que no se pueden representar detalles de fina escala, por lo que no son recomendables para regiones con orografía compleja, suelo heterogéneo o líneas costeras²¹.

²⁰ CEBALLOS, A. *El calentamiento actual de la tierra: el problema y su contexto*. [Compendio: Energías y cambio climático]. p. 98.

²¹ RUIZ, J. *Escenarios de cambio climático, algunos modelos y resultados de lluvia para Colombia bajo el escenario A1B*. p. 10.

2.5.2. Modelos climáticos regionales (MCR)

Es un modelo climático de alta resolución que incluye un área limitada del globo, generalmente de 5 000 x 5 000 kilómetros, y una resolución horizontal de 50 kilómetros. Los MCR están basados en las leyes de la física representadas por ecuaciones matemáticas que son resueltas utilizando una malla tridimensional. Generalmente, incluyen componentes atmosféricos y de la superficie terrestre, y otras representaciones de procesos importantes del sistema climático. La mayoría de estos procesos ocurren a escala espacial menor que la de la malla del modelo, por lo que no pueden ser modelados y resueltos de forma clara. Sus efectos se toman en cuenta por medio de parametrizaciones, por las cuales el proceso es representado por relaciones entre el área o tiempo promedio de efecto del proceso de escala menor y el flujo de gran escala.

Como los MCR son modelos limitados por un área, se requiere que sean conducidos en sus límites por campos de gran escala que dependen del tiempo. Estos campos provienen del análisis de observaciones o de integraciones de modelos climáticos globales en un área de amortiguamiento, que no es considerada cuando se analizan los resultados de los MCR²².

2.5.2.1. HadRM3P

La versión actual del MCR, del Hadley Centre, es el HadRM3P, y está basado en el modelo HadAM3P, que es una versión mejorada de la componente atmosférico del más reciente modelo de circulación global por acoplamiento atmósfera-océano (AOGCM), HadCM3.

²² Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *Workbook on generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. p. 13.

El HadRM3P ha sido utilizado con resoluciones horizontales de 50 y 25 kilómetros, con 19 niveles desde la superficie hasta 30 kilómetros en la estratósfera y 4 niveles en el suelo.

El MCR usa la misma formulación del sistema climático que en el MCG, lo que asegura que el MCR proporciona proyecciones regionales de cambio climático de alta resolución, y consistentes con la escala continental de cambio climático proyectada por el MCG²³.

El MCR PRECIS es un modelo atmosférico y de superficie terrestre de área limitada y alta resolución, localizable sobre cualquier parte del globo. El flujo dinámico, el ciclo atmosférico del azufre, nubes y precipitación, procesos de radiación, la superficie terrestre y el suelo profundo son descritos, e información de cada aspecto se diagnostica a partir del modelo.

El modelo requiere una superficie prescrita y condiciones laterales de los límites. Cuando se trabaja sobre superficies de agua se requieren condiciones de superficie de los límites, donde el modelo necesita series de tiempo de temperaturas superficiales y de extensiones de hielo. Las condiciones laterales de los límites proveen información atmosférica dinámica de los bordes latitudinales y longitudinales del dominio del modelo. Las condiciones laterales de los límites constan de las variables atmosféricas de presión superficial, componentes horizontales de viento, y medidas de temperatura y humedad atmosférica.

Unas configuraciones del MCR PRECIS contienen una representación completa del ciclo del azufre, por lo que, también se requiere un conjunto de

²³ Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *Workbook on generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. p. 13.

condiciones de los límites, como dióxido de azufre, aerosoles sulfatados y otras especies químicas asociadas.

El modelo puede ser descrito en tres secciones principales:

- Las dinámicas tratan de las variables del estado meteorológico, como las requeridas para condiciones laterales de los límites.
- Posteriormente, estas variables son modificadas consistentemente por las parametrizaciones físicas: las nubes, la precipitación, la radiación, la capa límite, los intercambios de superficie y el arrastre por ondas de gravedad.
- La tercera sección se refiere al ciclo del azufre: esta también es una parametrización física, pero sus variables de estado son tratadas como trazadoras de pronósticos y advección²⁴.

2.6. Escenarios de cambio climático

Son descripciones coherentes, internamente consistentes y recomendables sobre posibles estados futuros del mundo²⁵.

Son combinaciones de las condiciones que pueden representar posibles situaciones futuras, constituyendo pronósticos. Estos escenarios se utilizan a menudo, para evaluar las consecuencias de posibles condiciones futuras, la respuesta hipotética de organizaciones o individuos, y la manera en que ellos podrían estar mejor preparados para enfrentar tales condiciones²⁶.

²⁴ Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *Workbook on generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. p. 23.

²⁵ Panel Intergubernamental de cambio climático. *Impacts, adaptation, and vulnerability [Impactos, adaptación y vulnerabilidad]*, p. 147.

²⁶ Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. *Manual sobre evaluaciones de vulnerabilidad y adaptación*. p. 1.

Los escenarios de cambio climático constituyen una herramienta indispensable para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático.

2.6.1. Criterios de un escenario

Los siguientes criterios para conformar escenarios de cambio climático están dados por el Grupo de trabajo de asesoramiento en escenarios de impactos del clima:²⁷

- Los escenarios deben contener un número suficiente de variables para ser usadas en investigaciones de impactos. Las variables climáticas básicas a usar deben ser: temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación/nubosidad, humedad relativa específica o presión de vapor y velocidad de viento.
- Ser plausibles físicamente: combinaciones de cambios en diferentes variables deben ser físicamente consistentes.
- Ser espacialmente compatibles: cambios en una región son físicamente consistentes con cambios en otra región y con cambios globales.
- Ser consistentes con los rangos de proyecciones de calentamiento global 1,0–3,5 °C para el 2100, o 1,5–4,5 °C, para la duplicación de dióxido de carbono en la atmósfera.

La única forma en que un rango realístico de posibles impactos pueda ser estimado es si los escenarios reflejan el rango potencial de cambio climático futuro regional, junto con las incertidumbres en las predicciones.

²⁷ Grupo de trabajo de asesoramiento en escenarios de impactos del clima. *General guidelines on the use of scenario data... [Directrices generales sobre el uso de datos de escenarios...]*. p. 26.

2.7. Efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico

Las principales variables climáticas que determinan la disponibilidad de agua son: la precipitación, temperatura y demanda evaporativa (determinada por la radiación neta humedad atmosférica, velocidad de viento y temperatura).

2.7.1. Cambios en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos

Los impactos del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce se deben a los incrementos observados y proyectados en la temperatura, nivel del mar y variabilidad de precipitación. La estacionalidad del flujo de aquellas cuencas influenciadas por la precipitación incrementará, es decir, los caudales máximos serán más pronunciados en épocas húmedas y los mínimos serán más bajos durante períodos secos²⁸.

El cambio climático afecta a la rapidez de recarga de las aguas subterráneas y al nivel freático. Las aguas subterráneas dependen de las superficiales, por lo que los regímenes de estas afectan a las primeras²⁹.

2.7.2. Aumento de precipitación

Las proyecciones indican episodios de precipitación intensa más frecuentes. Esto tendría como resultado un aumento en crecidas repentinas e inundaciones de núcleos urbanos³⁰.

²⁸ GARCÍA, M. *Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia*. [Revista de Ingeniería, Núm. 36] p. 62.

²⁹ Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. *El cambio climático y el agua*. p. 40.

³⁰ *Ibíd.*

2.7.3. Sequía

En ciertas zonas, como áreas continentales medias, donde la humedad tiende a disminuir durante las épocas secas, se espera un aumento de las áreas afectadas por sequía³¹.

2.7.4. Calidad del agua

El aumento de la temperatura de las masas de agua, aunado a las precipitaciones intensas y a los períodos de caudal bajo prolongados, potenciaría las fuentes de contaminación del agua con sedimentos, nutrientes, carbono orgánico disuelto, patógenos, biocidas, sales y temperatura.

El aumento de la intensidad pluvial y de las épocas de estiaje, resultarían en el aumento de erosión hídrica. Esto aumentaría el transporte de sedimentos, la disminución del tirante de agua en ríos, el azolvamiento de cuerpos de agua y la probabilidad de inundaciones³².

2.8. Área de estudio de Sacatepéquez

El estudio se centrará en el departamento de Sacatepéquez de la región central de Guatemala.

2.8.1. Localización

Se localiza al sur-oeste de la República de Guatemala, a 45 kilómetros de la ciudad capital, cubre una extensión territorial de 465 kilómetros cuadrados, a

³¹ Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. *El cambio climático y el agua*. p. 42.

³² Op. Cit. p. 43.

una altitud de 1 546 metros sobre el nivel del mar, situado sobre las mesetas de la cordillera de la Sierra Madre, forma parte de la Región V (Central).

Limita al norte con el departamento de Chimaltenango, al sur con el departamento de Escuintla, al este con el departamento de Guatemala y al oeste con el departamento de Chimaltenango³³.

2.8.2. División político-administrativa

Está dividido en 16 municipios, su cabecera departamental es Antigua Guatemala. Los municipios son los siguientes³⁴.

- Antigua Guatemala
- Jocotenango
- Pastores
- Sumpango
- Santo Domingo Xenacoj
- Santiago Sacatepéquez
- San Bartolomé Milpas Altas
- San Lucas Sacatepéquez
- Santa Lucía Milpas Altas
- Magdalena Milpas Altas
- Santa María de Jesús
- Ciudad Vieja
- San Miguel Dueñas
- San Juan Alotenango

³³ Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 10.

³⁴ Op. Cit. p. 11.

- San Antonio Aguas Calientes
- Santa Catarina Barahona

2.8.3. Clima

La temperatura es de templada a semifría, con un promedio de 17,9 °C, marcándose 2 estaciones: verano e invierno.

La precipitación promedio en el departamento varía entre 800 mm en áreas con menos precipitación, hasta 3 999 mm en las zonas montañosas³⁵.

2.8.4. Fisiografía

La altitud oscila entre 700 y 3 980 msnm. Posee zonas montañosas, altas mesetas, picos volcánicos, profundas quebradas y altas llanuras. Sobresalen al sur, los volcanes de Agua (3 760 msnm), de Fuego (2 760 msnm) y de Acatenango (3 976 msnm)³⁶.

2.8.5. Recurso hídrico e hidrografía

A continuación se detallan los recursos hídricos del departamento.

2.8.5.1. Uso del agua

Existen 49 687 viviendas, de las cuales 36 842 tienen chorro para uso exclusivo, 5 619 un chorro para varios hogares, 4 302 chorro público, 1 383 se surten de pozo, 272 compran agua por tonel, 190 se surten de los ríos. El agua

³⁵ Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 20.

³⁶ Op. Cit. p. 22.

entubada es suministrada por las municipalidades y en algunos municipios existen comités del agua que se ocupan del mantenimiento de nacimientos.

El 97,31 % de las viviendas del departamento disponen de servicio sanitario. El 68,40 % de las viviendas están conectadas a los sistemas de drenaje. Las aguas servidas no reciben tratamiento antes de ser incorporadas al cuerpo receptor o el tratamiento es insuficiente³⁷.

2.8.5.2. Gestión integrada del recurso hídrico

Existen instituciones como el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social y la Unidad Especial de Ejecución de Desarrollo Integral de Cuencas Hidrográficas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, que coordinan actividades que contribuyen a la conservación del recurso hídrico, como: reforestación, producción de pilones forestales nativas del área, jornadas de limpieza de ríos, educación ambiental, proyectos de reciclaje y erradicación de basureros clandestinos. A nivel territorial no hay un plan de manejo de recursos hídricos³⁸.

2.8.5.3. Cuencas y subcuencas

Sacatepéquez está distribuido territorialmente en 4 cuencas hidrográficas, la del río Coyolate, río María Linda, río Achiguate y río Motagua. La cuenca más representativa es la del río Achiguate, específicamente la subcuenca del río Guacalate que cubre 307,64 km² correspondiente al 66 % del territorio³⁹.

³⁷ Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 35.

³⁸ Op. Cit. p. 48.

³⁹ Op. Cit. p. 49.

2.8.5.4. Hidrografía

Se distinguen tres zonas hidrográficas: la zona del Valle de Panchoy, que vierte sus aguas hacia el océano Pacífico a través del río Guacalate. La zona de la parte norte drena hacia el mar Caribe por el río Pixcayá, que se une al Motagua. La zona que drena hacia el lago de Amatitlán, en la parte este del departamento, con los municipios de Magdalena y San Lucas⁴⁰.

2.8.6. Demografía

La población es de cerca de 350 000 habitantes, la población masculina representa un 49 %, la femenina un 51 %. El 75 % de la población vive en área urbana y el 25 % en área rural. La población indígena representa un 42 %⁴¹.

2.8.7. Aspectos ambientales

Se definen los aspectos que pueden afectar el ambiente del departamento.

2.8.7.1. Contaminación

La contaminación del agua es provocada por desechos sólidos, hospitalarios, químicos, desfogues municipales y orgánicos, producidos por empresas exportadoras de vegetales, agroquímicos, así como sedimentos constituidos por material orgánico.

⁴⁰ Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 51.

⁴¹ Op. Cit. p. 52.

El suelo es contaminado por agroquímicos, desechos sólidos que son arrastrados por lluvias. El aire es contaminado, principalmente, por dióxido de carbono y monóxido de carbono producido por automóviles y quema de rosas⁴².

2.8.7.2. Áreas protegidas

El Cerro Alux, reserva protectora de manantiales, se encuentra en los municipios de San Lucas Sacatepéquez y Santiago Sacatepéquez. En Santa María de Jesús y Ciudad Vieja se localiza el cono volcánico de Agua. En San Miguel Dueñas y San Juan Alotenango se localizan los conos volcánicos de Fuego y Acatenango, declaradas zonas de veda⁴³.

2.8.7.3. Cobertura vegetal

El 48 % de la superficie del departamento posee cobertura vegetal. Un 25 % del territorio está comprendido por bosque mixto, en especial cobertura de encino común y de pino.

Existen áreas donde la frontera agrícola ha avanzado, conocido como bosque mixto-cultivos que corresponde al 10 % del territorio, caracterizado por cultivo de maíz y frijol. Existe el asocio latifoliadas-cultivo, que ocupa el 4 % del territorio, característico de la explotación cafetalera. El área sin cobertura vegetal se caracteriza por presencia de centros poblados⁴⁴.

⁴² Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 48.

⁴³ *Ibíd*

⁴⁴ *Op, Cit.* p. 49.

2.8.7.4. Suelo y su uso

El departamento presenta nueve series de suelos, de los cuales las series de Acatenango y de Cauqué son las más representativas. La primera se caracteriza por ser la zona cafetalera del departamento. La segunda serie contiene suelos fértiles, por lo que son usados para horticultura y cultivo de granos básicos como maíz y frijol⁴⁵.

Sus suelos poseen buen drenaje, lo que favorece la infiltración de agua al subsuelo, alimentando el manto freático y las corrientes subsuperficiales.

Las principales causas de cambio de uso del suelo son la agricultura limpia, que abarca un 38,32 % del territorio, y la horticultura, con un 6,62 % del territorio. No existen prácticas de conservación de suelo.

El cultivo de café, restringido a las faldas del volcán de Agua y de Fuego, ocupa un 14 % de la cobertura vegetal del departamento⁴⁶.

2.8.8. Aspectos socioeconómicos

La agricultura es la actividad principal y se desarrolla en mayor escala en los municipios de Santa María de Jesús, Magdalena Milpas Altas, Sumpango Sacatepéquez y Santo Domingo Xenacoj. La artesanía es una de las principales fuentes de ingresos en los municipios de Antigua Guatemala, Ciudad Vieja, Pastores y Jocotenango.

⁴⁵ Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 50.

⁴⁶ Op. Cit. p. 51.

El turismo se desarrolla en mayor escala en el municipio de Antigua Guatemala, pero está en proceso de expansión a los demás municipios, donde se han habilitado Oficinas de Atención al Turismo para promocionar territorios y productos⁴⁷.

⁴⁷ Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez*. p. 41.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación se describen las variables del ciclo hidrológico y el balance hídrico del suelo.

3.1.1. Variables independientes

Las variables del ciclo hidrológico son:

- Precipitación: cantidad de lluvia que cae en milímetro.
- Temperatura: medida de la cantidad de energía en el ambiente.
- Humedad: porción del agua dentro de una masa de aire.
- Evapotranspiración real: suma de los fenómenos de evaporación del suelo y de la transpiración de las plantas en milímetro.
- Escorrentía: cantidad de escorrentía en milímetro.
- Infiltración: cantidad que agua que infiltra en el suelo en milímetro.

3.1.2. Variables dependientes

Balance hídrico del suelo: cantidad de agua que es almacenada en los acuíferos. Según la metodología de Gunther Schosinsky para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos es mediante un balance hídrico de suelos.

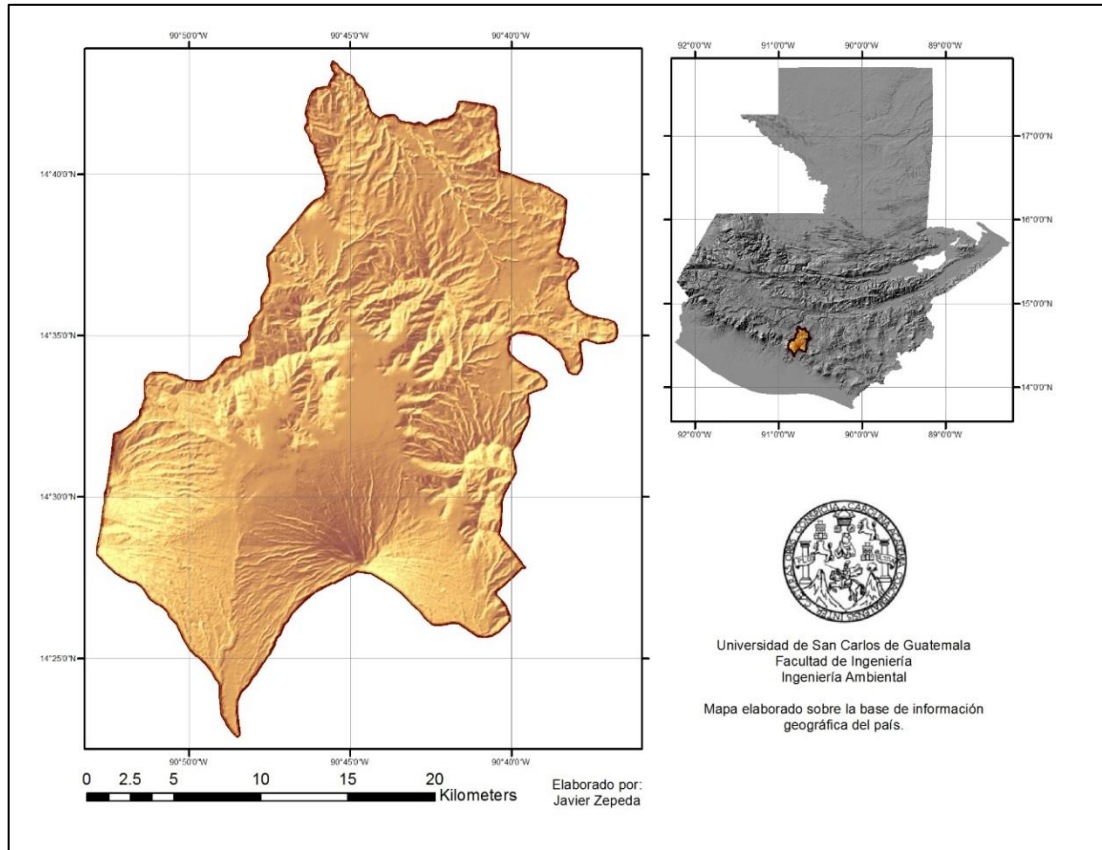
3.2. Delimitación del campo de estudio

En el departamento de Sacatepéquez se ha delimitado el campo de estudio, como se describe a continuación.

