



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 CHIMALTENANGO**

Diana María Mendoza Ramírez

Asesorado por el MSc. Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza

Guatemala, mayo de 2016

NIVERSIDAD 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 CHIMALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DIANA MARÍA MENDOZA RAMÍREZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. WALTER ARNOLDO BARDALES ESPINOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA 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
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
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 CHIMALTENANGO**

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



Diana María Mendoza Ramírez

Guatemala, febrero de 2016

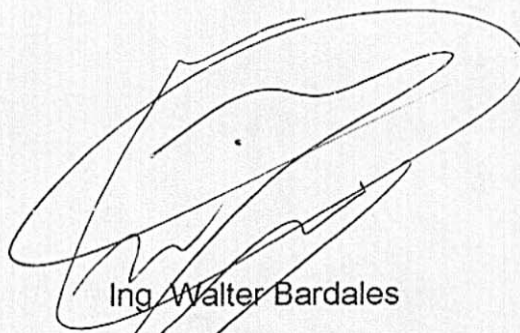
Ingeniero
Carlos Wong
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

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 Chimaltenango"** elaborado por la estudiante Diana María Mendoza Ramírez, carné 2010 20912.

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 Arnolfo Bardales Espinoza
Maestro en Recursos Hídricos Opción Hidrología
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 4279





Guatemala, 09 de marzo de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.014.2016.

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 **014-2014** 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 la estudiante universitaria: **Diana María Mendoza Ramírez**.
Identificada con número de carné: **2010-20912**.
Previo a optar al título de **INGENIERA AMBIENTAL**.

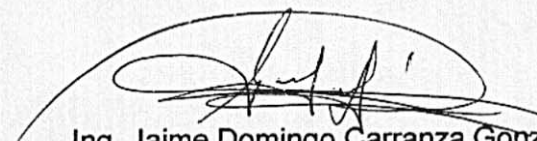
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

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

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 Carranza González
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.029.2016

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, **DIANA MARÍA MENDOZA RAMÍREZ** titulado: **"IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS BAJO ESCENARIOS A2 Y B1 CON EL MODELO CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS EN EL DEPARTAMENTO DE CHIMALTENANGO"**. 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 D
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

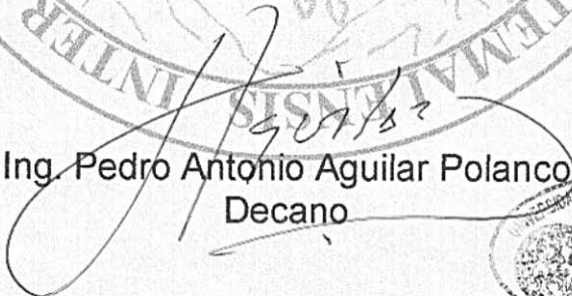


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.229-.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 CHIMALTENANGO**, presentado por la estudiante universitaria: **Diana María Mendoza Ramírez**, 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 guiarme en mis estudios y a lo largo de mi vida, y otorgarme fortaleza en momentos de debilidad.
- Mi hermana** Gabriela Mendoza, por su incondicional apoyo y cariño. Por y para ella.
- Mis padres** Edwin Mendoza e Irma Ramírez, por su apoyo y cuidado a lo largo de los años.
- Mis abuelos** Estela Sierra, Arturo Mendoza, Marta Ramírez, por ser una importante influencia en mi vida, por su cariño, y por siempre haber creído en mí.
- Mis amigos** Mi segunda familia: Jorge García, Javier Zepeda, Silvia Méndez y Alan Rodríguez, por los incontables momentos de apoyo, cariño y motivarme siempre a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y haber permitido mi formación profesional.
Facultad de Ingeniería	Por haberme otorgado la oportunidad de crecer profesionalmente.
Mi asesor	Por el tiempo dedicado, por su paciencia, además haber compartido conmigo sus conocimientos y guiarme a lo largo de este camino.
Mis amigos	Por haberme impulsado siempre a alcanzar esta meta y nunca haber dudado de mí.
Mi familia	Por haberme apoyado en todo sentido en las buenas y en las malas, todo lo que soy es gracias a ustedes.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Justificación	8
1.2. Determinación del problema.....	10
1.2.1. Definición del problema	10
1.2.2. Delimitación del problema	10
1.2.3. Limitantes del estudio	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Ciclo hidrológico	13
2.2. Balance hídrico.....	14
2.3. Efecto invernadero	15
2.4. Cambio climático	17
2.5. Modelos climáticos	18
2.5.1. Modelos climáticos globales	19
2.5.2. Modelos climáticos regionales.....	19
2.5.2.1. HadRM3P	20
2.6. Escenarios.....	22
2.6.1. Escenarios de cambio climático.....	22

2.6.2.	Escenarios socioeconómicos de emisiones	23
2.6.3.	Escenarios elaborados para Guatemala	25
2.6.3.1.	Primera comunicación nacional sobre cambio climático	25
2.7.	Efecto del cambio climático sobre el recurso hídrico.....	29
2.8.	Área de estudio	31
2.8.1.	Localización.....	31
2.8.2.	División político administrativa	32
2.8.3.	Clima	32
2.8.3.1.	Clasificaciones climáticas.....	33
2.8.4.	Recurso hídrico	33
2.8.5.	Agua potable y saneamiento	35
2.8.6.	Demografía.....	36
2.8.7.	Aspectos ambientales	37
2.8.7.1.	Áreas protegidas	38
2.8.7.2.	Cobertura boscosa	40
2.8.8.	Aspectos socioeconómicos	41
3.	METODOLOGÍA	43
3.1.	Variables	43
3.1.1.	Variables independientes	43
3.1.2.	Variables dependientes	43
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	44
3.3.	Técnicas.....	46
3.3.1.	Técnica cualitativa.....	46
3.3.2.	Técnica cuantitativa.....	47
4.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	59
4.1.	Escenarios A2	60

4.2.	Escenarios B1	65
4.3.	Tablas resumen.....	69
4.4.	Gráficas comparativas	70
CONCLUSIONES		77
RECOMENDACIONES.....		79
BIBLIOGRAFÍA.....		81
APÉNDICES		85
ANEXOS		93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efecto invernadero	16
2.	Medias multimodelo y rangos evaluados del calentamiento de la superficie	24
3.	Escenario de temperatura	26
4.	Escenario de precipitación	27
5.	Escenario del índice de aridez	27
6.	Escenario A2 temperatura media, enero, década 2090	28
7.	Escenario B1 temperatura media, enero, década 2090	29
8.	Impactos asociados al cambio promedio mundial de temperatura.....	31
9.	Serie histórica: número de habitantes 2008-2012.....	37
10.	Hectáreas de bosque per cápita 2008-2012	41
11.	Mapa de ubicación del departamento de Chimaltenango	45
12.	Mapa de estaciones para el departamento de Chimaltenango	45
13.	Recarga potencial de acuíferos, década 2020	61
14.	Recarga potencial de acuíferos, década 2030	61
15.	Recarga potencial de acuíferos, década 2040	62
16.	Recarga potencia de acuíferos, década 2050.....	62
17.	Recarga potencial de acuíferos, década 2060	63
18.	Recarga potencial de acuíferos, década 2070	63
19.	Recarga potencial de acuíferos, década 2080	64
20.	Recarga potencial de acuíferos, década 2090	64
21.	Recarga potencial de acuíferos, década 2020	65
22.	Recarga potencial de acuíferos, década 2030	65

23.	Recarga potencial de acuíferos, década 2040.....	66
24.	Recarga potencial de acuíferos, década 2050.....	66
25.	Recarga potencial de acuíferos, década 2060.....	67
26.	Recarga potencial de acuíferos, década 2070.....	67
27.	Recarga potencial de acuíferos, década 2080.....	68
28.	Recarga potencial de acuíferos, década 2090.....	68
29.	Precipitación, escenario A2 vs. B1.....	71
30.	Precipitación que infiltra, escenarios A2 vs. B1	71
31.	Escorrentía, escenario A2 vs. B1.....	72
32.	Evapotranspiración escenario A2 vs. B1	73
33.	Temperatura máxima, escenario A2 vs. B1	73
34.	Temperatura media, escenario A2 vs. B1.....	74
35.	Temperatura mínima, escenario A2 vs. B1	74
36.	Recarga potencial de acuíferos, escenario A2 vs. B1.....	76

TABLAS

I.	Escenarios de emisión, sensibilidad climática y MCG	26
II.	Tratamiento de agua superficial (volumen anual en metros cúbicos) ...	34
III.	Acceso a agua potable en Chimaltenango	35
IV.	Acceso a servicios de saneamiento en Chimaltenango.....	36
V.	Áreas protegidas en Chimaltenango.....	38
VI.	Coeficiente de infiltración por textura.....	47
VII.	Coeficiente de infiltración por pendiente	47
VIII.	Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal	48
IX.	Tabla resumen, escenario A2	69
X.	Tabla resumen, escenario B1	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CC	Capacidad de campo
Ch	Coeficiente de humedad
C1	Coeficiente de humedad máximo
C2	Coeficiente de humedad mínimo
Ci	Coeficiente de infiltración
kv	Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal
kp	Coeficiente de infiltración por la pendiente
kfc	Coeficiente de infiltración por textura de suelo
DCC	Déficit de capacidad de campo
ESC	Escorrentía
ETP	Evapotranspiración potencial
ETPR	Evapotranspiración potencial real
hD	Humedad disponible
hSf	Humedad final del suelo
hSi	Humedad inicial del suelo
Pi	Infiltración pluvial
mm	Milímetros
NR	Necesidad de riego
P	Precipitación
PM	Punto de marchitez permanente
RP	Recarga potencial

GLOSARIO

Cambio climático	Cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea por variabilidad natural o como resultado de la actividad humana.
Capacidad de campo	Máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado; la planta tiene su máxima capacidad de evapotranspiración.
Escenarios	Proyecciones del estado futuro de la sociedad y del medio ambiente, basadas en suposiciones de aumento sobre emisiones de GEI, población, crecimiento económico y políticas ambientales.
Escorrentía	Diferencia entre la precipitación y la precipitación que infiltra.
Evapotranspiración	Transpiración de la planta junto con la evaporación del suelo.
GEI	Gases de efecto invernadero, los cuales impiden que los rayos infrarrojos regresen al espacio exterior, manteniendo la temperatura de la superficie terrestre.
Infiltración	Penetración del agua en el suelo.

Modelo climático	Representación matemática del sistema climático basada en las propiedades físicas de sus componentes, sus interacciones y procesos.
Precipitación	Todas las formas de humedad que caen a la tierra: lluvia, llovizna, escarcha y granizo, resultante de la condensación del vapor de agua atmosférico.
Punto de marchitez	Mínima humedad que puede tener un suelo, si la planta no transpira, muere.
Recarga potencial	Cuando el agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante es la que recarga al acuífero.

RESUMEN

El cambio climático ha sido uno de los fenómenos más discutidos en las últimas décadas, debido a actividades antropogénicas se han aumentado los gases que causan el efecto invernadero en la atmósfera, calentando la parte baja de la misma en mayor proporción que el proceso natural que permite la temperatura para el desarrollo de la vida.

Algunos de los impactos probables del cambio climático sobre el recurso hídrico son: alteración de los componentes del ciclo hidrológico, aumento del nivel del mar, incremento del uso del recurso hídrico, disminución de la calidad y de las fuentes de agua, que afectan la salud y economía, no solamente a nivel local sino regional.

Guatemala es un país vulnerable al cambio climático, pues su ubicación geográfica lo hace propenso a fenómenos hidrometeorológicos; por ello el desarrollo de estudios enfocados a proyecciones de futuros escenarios ante el mismo son de gran importancia, tomando en cuenta factores económicos y políticos, y el crecimiento de población, producción y consumo energético. El presente estudio se delimita al departamento de Chimaltenango.

Por medio de los escenarios de cambio climático basados en el modelo climático regional PRECIS, adecuado para Guatemala, se determinó la anomalía de las variables climáticas, esta anomalía se sumó a la climatología real para el periodo que va de 1960 a 2011; se estiman los impactos sobre el recurso hídrico para el horizonte temporal de 2020 a 2090, cuantificando la precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración.

La precipitación presentó variabilidad en ambos escenarios con una tendencia similar a disminuir, la que infiltra será menor para el escenario A2 que para el B1, disminuye en un 26 % para el escenario pesimista y 9% para el optimista. La escorrentía presentó tendencia a disminuir en ambos escenarios, hasta un 44 % con el escenario A2 y un 12 % con el escenario B1. La evapotranspiración aumentó un 9 % para el escenario A2 y un 4 % para el B1. El escenario A2 llegó a tener un aumento en promedio de 3 °C de temperatura en los horizontes de tiempo, mientras que el B1 presentó un aumento de 2 °C.

Para ambos escenarios se presentó la tendencia a la disminución de la recarga potencial de acuíferos determinada con la metodología de Schosinsky. Con el escenario A2 llegó a darse una disminución de la recarga hasta de un 28 % y con el escenario B1 un 10 % de disminución. Asimismo, en la parte sur del departamento, correspondiente a la zona de captación del recurso hídrico de la vertiente del Pacífico, puede observarse mayor recarga por la geología y acumulados de precipitación, por lo que constituyen áreas de protección especial.

Si no se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero las temperaturas seguirán incrementando dependiendo de la población y desarrollo industrial, afectando el desarrollo poblacional, económico y sanitario.

OBJETIVOS

General

Determinar cuantitativamente los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico por medio de escenarios A2 y B1, con el modelo climático regional PRECIS en el departamento de Chimaltenango.

Específicos

1. Estimar la precipitación bajo los escenarios A2 y B1.
2. Estimar la evapotranspiración potencial bajo los escenarios A2 y B1.
3. Estimar la escorrentía bajo los escenarios A2 y B1.
4. Estimar la infiltración bajo los escenarios A2 y B1.
5. Estimar la humedad bajo los escenarios A2 y B1.
6. Estimar la temperatura máxima, mínima y media bajo los escenarios A2 y B1.
7. Estimar disponibilidad hídrica futura bajo los escenarios A2 y B1.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han presentado cambios en la atmósfera atribuidos al cambio climático, fenómeno generado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico.

El cambio climático tendrá impacto a escala global, con grandes repercusiones en el recurso hídrico, sin embargo, los países en vías de desarrollo como Guatemala, sufrirán consecuencias aún más adversas, pues la mayoría de su población es rural y por lo tanto, dependiente de la producción agrícola, la pobreza del país y la condición social también disminuye la capacidad de adaptación ante el cambio climático.

Por ello se ha presentado la necesidad de cuantificar y estudiar el impacto del cambio climático sobre el recurso hídrico, incluyendo la calidad y disponibilidad del mismo, que tendrá impactos tanto sociales como económicos. Es posible proyectar por medio de los escenarios de cambio climático los impactos o cambios que se podrían presentar, con el fin de disminuir la vulnerabilidad y mejorar la adaptación.

El estudio se delimitó al departamento de Chimaltenango, primordialmente por ser zona de captación del recurso hídrico de la vertiente del Caribe y Pacífico, abasteciendo a sus comunidades, para sus actividades productivas y de desarrollo, y a la capital, por lo que los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico afectarán no solo al departamento sino a todo el país.

1. ANTECEDENTES

Ante los cambios drásticos observados en las variables climáticas la Comunidad Científica Internacional tomó acciones para el estudio del cambio climático; las más relevantes han sido:

- Primera conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano Estocolmo, 1972.
- Primera conferencia mundial sobre el clima (en Ginebra), convocada por la Organización Meteorológica Mundial, estableciendo un Programa Mundial sobre el Clima, 1979.
- La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 1988.
- Publicación del Primer Informe de Evaluación del IPCC y se realiza la segunda conferencia mundial sobre el clima, 1990.
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, “Cumbre de Tierra Río” (Río de Janeiro) dio a conocer tres tratados internacionales, destacando la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992.
- Primera Conferencia de las partes COP1 Berlín, Alemania. Presentó la incertidumbre de la capacidad de los países de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, estableciendo instrumentos e iniciativas que se ajustarán a las necesidades, 1995.
- Publicación del Segundo Informe de Evaluación del IPCC, 1995.
- Segunda Conferencia de las partes COP 2 Ginebra, Suiza. Se determinó que los países miembros no seguirían soluciones uniformes, 1996.

- Tercera Conferencia de las partes COP3 Kyoto, Japón. Se adopta oficialmente el Protocolo de Kyoto, que estableció objetivos vinculantes para la emisión de gases de efecto invernadero.
- Cuarta Conferencia de las partes COP4 Buenos Aires, Argentina. Se presentó un periodo de dos años para esclarecer y determinar herramientas para el protocolo de Kyoto, 1998.
- COP5 Bonn, Alemania. Fue de carácter técnico sobre los mecanismos del protocolo de Kyoto en 1999.
- COP6 Haya, Holanda, en el 2000 se presentaron desacuerdos y debates sobre los instrumentos de aplicación del protocolo de Kyoto, 2000.
- Cumbre del Milenio Nueva York, se aprueba la Declaración del Milenio, con los ocho objetivos de Desarrollo del Milenio, buscando detener la degradación ambiental, pobreza, hambre, entre otras en el 2000.
- COP7 Marrakech, Marruecos. Se estableció la reglamentación para la implementación del Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto, 2001.
- Publicación del Tercer Informe de Evaluación del IPCC, 2001.
- Cumbre de la Tierra de Johannesburgo (Sudáfrica), Cumbre Mundial del Desarrollo Sostenible organizada por la ONU, incentivando la protección ambiental de acuerdo con el desarrollo económico y social, 2002.
- COP8 Nueva Delhi, India. Avance de los Mecanismos de Desarrollo Limpio, promoviendo una sinergia entre convenciones de cambio climático, biodiversidad y desertificación, 2002.
- COP9 Milán, Italia. Se propuso promover la asistencia al desarrollo, investigación y cooperación para innovación tecnológica, 2003.
- COP10 Buenos Aires, Argentina. Se presentó la preocupación de lo que sucedería con el protocolo de Kyoto al terminar en el 2012, y cómo reducir las emisiones posteriormente, pues se reconoce la importancia de la mitigación y adaptación al cambio climático, 2004.

- En el 2005 entra en vigor el Protocolo de Kyoto.
- COP11 Montreal, Canadá, en paralelo con la Primera Reunión de las Partes del Protocolo de Kyoto (CMP1). Centradas en lo que sucedería luego de finalizar el periodo del Protocolo de Kyoto, 2005.
- Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres, Kobe, Hyogo, Japón. Se desarrolló el marco de acción de Hyogo con el fin de implementar la reducción del riesgo de desastres, 2005.
- COP12 Nairobi, Kenia, en paralelo con la Segunda Reunión de las Partes del Protocolo de Kyoto (CMP2). Se finalizaron detalles técnicos del Protocolo de Kyoto y se continuó con el acuerdo de que sucedería luego de su periodo, 2006.
- COP13 Bali, Indonesia, en paralelo con la Tercera Reunión de las Partes del Protocolo de Kyoto (CMP3). Adopción del Plan de Acción de Bali que inició negociaciones sobre un acuerdo global de cambio climático, estableciendo un calendario a concluir en el 2009 en la Conferencia de Copenhague, 2007.
- Publicación del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, 2007.
- COP14 Poznan, Polonia. Programa estratégico de Poznan sobre transferencia de tecnología, para ayudar a países en desarrollo, 2008.
- COP15 Copenhague, Dinamarca, en paralelo con la CMP5, se firmó el acuerdo de Copenhague, donde se fijó la meta del límite máximo para el incremento de temperatura media global de 2 °C, y mantener el incremento de temperatura bajo los 1,5 °C por los países en desarrollo vulnerables, en 2009.
- COP16 Cancún, México, en paralelo con la CMP6. Se prosiguen los esfuerzos de la Conferencia anterior para concluir un acuerdo jurídicamente vinculante sobre el clima, luego del 2012. Se creó el Fondo Verde para el Clima, con el fin de financiar proyectos en países en desarrollo, 2010.

- Cumbre de las Naciones Unidas sobre los Objetivos de Desarrollo del Milenio, se aprobó un plan de acción mundial, 2010.
- COP17 Durban, Suráfrica. Se estableció que los principales emisores de gases de efecto invernadero, y todos los países formarían parte de un acuerdo jurídicamente vinculante para el 2015, 2011.
- COP18 Doha, Catar. Se pretende sentar las bases para un acuerdo climático que asegure que el aumento global de temperatura no supere los 2 °C. Se establece el acuerdo Puerta Climática de Doha, que prorroga hasta el 2020 el periodo de compromiso del Protocolo de Kyoto, 2012.
- Conferencia de desarrollo sostenible de Naciones Unidas, Río de Janeiro, Brasil, conocida como Río +20. Se desarrolló el documento “El futuro que queremos”, que contiene medidas y prácticas para la implementación del desarrollo sostenible, 2012.
- COP19 Varsovia, Polonia. Se estableció alargar los compromisos del Protocolo de Kyoto hasta el 2020, sin la participación de países contaminantes como Estados Unidos, China, Rusia, Japón y Canadá, 2013.
- COP20 Lima, Perú. Con el objetivo de concluir un acuerdo mundial para reducir emisiones de GEI, se aprobó un aporte de millones de dólares al Fondo Verde para el Clima, y el compromiso de los países a fortalecer políticas de sensibilización y educación ambiental, 2014.
- Publicación del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, 2014.