- La red hidrometeorológica:
 - Suiza Contenta
 - Volcán de Agua

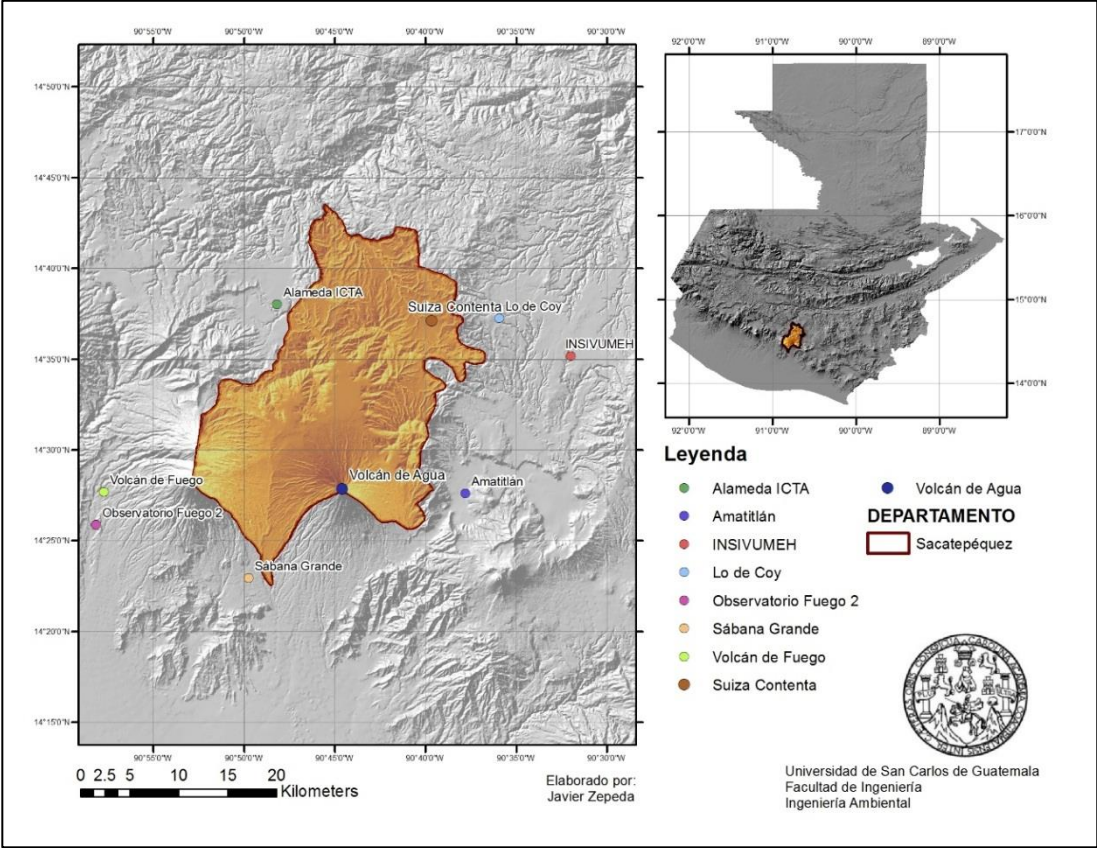
- Estaciones en los alrededores:
 - Lo de Coy, Mixco
 - Amatitlán
 - Insivumeh
 - Alameda ICTA
 - Sábana Grande
 - Volcán de Fuego, Yepocapa
 - Volcán de Fuego, Observatorio 2, Yepocapa

Figura 3. **Mapa de ubicación del departamento de Sacatepéquez**



Fuente: elaboración propia, a partir de información geográfica nacional.

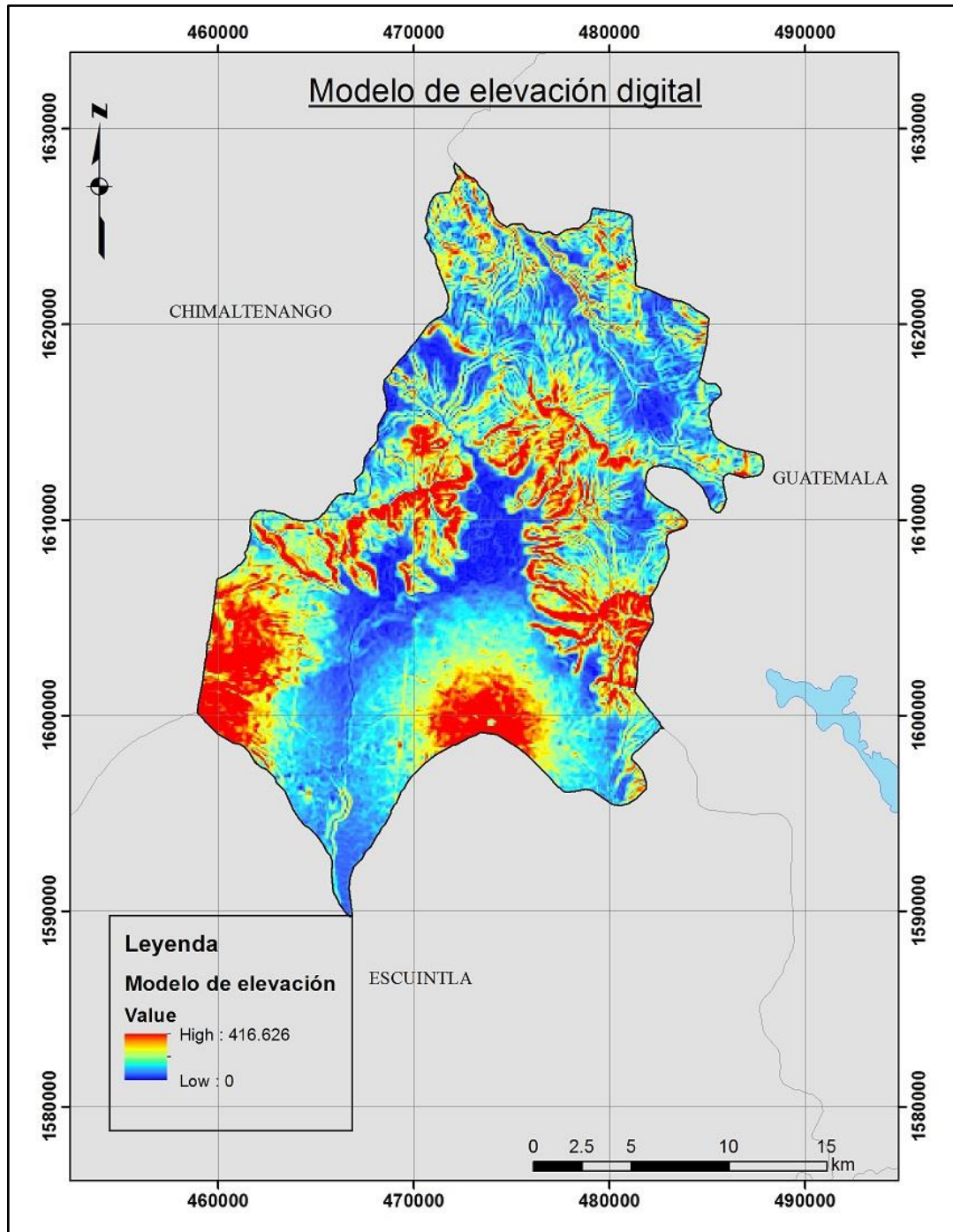
Figura 4. Mapa de estaciones para el departamento de Sacatepéquez



Fuente: elaboración propia, a partir de información geográfica nacional.

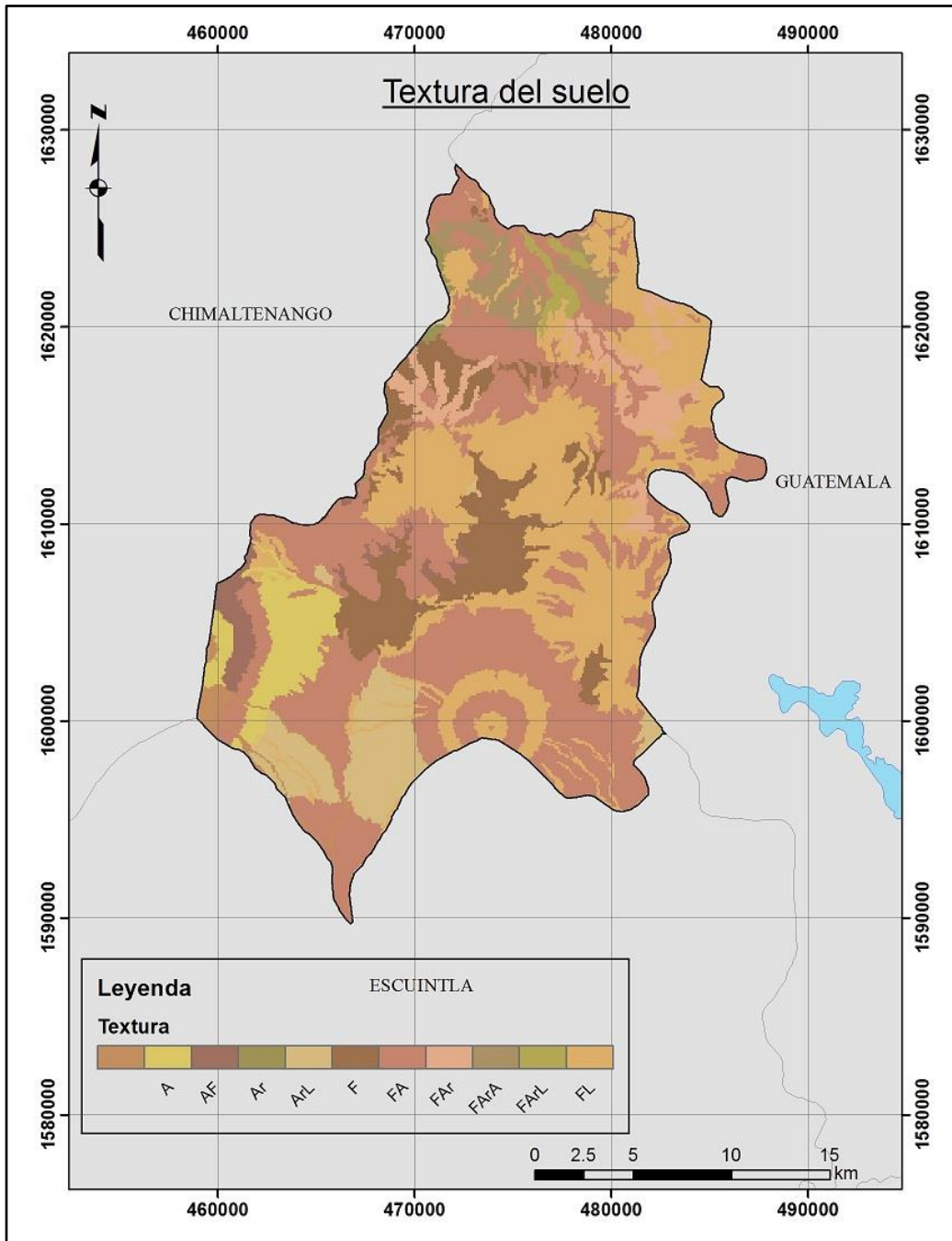
El estudio no contempla cambios de uso del suelo a lo largo del intervalo de tiempo estudiado. A continuación se presentan los mapas con la información del terreno del departamento de Sacatepéquez.

Figura 5. **Mapa de pendientes, departamento de Sacatepéquez**



Fuente: elaboración propia, a partir del modelo de elevación digital a 90 m.

Figura 6. **Mapa de texturas del suelo, departamento de Sacatepéquez**



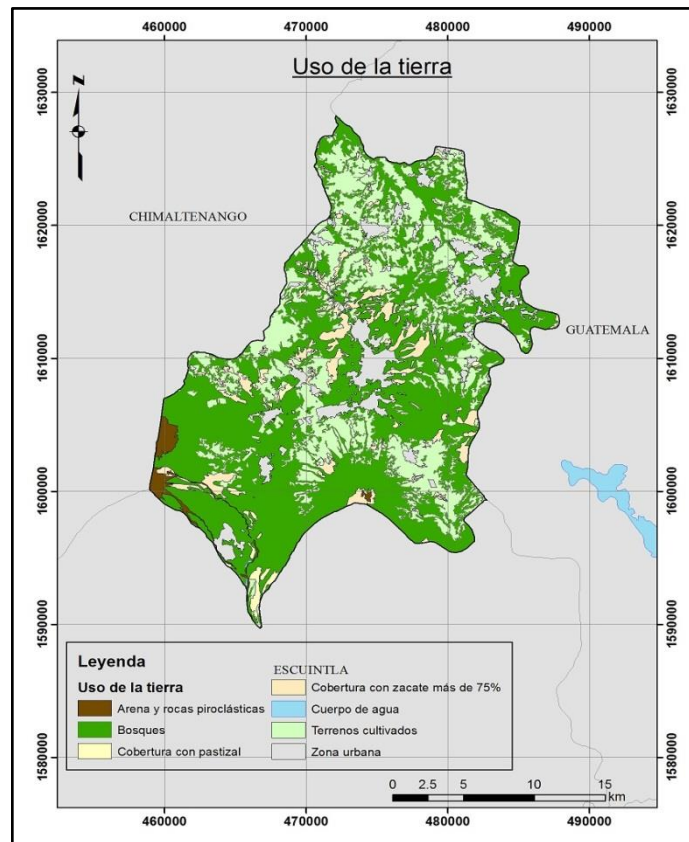
Fuente: elaboración propia, a partir del estudio *semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez*.

Tabla I. **Simbología de textura del suelo**

Símbolo	Descripción
A	Arena
AF	Arena franca
Ar	Arcilla
ArL	Arcilla limosa
F	Franco
FA	Franco arenoso
FAr	Franco arcilloso
FArA	Franco arcilla arenosa
FArL	Franco arcilla limosa
FL	Franco limoso

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Mapa de cobertura vegetal, departamento de Sacatepéquez**



Fuente: elaboración propia, a partir de información geográfica nacional.

3.3. Recursos humanos disponibles

Dentro del recurso humano para la realización del presente estudio se contó con el siguiente:

- Asesor: Ingeniero Walter Bardales
- Investigador: Javier Zepeda Mas

3.4. Recursos materiales disponibles

Equipo de trabajo fue el siguiente:

- De cómputo
- Información climática
- Sistema operativo
- Softwares
- Impresora

3.5. Técnicas

Las técnicas empleadas se describen a continuación:

3.5.1. Cualitativa

Mapas o escenarios: construcción de representaciones gráficas de los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico para los horizontes temporales comprendidos entre 2011 y 2090.

3.5.2. Cuantitativa

Procedimiento de decisión que pretende señalar, entre ciertas alternativas, usando magnitudes numéricas que pueden ser tratadas mediante herramientas del campo de la estadística.

3.5.2.1. Balance hídrico de suelos (metodología de Shosinsky)

Cálculo de la recarga potencial de acuíferos a partir de la precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración.

3.5.2.1.1. Coeficiente de infiltración

Del agua que llega a la superficie del suelo, una parte se infiltra, esto debido a la textura del suelo, la cobertura vegetal y la pendiente del terreno.

Coeficiente de infiltración⁴⁸

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc > 1 \Rightarrow Ci = 1$$

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc \leq 1 \Rightarrow Ci = Kp + Kv + Kfc \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde

Ci: coeficiente de infiltración [adimensional]

Kp: fracción infiltrada por la pendiente [adimensional]

Kv: fracción infiltrada por la cubierta vegetal [adimensional]

⁴⁸ SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 15

Kfc: Fracción infiltrada por textura del suelo [adimensional]

Los valores de Kp, Kv y Kfc están dados por la tabla II.

Tabla II. **Coeficientes de infiltración propuestos por textura y pendiente**

Por textura de suelo:		Kfc
Arcilla compacta impermeable		0,10
Combinación de limo y arcilla		0,20
Suelo limo arenoso no muy compacto		0,40
Por pendiente:		Kp
Muy plana	0,02 % - 0,06 %	0,30
Plana	0,3 % - 0,04 %	0,20
Algo plana	1 % - 2 %	0,15
Promedio	2 % - 7 %	0,10
Fuerte	mayor de 7 %	0,06

Fuente: SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 16.

Tabla III. **Coeficientes de infiltración propuestos por cobertura vegetal**

Por cobertura vegetal:		Kv
Cobertura con zacate menos de 50 %		0,09
Terrenos cultivados		0,10
Cobertura con pastizal		0,18
Bosques		0,20
Cobertura con zacate más de 75 %		0,21

Fuente: SCHOSINSKY, G. & LOSILLA, M. *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 23] p. 45.

Para conocer la textura del suelo se utilizó la información del *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala*⁴⁹, figura 6. La pendiente se calculó mediante el modelo de elevación digital a 90 metros, en formato ráster del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, figura 5. La cobertura se determinó mediante la información de uso de la tierra, en formato ráster del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, figura 7.

3.5.2.1.2. Infiltración pluvial mensual

Para el cálculo de la infiltración pluvial mensual se consideran los factores: precipitación mensual y coeficiente de infiltración.

Precipitación que infiltra mensualmente

$$P_i = C_i * P \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde

P_i: precipitación que infiltra mensualmente [mm/mes]

C_i: coeficiente de infiltración [adimensional] (ecuación 2)

P: precipitación mensual [mm/mes] (dato meteorológico)

3.5.2.1.3. Escorrentía superficial

Del agua que llega a la superficie del suelo, la fracción que no infiltra al suelo se convierte en escorrentía superficial.

⁴⁹ Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA-. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala*. Guatemala: Don Quijote, 2013. p. 21.

Escorrentía superficial⁵⁰

$$ESC = P - Pi \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde

ESC: escorrentía superficial [mm/mes]

P: precipitación mensual [mm/mes] (dato meteorológico)

Pi: precipitación que infiltra mensualmente [mm/mes] (ecuación 3)

3.5.2.1.4. Evapotranspiración

Se refiere a la porción de agua transpirada por las plantas y la evaporación proveniente del suelo.

Evapotranspiración potencial

$$ETP = \sqrt{12.5 * \sqrt{100 - HR}} * 0.075 * 0.0075 * T_{med} * Ra \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde

ETP: evapotranspiración potencial [mm/mes]

HR: humedad relativa promedio mensual [%]

T_{med}: temperatura media mensual [°F] (dato meteorológico)

Ra: radiación extraterrestre [mm]

⁵⁰ Modificada de: SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 16.

Los datos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente se obtuvieron del *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala*⁵¹.

Coeficiente de humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración⁵²

$$C1 = \frac{HSi - PM + Pi}{CC - PM} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde

C1: coeficiente de humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración [adimensional]

HSi: humedad del suelo al iniciar el mes [mm]

PM: punto de marchitez permanente [mm]

Pi: precipitación que infiltra [mm/mes] (ecuación 3)

CC: capacidad de campo [mm]

Evapotranspiración potencial real⁵³

$$ETR1 = C1 * ETP \quad \text{[Ecuación 7]}$$

⁵¹ Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA-. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala*. Guatemala: Don Quijote, 2013. p. 35.

⁵² SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 20.

⁵³ *Ibíd.*

Donde

ETR1: evapotranspiración potencial real [mm/mes]

C1: coeficiente de humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración [adimensional] (ecuación 6)

ETP: evapotranspiración potencial [mm/mes] (ecuación 5)

Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración⁵⁴

$$C2 = \frac{HSi - PM + Pi - ETR1}{CC - PM} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde

C2: coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración [adimensional]

HSi: humedad del suelo al iniciar el mes [mm]

PM: punto de marchitez permanente [mm]

Pi: precipitación que infiltra [mm/mes] (ecuación 3)

ETR1: evapotranspiración potencial real (ecuación 7)

CC: capacidad de campo [mm]

Humedad disponible⁵⁵

$$HD = HSi + Pi - PM \quad \text{[Ecuación 9]}$$

⁵⁴ SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 20.

⁵⁵ *Ibíd.*

Donde

HD: humedad disponible [mm/mes]

HSi: humedad del suelo al iniciar el mes [mm]

Pi: precipitación que infiltra [mm/mes] (ecuación 3)

PM: punto de marchitez permanente [mm]

Evapotranspiración real⁵⁶

$$\begin{aligned} Si \left(\frac{(C1 + C2)}{2} \right) * ETP \leq HD \Rightarrow ETR = \left(\frac{(C1 + C2)}{2} \right) * ETP \\ Si \left(\frac{(C1 + C2)}{2} \right) * ETP > HD \Rightarrow ETR = HD \quad [Ecuación 10] \end{aligned}$$

Donde

C1: coeficiente de humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración [adimensional] (ecuación 6)

C2: coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración [adimensional] (ecuación 8)

ETP: evapotranspiración potencial [mm/mes] (ecuación 5)

HD: humedad disponible [mm/mes] (ecuación 9)

ETR: evapotranspiración real [mm/mes]

3.5.2.1.5. Recarga potencial al acuífero

La recarga al acuífero se lleva a cabo si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la

⁵⁶ SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 21.

evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero.⁵⁷

Humedad del suelo al final del mes⁵⁸

$$\text{Si } HD + PM - ETR < CC \Rightarrow HSf = HD + PM - ETR$$

$$\text{Si } HD + PM - ETR \geq CC \Rightarrow HSf = CC \quad [\text{Ecuación 11}]$$

Donde

HD: humedad disponible [mm/mes] (ecuación 9)

PM: punto de marchitez permanente [mm]

ETR: evapotranspiración real [mm/mes] (ecuación 10)

CC: capacidad de campo [mm]

HSf: humedad del suelo al final del mes [mm]

Humedad del suelo al inicio del mes⁵⁹

$$HSi = HSf_0 \quad [\text{Ecuación 12}]$$

Donde

HSi: Humedad del suelo al inicio del mes [mm]

HSf₀: Humedad del suelo al final del mes anterior [mm] (ecuación 11)

⁵⁷ SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 21.

⁵⁸ *Ibíd.*

⁵⁹ *Ibíd.*

Recarga potencial al acuífero⁶⁰

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Donde

R_p: recarga potencial mensual [mm/mes]

P_i: precipitación que infiltra [mm/mes] (ecuación 3)

H_{Si}: humedad del suelo al iniciar el mes [mm] (ecuación 12)

H_{Sf}: humedad del suelo al final del mes [mm] (ecuación 11)

ETR: evapotranspiración real [mm/mes] (ecuación 10)

3.6. Recolección de la información

La información necesaria para construir la base climática será recolectada de los datos meteorológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). Esta será ordenada en tablas y gráficas para su análisis.

La información geográfica se obtendrá de los siguientes productos cartográficos:

- Modelo de elevación digital DEM de 90 m, MAGA.
- Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala.
- Uso de la tierra, MAGA.

⁶⁰ SCHOSINSKY, G. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. [Revista Geológica de América Central, Núm. 34-35] p. 21.

3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizará por medio de medidas de tendencia central, medidas de desviación, análisis de máximos y mínimos.

3.7.1. Medidas de tendencia central

Ubican el centro de los datos.

- Media aritmética: es la suma de los valores observados de la variable, dividido por el número de observaciones.⁶¹

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

3.7.2. Medidas de dispersión

Donde

X: datos

N: número de datos

\bar{X} : media aritmética

Miden el grado de separación de los datos con respecto a un valor central.

- Desviación estándar: es la raíz cuadrada de la varianza.⁶²

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{N}} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

⁶¹ CORDOVA, M. *Estadística, descriptiva e inferencial. Aplicaciones.* p. 44.

⁶² CORDOVA, M. *Estadística, descriptiva e inferencial. Aplicaciones.* p. 66.

Donde

σ : desviación estándar

X: datos

\bar{X} : media aritmética

N: número de datos

- Coeficiente de variación: es la relación entre la desviación estándar y la media aritmética, se puede mostrar como un valor porcentual.⁶³

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde

CV: coeficiente de variación

σ : desviación estándar

\bar{X} : media aritmética

3.7.3. Análisis de máximos y mínimos

Se utilizan para la determinación de datos atípicos o no homogéneos.

⁶³ CÓRDOVA, M. *Estadística, descriptiva e inferencial. Aplicaciones.* p. 70.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados para el escenario B1

La tabla IV presenta los resultados para las distintas variables, calculadas bajo las condiciones del escenario socioeconómico B1, desde la década 2020 hasta la de 2090. En verde se muestran los datos preferentes, mientras que los que están en rojo se refieren a los casos más drásticos.

Tabla IV. Resultados para el escenario B1

Variable	Década							
	20	30	40	50	60	70	80	90
P (mm)	1 209,5	1 214,4	1 110,7	1 188,8	1 088,5	1 016,8	1 114,0	970,4
T máx (°C)	23,8	24,0	24,5	24,8	25,3	25,4	25,9	26,6
T med (°C)	17,8	18,0	18,3	18,7	19,0	19,0	19,4	19,9
T min (°C)	11,6	11,8	12,1	12,3	12,5	12,6	12,9	13,3
ESC (mm)	612,0	614,3	560,5	600,9	548,9	511,9	562,0	487,5
ETR (mm)	42,1	42,3	42,4	42,4	42,8	42,1	42,8	43,6
Pi (mm)	597,5	600,1	550,3	587,9	539,6	504,9	552,0	482,9
Rp (mm)	471,8	473,1	424,5	460,6	411,1	379,6	423,0	352,0

Fuente: elaboración propia.

La tabla V presenta el análisis estadístico de los resultados de las variables de la tabla IV.

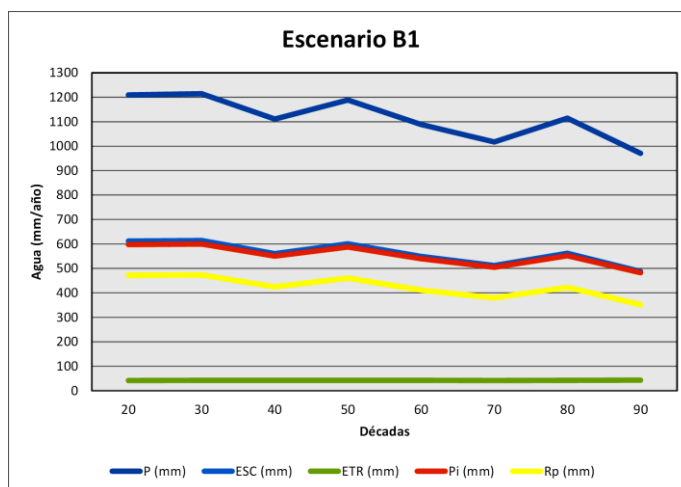
Tabla V. **Análisis estadístico, escenario B1**

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
P (mm)	1 114,1	83,3	7,5 %
T máx (°C)	25,0	0,9	3,6 %
T med (°C)	18,8	0,7	3,5 %
T min (°C)	12,4	0,5	4,2 %
ESC (mm)	562,2	43,3	7,7 %
ETR (mm)	42,6	0,5	1,1 %
Pi (mm)	551,9	40,0	7,3 %
Rp (mm)	424,5	40,9	9,6 %

Fuente: elaboración propia.

La figura 8 muestra los promedios de las variables del movimiento del agua a lo largo del horizonte temporal, desde la década de 2020 al 2090. La superior es la precipitación pluvial, las tres de en medio son la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos, mientras que la inferior es la evapotranspiración real.

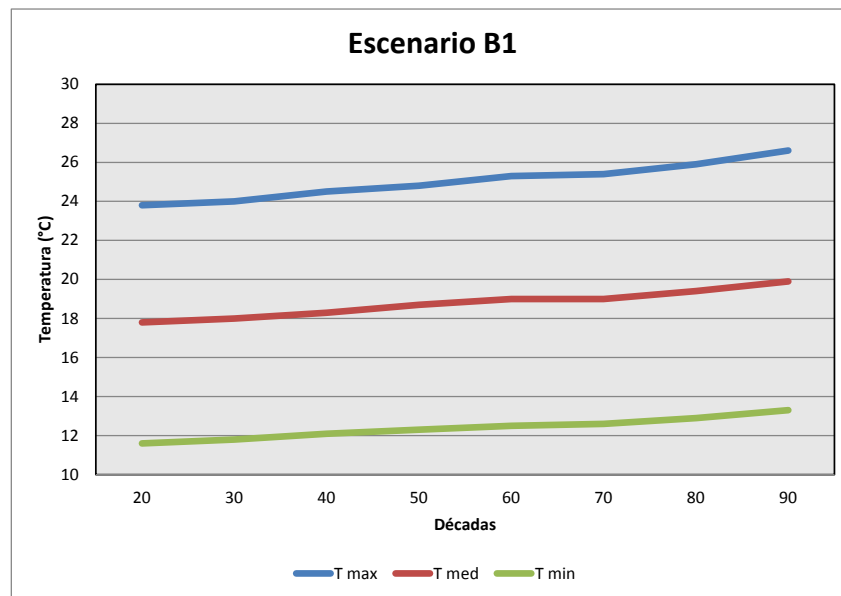
Figura 8. **Variables del movimiento del agua, escenario B1**



Fuente: elaboración propia.

La figura 9 presenta el cambio de las temperaturas a lo largo del intervalo estudiado, teniendo las tres una tendencia ascendente.

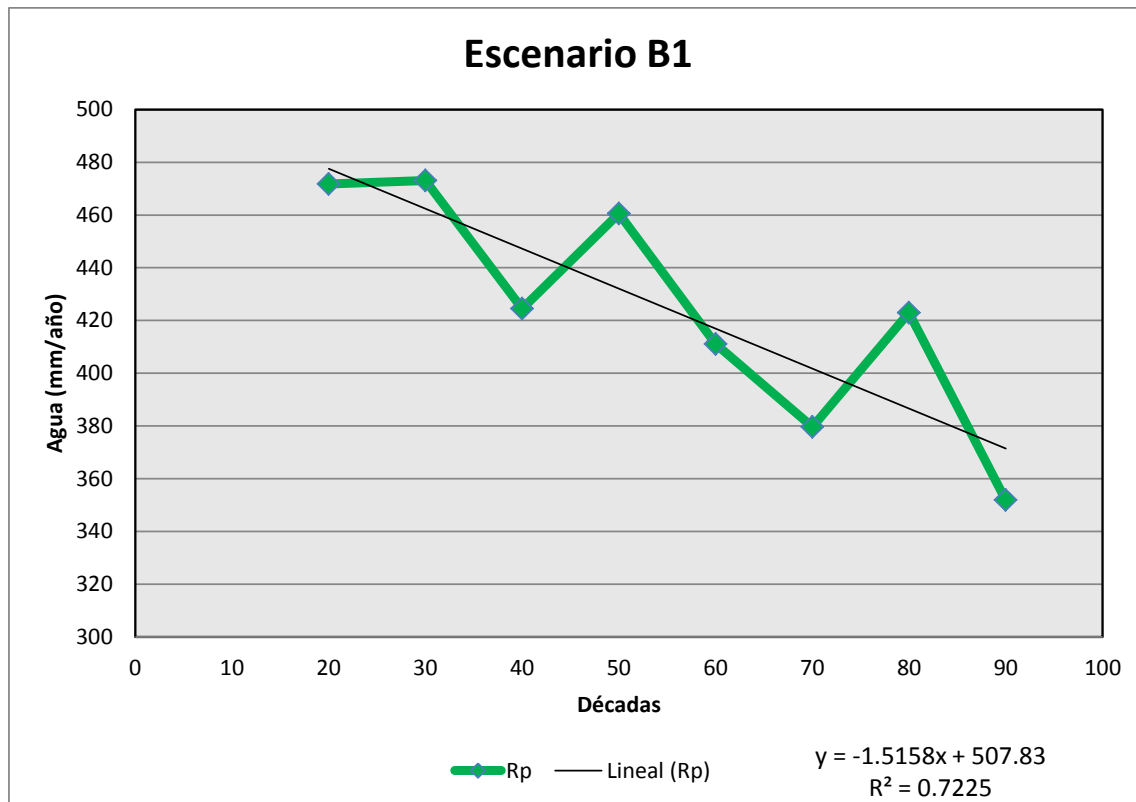
Figura 9. **Temperaturas, escenario B1**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 10 se presenta la gráfica de la recarga potencial del acuífero con su línea de tendencia y el coeficiente de determinación.

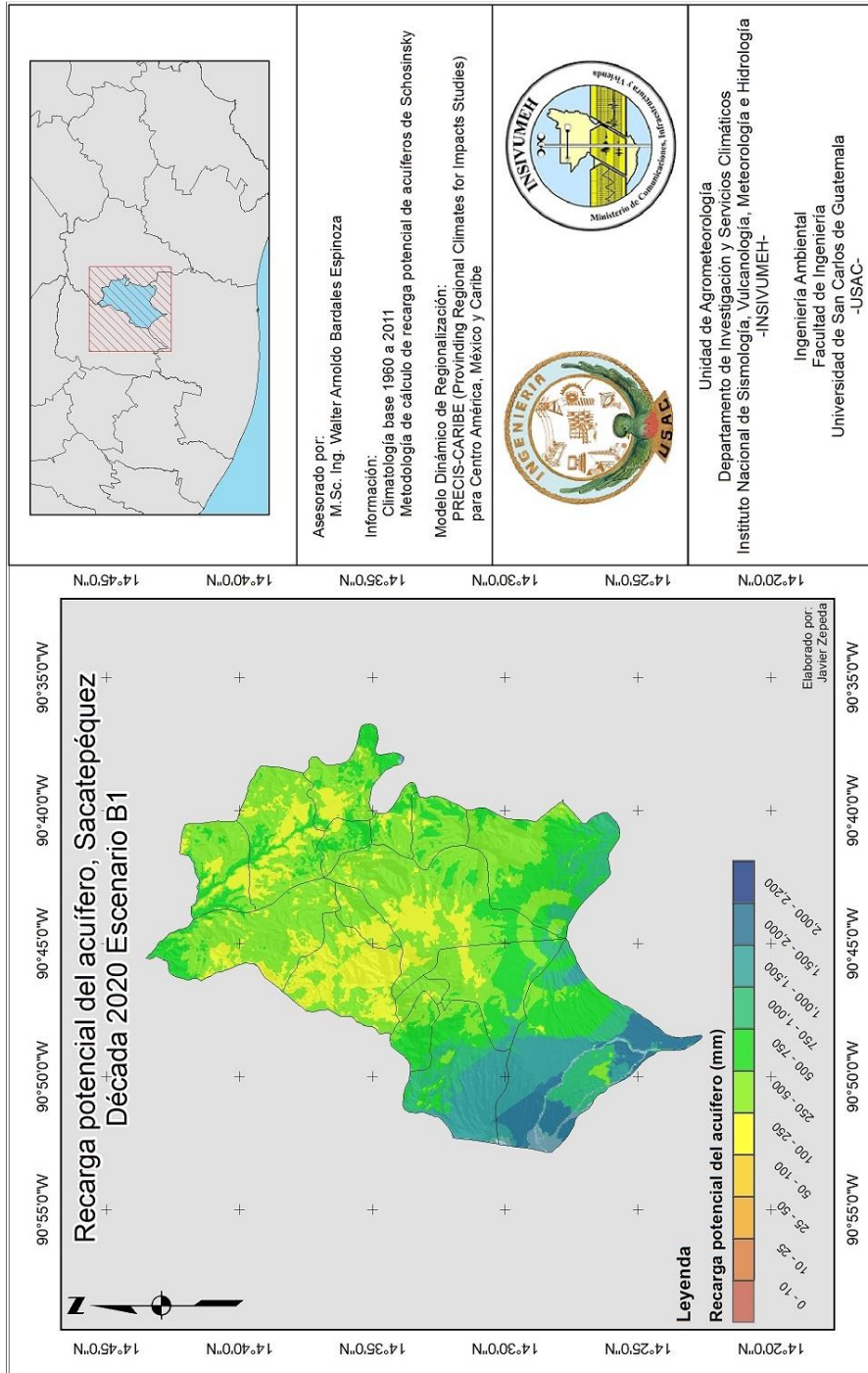
Figura 10. Recarga potencial de acuíferos y línea de tendencia, escenario B1



Fuente: elaboración propia.

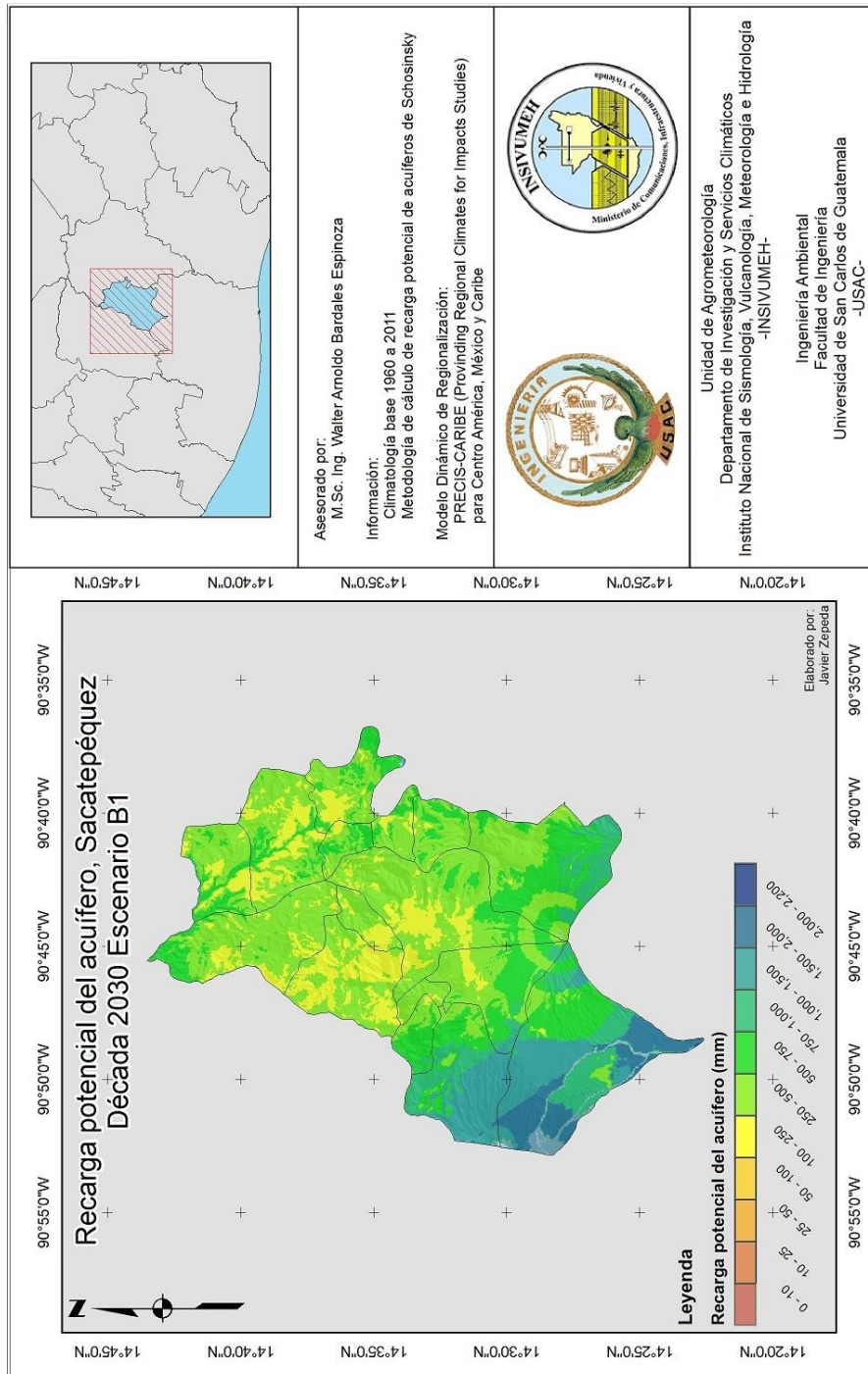
Las figuras de la 11 a la 18 presentan los mapas con los resultados de la recarga potencial de acuíferos, para las décadas de 2020 a 2090, con las condiciones socioeconómicas del escenario B1. La escala indica que los colores de rojo a amarillo son los de menor recarga, mientras que los azules son los que presentan mayor recarga.