Nivel nacional

Siendo Guatemala uno de los países más vulnerables al cambio climático, a pesar de ser un menor emisor de gases de efecto invernadero, se han tomado

acciones para mitigar los impactos y medidas para la adaptación al mismo, las más relevantes han sido:

- Creación de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (Conama) mediante el Decreto 68-86 Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, con el fin de asesorar y coordinar todas las acciones tendientes a la formulación de la política nacional ambiental y propiciar su aplicación a través de los distintos ministerios de Estado, 1986.
- Conama se integra a la Red de Formación Ambiental de América Latina y el Caribe, establecida por el PNUMA, 1988.
- Decreto 4-89 Ley de Áreas Protegidas, la cual creó el Consejo Nacional de Áreas Protegidas, CONAP, 1989.
- Elaboración del documento Programa Nacional de Inversión en Educación, Capacitación y Concientización Ambiental en Guatemala, con financiamiento del BID, 1990.
- Estrategia Nacional de Educación Ambiental, respaldada por Conama, el Ministerio de Educación, el Consejo Superior Universitario y posteriormente por el Congreso de la República, 1990.
- Firma y ratificación del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 1992 y 1995, respectivamente.
- Creación del Instituto Nacional de Bosques (INAB), por medio del Decreto 101-96 Ley Forestal, autoridad del sector público agrícola en materia forestal, 1996.
- Decreto 116-96 Ley de Fomento de la Difusión de la Conciencia Ambiental, para que el guatemalteco no perjudique el medio ambiente, logrando su desarrollo, 1996.
- Creación de la Red Nacional de Formación e Investigación Ambiental REDFIA, integrada por las Universidades de San Carlos de Guatemala, Rafael Landívar, del Valle de Guatemala, Mariano Gálvez, Rural y por la

Asociación de Investigación y Estudios Sociales (Asies), la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (Flacso), Conama, y posteriormente, por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 1996.

- Se inician actividades sobre el cambio climático en Guatemala con la ejecución del Proyecto Primera Comunicación Nacional y Plan de Acción sobre Cambio Climático, 1998.
- Decreto 90-2000 del Congreso de la República de Guatemala, Ley de Creación del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, rector del sector ambiental, 2000.
- Firma y ratificación del Protocolo de Kyoto, 1998 y 1999, respectivamente.
- Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, desarrollo de escenarios de cambio climático a partir de estimaciones de concentraciones de gases de efecto invernadero, 2001.
- Creación de la Unidad de Cambio Climático, 2001.
- Primer Informe Metas del Milenio. Estableció una base de evaluación del grado de avance en Guatemala con relación a los Objetivos de Desarrollo del Milenio, metas e indicadores, para un periodo de 1990 al 2000, 2002.
- Creación de la unidad encargada del Programa Nacional de Cambio Climático, 2003.
- Decreto 52-2003 Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energías Renovables, 2003.
- Acuerdo Gubernativo 791-2003 Política Marco de Gestión Ambiental, 2003.
- Política Nacional de Educación Ambiental, por el Ministerio de Educación y Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2004.

- Acuerdo Ministerial 477-2005 creación de la Oficina Nacional de Desarrollo Limpio y Reglamento de sus procedimientos, 2005.
- II Informe de Avances de los Objetivos del Milenio en Guatemala por la Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia de la República. Orientado hacia el cumplimiento de los objetivos de Desarrollo del Milenio, identificando desafíos, 2006.
- Creación de la Agenda 21 para prestar servicios de investigación, capacitación y asistencia técnica para el desarrollo en Centroamérica y El Caribe, en el marco de contratos con agencias nacionales e internacionales de cooperación, 2006.
- Acuerdo Gubernativo 63-2007 Política de Conservación, Protección y Mejoramiento del Ambiente y los Recursos Naturales, 2007.
- Proyecto Estudios de Cambio Climático con Énfasis en Adaptación, Programa Nacional de Cambio Climático, 2007.
- Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático, 2008.
- Fomento de las capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba, 2008.
- Acuerdo Gubernativo 329-2009. Política Nacional de Cambio Climático. Contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos del Milenio con énfasis en la reducción de pobreza, reducción de la vulnerabilidad y reforzamiento de la adaptación al cambio climático.
- Creación de la Mesa Nacional de Cambio Climático, para consensuar y aprobar la política, estrategia y ley nacional de cambio climático, 2009.
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo publicó el cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala, 2009.
- III Informe de Avances de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, por la Secretaria de Planificación y Programación de la Presidencia con el acompañamiento de Ministros de Estado y el Presidente de la República. Basada en el objetivo 1 erradicar la pobreza y el hambre, 2010.

- Creación del Instituto Privado de Investigación Sobre el Cambio Climático por la Asociación de Azucareros de Guatemala, para la investigación y promoción de acciones que contribuyan a la reducción de la vulnerabilidad, mitigación y adaptación al cambio climático, 2010.
- Política Nacional para la Reducción de Riesgo a los Desastres en Guatemala, Acuerdo 06-2011 del Consejo Nacional de Conred. Dándole cumplimiento al Marco de Acción de Hyogo, garantizando que la reducción del riesgo de desastres sea una prioridad nacional, 2011.
- Se aprobó la 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, creando el Fondo Nacional del Cambio Climático, con el fin de financiar planes, programas y proyectos. Se crea con esta Ley el Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático, 2013.

Para observar el desarrollo de medidas tomadas por los países internacionales, en comparación con las medidas nacionales (ver apéndice 3.)

1.1. Justificación

Debido a la variabilidad de las condiciones atmosféricas derivadas del cambio climático ha aumentado la frecuencia de fenómenos naturales hidrometeorológicos, teniendo como consecuencia predominante la reducción de la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, que es vital para la vida, el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ecológica.

Por ello, se ha presentado la necesidad de desarrollar escenarios del cambio climático, cuantificando los impactos del mismo en los recursos hídricos a partir de proyecciones, el horizonte temporal abarcó del 2020 a 2090, rango

seleccionado por el crecimiento abrupto en la temperatura luego de los 50, lo que resulta con escenarios de sequía comparables con el fenómeno del niño de 1997–1998, que ha sido el más fuerte en la historia.

El modelo climático regional PRECIS se ajusta a la realidad de Centroamérica y el Caribe, por lo que es apropiado para Guatemala, simula de mejor manera los episodios de sequía durante época lluviosa. El modelo fue aplicado para los escenarios A2 y B1. El escenario A2 constituye las máximas emisiones que podrían presentarse, siendo un escenario pesimista, mientras que el B1 constituye las mínimas emisiones que podrían presentarse, siendo un escenario optimista, situados en los extremos de posibilidades que con mayor probabilidad pueden afectar, y representativos del conjunto de escenarios. Estos escenarios son proyecciones del estado futuro de la sociedad y del medio ambiente. Sirviendo de fundamento para reducir la vulnerabilidad al cambio climático y aportar a la adaptación al mismo.

Se hizo uso de la metodología del balance hídrico desarrollada por Schosinsky en Costa Rica, que es ampliamente utilizada en Guatemala pues ambos países pertenecen al istmo centroamericano y por lo tanto, poseen características climáticas similares.

El departamento de Chimaltenango constituye una zona de captación del recurso hídrico por estar situada en la parte alta de la vertiente del Caribe y Pacífico. Las comunidades se abastecen del agua captada dentro de sus límites, para sus actividades productivas y desarrollo, destacando la agricultura, y también constituye el abastecimiento para la ciudad capital.

1.2. Determinación del problema

El cambio climático tendrá efectos sobre el recurso hídrico, afectando su disponibilidad y calidad.

1.2.1. Definición del problema

Se presenta variabilidad climática en cuanto a temperatura, lluvia, eventos extremos como inundaciones y sequías, con consecuencias sobre la salud y el sector económico, para el departamento de Chimaltenango.

1.2.2. Delimitación del problema

El estudio se delimita al departamento de Chimaltenango, que limita al norte con Quiché, al este con Guatemala y Sacatepéquez, al sur con Escuintla y al oeste con Suchitepéquez y Sololá.

- La red hidrometeorológica considerada en este estudio es del orden de seis estaciones meteorológicas:
 - Alameda ICTA
 - San Martín Jilotepeque
 - Santa Cruz Balanyá
 - Santa Margarita, Pochuta
 - Volcán de Fuego, Yepocapa
 - Volcán de Fuego, Observatorio 2, Yepocapa

- Estaciones en los alrededores:
 - Chinique
 - Santa María El Tablón
 - El Capitán, San Lucas Tolimán
 - Suiza Contenta

Así como la información histórica utilizada correspondiente a los años 1960 a 2011.

1.2.3. Limitantes del estudio

Los estudios de predicción de cambio climático se acompañan de incertidumbres como limitantes, no solamente basadas en la metodología utilizada, sino también por factores externos como económicos, sociales, políticos y culturales. En Guatemala se le suma a lo anterior la escasez de estaciones meteorológicas.

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero son incertezas que varían de acuerdo con la concentración proyectada.

Los modelos también poseen limitantes en la reproducción del clima, pues son cambiantes los patrones de circulación que simulan el clima.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ciclo hidrológico

Es el movimiento general del agua, por ser un ciclo no tiene principio ni fin. El agua es un recurso fundamental para todas las formas de vida. El ciclo inicia con la evaporación del agua que se encuentra sobre la superficie o cerca de ella, esto se da por la radiación y el viento. El vapor de agua se eleva por las masas de aire en movimiento y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Esta misma puede volver a evaporarse o ser captada por construcciones o plantas, fluyendo luego sobre las superficies hasta las corrientes o sufriendo de infiltración.

Es un proceso de transporte recirculatorio e indefinido, el movimiento del ciclo se debe al sol que proporciona la energía para elevar el agua o evaporarla, y a la gravedad terrestre que permite que el agua condensada descienda. Si el agua infiltrada es suficiente se da la recarga del agua subterránea, pero si es escasa, vuelve a la atmósfera por medio de la evaporación o transpiración de las plantas, fenómeno englobado conjuntamente como evapotranspiración ⁽¹⁾.

El intercambio de agua implica un flujo de energía y de agua, incluyendo también varios elementos químicos. El cambio climático ejerce grandes implicaciones sobre el ciclo hidrológico, modificando las precipitaciones, humedad del suelo, escurrimiento, evaporación, vapor atmosférico y temperatura.

¹ CAMPOS, Daniel Francisco. *Procesos del ciclo hidrológico*. p. 26.

2.2. Balance hídrico

Por medio de un balance hídrico es posible cuantificar los recursos de agua, porque se analizan las entradas y salidas, así como las modificaciones que ha sufrido por causas antropogénicas. El conocimiento del balance hídrico es fundamental para ejercer planes que permitan un manejo racional del recurso. Con los datos es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema en diferentes períodos de tiempo, y establecer el grado de su influencia en las variaciones del régimen natural.

El balance hídrico se basa en el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad; con base en la diferencia que se produce entre entradas y salidas de agua, se traduce en el agua que queda almacenada:

$$\textit{Entradas} - \textit{salidas} = \textit{variación de almacenamiento}$$

La ecuación del balance hídrico indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la masa de agua. Las entradas en la ecuación son: la precipitación en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la masa de agua desde fuera. Las salidas constituyen: la evaporación desde la superficie de la masa de agua y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea, desde la masa de agua considerada. Cuando las entradas superan las salidas, el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye.