Figura 11. Recarga potencial de acuíferos, década 2020, escenario B1



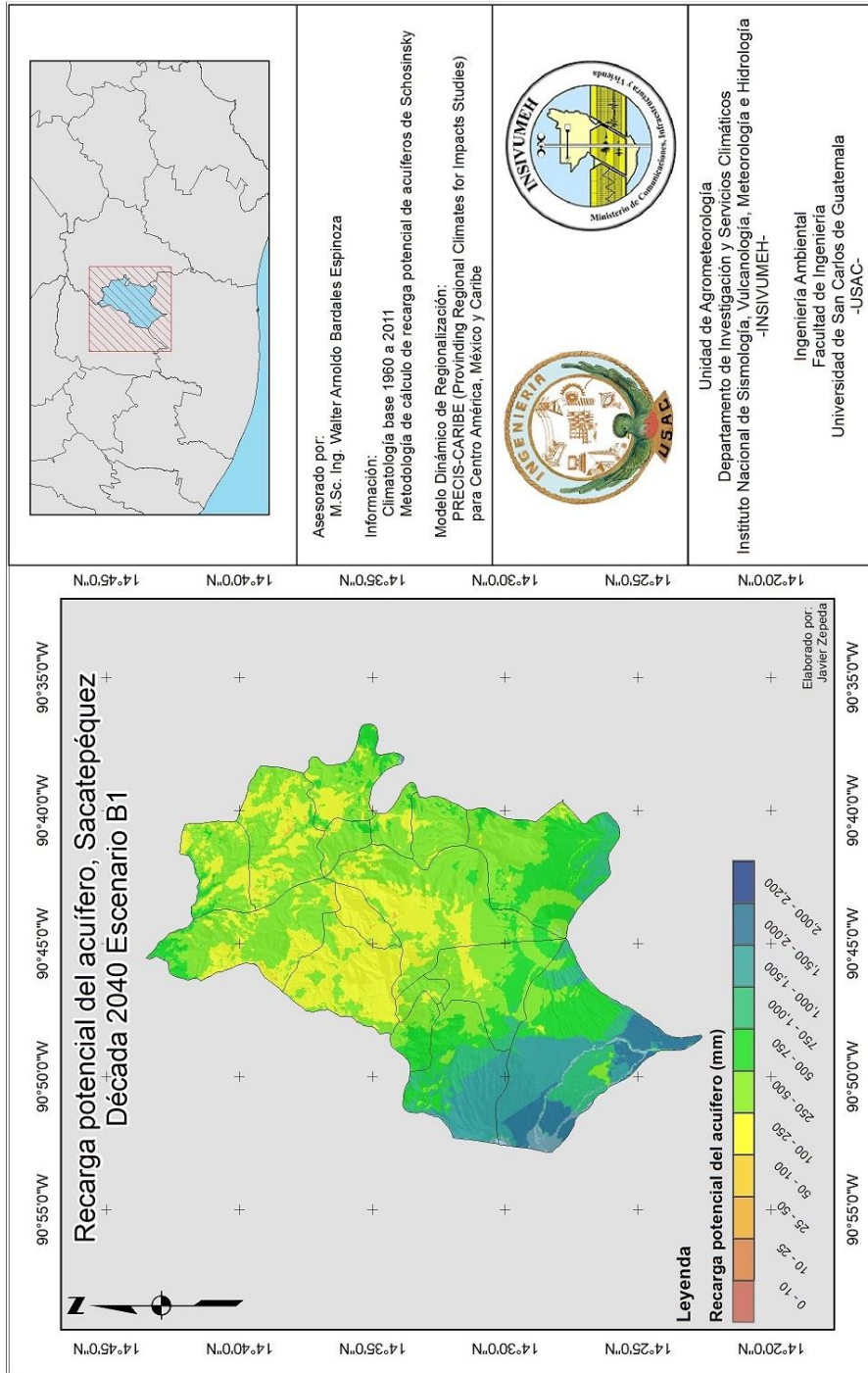
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 12. Recarga potencial de acuíferos, década 2030, escenario B1



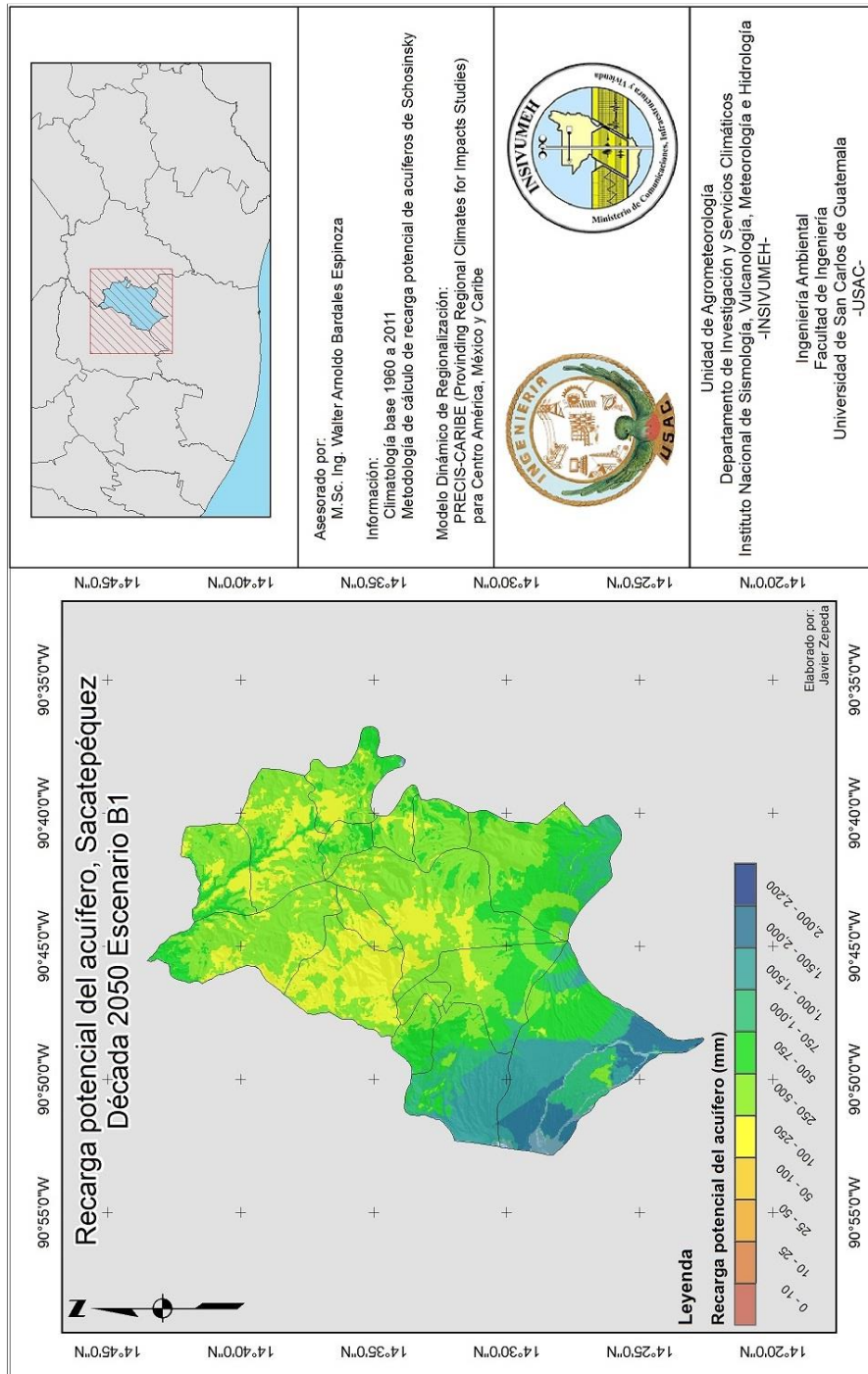
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 13. Recarga potencial de acuíferos, década 2040, escenario B1



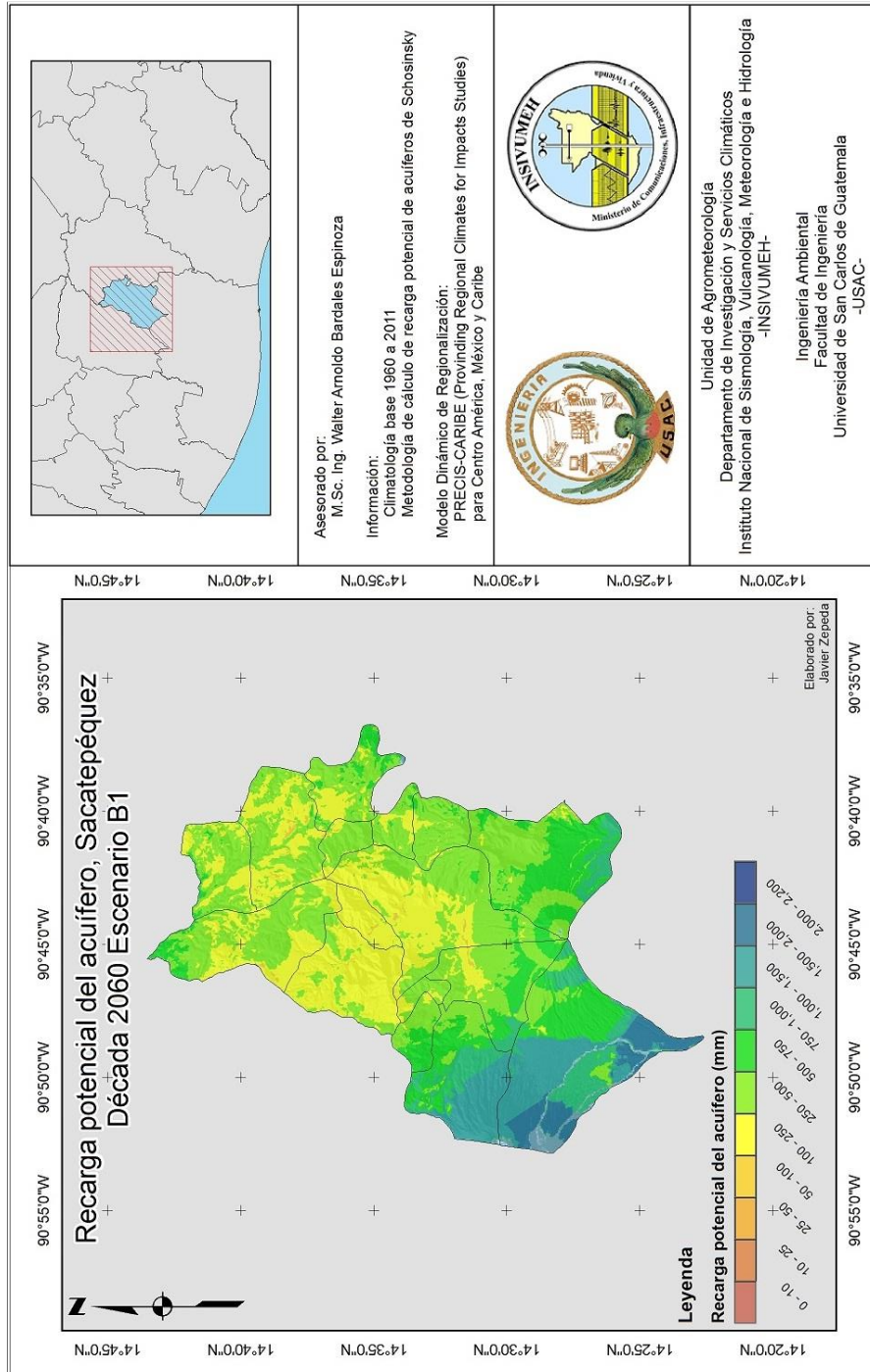
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 14. Recarga potencial de acuíferos, década 2050, escenario B1



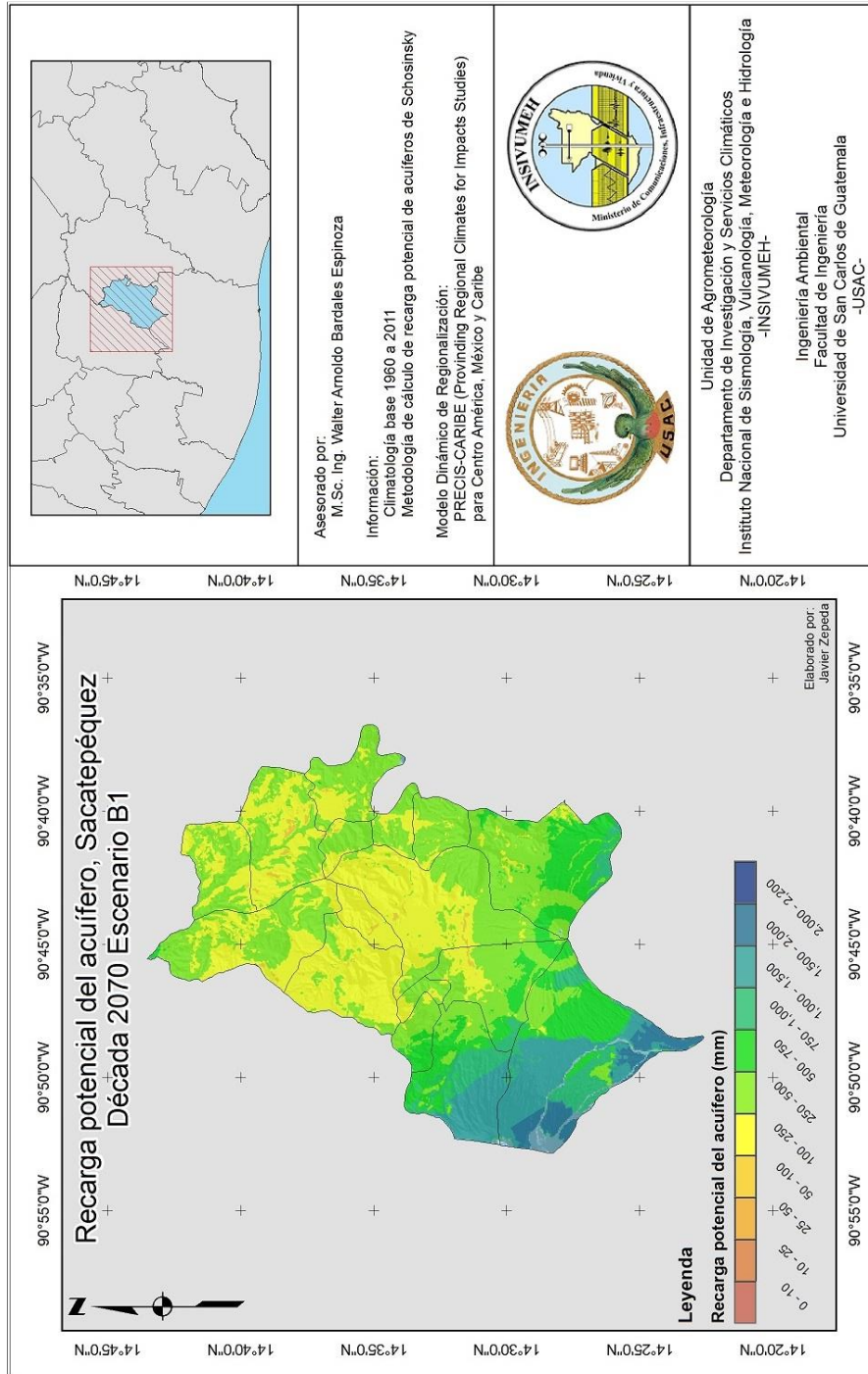
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 15. Recarga potencial de acuíferos, década 2060, escenario B1



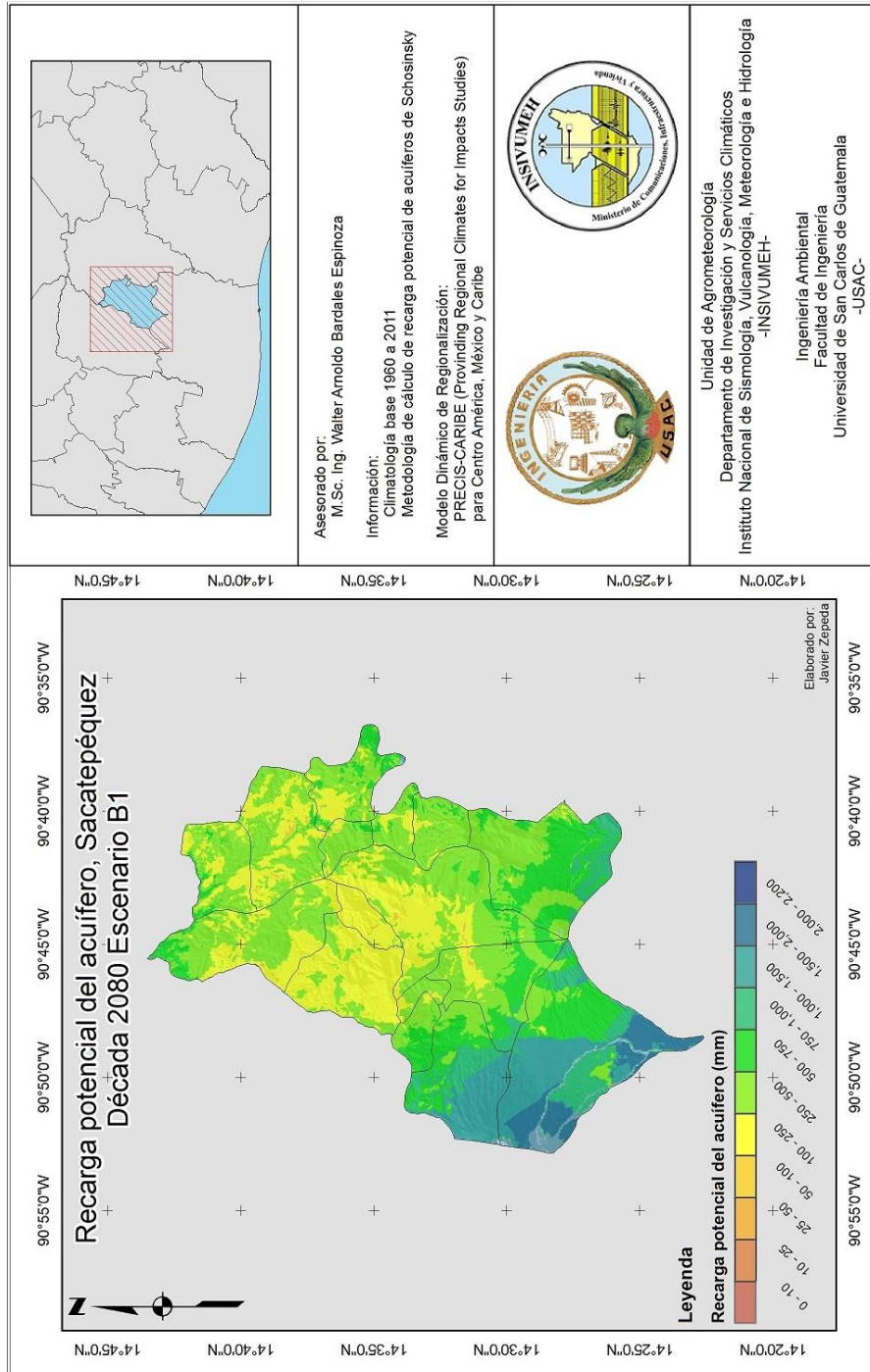
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 16. Recarga potencial de acuíferos, década 2070, escenario B1



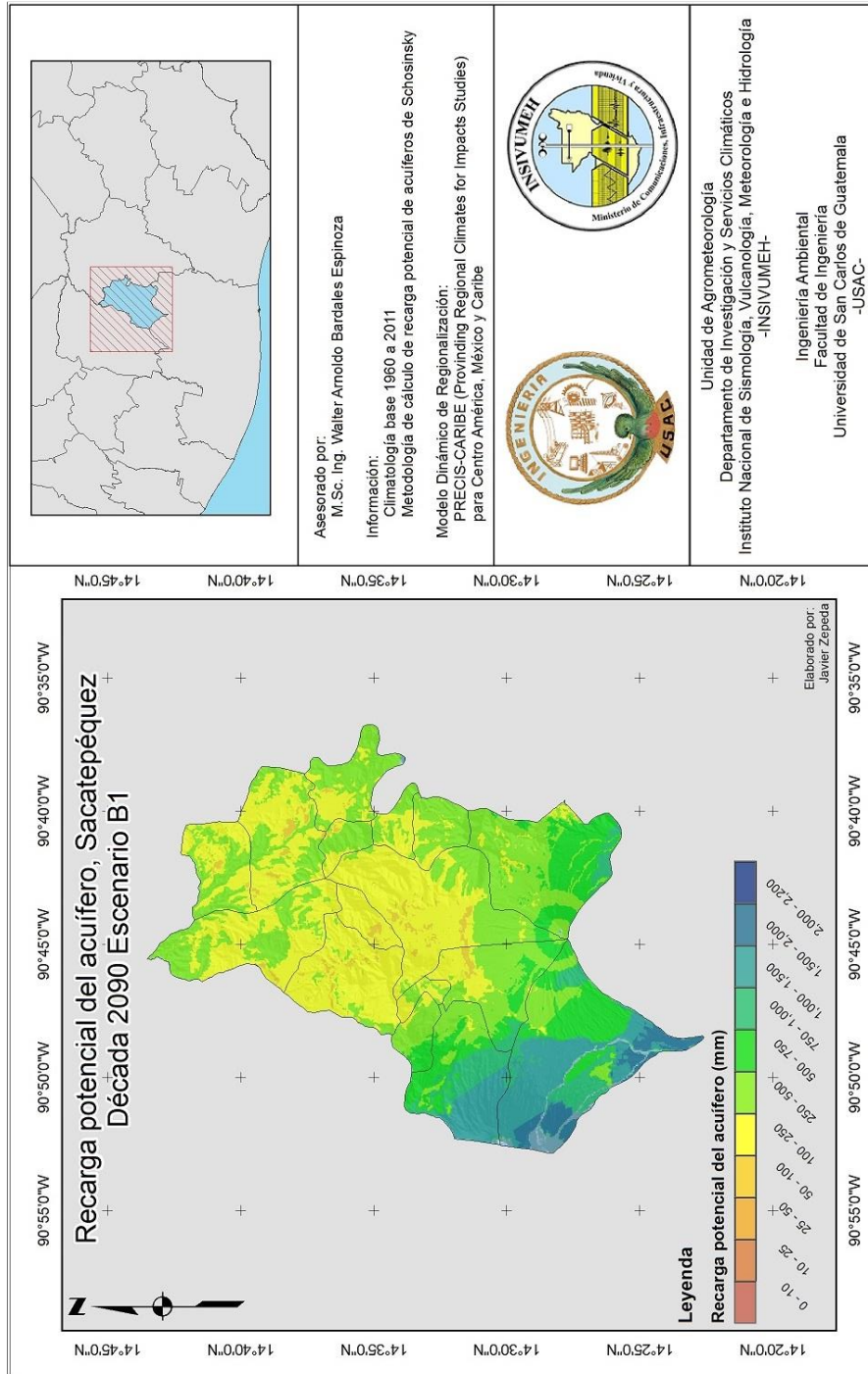
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 17. Recarga potencial de acuíferos, década 2080, escenario B1



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 18. Recarga potencial de acuíferos, década 2090, escenario B1



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

4.2. Resultados para el escenario A2

La tabla VI presenta los resultados para las distintas variables, calculadas bajo las condiciones del escenario socioeconómico A2, desde la década 2020 hasta la de 2090. En verde se muestran los datos preferentes, mientras que los que están en rojo se refieren a los casos más drásticos.