Debido a que todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación se incluye un término residual:

$$P + Q_{SI} + Q_{UI} - E - Q_{SO} - Q_{UO} - \Delta S - v = 0$$

Donde

P = precipitación

Q_{SI} = realmente recibida en la superficie del suelo

Q_{UI} = aguas superficiales y subterráneas recibidas

E = evaporación

Q_{SO} = salida de corrientes de agua superficial

Q_{UO} = salida de corrientes de agua subterránea

ΔS = volumen de agua almacenada

v = término residual

2.3. Efecto invernadero

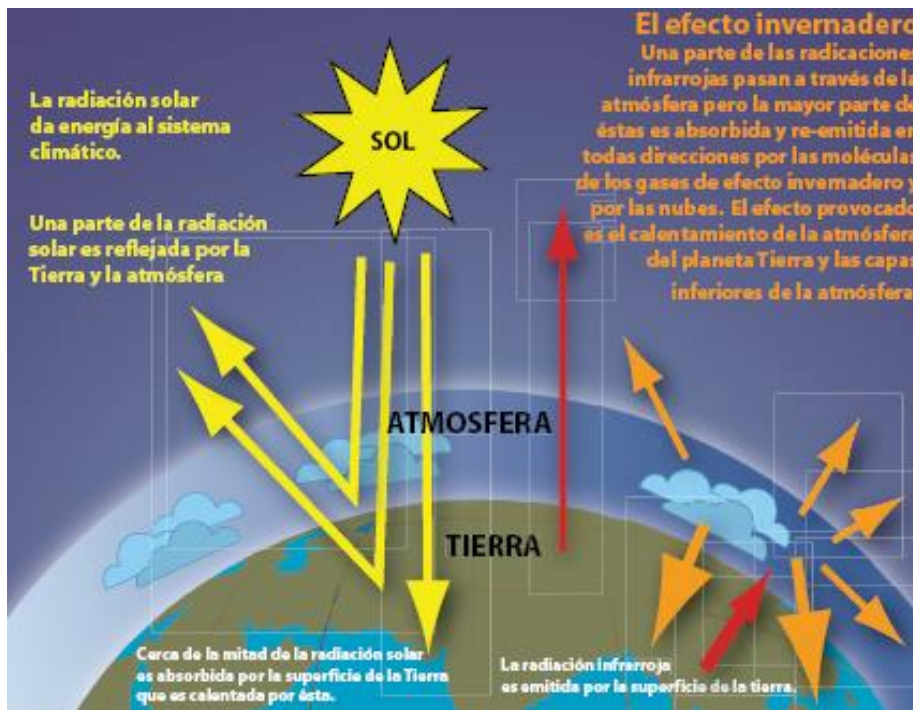
El sol irradia energía a la atmósfera de la Tierra; una parte de ella es reflejada de vuelta al espacio. La radiación llega en forma de onda corta o radiación visible y regresa al espacio en forma de radiación infrarroja o de onda larga.

La atmósfera absorbe parte de la radiación por los gases que la componen (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y vapor de agua), también importantes para la formación del clima de la Tierra. El efecto invernadero consiste en el proceso en el cual el calor absorbido se reemite a la superficie terrestre calentándola, dando origen a las condiciones climáticas y ambientales.

Los gases de efecto invernadero impiden que los rayos infrarrojos regresen al espacio exterior, manteniendo la temperatura de la superficie terrestre, permitiendo el desarrollo de la vida. Por lo que el efecto invernadero

natural hace posible la vida, sin embargo, las actividades humanas han intensificado el efecto natural, dando lugar al calentamiento mundial.

Figura 1. Efecto invernadero



Fuente: IPCC. Climate change 2007. *The physical science basis*. p. 126.

Las actividades humanas que han aumentado las emisiones de GEI causando una variación en el clima, son principalmente quema de combustibles fósiles y cambios agrícolas. En Guatemala, los mayores GEI son; dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, monóxido de carbono, dióxido de azufre, compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno, tal como se muestra en el anexo 1.

2.4. Cambio climático

El panel intergubernamental sobre cambio climático lo define como: “cualquier cambio en el clima a través del tiempo, ya sea por variabilidad natural o como resultado de la actividad humana” ⁽²⁾.

El clima cambia, pues es el resultado de interacciones complejas de procesos en los océanos, atmósfera y la superficie terrestre. Varios estudios demuestran que el cambio climático tendrá como consecuencia un aumento de la temperatura superficial de la tierra, con impactos asociados como aumento en la frecuencia o intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. Las temperaturas incrementarán entre 1 y 3,5 °C dependiendo del crecimiento demográfico y económico.

“La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado” ⁽³⁾.

Las emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero cada vez contribuyen en mayor proporción al cambio climático, principalmente la emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, tanto por la quema de combustibles fósiles como por el cambio de uso de suelo. Estos gases mantienen la tierra caliente, sin embargo, por las grandes tasas de emisión el proceso se ha visto intensificado, debido a que estos compuestos tienen ciclos de vida atmosféricos largos el proceso de recuperación de este efecto tomará siglos, puede observarse en la gráfica del anexo 3.

² Panel intergubernamental de cambio climático. *The scientific basis. contribution of working group i to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC*, p. 5.

³ Panel intergubernamental de cambio climático. *Afirmaciones principales del resumen para responsables de políticas. Suiza: IPCC*, p. 1.

Por el contrario, partículas como aerosoles, polvo, partículas provenientes de explosiones volcánicas tienen efecto de enfriamiento; sin embargo, el ciclo de vida atmosférico de estas partículas es relativamente corto.

Los sistemas naturales son especialmente vulnerables al cambio climático por su baja capacidad de adaptarse, entre los cuales están los glaciares, arrecifes de coral, manglares, ecosistemas polares, boques boreales y tropicales, humedales de praderas, y tierras de pastoreo. Los sistemas humanos también son sensibles al cambio climático entre los cuales están el recurso hídrico, silvicultura, agricultura, sistemas marinos, energía, industria, asentamientos, seguros financieros y salud humana. Los climas extremos tienen grandes consecuencias para ambos sistemas, pues generan sequías, inundaciones, aludes, olas de calor, afectando mayormente a poblaciones rurales, con lo que se presentan impactos mayores para países subdesarrollados o en vías de desarrollo.

Para mitigar los impactos del cambio climático la adaptación es la mejor estrategia, para lo cual la equidad y desarrollo sostenible son partes fundamentales, reduciendo la vulnerabilidad, tal como puede observarse en el anexo 2.

2.5. Modelos climáticos

Los modelos climáticos pueden ser globales o regionales, como a continuación se presentan.

2.5.1. Modelos climáticos globales

Un modelo climático global es una representación matemática del sistema climático basada en las propiedades físicas de sus componentes, interacciones y procesos. Además, algunos modelos de tratarse de procesos físicos, también representan modelos biológicos y químicos. Son empleados para simular características del clima actual, pasado reciente, así como proyecciones del clima futuro ante las actividades humanas. Los modelos de los principales componentes como la atmósfera, el océano, la tierra y el mar, se han integrado con representaciones del ciclo del carbono y química atmosférica.

Las proyecciones de los modelos globales pueden ser adecuadas a unos cientos de kilómetros; sin embargo, no reflejan el detalle local, que a menudo es necesario para las evaluaciones de impacto a nivel nacional y regional ⁽⁴⁾.

Los modelos climáticos con los que se trabaja actualmente se basan en el modelo general de circulación GCM. Los modelos de circulación son empleados para simular el clima presente y de un futuro posible bajo condiciones impuestas por cada uno de los escenarios de gases de efecto invernadero.

2.5.2. Modelos climáticos regionales

Los modelos climáticos regionales son empleados para predicciones climáticas a resoluciones más adecuadas que las resultantes de los modelos globales. Generalmente, cubren un área limitada del globo terrestre de 5 000 km × 5 000 km, con una resolución horizontal hasta de 25 km.

⁴ Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS*. Met Office Hadley Centre, p. 21.

Se basan en leyes físicas representadas por ecuaciones matemáticas que se resuelven, utilizando una rejilla tridimensional. Por ello, son modelos completos, incluyendo la atmósfera y los componentes de la superficie terrestre del sistema climático, conteniendo representaciones de los procesos importantes dentro del sistema climático (nubes, radiación, precipitación, e hidrología del suelo). Muchos de estos procesos físicos se dan a escalas espaciales menores que la malla del modelo, por lo que no pueden ser modeladas de forma explícita. Se toman en cuenta sus efectos con el uso de parametrizaciones, por medio de las cuales el proceso se representa mediante relaciones entre el área o tiempo promedio de efecto de los procesos a escala de subred y el flujo a gran escala.

Debido a que los modelos regionales tienen un área limitada necesitan ser conducidos en sus límites por campos a gran escala en función del tiempo (temperatura, viento, vapor de agua y presión superficial). Estos campos se originan a partir de análisis de observaciones o integraciones de los GCM en una zona de amortiguamiento, que no se considera al analizar los resultados del modelo climático regional.

2.5.2.1. HadRM3P

Modelo climático regional desarrollado por el Centro Hadley, basado en HadAM3H, una versión mejorada de la componente atmosférica de las últimas del Centro Hadley junto AOGCM, HadCM3. La HadRM3P se ha usado con resoluciones horizontales de 50 y 25 km con 19 niveles en la atmósfera (desde la superficie hasta 30 km en la estratósfera) y cuatro niveles en el suelo. El modelo climático regional utiliza la misma formulación del sistema climático como en el GCM que ayuda a asegurar que el modelo regional ofrezca una alta resolución de las proyecciones del cambio climático regional, generalmente

consistente con el cambio climático a escala continental proyectada por los GCM, siendo adecuado para la región del Caribe, Centroamérica y por lo tanto, Guatemala.

El modelo requiere una superficie prescrita y condiciones de contorno laterales. Las condiciones de superficie solamente son requeridas sobre el agua, en donde el modelo necesita series de tiempo de temperatura superficial y las extensiones de hielo. Las condiciones laterales de contorno proporcionan información dinámica atmosférica en los bordes latitudinales y longitudinales del dominio del modelo. No hay restricción prescrita en el límite superior del modelo. Las condiciones del entorno laterales comprenden las variables atmosféricas de presión superficial, componentes del viento horizontal y medidas de temperatura atmosférica y humedad.

Ciertas configuraciones del PRECIS RCM contienen una representación completa del ciclo del azufre, lo que hace necesario un conjunto de condiciones del contorno (incluyendo dióxidos de azufre, aerosoles de sulfato y especies químicas asociadas). Estas condiciones de contorno laterales se actualizan cada seis horas; mientras que las condiciones de contorno de superficie se actualizan diariamente.

El modelo se describe en tres secciones principales: la dinámica, el ciclo de azufre y las parametrizaciones físicas. La dinámica se refiere a la advección de las variables del estado meteorológico (necesarias para las condiciones de contorno laterales), que se modifican constantemente por las parametrizaciones físicas nubes, precipitación, radiación, capa límite, intercambios de superficie y ondas de gravedad de arrastre. El ciclo del azufre también es una parametrización física; sin embargo, sus variables (concentraciones de especies químicas) son tratadas como pronósticos y la advección como

trazadores. El PRECIS MCR se basa en el componente atmosférico del HadCM3, con modificaciones sustanciales a la física del modelo.