Tabla VI. Resultados para el escenario A2

Variable	Década							
	20	30	40	50	60	70	80	90
P (mm)	1 229,2	1 167,9	997,8	1 103,5	961,9	816,8	937,4	708,8
T máx (°C)	23,9	24,2	25,1	25,6	26,2	27,3	28,1	29,2
T med (°C)	17,9	18,1	18,9	19,4	19,7	20,5	21,1	22,0
T min (°C)	11,7	11,8	12,4	12,9	13,1	13,7	14,2	14,8
ESC (mm)	622,7	590,9	503,1	557,3	483,9	409,8	470,9	352,7
ETR (mm)	41,3	42,3	42,2	42,9	43,3	41,9	43,9	44,3
Pi (mm)	606,5	577,0	494,7	546,2	478,0	406,9	466,5	356,1
Rp (mm)	481,9	450,2	369,7	417,1	348,1	282,0	333,4	223,0

Fuente: elaboración propia.

La tabla VII presenta el análisis estadístico de los resultados de las variables de la tabla VI.

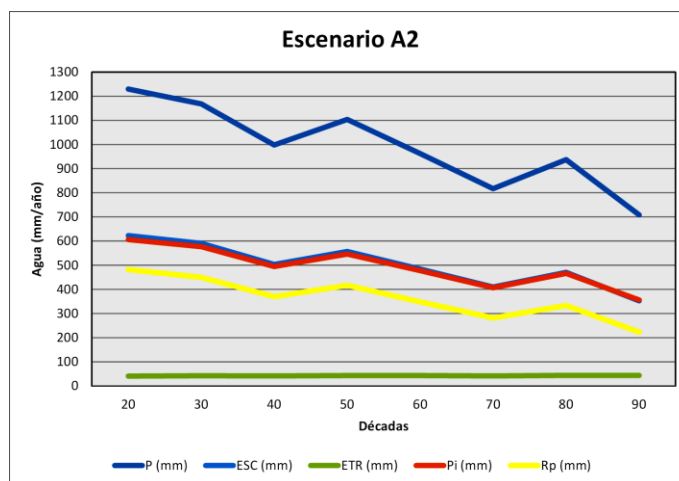
Tabla VII. **Análisis estadístico, escenario A2**

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
P (mm)	990,4	163,7	17 %
T máx (°C)	26,2	1,8	7 %
T med (°C)	19,7	1,3	7 %
T mín (°C)	13,1	1,0	8 %
ESC (mm)	498,9	84,8	17 %
ETR (mm)	42,8	1,0	2 %
Pi (mm)	491,5	78,9	16 %
Rp (mm)	363,2	80,6	22 %

Fuente: elaboración propia.

La figura 19 muestra los promedios de las variables del movimiento del agua a lo largo del horizonte temporal, desde la década de 2020 hasta la de 2090. La superior es la precipitación pluvial, las tres de en medio son la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos, mientras que la inferior es la evapotranspiración real.

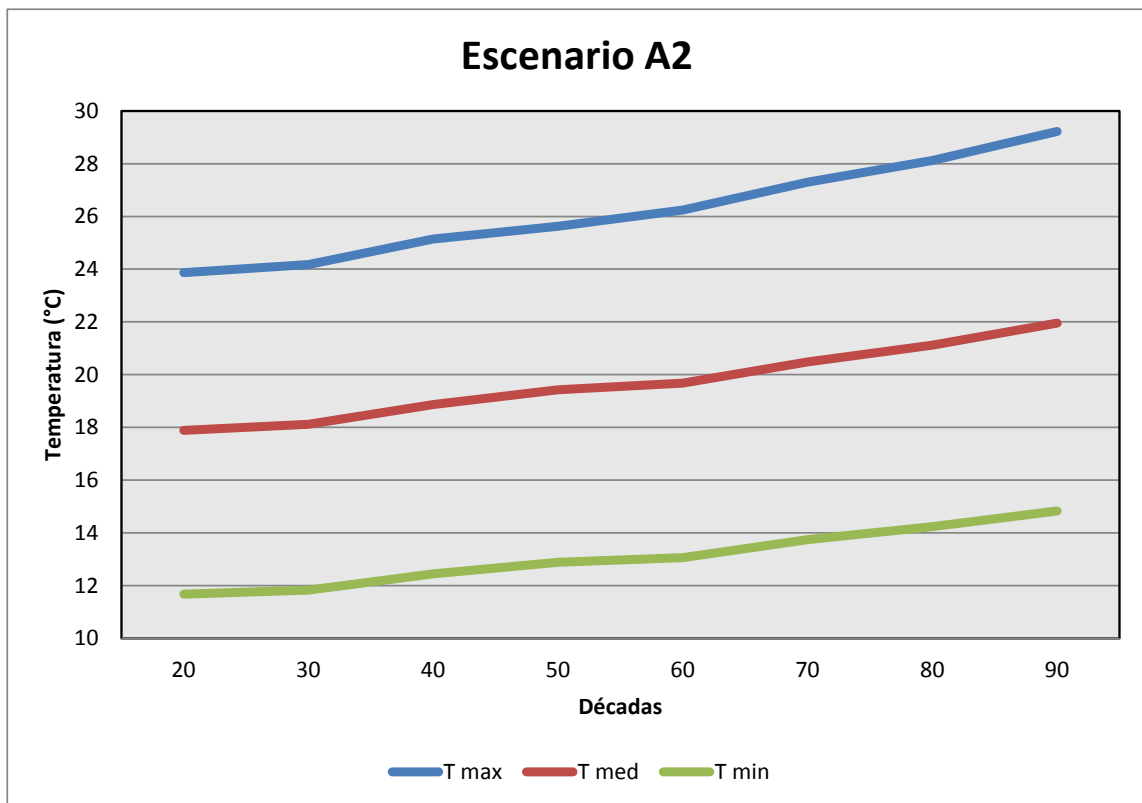
Figura 19. **Variables del movimiento del agua, escenario A2**



Fuente: elaboración propia.

La figura 20 presenta el cambio de las temperaturas a lo largo del intervalo estudiado, teniendo las tres una tendencia ascendente.

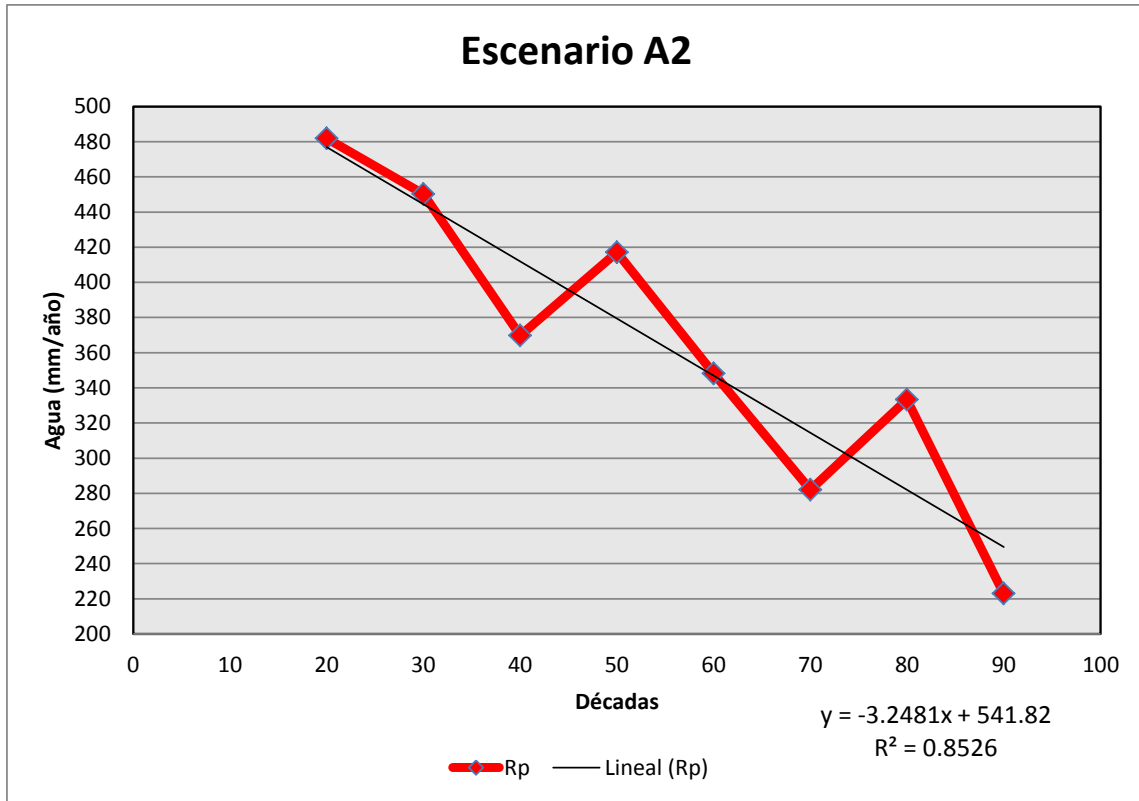
Figura 20. **Temperaturas, escenario A2**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 21 se presenta la gráfica de la recarga potencial del acuífero con su línea de tendencia y el coeficiente de determinación.

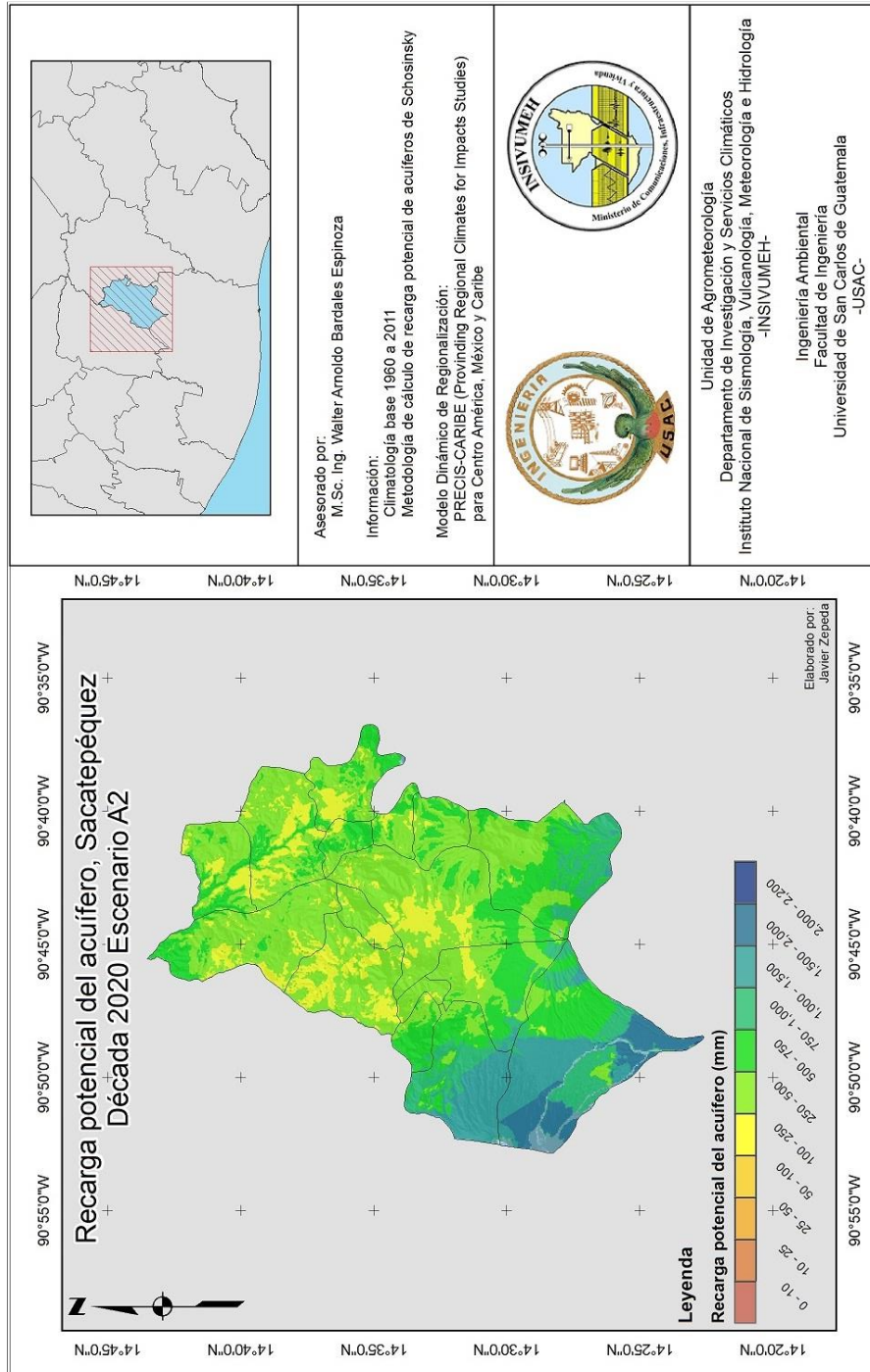
Figura 21. Recarga potencial del acuífero y línea de tendencia, escenario A2



Fuente: elaboración propia.

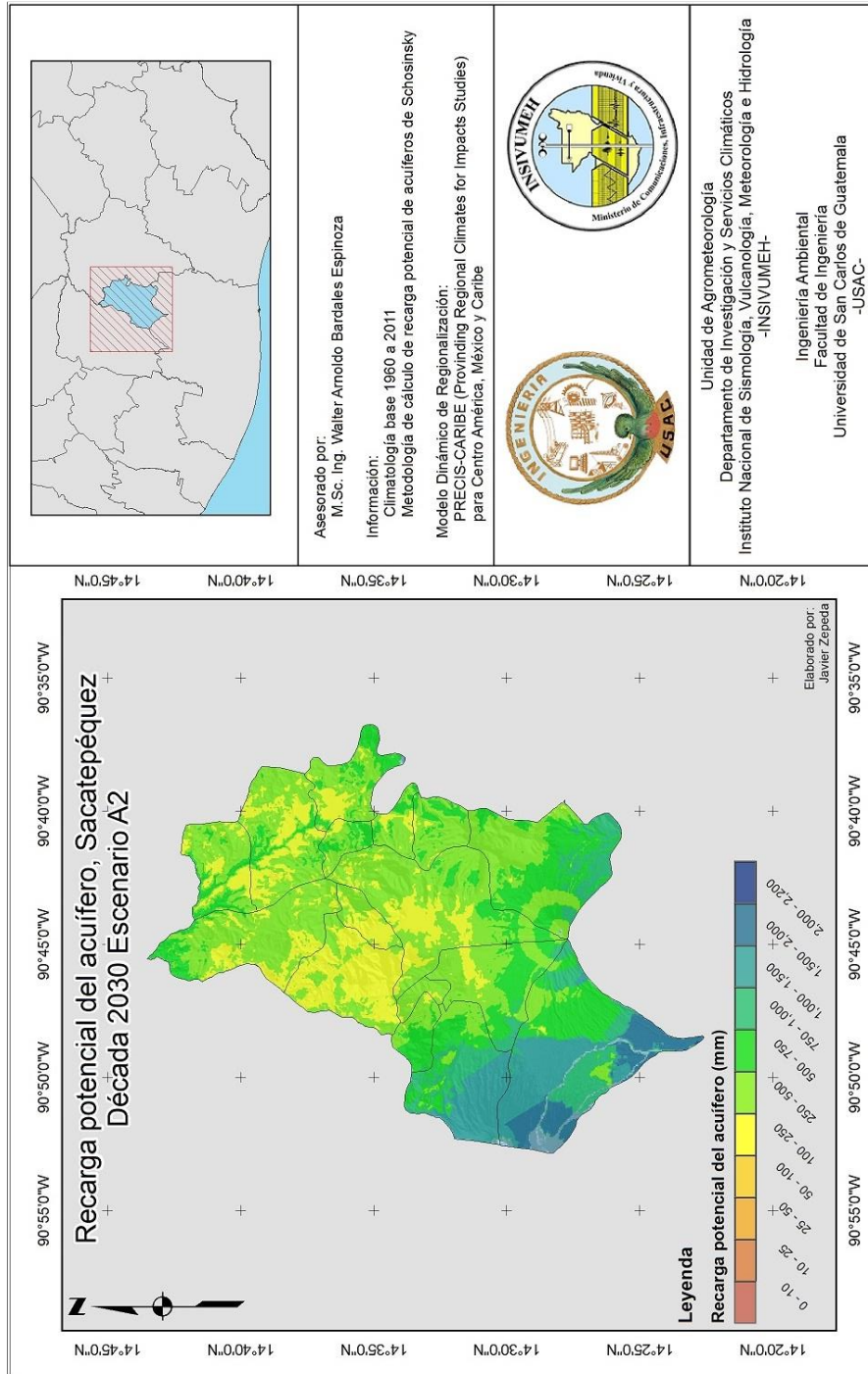
Las figuras de la 22 a la 29 presentan los mapas con los resultados de la recarga potencial de acuíferos, para las décadas de 2020 a 2090, con las condiciones socioeconómicas del escenario B1. La escala indica que los colores de rojo a amarillo son los de menor recarga, mientras que los azules son los que presentan mayor recarga.

Figura 22. Recarga potencial de acuíferos, década 2020, escenario A2



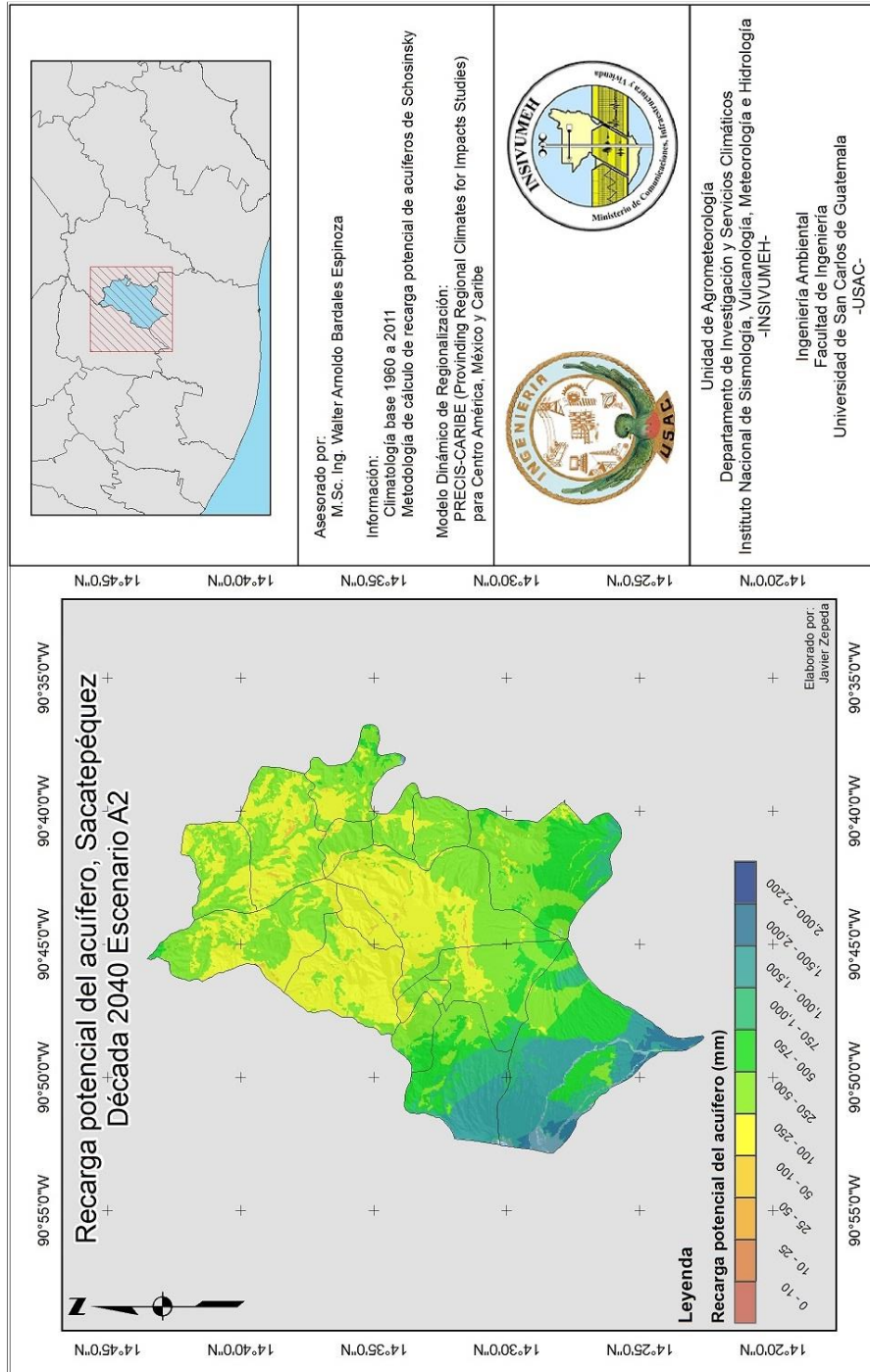
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 23. Recarga potencial de acuíferos, década 2030, escenario A2



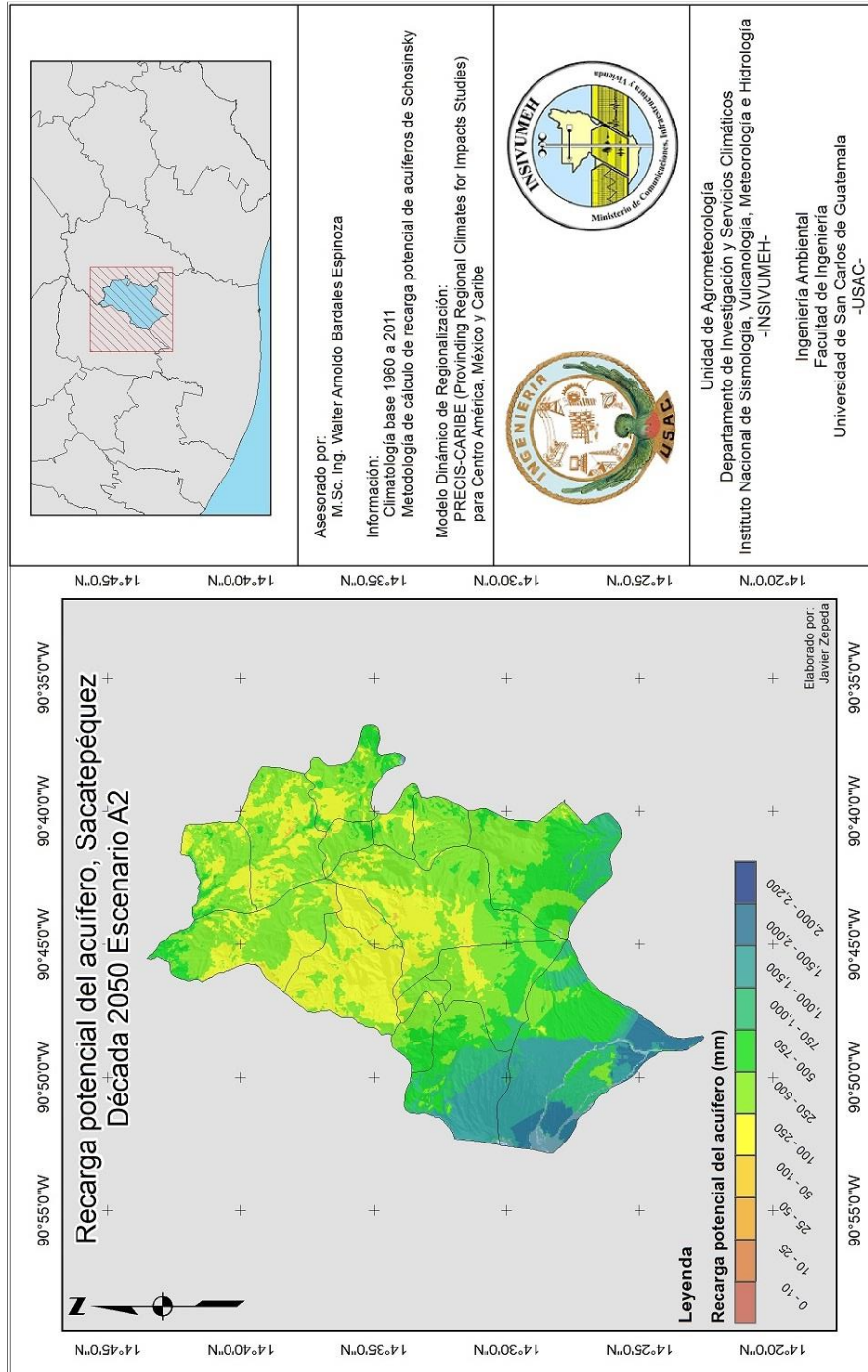
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 24. Recarga potencial de acuíferos, década 2040, escenario A2



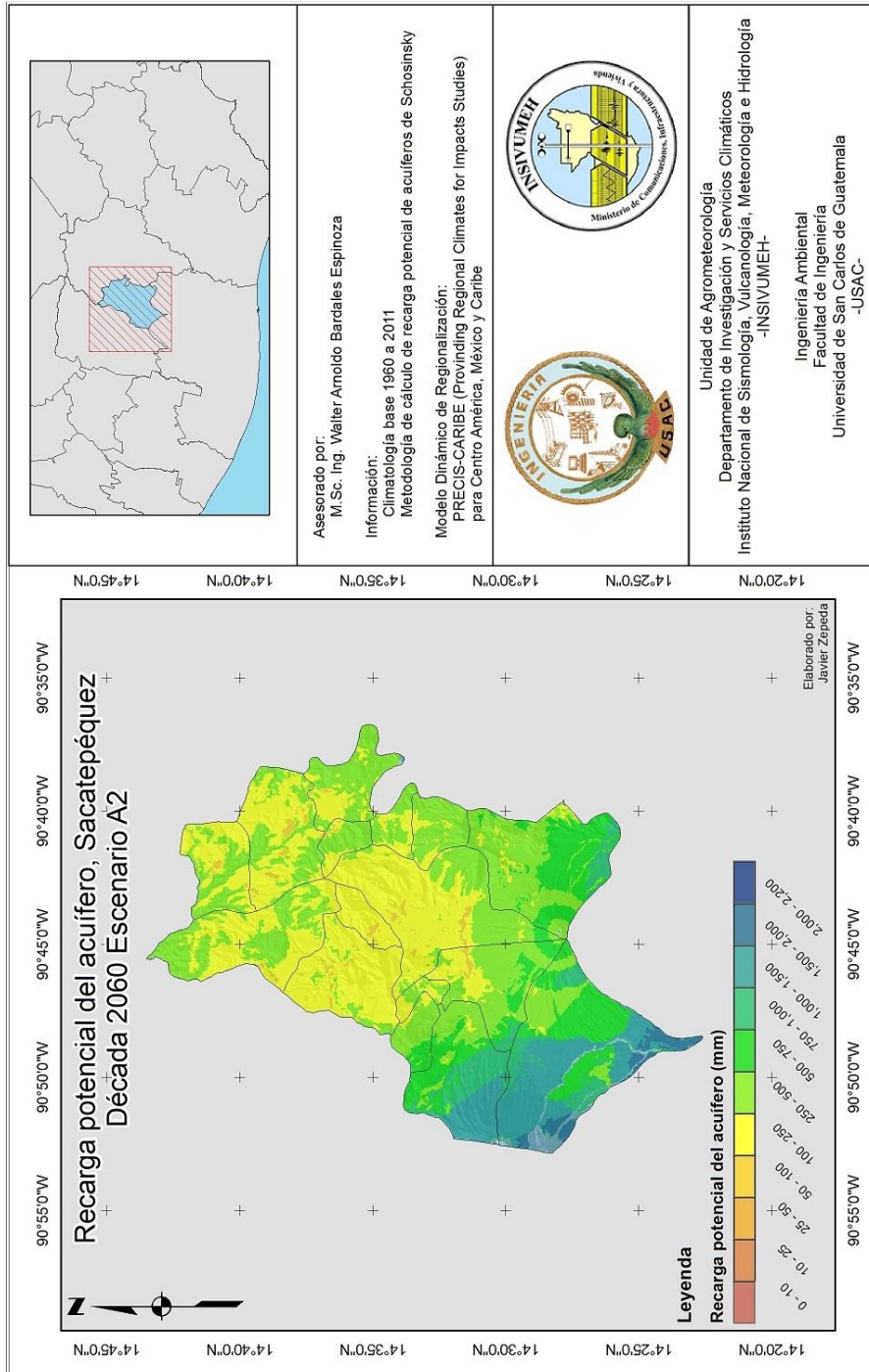
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 25. Recarga potencial de acuíferos, década 2050, escenario A2



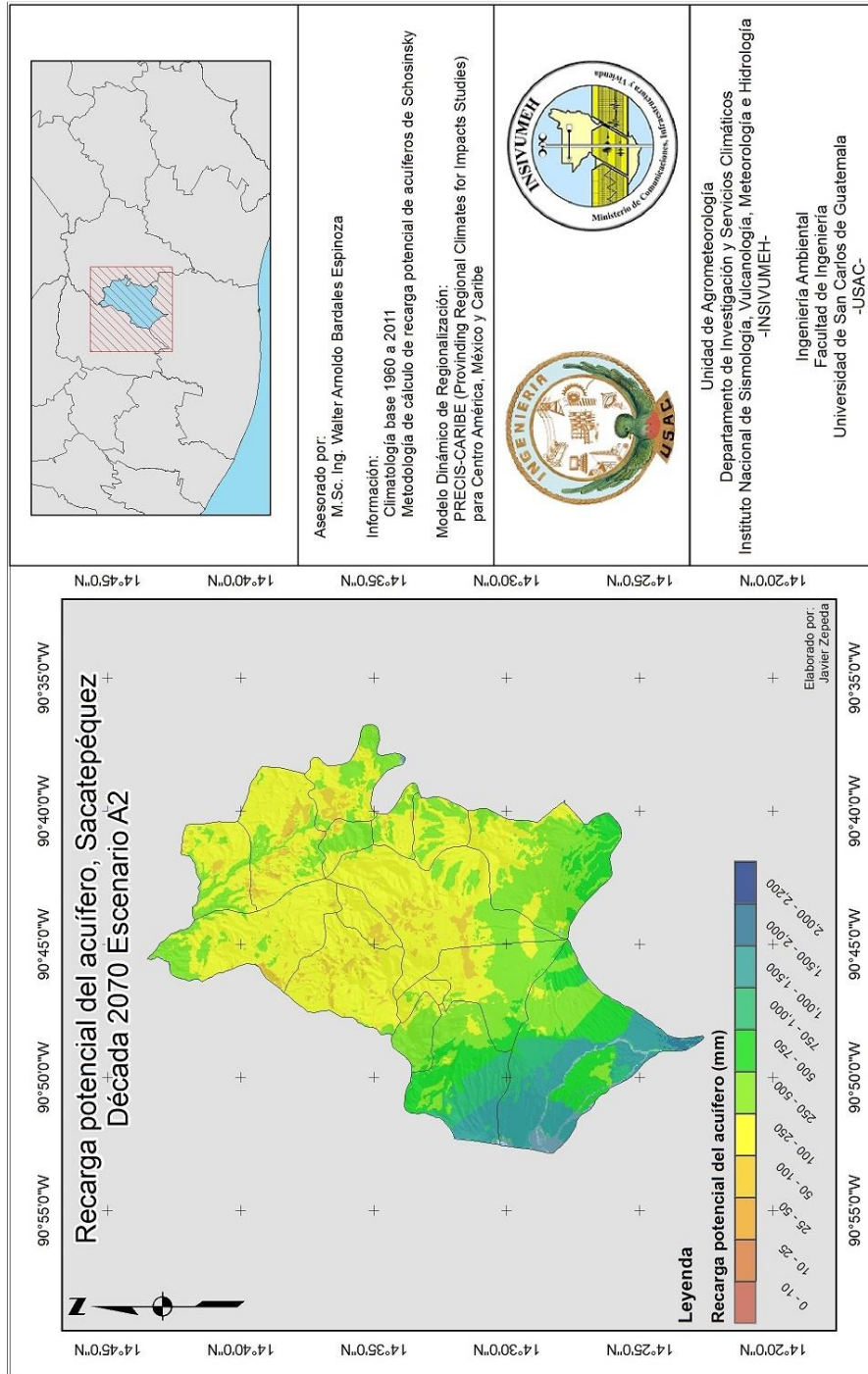
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 26. Recarga potencial de acuíferos, década 2060, escenario A2



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

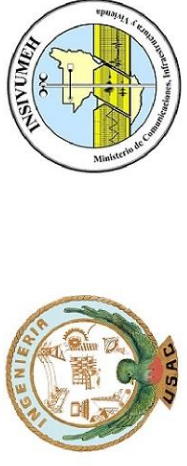
Figura 27. Recarga potencial de acuíferos, década 2070, escenario A2



Aesorado por:
M.Sc. Ing. Walter Arnaldo Barcales Espinoza

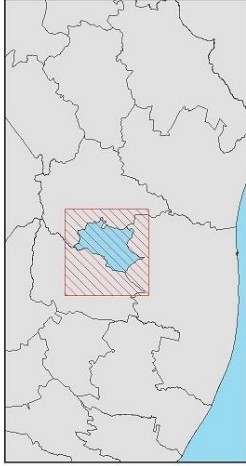
Información:
Climatología base 1960 a 2011
Metodología de cálculo de recarga potencial de acuíferos de Scholsinsky

Modelo Dinámico de Regionalización:
PRECIS-CARIBE (Providing Regional Climates for Impacts Studies)
para Centro América, México y Caribe



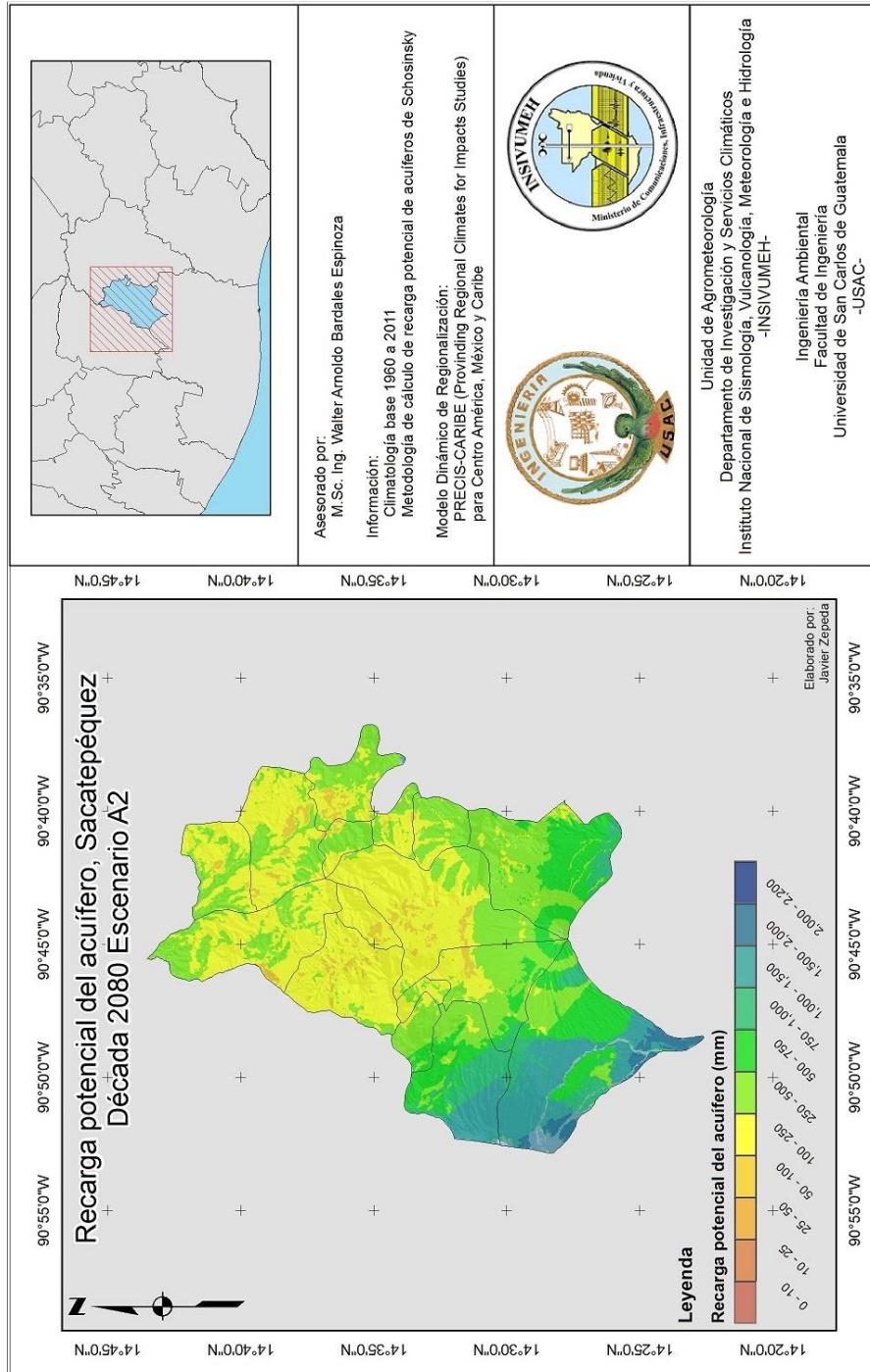
Unidad de Agrometeorología
Departamento de Investigación y Servicios Climáticos
Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
-INSVUMEH-

Ingeniería Ambiental
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
-USAC-