2.6. Escenarios

Un escenario es una descripción coherente y plausible de un posible estado futuro del mundo. Según la IPCC son proyecciones del estado futuro de la sociedad y del medio ambiente, basadas en suposiciones de aumento sobre la emisión de gases de efecto invernadero, aumento de población, crecimiento económico y políticas ambientales.

Son ampliamente utilizados en evaluaciones del impacto del cambio climático, adaptación y vulnerabilidad.

2.6.1. Escenarios de cambio climático

Son descripciones de cómo el sistema climático de la Tierra puede cambiar en el futuro, contruidos primordialmente para investigación y determinación de las posibles consecuencias del cambio climático, originado por causas antropogénicas basadas en relaciones climatológicas.

Establecen y cuantifican las variaciones del clima futuro, respecto del clima actual, fundando las bases para estudios de vulnerabilidad de adaptación para los sectores hídricos, agrícolas, forestales y salud.

Además de datos actuales del clima, en su análisis también intervienen emisiones futuras de gases de efecto invernadero, siendo afectadas por crecimiento demográfico, desarrollo económico y cambios tecnológicos.

Los escenarios poseen incertidumbres derivadas del desconocimiento de cómo serán las emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro, variabilidad interna del sistema climático, así como incertidumbres en los modelos. Sin embargo, constituyen una herramienta de mucha ayuda para estimar impactos.

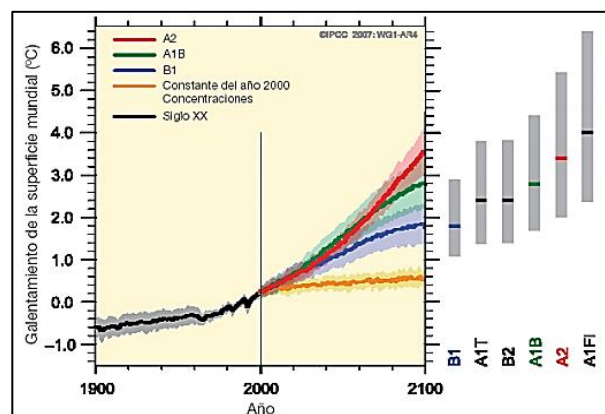
2.6.2. Escenarios socioeconómicos de emisiones

Los escenarios SRES se agrupan en cuatro familias de crecimiento de población y desarrollo socioeconómico.

- A1: describe un rápido crecimiento económico, aumento en la población mundial a mediados del siglo, seguido de un decrecimiento y una introducción rápida de tecnología eficiente. Reducción en las diferencias regionales por un incremento de interacciones culturales. La familia A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas de cambio tecnológico en el sistema energético. Todos distinguidos por su énfasis tecnológico: intensivo en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T) y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B1) (no dependiente de una fuente de energía en particular).
- A2: describe un mundo heterogéneo basado en autosuficiencia y conservación de las identidades locales. Se da un crecimiento continuo de la población, con patrones de fertilidad que convergen lentamente. El desarrollo económico se orienta principalmente a nivel regional y crecimiento económico *per cápita* y el cambio tecnológico se encuentra más fragmentado que en la familia A1.

- B1: describe un mundo convergente con la misma población global, alcanzando su máximo a mediados del siglo seguido por un decrecimiento, al igual que en la familia A1, pero con un rápido cambio en las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información, reducciones en consumo e introducción de tecnologías limpias y eficientes. Se le da importancia a soluciones globales de sostenibilidad, incluyendo equidad, pero sin iniciativas adicionales respecto del clima.
- B2: describe un mundo en el cual se le da énfasis a las soluciones locales para una sostenibilidad económica, social y ambiental. Se presenta población creciente, pero a una tasa menor que la familia A2, niveles intermedios de desarrollo económico, así como un más lento, pero variado cambio tecnológico que el A1 y B1. La sociedad se orienta hacia una protección ambiental y equidad social, en ámbito local y regional.

Figura 2. **Medias multimodelo y rangos evaluados del calentamiento de la superficie**



Fuente: IPCC. Climate change 2007. *The Physical Science Basis*. p. 14.

Las líneas muestran los promedios de cambio de temperatura global, la línea naranja muestra el cambio en caso de mantenerse constantes las concentraciones atmosféricas de GEI a niveles del 2000. Las demás proyecciones corresponden a mayores concentraciones atmosféricas de GEI.

2.6.3. Escenarios elaborados para Guatemala

Tanto los escenarios elaborados para las comunicaciones nacionales sobre cambio climático como los escenarios del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) utilizan datos de la climatología real de Guatemala, con el modelo climatológico de dicha identidad de 1960 a 2011, con una resolución de 90 metros.

2.6.3.1. Primera comunicación nacional sobre cambio climático

Los escenarios de emisiones seleccionados para estimar los cambios de temperatura media global fueron el IS92c, el IS92a y el IS92e, elaborados por el IPCC. Los IS92 son escenarios de “no intervención” pues no consideran políticas de intervención orientadas a mitigar el cambio climático, pero sí incluyen políticas encaminadas a reducir otros problemas ambientales relacionados, como la lluvia ácida o la contaminación atmosférica.

Los escenarios IS92c e IS92e producen perfiles de futuras emisiones más extremas, mientras que el IS92a produce un escenario intermedio. Permite comparaciones con estudios de otros países y considera sensibilidades climáticas altas, medias y bajas.

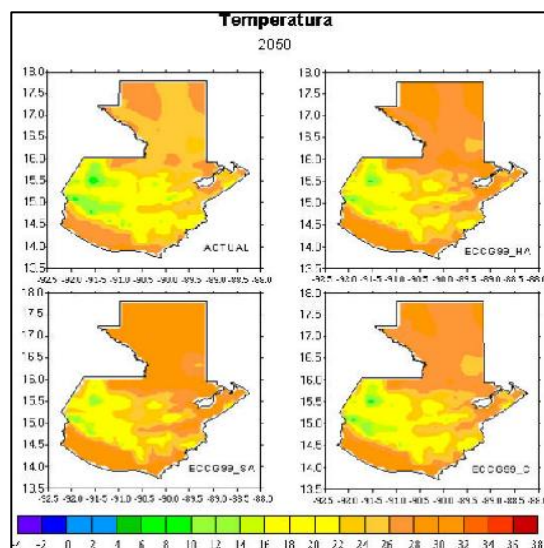
Los modelos de circulación fueron seleccionados por cubrir el mayor rango de posibles cambios futuros del clima. Los modelos HADCM2, el UKHI y el ECHAM3TR reflejan el mayor rango de incertidumbres asociadas con las proyecciones de los MCG para el caso guatemalteco.

Tabla I. **Escenarios de emisión, sensibilidad climática y MCG**

Escenario climático		Escenario de emisión	Sensibilidad climática	Modelo de circulación general
Húmedo bajo	ECCG_HB	IS92c	Baja	UKHI
Húmedo alto: optimista	ECCG_HA	IS92e	Alta	UKHI
Seco bajo	ECCG_SB	IS92c	Baja	HADCM2
Seco alto: pesimista	ECCG_SA	IS92e	Alta	HADCM2
Central: central	ECCG_C	IS92a	Media	ECHAM3TR

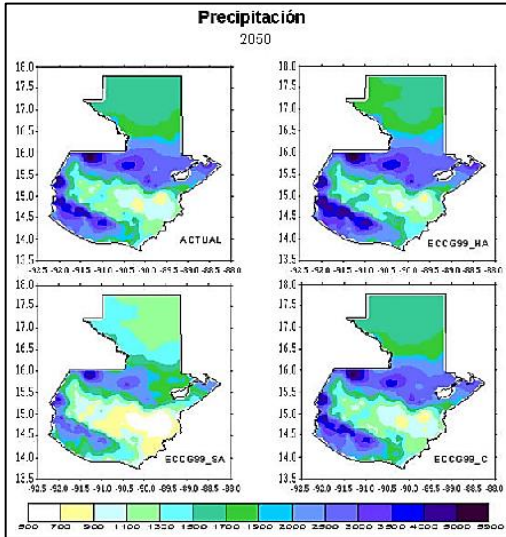
Fuente: MARN. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 51.

Figura 3. **Escenario de temperatura**



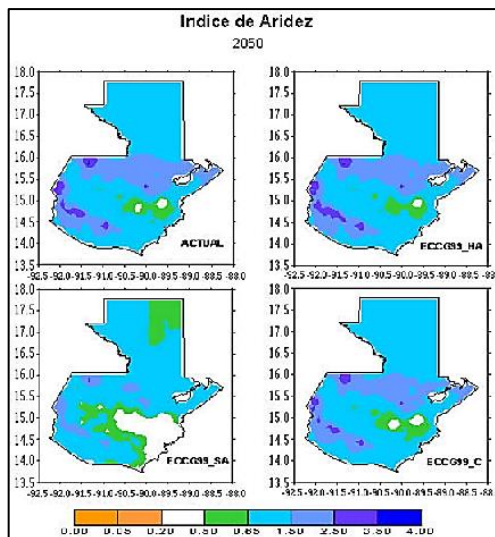
Fuente: MARN. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 54.

Figura 4. Escenario de precipitación



Fuente: MARN. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 56.

Figura 5. Escenario del índice de aridez

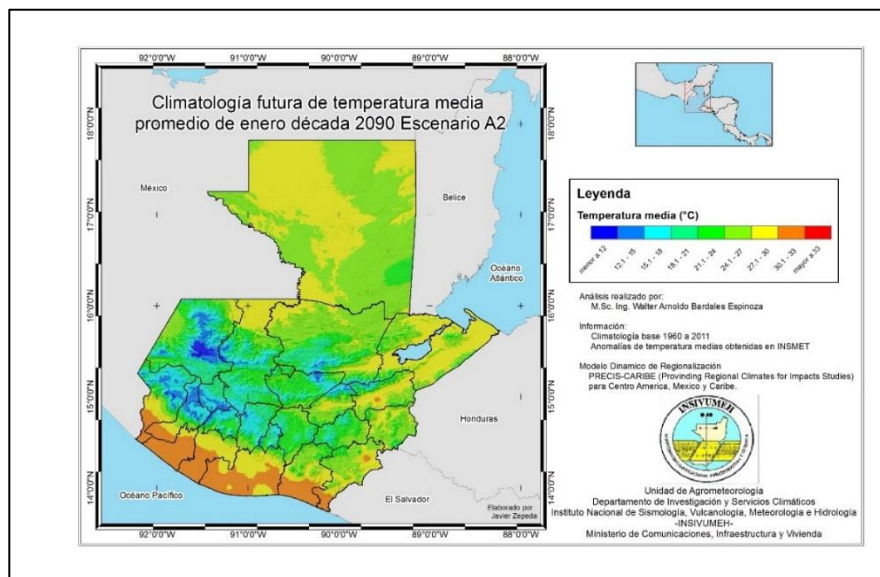


Fuente: MARN. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 57.