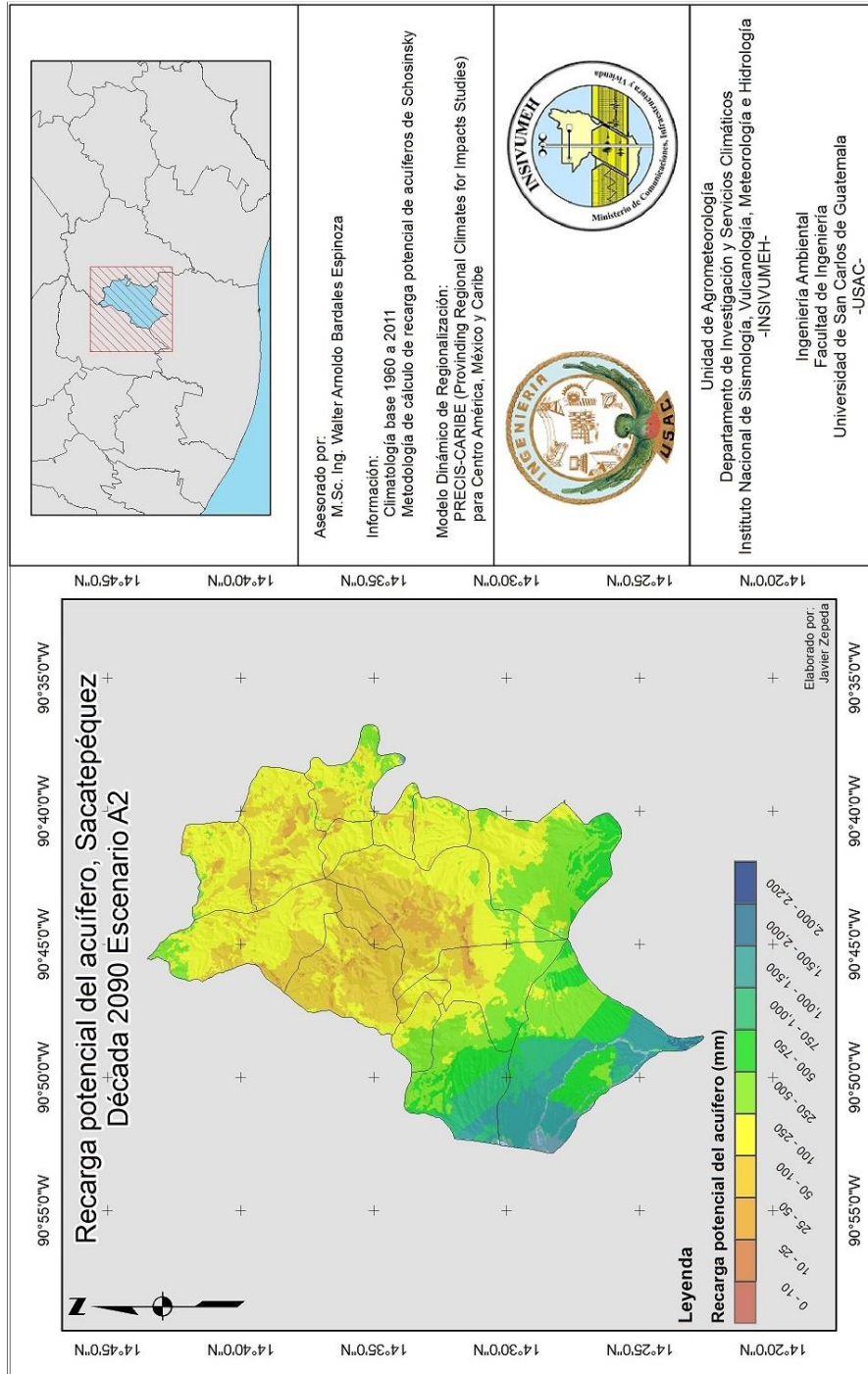
Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 28. Recarga potencial de acuíferos, década 2080, escenario A2



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

Figura 29. Recarga potencial de acuíferos, década 2090, escenario A2

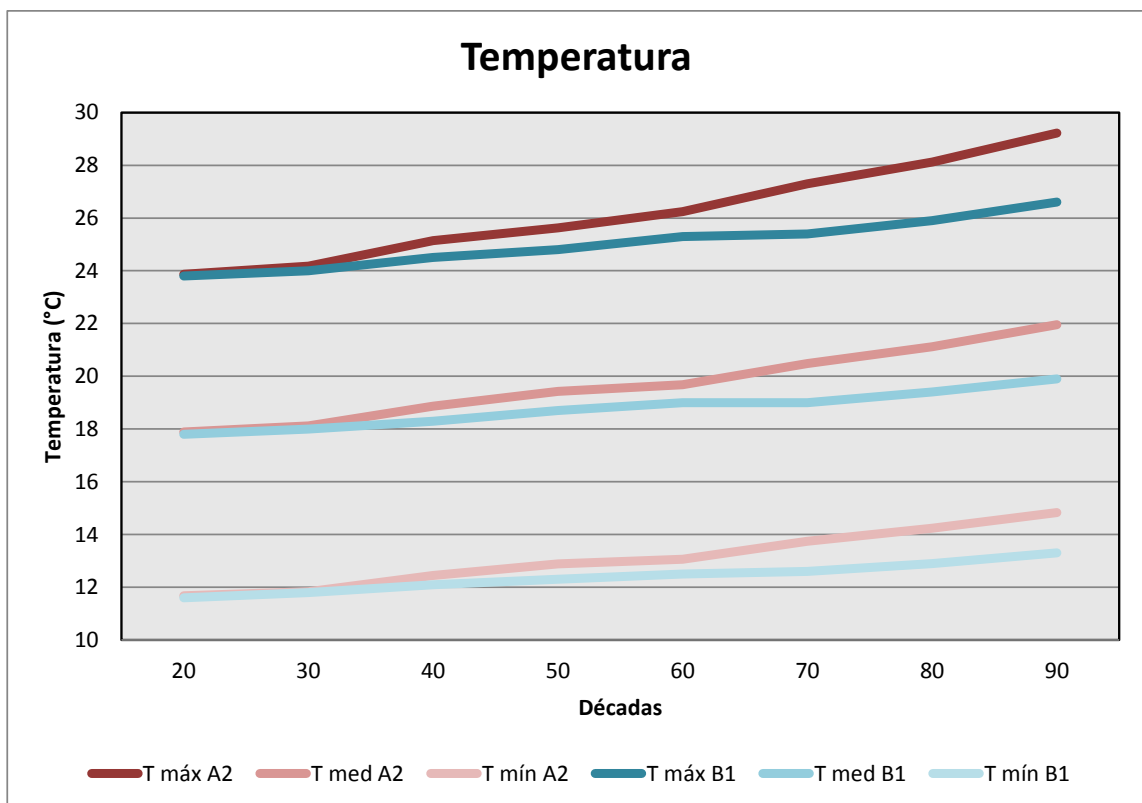


Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS.

4.3. Gráficas comparativas

La figura 30 muestra la comparación de las temperaturas máxima, media y mínima entre los dos escenarios, estos datos son los que se encuentran tabulados en las tablas IV y VI.

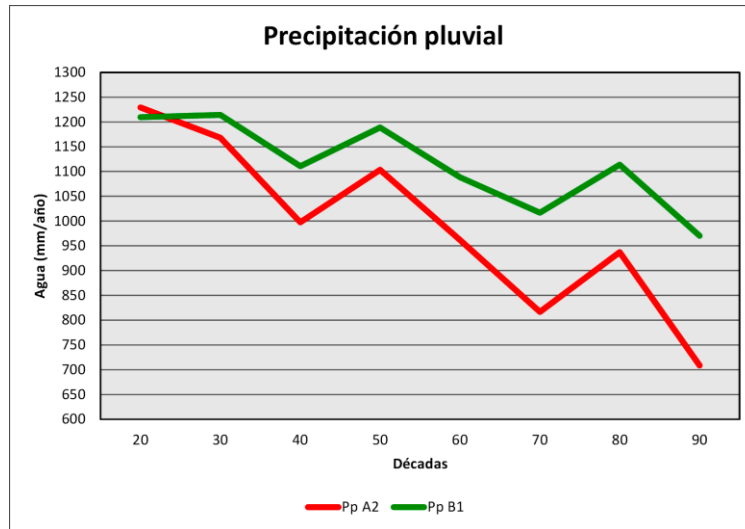
Figura 30. Comparación de temperaturas para ambos escenarios



Fuente: elaboración propia.

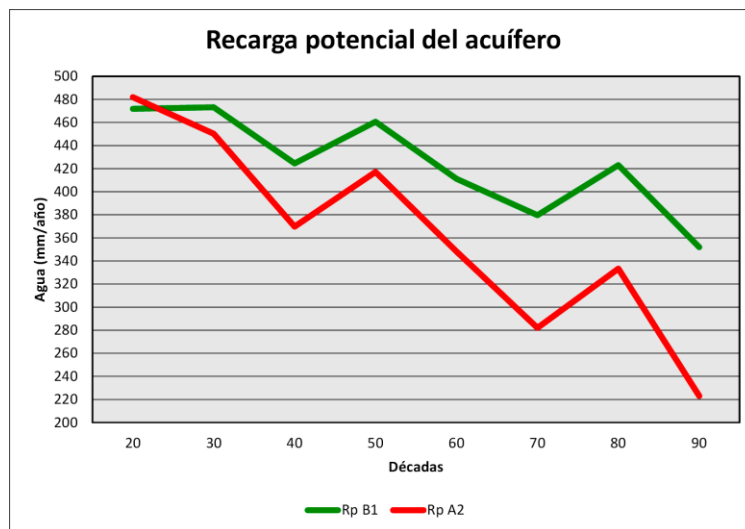
Las figuras 31 y 32 muestran los comportamientos de la precipitación pluvial y la recarga potencial de acuíferos para ambos escenarios, en el horizonte del tiempo estudiado.

Figura 31. **Comparación de precipitación pluvial para ambos escenarios**



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Comparación de recarga potencial del acuífero para ambos escenarios**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Escenario B1

La tabla IV presenta los resultados de las variables para el escenario B1 en las décadas 2020 y 2030, se obtienen los datos preferentes, mientras que en la última década, 2090 se obtienen los más drásticos. La condición para establecer qué datos son preferentes es la disponibilidad de agua. En la década de 2030 se espera una precipitación de 1 214,4 mm por año, la mayor cifra de esta variable para el intervalo estudiado, esto significaría una escorrentía de 614,3 mm por año, una infiltración de 600,1 mm por año y una recarga potencial de acuíferos de 473,1 mm por año. En la década de 2020 se esperan las temperaturas más bajas de las décadas analizadas, con una máxima de 23,8 °C, una media de 17,8 °C y una mínima de 11,6 °C; al ser las temperaturas más bajas del intervalo estudiado, también la evapotranspiración es menor, con 42,1 mm por año.

La década 2090 presenta los valores más drásticos, con una temperatura media de 19,9 °C, es decir, más de 2 °C respecto a la década de 2020. Esto influye en la precipitación, que es menor, con un estimado 970,4 mm por año, esto significa un déficit de 244 mm por año respecto a lo esperado para la década de 2030. La evapotranspiración real aumenta a 43,6 mm por año. Una menor cantidad de precipitación incide en menor cantidad de agua que escurre, infiltra y recarga a los acuíferos.

La figura 8 grafica las distintas variables de la dinámica del agua en el horizonte temporal estudiado. La tendencia de la precipitación, en general, es descendente, aunque se pueden observar picos en la gráfica que podrían deberse a variabilidad climática en esas décadas.

La tendencia de la precipitación afecta a la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos, que también presentan comportamiento descendente, con picos marcados en las mismas décadas que los que presenta la precipitación. Con esto se infiere que la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos son dependientes de la precipitación, además de la relación que existe entre el uso del suelo, la pendiente y textura del terreno con estas variables.

En la tabla V se puede observar el análisis estadístico para los resultados del escenario B1. Los coeficientes de variación para cada variable indican que los datos obtenidos no varían mucho respecto de la media, por ejemplo, para la recarga potencial de acuíferos es de 9,6 %, que es el mayor; este tipo de análisis podría inducir a la creencia que los cambios a lo largo del intervalo de tiempo estudiado no son muy marcados, sin embargo, en términos climatológicos, el aumento de la temperatura media en casi 2 °C produciría una mayor necesidad de consumo de agua, por parte de los ecosistemas y de los seres humanos. Esta mayor necesidad de agua resultaría en mayor presión sobre el recurso, que sería más escaso, pues de la década de 2020 a la de 2090, la precipitación disminuiría en más de 200 mm al año.

En la figura 9 se observa el incremento constante de la temperatura máxima, media y mínima a lo largo del tiempo. Este aumento de temperatura repercute en mayor requerimiento de agua por parte de las plantas y de los seres vivos en general.

La figura 10 presenta la dispersión de la recarga potencial de acuíferos, junto con la línea de tendencia que tiene una pendiente de -1,52, es decir, que cada año disminuiría en 1,52 mm la cantidad de agua que puede llegar a recargar los acuíferos del departamento. El coeficiente de determinación (0,72) indica que la ecuación se ajusta de forma aceptable a los datos de la dispersión.

Las figuras de la 11 a la 18 presentan los escenarios futuros de recarga potencial de acuíferos, usando las condiciones del escenario socioeconómico B1. Las áreas de mayor recarga son las cimas y laderas de los volcanes al sur y suroeste del departamento, esto se debe a que la textura del suelo en estas zonas es de tipo arenoso y franco arenoso (figura 6), y a que la cobertura vegetal es bosque en gran parte y cobertura de zacate (figura 7). Estos dos aspectos influyen en una mayor infiltración y, por tanto, una mayor recarga potencial de acuíferos.

Se puede observar que las áreas de zonas urbanas del mapa de cobertura vegetal (figura 7) coinciden con áreas que presentan menor recarga de acuíferos. En las áreas con pendientes planas (azules a celeste en la figura 5) se esperaría mayor infiltración y, por ende, mayor recarga, pero no ocurre así debido, principalmente, a que el uso del suelo son zonas urbanas y terrenos cultivados (figura 7).

Para la década de 2090 se espera una ampliación de las áreas con poca recarga potencial de acuíferos en la parte central del departamento, respecto a lo esperado para la década de 2020. Las cimas y laderas volcánicas presentan una disminución de la recarga, pero en menor medida.

Se debe mencionar que en este estudio no se contemplan los cambios de uso del suelo. La ampliación de zonas urbanas y terrenos cultivados ampliarían las áreas con menor recarga potencial de acuíferos, esto, aunado a la disminución de la precipitación, deriva en el incremento de la presión sobre los recursos hídricos del departamento.

5.2. Escenario A2

En la tabla VI se observan los resultados de las variables para el escenario A2, los datos preferentes se encuentran en la década 2020 (marcados en verde), mientras que en la década de 2090 se obtienen los más drásticos. Para la década de 2020 se espera una precipitación de 1 229,2 mm por año, con esta precipitación se generaría 622,7 mm por año de esorrentía y 606,5 mm por año de infiltración, de esta última se espera que 481,9 mm por año sean de recarga potencial de acuíferos. Las temperaturas son menores en la década de 2020, siendo la máxima de 23,9 °C, la media de 17,9 °C y la mínima de 11,7 °C, esto influye en una menor evapotranspiración, que para esta década se estima en 41,3 mm por año.

En la década 2090 se obtienen los valores más drásticos. La temperatura media se estima en 22,0 °C, es decir, más de 4 °C respecto a la de la década de 2020. Este cambio tan drástico de la temperatura influye en la precipitación que disminuye a 708,8 mm por año, esto es 500 mm por año menos que lo esperado en la década de 2020. El aumento de la temperatura repercute en un aumento de la evapotranspiración real, que para la década de 2090 sería de 44,3 mm por año. La disminución de la precipitación incide en menor esorrentía, con 352,7 mm por año, menor infiltración, con 356,1 mm por año y menor recarga a los acuíferos, con 223,0 mm por año.

En la figura 19 se presenta la gráfica de las distintas variables de la dinámica del agua entre las décadas de 2020 y 2090. La tendencia de la precipitación, en general, es descendente, aunque, al igual que como ocurre en el escenario B1 (sección 5.1) se pueden observar picos en la gráfica, estos pueden corresponder a variabilidad climática en esas décadas.

La tendencia descendente de la precipitación influye en la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos, que presentan una tendencia similar, con picos marcados en las mismas décadas en las que los presenta la precipitación. Con esto se infiere que la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos son dependientes de la precipitación, además de la relación de la cobertura y textura del suelo con estas variables.

La tabla VII presenta el análisis estadístico para los resultados del escenario A2. Se puede observar que, para las temperaturas y la evapotranspiración real, los coeficientes de variación indican una pequeña variación de los datos respecto de la media. Para la precipitación, la escorrentía, la infiltración y la recarga potencial de acuíferos, los coeficientes de variación no son aceptables, pues marcan una gran variación de los datos en relación con su media, entre de 16 %, para la infiltración y 22 % para la recarga potencial de acuíferos. Los resultados de este análisis advierten que los cambios esperados en la precipitación y las variables que de ella dependen, según las condiciones del escenario A2 son más considerables que los esperados con las condiciones del escenario B1.

El aumento de la temperatura media en 4 °C podría producir extinciones y migraciones de especies, así como el incremento de la necesidad de consumo de agua, por parte de los ecosistemas que aún existan y de los seres humanos, incrementando la presión sobre los recursos hídricos del departamento. A esto se añade la disminución de la precipitación en 500 mm al año.

En la figura 20 se muestra el incremento constante que se espera de la temperatura máxima, media y mínima, desde la década de 2020 a la de 2090. Como ya se mencionó, el incremento de la temperatura puede ocasionar la migración de especies hacia otros puntos con condiciones en las que puedan desarrollarse de mejor forma e incluso puede ocasionar la extinción de otras especies que no puedan adaptarse al cambio y sean incapaces de migrar a otros sitios. De forma sencilla, el aumento de temperatura deriva en el aumento de los requerimientos de agua por parte de los ecosistemas y de los seres humanos, tanto para consumo como para realizar actividades agrícolas, que son la principal fuente de ingresos económicos del departamento de Sacatepéquez.

En la gráfica de la figura 21 se presenta la dispersión de la recarga potencial de acuíferos, junto con la línea de tendencia, que tiene una pendiente de -3,25. Esta pendiente indica que cada año disminuiría en 3,25 mm la cantidad de agua que puede llegar a recargar los acuíferos del departamento. El coeficiente de determinación (0,85) indica que la ecuación se ajusta bastante bien a los datos de la dispersión.

Las figuras de la 22 a la 29 presentan los escenarios futuros de recarga potencial de acuíferos, usando las condiciones del escenario socioeconómico A2. Al igual que en el escenario B1, las áreas de mayor recarga son las cimas y laderas de los volcanes al sur y suroeste del departamento, esto es debido a la

textura del suelo que es de tipo arenoso y franco arenoso (figura 6), y a la cobertura vegetal que, en estas áreas es bosque en gran parte y cobertura de zacate (figura 7). Estos dos aspectos influyen en una mayor infiltración y, por tanto, una mayor recarga potencial de acuíferos.

En esta serie de mapas se observa de forma evidente la disminución de la recarga potencial de acuíferos, no solo en la parte central y norte del departamento, sino también en la parte de los volcanes, donde en la década de 2020 existen zonas de recarga mayores a los 2 000 mm por año y disminuye hasta recargas entre los 1 500 y los 2 000 mm por año en la década de 2090. Sin embargo, en las áreas planas (según figura 5), con uso de la tierra tipo urbano o terrenos cultivados (según figura 7) es donde se observan los cambios de forma más clara. Para la década de 2090 las áreas con poca recarga potencial de acuíferos afectarán la parte central, norte, noroeste y noreste del departamento.

Es necesario hacer mención que, para realizar este estudio, el uso del suelo y la población se mantienen constantes. Esto repercute, como ya se ha explicado, en que con la ampliación de zonas urbanas y terrenos cultivados se incrementarían las áreas con poca recarga potencial de acuíferos. Incidiendo en el incremento de la presión sobre los recursos hídricos del departamento, ya vulnerables por el incremento de las temperaturas y la disminución de la precipitación.

5.3. Interpretación de las gráficas comparativas

La figura 30 presenta la comparación de la temperatura futura máxima, media y mínima de ambos escenarios. Al utilizar el escenario con menores y el de mayores emisiones, puede esperarse que las temperaturas futuras estén

dentro de los rangos delimitados por cada pareja de líneas. Las diferencias entre los dos escenarios son más evidentes en la última década, mientras que en la década de 2020 tienen valores casi iguales.

En la gráfica de la figura 31 se hace una comparación de la precipitación futura de los escenarios A2 y B1, en rojo y verde, respectivamente. En la década de 2020, los resultados son casi iguales, pero conforme se avanza en el horizonte temporal las gráficas se van distanciando, pero siguiendo ambas una tendencia descendente con picos en las mismas décadas. Estos picos pueden estar determinados por una variabilidad climática que ocurra en esas décadas. En la década de 2090, la precipitación del escenario A2 es aproximadamente 250 mm por año menor que la precipitación del escenario B1 para la misma década.

Siguiendo con lo anterior, en la figura 32 se hace la comparación de la recarga potencial de acuíferos futura de los escenarios A2 y B1, en rojo y verde, respectivamente. Al igual que en la precipitación, los resultados en la década de 2020 son casi iguales, pero al avanzar en el horizonte temporal las gráficas se van distanciando. Estas gráficas, también incluyen los picos en las mismas décadas que la precipitación, pues son variables dependientes de esta. En la década de 2090 la recarga potencial de acuíferos para el escenario A2 es 130 mm por año menor que la recarga potencial de acuíferos para el escenario B1 en la misma década.