La temperatura refleja un aumento entre 0,5 °C escenario optimista y 3,3 °C escenario pesimista; se presenta reducción promedio de la precipitación intensificando periodos de ondas cálidas, expansión de áreas semiáridas por el aumento de temperatura y consecuente aumento de la evapotranspiración.

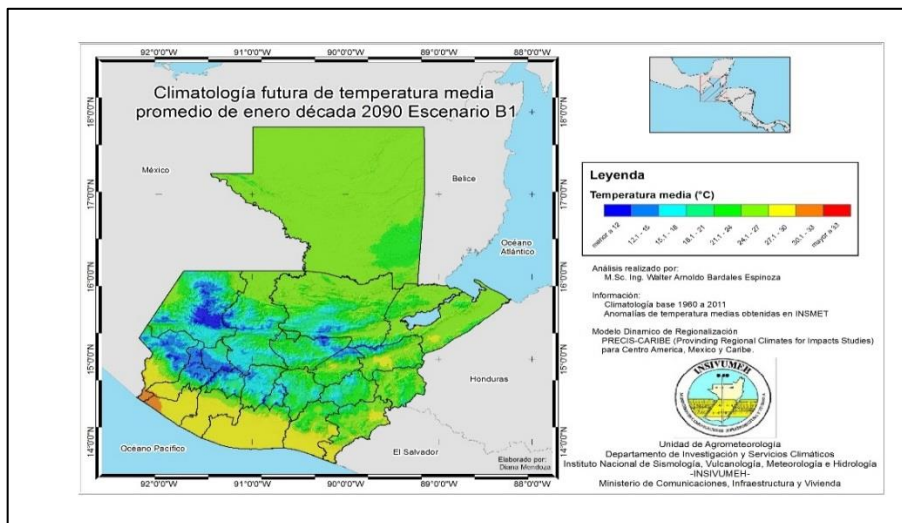
Los escenarios de cambio climático realizados por el Departamento de Investigación y Servicios Climáticos Unidad de Agrometeorología se basan en el modelo climático regional PRECIS, adecuado para la región del Caribe, además de la climatología real de 1960 a 2011.

Figura 6. **Escenario A2 temperatura media, enero, década 2090**



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, unidad de Agrometeorología.

Figura 7. Escenario B1 temperatura media, enero, década 2090



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, unidad de Agrometeorología.

2.7. Efecto del cambio climático sobre el recurso hídrico

El recurso hídrico es el factor más crítico asociado al cambio climático, el cual tiene consecuencias sobre el ciclo global del agua, el mismo es esencial para todos los sectores y regiones. Esto conlleva a problemas con la disponibilidad del recurso, la cantidad y calidad. Podría presentarse una disminución de los recursos hídricos por sequías, y a la vez aumentó en el número e intensidad de tormentas. Estas sequías y tormentas afectarían la producción agraria y alimenticia, exacerbando la hambruna y las enfermedades. La magnitud de los impactos varía según el escenario a utilizar, pero siempre tendrá graves efectos no solo sobre la sociedad, sino sobre los ecosistemas.

Se presentan posibles cambios en los sistemas de agua superficial y subterránea, causados por los cambios en las temperaturas,

evapotranspiración, escorrentía y precipitación. Los cambios en los caudales de los ríos también se ven afectados por los patrones de circulación atmosférica. A escala mundial se ha presentado un aumento de la escorrentía en regiones como China y Finlandia, sobre todo en latitudes más altas, y una disminución en regiones como el sur de América Latina, sur de Europa y África Occidental. Los niveles de agua subterránea en varios acuíferos indican un decrecimiento, esto es atribuido mayormente a la explotación de dichos acuíferos a una tasa mayor que su recarga natural; sin embargo, los cambios en las variables del ciclo hidrológico afectan la disponibilidad de agua subterránea.

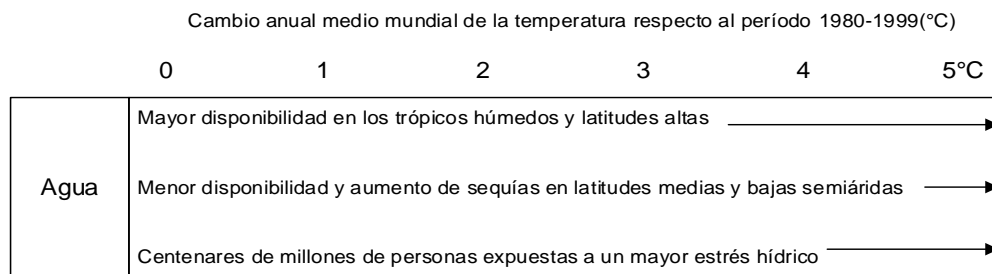
Los posibles impactos sobre la calidad del agua implican afecciones sobre los organismos de ecosistemas de agua dulce, así como migraciones. Se ha presentado estratificación en varios lagos con una disminución de la concentración de nutrientes en la capa superficial y prolongada disminución de oxígeno en la capa inferior, esto reduce el movimiento del agua a través de la termoclina inhibiendo los nutrientes para la red alimenticia. Han aumentado concentraciones de sulfatos, disminución en el nitrógeno inorgánico disuelto e incremento de pH en lagos de agua suave. La erosión ha aumentado debido a cambios de uso de suelo, la erosión implica turbiedad, afectando el consumo humano.

El cambio climático probablemente causaría cambios en la intensidad y frecuencia de las inundaciones, que producen largos periodos de precipitación, deshielo, rotura de presas, reducción de transporte debido a deslizamientos o barreras, afectando la producción agrícola, infraestructura y la contaminación de cuerpos hídricos. Son dependientes de la intensidad de precipitación, duración, volumen, de su fase, ya sea lluvia o nieve, condiciones de los ríos y drenaje de las cuencas, humedad, urbanización y estructuras como diques, presas y embalses.

Con las sequías se presentaría disminución de la precipitación y a la vez incremento de temperaturas, intensificando la evapotranspiración, y disminuyendo la humedad del suelo. Desarrollándose con mayor intensidad en los trópicos. Sus consecuencias son: hambruna, epidemias, incendios, disminución de producción agrícola, suministro hídrico y energético.

La pérdida de glaciares afectará la disponibilidad de agua dulce, reduciendo la disponibilidad del recurso y capacidad hidroeléctrica del mismo.

Figura 8. Impactos asociados al cambio promedio mundial de temperatura



Fuente: IPCC. *Cambio climático 2007. Informe de síntesis*. p. 10.

2.8. Área de estudio

El área de estudio para esta investigación fue el departamento de Chimaltenango.

2.8.1. Localización

Chimaltenango se encuentra a 54 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala, en la zona centro-occidente. Cuenta con una extensión territorial de

1979 km², lo que constituye el 1,8 % del país, ocupa el decimosexto lugar en amplitud territorial de la República. Limita al norte con los departamentos de El Quiché y Baja Verapaz; al este con Guatemala y Sacatepéquez; al sur con Escuintla y Suchitepéquez, y al oeste con Sololá. Su altitud promedio es de 1890 metros sobre el nivel del mar, la más baja se ubica en San Miguel Pochuta (de 700 a 1,200 pies), y la más alta en Tecpán Guatemala (de 7,200 a 7,700 pies). Su latitud es de 14°39'20" y su longitud de 90°47'20".

Pertenece al complejo montañoso que se desprende de la Cordillera de Los Andes, en el departamento se ubican los volcanes de Acatenango y Fuego. Las zonas de vida del departamento son el bosque húmedo y el bosque montano.

2.8.2. División político administrativa

El departamento de Chimaltenango se encuentra integrado por 16 municipios: Chimaltenango, San José Poaquil, San Martín Jilotepeque, San Juan Comalapa, Santa Apolonia, Tecpán Guatemala, Patzún, Pochuta, Patzicía, Santa Cruz Balanyá, Acatenango, San Pedro Yepocapa, San Andrés Itzapa, Parramos, Zaragoza y El Tejar ⁽⁵⁾.

2.8.3. Clima

Chimaltenango posee un clima templado que oscila entre los 12 °C y 24 °C. Tornándose frío en los meses de noviembre, diciembre y enero. Se marcan dos estaciones en el año: invierno y verano.

⁵ Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. *Plan de desarrollo departamental de Chimaltenango*. p. 11.

2.8.3.1. Clasificaciones climáticas

En Guatemala se utilizan dos clasificaciones climáticas: el sistema Thornwhite y Köppen.

- Sistema Thornwhite: BB'2, bosque húmedo templado.
- Sistema Köppen: Cwbig, templado húmedo con invierno benigno, presencia de lluvias en verano, verano fresco, isotermal, con diferencia en temperaturas entre el mes más frío y el caliente < 5 °C.

2.8.4. Recurso hídrico

Chimaltenango se encuentra en la parte alta del río Achíguate y del río Motagua. Los principales ríos son: El Coyolate, Madre Vieja, Pixcayá, Grande o Motagua y Aguacalate o de la Virgen. Los ríos secundarios son: Agua Escondida, Xayá, Santo Domingo, Pantaleón, Los Encuentros, Nicán y Guexá. Cuenta con un total de 221 ríos, 152 riachuelos, 79 quebradas y 12 lagunas.

Las cuencas en el departamento son: la del río Motagua, que cuenta con la mayor superficie, siendo beneficiados los municipios de San Martín Jilotepeque, Tecpán, San José Poaquil, Comalapa y Zaragoza. La cuenca del río Coyolate, siendo los municipios más beneficiados Yepocapa, Acatenango, San Miguel Pochuta y Patzún. La cuenca del río Madre Vieja beneficia a los municipios de Patzún y Tecpán, y la del río Achiguate a los municipios de San Andrés Itzapa y Parramos.

Las subcuencas de Xayá y Pixcayá son de gran importancia pues abastecen de agua a la ciudad capital con una producción diaria de 140 000 m³, por medio del acueducto Xayá-Pixcayá que abastece a la planta de tratamiento

Lo de Coy, produciendo el 39 % del agua potable que distribuye EMPAGUA en la ciudad de Guatemala, abasteciendo a las zonas 1, 2, 3, 7, 8, 11, 12 y 19 totalmente, y a las zonas 4, 6 y 18 parcialmente. Abarca el 10,7 % del territorio departamental, dentro de 9 municipios con una extensión de 21 090 hectáreas.

Tabla II. **Tratamiento de agua superficial (volumen anual en metros cúbicos)**

Año	Planta de tratamiento	Ríos Xayá y Pixcayá en m ³
2000	Lo de Coy	41 209 993
2001		37 864 356
2002		35 942 591
2003		34 212 509
2004		34 058 005
2005		37 495 964
2006		43 317 998
2007		43 318 164
2008		38 631 600
2009		43 226 090

Fuente: INE. *Compendio estadístico ambiental*. p. 34.

El uso del recurso indica una disponibilidad bruta de 1 641 020,600 m³ de agua al año: 1 281,28 m³ para uso agroindustrial; 21 651,61 m³ para embotelladoras y alimentos; 24 473,09 para el consumo de agua potable; y 6 667,98 para otro tipo de empresas ⁽⁶⁾.

⁶ INE. *Compendio estadístico ambiental*. p. 34.