CONCLUSIONES

1. Para el escenario B1, en la década de 2020 se espera una precipitación de 1 209,5 mm por año, y en la década de 2090 una de 970,4 mm por año; mientras que, para el escenario A2, en la década de 2020 se espera una precipitación de 1 229,2 mm por año y en la década de 2090 una de 708,8 mm por año.
2. Para la década de 2020 se espera una temperatura máxima de 23,9 °C, para el escenario A2, y de 23,8 °C, para el escenario B1; para la década 2090 aumentaría a 29,2 °C, para el escenario A2, y a 26,6 °C, para el escenario B1.
3. La temperatura media según el escenario B1, para la década de 2020 se espera en 17,8 °C y para la década de 2090 en 19,9 °C; para el escenario A2 en la década 2020 se espera en 17,9 °C y para la década de 2090 en 22,0 °C.
4. La temperatura mínima para el escenario B1 se estima en 11,6° C y 13,3 °C para las décadas 2020 y 2090, respectivamente; y, para el escenario A2 se estima en 11,7 °C para la década 2020, y 14,8 °C para la década 2090.

5. La evapotranspiración real futura es dependiente de la temperatura, por lo que aumentará hacia el futuro de 42,1 mm por año en la década de 2020 a 43,6 mm por año en la década de 2090, para el escenario B1; y para el escenario A2 aumentará de 41,3 mm por año en la década 2020 a 44,3 mm por año en la década de 2090.
6. La escorrentía para ambos escenarios tiene tendencia descendente, para el A2 en la década de 2020 se estima en 622,7 mm por año y en la década 2090 en 352,7 mm por año, mientras que para el B1 década 2020 se estima en 612,0 mm por año y 2090 en 487,5 mm por año.
7. La infiltración futura se estima en 597,5 mm por año para la década de 2020 y para la de 2090 en 482,9 mm por año, para el escenario B1; mientras que para el escenario A2, se espera 606,5 mm por año para la década de 2020 y 356,1 mm por año para la de 2090.
8. La recarga potencial de acuíferos del departamento de Sacatepéquez, para el escenario B1, tiene una tendencia descendente con 471,8 mm por año que llegan a los acuíferos en la década de 2020, y con 352,0 mm por año para la década de 2090.
9. Para el escenario A2, la recarga potencial de acuíferos del departamento de Sacatepéquez presenta una tendencia descendente, más pronunciada que la del B1; para la década de 2020 se espera que 481,9 mm por año recarguen los acuíferos, y para 2090 se espera que esta recarga haya descendido a 223,0 mm por año.

10. El déficit de recarga potencial de acuíferos entre la década de 2020 y la de 2090 es de 120 mm por año aproximadamente, para el escenario B1; para el escenario A2 se espera que este déficit sea de 260 mm por año, aproximadamente.
11. Los escenarios futuros de recarga potencial de acuíferos, para ambos escenarios socioeconómicos, presentan como áreas de mayor recarga las cimas y laderas volcánicas, al sur y suroeste del departamento.
12. Las zonas con menor recarga potencial de acuíferos son las que tienen uso de suelo tipo urbano y terrenos cultivados, aunque estos se encuentren en zonas de pendientes planas.
13. Para el escenario B1 se espera un incremento de las zonas con poca recarga potencial de acuíferos en la parte central del departamento, mientras que para el escenario A2 el incremento de zonas con poca recarga potencial de acuíferos se extiende de la parte central hacia el norte, el este y el oeste del departamento.
14. Las áreas con textura del suelo de tipo arenoso y franco arenoso, y las que tienen cobertura boscosa, presentan una mayor infiltración y una mayor recarga potencial de acuíferos, no importando que se encuentren en zonas con pendientes pronunciadas.

RECOMENDACIONES

Mitigación

1. Realizar e implementar planes de ordenamiento territorial para establecer el crecimiento organizado de las zonas urbanas, impulsar formas de agricultura amigables con el ambiente y crear áreas de reforestación y reservas forestales, con lo cual se protegerán las áreas de recarga hídrica.
2. Capacitar a la población para el uso adecuado de los recursos hídricos, con el fin de mitigar la contaminación de los cuerpos de agua y aumentar las posibilidades de conservación del recurso.

Adaptación

3. Desarrollar estudios enfocados en la dimensión humana de los impactos del cambio climático, con el fin de elaborar políticas y enfocar acciones para disminuir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de adaptación y manejo del recurso hídrico por parte de las comunidades.
4. Elaborar un plan de manejo del recurso hídrico dentro del departamento de Sacatepéquez, integrando a todos los sectores de la sociedad, con el fin de establecer acciones concretas hacia la adaptación a los efectos del cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

1. BROUWER, C; HEIBLOEM, M. *Irrigation water management: Irrigation water needs [Gestión de agua para irrigación: necesidades de agua para irrigación]* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 1986. [en línea]. <<http://www.fao.org/docrep/S2022E/S2022E00.htm>>. [Consulta: junio de 2014].
2. CAMPOS ARANDA, Daniel Francisco. *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1998. ISBN: 968-6194-44-4.
3. CEBALLOS BARBANCHO, Antonio. *El calentamiento actual de la tierra: el problema y su contexto*. Salamanca: Universidad de Salamanca, 2008. 416 p. Compendio: energías y cambio climático. ISBN: 978-84-7800-333-4.
4. Consejo de Desarrollo Departamental de Sacatepéquez. *Plan de desarrollo departamental de Sacatepéquez* Segeplan, Guatemala, 2010. 111 p.
5. Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. *Manual sobre evaluaciones de vulnerabilidad y adaptación* [en línea]. <http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/v_and_a/Spanish/index.html>. [Consulta: junio de 2014].

6. CÓRDOVA ZAMORA, Manuel. *Estadística, descriptiva e inferencial. Aplicaciones*. 5a ed. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2003. 500 p. ISBN: 9972-813-05-3.
7. GARCÍA, María Claudia et al. Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*. 2012, núm. 36. 105 p.
8. Grupo de Trabajo de Asesoramiento en Escenarios de Impactos del Clima. *General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment [Directrices generales sobre el uso de datos de escenarios para impactos climáticos y asesoramiento en adaptación]*. Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2007. 66 p. Versión 2.
9. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. *El cambio climático y el agua*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2008. 224 p. ISBN: 978-92-9169-323-8.
10. _____. *Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2000. Resumen para responsables de políticas. 20 p. ISBN: 92-9169-413-4.

11. MADEREY RASCÓN, Laura Elena. *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. Jiménez, Arturo (col.) México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 2005. 105 p. Serie Geografía para el siglo XXI. ISBN: 970-32-2965-4.
12. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *Estudio semidetallado de los suelos del Departamento de Sacatepéquez, Guatemala*. Guatemala: Don Quijote, 2013. 678 p. ISBN: 978-9929-637-02-3. Convenio de Cooperación Nro. 43-2006 MAGA – Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-.
13. Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS*. United Kingdom: Met Office Hadley Centre, 2003. 32 p.
14. Instituto de Enseñanza Secundaria Felo Monzón Grau Bassas. *Recursos hídricos España*. [en línea]. <http://biologiaygeologia.org/unidadbio/a_ctma/u2_hidrosfera/u2_t2contenido/1_recursos_hdricos.html>. [Consulta: junio de 2014].
15. Instituto de Hidrología de España. *Métodos de cálculo del balance hídrico*. Sokolov, A. & Chapman, T. (editores); Heras, Rafael (versión española). España: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 1981. 182 p. ISBN: 92-3-301227-1.

16. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Política nacional de cambio climático*. Guatemala: 2009. 23 p.
17. _____. *Primera Comunicación Nacional Sobre Cambio Climático*. Guatemala: 2001. 110 p.
18. Organización Meteorológica Mundial. *Glosario hidrológico internacional*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2012. 461 p. ISBN: 978-92-3-001154-3.
19. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability [Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad]*. Reino Unido: El sindicato de Prensa de la Universidad de Cambridge, 2001. 1032 p. ISBN: 0-521-80768-9.
20. RUIZ MURCIA, José Franklyn. *Escenarios de cambio climático, algunos modelos y resultados de lluvia para Colombia bajo el escenario A1B*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2007. 55 p.
21. SCHOSINSKY, Gunther; LOSILLA, Marcelino. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. [*Revista Geológica de América Central*, No. 23] Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, 1999: 115 p.

22. SCHOSINSKY, Gunther. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. [*Revista Geológica de América Central*, No. 34-35] Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, 2006: 300 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos

Carrera

Ingeniería Química
Ingeniería Ambiental

Campos del conocimiento científico y tecnológico

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 1. Ciencias naturales y exactas | 4. Ciencias de la salud |
| 2. Ingeniería y tecnología | 5. Ciencias agropecuarias |
| 3. Ciencias sociales | 6. Humanidades |

Disciplinas

Ciencias naturales y exactas

- | | |
|----------------------|---|
| 1. Matemáticas | 5. Ciencias biológicas |
| 2. Ciencias físicas | 6. Ciencias de la Tierra,
relacionadas con el ambiente |
| 3. Estadística | 7. Informática |
| 4. Ciencias químicas | |

Ingeniería y tecnología

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| 8. Físicoquímica | 10. Ingeniería aplicada y diseño |
| 9. Operaciones unitarias | |

Ciencias sociales

- | | |
|----------------|----------------|
| 11. Economía | 13. Sociología |
| 12. Psicología | 14. Derecho |

Continuación del apéndice 1.

Humanidades

15. Lengua y literatura
16. Historia
17. Filosofía

18. Arte
19. Deporte

Subdisciplinas

Informática

Sistemas de información

Ciencias de la Tierra relacionadas con el ambiente

Climatología

Meteorología

Geología

Edafología

Hidrología

Estadística

Estadística analítica

Análisis de datos

Medidas de tendencia central

Ingeniería aplicada y diseño

Diseño de escenarios de cambio climático

Derecho

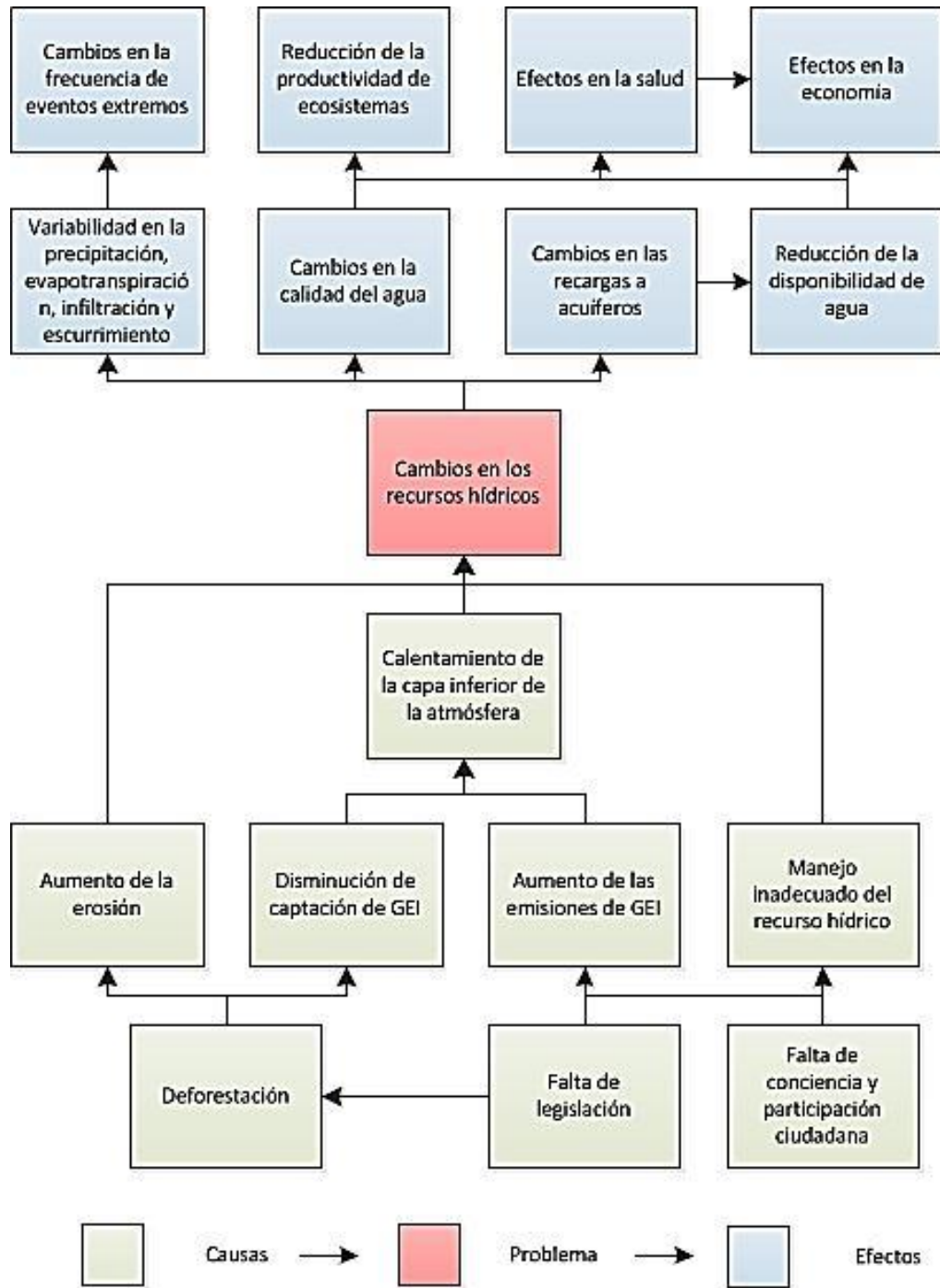
Legislación

Historia

Registros históricos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de causas y efectos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Conferencias de las partes de la convención marco de Naciones Unidas sobre cambio climático**

COP	LUGAR	AÑO	TEMAS TRATADOS
I	Berlín	1995	Idoneidad de los países a cumplir los compromisos
II	Ginebra	1996	Aceptación de descubrimientos sobre cambio climático
III	Kioto	1997	Protocolo de Kioto para control de gases de efecto invernadero
IV	Buenos Aires	1998	Plan de acción para avanzar en esfuerzos y definir mecanismos para implementar el protocolo de Kioto
V	Bonn	1999	Reunión técnica
VI	La Haya, Bonn	2000, 2001	Mecanismos flexibles, sumidero de carbono, cumplimiento, financiamiento
VII	Marrakech	2001	Reglas operacionales, régimen de cumplimiento, procedimientos de contabilidad
VIII	Nueva Delhi	2002	Transferencia de tecnología y minimizar impactos del cambio climático en países en desarrollo
IX	Milán	2003	Uso del fondo para la adaptación, para apoyo a países en desarrollo
X	Buenos Aires	2004	Plan de acción Buenos Aires para promover la adaptación en países en desarrollo
XI	Montreal	2005	Plan de acción Montreal: extensión del protocolo de Kioto más allá de 2012, negociación para más reducciones de GEI
XII	Nairobi	2006	Apoyo a adaptación en países en desarrollo, mejorar proyectos de los mecanismos de desarrollo limpio
XIII	Bali	2007	Plan de acción Bali: línea de tiempo y negociación estructurada sobre el marco post-2012
XIV	Poznan	2008	Financiamiento a países pobres, mecanismo de protección de bosques. Negociaciones centradas en el sucesor del Protocolo de Kioto
XV	Copenhague	2009	Compromiso de países desarrollados a nuevos y adicionales recursos, en especial forestación e inversión en instituciones internacionales
XVI	Cancún	2010	Un fondo de clima verde y un centro de tecnología climática
XVII	Durban	2011	Acuerdo jurídicamente vinculante comprometiendo a todos los países. Progreso en la creación del Fondo de clima verde
XVIII	Catar	2012	La puerta climática de Doha: enmienda al protocolo de Kioto y se contempla un mecanismo de pérdidas y daños
XIX	Varsovia	2013	Disminución de emisiones por parte de países desarrollados, experiencia y ayuda a los países en desarrollo para disminuir los efectos del cambio climático

Fuente: elaboración propia.

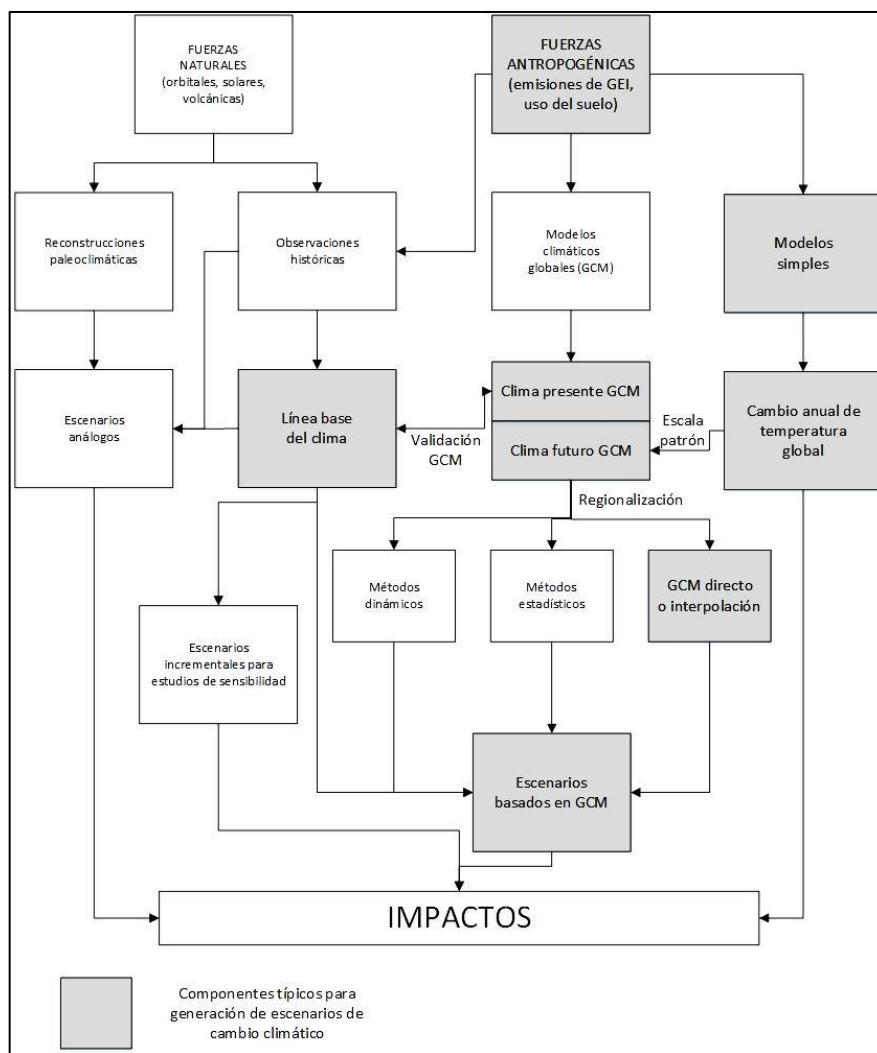
Apéndice 4. **Legislación ambiental de Guatemala**

AÑO	DOCUMENTO	TÍTULO
1974	Decreto 43-74	Ley reguladora sobre importación, elaboración almacenamiento, transporte, venta y uso de pesticidas
1986	Decreto 68-86	Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente
1989	Decreto 4-89	Ley de Áreas Protegidas
1996	Decreto 74-96	Ley de Fomento de la Educación Ambiental
1996	Decreto 101-96	Ley Forestal
1996	Decreto 109-96	Ley de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres de origen natural o provocado
1996	Decreto 116-96	Ley de Fomento a la Difusión de la Conciencia Ambiental
1997	Decreto 48-97	Ley de Minería
1997	Decreto 109-97	Ley de Hidrocarburos
1997	Decreto 110-97	Ley que prohíbe la importación y regula el uso de los clorofluorocarbonos en sus diferentes presentaciones
1998	Decreto 36-98	Ley de Sanidad Vegetal y Animal
2001	A. G. 509-2001	Reglamento para el manejo de desechos sólidos hospitalarios
2003	Decreto 52-2003	Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable
2003	A. G. 791-2003	Normativa sobre la Política Marco de Gestión Ambiental
2005	A. G. 388-2005	Designación del MARN como autoridad nacional encargada del Mecanismo de Desarrollo Limpio
2006	A. G. 236-2006	Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos
2006	A. M. 413-2006	Establecer los requisitos aplicables a la importación, comercialización, uso y exportación de sustancias agotadoras del ozono e importación de equipo y artículos que contengan clorofluorocarbonos
2007	A. G. 431-2007	Reglamento para la evaluación, control y seguimiento ambiental
2008	A. M. 105-2008	Manual general del reglamento de descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos
2013	Decreto 7-2013	Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero
2013	A. G. 256-2013	Creación de la comisión nacional de coordinación de contaminantes orgánicos persistentes

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Procedimiento para la construcción de escenarios de cambio climático para uso en asesoramiento de impactos



Fuente: Panel intergubernamental de cambio climático. *The Scientific Basis [Capítulo 13: Climate Scenario Development]*, p. 746.