2.8.5. Agua potable y saneamiento

Un 80,85 % de un total de 83,516 hogares en el 2002, cuentan con acceso al agua potable. Para el 2006 se dio un incremento al 88,8 %.

Tabla III. Acceso a agua potable en Chimaltenango

Código departamento	Departamento	Proporción de la población con acceso a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable					
		Año base: 1994	Última estación: 2006	Meta nacional	Meta departamental	Brecha nacional	Brecha departamental
4	Chimaltenango	75,3	88,8	83	87,63	-5,8	-1,21

Fuente: SEGEPLAN. *Plan de desarrollo departamental de Chimaltenango*. p. 36.

El abastecimiento de agua potable mediante fuentes mejoradas supera a la meta departamental en -1,21, lo que indica que la mayor parte de la población cuenta con este servicio; existen ciertos municipios que no tienen acceso al agua potable, por lo cual se debe trabajar en la cobertura y calidad del servicio.

El 81 % de las viviendas cuenta con letrinas o inodoros y el 40 % con servicios de alcantarillado. De un total de 83 516 viviendas el 64.5 % cuenta con servicio de saneamiento básico.

Tabla IV. **Acceso a servicios de saneamiento en Chimaltenango**

Código departamento	Departamento	Proporción de la población con acceso a servicios de saneamiento mejorados					
		Año base: 1994	Última estación: 2006	Meta nacional	Meta departamental	Brecha nacional	Brecha departamental
4	Chimaltenango	28,5	58,3	67,6	64,23	9,3	5,89

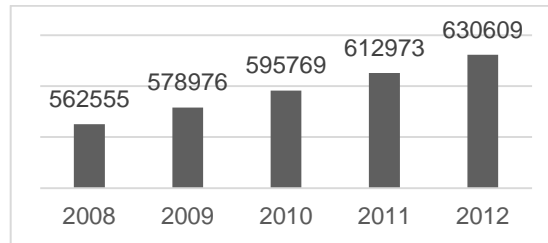
Fuente: SEGEPLAN. *Plan de desarrollo departamental de Chimaltenango*. p. 37.

2.8.6. Demografía

La población es de cerca de un millón de habitantes, de los cuales el 79 % son indígenas, principalmente de la etnia kaqchikel. Un 48,8 % de la población se ubica en el área urbana y el 51,2 % en el área rural. Las mujeres representan el 51 % y los hombres el 49 %. El mayor porcentaje de la población lo constituyen las mujeres; predominan las edades de 0 a 24 años, representadas por la población infantil y juvenil. El crecimiento poblacional aumenta la demanda de cobertura de servicios básicos y de fuentes de empleo ⁽⁷⁾.

⁷ SEGEPLAN. *Plan de desarrollo departamental de Chimaltenango*. p. 37.

Figura 9. **Serie histórica: número de habitantes 2008-2012**



Fuente: INE. *Caracterización departamental: Chimaltenango 2012*. p. 13.

2.8.7. Aspectos ambientales

Debido a que Chimaltenango está situado sobre la Sierra Madre en el altiplano central, situada al norte del departamento, se cuenta con elevadas montañas y cerros, que le otorgan al terreno una formación orográfica variable, con barrancos, valles y grandes llanuras fértiles, lo cual propicia que su principal actividad económica sea la agricultura.

Se divide en tres zonas topográficas: la primera formada por tierras bajas del norte en el valle del río Motagua, unido al Pixcayá, con alturas entre los 650 metros; difiere de las demás comunidades, pues predomina vegetación de chaparral espinoso, cactus y otras plantas punzantes. La segunda zona, intermedia y más extensa se encuentra a una altura promedio de 200 msnm, predominando los pinos, cipreses y álamos. La tercera zona, con gran vegetación de la selva subtropical húmeda, que corresponde al extremo meridional, hacia el este del río Madre Vieja y al sur de los municipios de Yepocapa y Pochuta, también cuenta con la calurosa sabana tropical húmeda.

En su territorio se encuentran los volcanes de Fuego (altura de 3,763 msnm) y Acatenango (cuenta con dos picos; 3,975 msnm y 3,880 msnm).

2.8.7.1. Áreas protegidas

En departamento cuenta con una extensión de 200 km² de áreas protegidas, siendo el municipio de Patzún el que posee la mayor extensión con 57.76 km².

Tabla V. **Áreas protegidas en Chimaltenango**

Área protegida	Categoría de manejo	Tipo de categoría	Extensión unitaria (hectáreas)	Año declaratoria	Dentro de otra área protegida
Los Aposentos	Parque nacional	Tipo I	15, 00	1955	N/A
Volcán Acatenango	Zona de veda definitiva	Sin categoría	7 100, 00	1956	N/A
Volcán Fuego	Zona de veda definitiva	Sin categoría	12 150, 00	1956	N/A
Iximché	Monumento cultural	Tipo II	50, 00	1964	N/A
Astillero municipal de Tecpán	Parque regional municipal	Tipo IV	1 706, 25	2000	N/A
El Retiro	Reserva natural privada	Tipo V	301, 50	2001	N/A
Molino Helvetia	Reserva natural privada	Tipo V	175, 65	2004	N/A

Continuación de la tabla V.

San Bernardino E. C. A Xeyujú	Reserva natural privada	Tipo V	625, 05	2006	Reserva de uso múltiple cuenca del lago de Atitlán
Xecanac	Reserva natural privada	Tipo V	16, 32	2006	N/A
Monserate	Reserva natural privada	Tipo V	45, 00	2007	N/A
Los Laureles	Reserva natural privada	Tipo V	39, 00	2008	N/A
La Soledad y anexos	Reserva natural privada	Tipo V	22, 00	2008	N/A
Finca Chirijuyú	Reserva natural privada	Tipo V	178, 00	2009	N/A
Astillero Pajales, astillero Chicorona, astillero Grande y astillero Pequeño	Parque regional municipal	Tipo IV	153, 73	2010	N/A
Santa Rosa Sumatán	Reserva natural privada	Tipo V	629, 4187	2010	N/A
El Encanto de Tecpán	Reserva natural privada	Tipo V	16, 40	2010	N/A
Astillero municipal Volcán de Acatenango	Parque regional municipal	Tipo IV	890, 55	2011	Zona de vida Volcán Acatenango
El Pacaño	Reserva natural privada	Tipo V	48, 22	2012	N/A

Fuente: Conap. *Listado de áreas protegidas*. www.conap.gob.gt. Consulta: 02 abril 2014.

Muchas de estas áreas protegidas son importantes zonas de captación del recurso hídrico, principalmente el Parque Nacional Los Aposentos, parque regional astillero municipal de Tecpán, y las zonas de veda de los volcanes de Fuego y Acatenango.

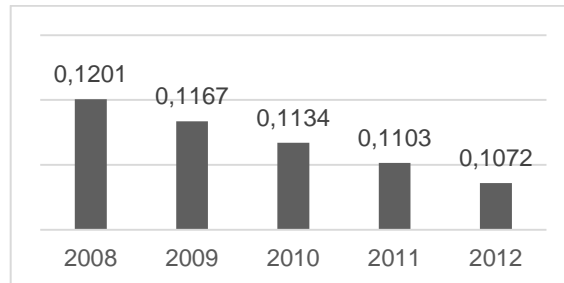
2.8.7.2. Cobertura boscosa

El departamento posee variedad de cobertura boscosa, se encuentran áreas sin bosque, el bosque abierto comparte el área con cultivos diversos, anuales, perennes o con pastos, y bosques con cobertura forestal del suelo. Predominan en Chimaltenango, los bosques mixtos, las áreas de hortalizas, los bosques latifoliados y áreas cafetaleras.

Debido a la creciente degradación ambiental por contaminación descontrolada, así como la explotación de los recursos naturales, se estableció un proyecto de manejo de la montaña de El Soco, situada en los municipios de San Andrés Itzapa, Zaragoza, Patzicía y Acatenango, para abastecer de agua a 5 comunidades. Se trata de un bosque nuboso de altura que contribuye a la recarga hídrica de más de 80 fuentes de agua superficial y acuíferos, con una recarga de más de 4 millones de m³ anuales.

Las hectáreas de bosque *per cápita* es la superficie de bosque disponible por año para cada habitante, en la figura se muestra cómo se ha presentado una disminución de 0,0130 hectáreas por habitante.

Figura 10. **Hectáreas de bosque per cápita 2008-2012**



Fuente: INE. *Caracterización departamental Chimaltenango 2012*. p. 52.

2.8.8. Aspectos socioeconómicos

Las principales actividades productivas son la agricultura y la industria. La agricultura se desarrolla ampliamente por las condiciones topográficas del departamento. Entre los productos agrícolas de la región se encuentran el maíz, el frijol de Acatenango y de Parramos, así como el café de Pochuta, caña de azúcar, trigo y frutas de todo clima. Además, en los últimos años, este territorio ha sobresalido por la siembra de hortalizas, con las que se surte un gran porcentaje de las existencias en los supermercados del país. Entre su producción pecuaria se encuentran la ganadería de tipo vacuno, lanar, porcino y equino, produciendo lácteos y embutidos. Se da la crianza de aves de corral. La industria produce hilados, tejidos y maquiladoras, siendo la producción textil uno de los mayores ingresos a partir de exportaciones.

La producción de arveja china representa el 69 % de la producción obtenida a nivel nacional, el güicoy representa el 38 % de la producción nacional; asimismo el repollo y aguacate son de alta producción.

El sector comercial, servicios financieros, turísticos, transporte no constituyen los principales motores económicos, sin embargo están presentes en el departamento ⁽⁸⁾.

El municipio con el mayor porcentaje de pobreza rural es Pochuta, mientras que el municipio con la menor tasa fue el de Santa Cruz Balanyá.

⁸ Fuente: SEGEPLAN. *Plan de desarrollo departamental de Chimaltenango*. p. 37.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Las variables se dividen en independientes y dependientes.

3.1.1. Variables independientes

- Variables del ciclo hidrológico:
 - Precipitación: cantidad de precipitación en mm por día, así como promedios mensuales, por medio de la metodología del modelo futuro.
 - Evapotranspiración: suma de los fenómenos de evaporación del suelo y de la transpiración de las plantas en milímetros, por medio de la metodología del modelo futuro.
 - Escorrentía: cantidad de escorrentía en milímetros, por medio de la metodología de balance hídrico de suelos.
 - Infiltración: cantidad que agua que se infiltra en el suelo, por medio de la metodología de propiedades del suelo.

3.1.2. Variables dependientes

Balance hídrico, cuantificando la variación de almacenamiento, por medio de la metodología Schosinsky.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Departamento: Chimaltenango

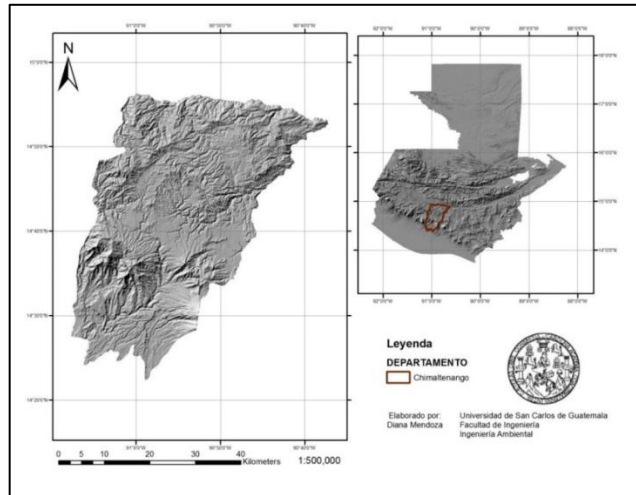
La red hidrometeorológica:

- Alameda ICTA
 - San Martín Jilotepeque
 - Santa Cruz Balanyá
 - Santa Margarita, Pochuta
 - Volcán de Fuego, Yepocapa
 - Volcán de Fuego, Observatorio 2, Yepocapa

- Estaciones en los alrededores:
 - Chinique
 - Santa María El Tablón
 - El Capitán, San Lucas Tolimán
 - Suiza Contenta

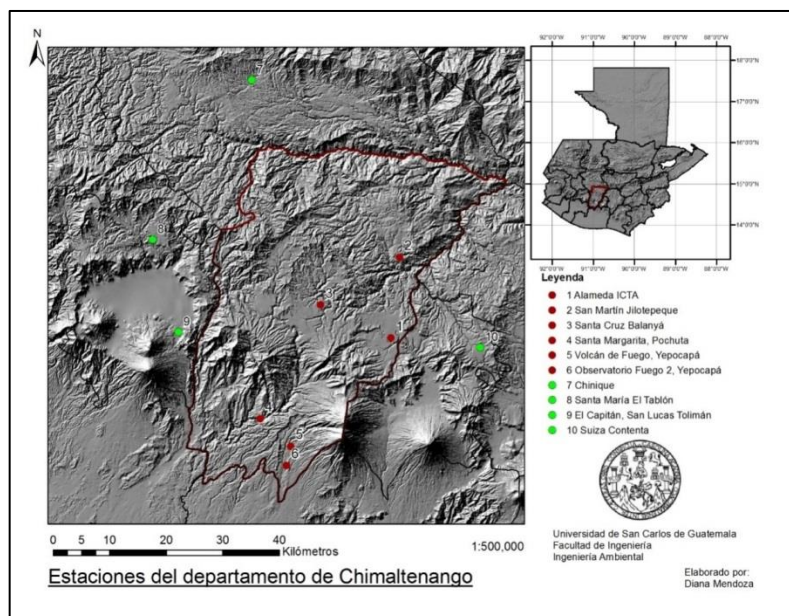
Información histórica correspondiente a los años 1960 a 2011.

Figura 11. **Mapa de ubicación, departamento de Chimaltenango**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 12. **Mapa de estaciones para el departamento de Chimaltenango**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

3.3. Técnicas

Las técnicas pueden ser cualitativas o cuantitativas.

3.3.1. Técnica cualitativa

Descripción de los impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos bajo escenarios de emisión:

- A2: describe un mundo heterogéneo, valores intermedios en cuanto al crecimiento de gases de efecto invernadero, y crecimiento poblacional elevado. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional; el crecimiento económico *per cápita* y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- B1: describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanzó su nivel más alto a mediados del siglo pasado para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. Relevancia en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.

Corridas del modelo climático regional PRECIS para la región del Caribe, que proyectan el cambio climático con el modelo climático regional HADRCM, fueron desarrolladas por el Hadley Center, de la Oficina de Meteorología de Reino Unido, que simula mejor los episodios de sequía durante la época lluviosa en la región de Centroamérica y el Caribe.

3.3.2. Técnica cuantitativa

- Balance hídrico: a partir de la metodología de Schosinsky: las entradas (precipitación pluvial, aportes) y las salidas (evapotranspiración real, escorrentía y retención).
- Infiltración: el coeficiente de infiltración por la textura del suelo (kfc) determina la infiltración de la precipitación:

Tabla VI. **Coeficiente de infiltración por textura**

Textura	kfc
Arcilla compactada impermeable	0,10
Combinación de limo y arcilla	0,20
Suelo limo arenoso no muy compacto	0,40

Fuente: SABORÍO, Javier. *Elaboración del mapa de precipitación que infiltra hacia la recarga hídrica para Centro América*. p. 33.

El coeficiente de infiltración por la pendiente (Kp) se determina mediante:

Tabla VII. **Coeficiente de infiltración por pendiente**

Categoría	Rango de pendiente (%)	Kp
Muy plana	0,00 – 0,06	0,30
Plana	0,3 – 0,4	0,20
Algo plana	1 - 2	0,15
Promedio	2 - 7	0,10
Fuerte	>7	0,06

Fuente: SCHOSINSKY, Gunter. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 16.

El coeficiente de infiltración por cobertura vegetal (K_v) se determina mediante:

Tabla VIII. **Coeficiente de infiltración por cobertura vegetal**

Categoría	K_v
Ciudades o infraestructura	0
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Fuente: SCHOSINSKY, Gunter. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. p. 16.

Estos tres coeficientes conforman el coeficiente de infiltración del suelo (C_i):

$$\begin{aligned} \text{Si } k_p + k_v + k_{fc} > 1, \quad C_i &= 1 \\ \text{Si } k_p + k_v + k_{fc} \leq 1, \quad C_i &= k_p + k_v + k_{fc} \end{aligned}$$

Donde

C_i = coeficiente de infiltración [adimensional]

k_p = fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional]

k_v = fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional]

k_{fc} = fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional]

El coeficiente de infiltración (C_i) no debe ser mayor de 1; en este caso se le asigna a C_i el valor de 1.

Para generar la pendiente se hizo uso del modelo de elevación digital a 90 metros en formato ráster; para la cobertura vegetal se utilizó un formato ráster de uso de suelo, y para la textura de suelo se utilizó información del estudio semidetallado de suelos del departamento de Chimaltenango, del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.⁽⁹⁾

Infiltración pluvial mensual

Para determinar la precipitación que infiltra mensualmente debe considerarse la precipitación mensual y el coeficiente de infiltración. La precipitación se obtuvo de datos meteorológicos proporcionados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

$$P_i = (C_i)(P)$$

Donde

P_i = precipitación que infiltra mensualmente al suelo [milímetros /mes]

C_i = coeficiente de infiltración [adimensional]

P = precipitación mensual [milímetros/mes]

⁹ Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Chimaltenango, Guatemala*. p. 46.

Escorrentía superficial

La escorrentía generada por la lluvia mensual se determina mediante la precipitación mensual y la infiltración.

$$ESC = P - Pi$$

Donde

ESC = escorrentía superficial [milímetros/mes]

P = precipitación [milímetros/mes]

Pi = precipitación que infiltra mensualmente al suelo [milímetros/mes]

Evapotranspiración:

$$ETP = \sqrt{12.5 * \sqrt{100 - HR} * 0,075 * 0,0075 * T_{med} * Ra}$$

Donde

ETP = evapotranspiración potencial [milímetros/mes]

HR = humedad relativa promedio mensual [porcentaje]

T_{med} = temperatura media mensual [Fahrenheit]

Ra = radiación extraterrestre [milímetros]

La temperatura se obtuvo de información meteorológica, la humedad relativa y radiación extraterrestre de formatos tipo ráster del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

La evapotranspiración es la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, junto con la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando los estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua.

Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere.

El coeficiente de humedad (Ch):

$$Ch = (\text{humedad de suelo} - \text{punto de marchitez}) / (\text{capacidad de campo} - \text{punto de marchitez})$$

La capacidad de campo y el punto de marchitez fueron obtenidos del estudio semidetallado de suelos del departamento de Chimaltenango ⁽¹⁰⁾.

Al iniciar un mes, el suelo tendrá una humedad inicial (h_{Si}). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (P_i) aumentaría la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Al no considerar la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes, sería (C_1):

$$C_1 = (h_{Si} - PM + P_i) / (CC - PM)$$

¹⁰ Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Chimaltenango, Guatemala*. p. 46.

Donde

$C1$ = coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración

h_{si} = humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial [milímetros]

PM = punto de marchitez [milímetros]

P_i = precipitación que infiltra [milímetros/mes]

CC = capacidad de campo [milímetros]

Al considerar que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes sería:

$$C2 = (h_{Si} - PM + P_i - ETR1) / (CC - PM)$$

$$ETR1 = (C1)(ETP)$$

Donde

$C2$ = coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración

$ETR1$ = evapotranspiración potencial real, considera la humedad correspondiente al coeficiente $C1$ [milímetros/mes]

ETP = evapotranspiración potencial [milímetros/mes]

El valor de $C1$ corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de $C2$, corresponde al coeficiente de humedad mínimo, pues considera la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo, $C1$. Por lo tanto, el coeficiente $C2$ se aproxima al coeficiente de humedad al

final del mes. Como la infiltración y la evapotranspiración ocurren durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; o sea, $(C1+C2)/2$; la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes dado es:

$$ETPR (mm/mes) = ((C1 + C2)/2) ETP$$

Donde

ETPR = evapotranspiración real tentativa promedio, durante el mes [milímetros /mes]

C1 = coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración

C2 = coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con *C1*

ETP = evapotranspiración potencial [milímetros/mes]

Ninguno de los coeficientes de humedad, *C1* y *C2*, pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. En caso que *C1* o *C2* sea mayor de 1, se tomará igual a 1. Si *C1* o *C2* son negativos se tomarán con valor de 0. La humedad disponible (*hD*), es aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar.

$$hD (mm/mes) = hSi + Pi - PM$$

Donde

hD = humedad disponible [milímetros /mes]

hSi = humedad de suelo inicial (al inicio del mes) [milímetros]

Pi = precipitación que infiltra [milímetros /mes]

PM = punto de marchitez [milímetros]

Si la humedad disponible es menor que la ETPR, la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, sino que evapotranspirará únicamente la humedad disponible, debido a que no hay suficiente humedad para evapotranspirar la cantidad de agua indicada en la ETPR. Sin embargo, si la humedad disponible (hD) es mayor que la cantidad de agua indicada en ETPR, la planta evapotranspirará la cantidad expresada en ETPR. Por lo tanto la evapotranspiración real será, evapotranspiración real:

$$Si ((C1 + C2)/2)ETP \leq hD, \quad ETR (mm/mes) = ((C1 + C2)/2)ETP$$

$$Si ((C1 + C2)/2)ETP > hD, \quad ETR (mm/mes) = hD$$

Donde

ETR = evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes
[milímetro/mes]

$C1$ = coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración
[adimensional]

$C2$ = coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con $C1$, [adimensional]

ETP = evapotranspiración potencial [milímetros/mes]

hD = humedad disponible [milímetro/mes]

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se debe conocer la humedad del suelo al final del mes, humedad de suelo final (hSf), la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo:

$$Si (hD + PM - ETR) < CC, \quad hSf = hD + PM - ETR$$

$$Si (hD + PM - ETR) \geq CC, \quad hSf = CC$$

Donde

hSf = humedad del suelo final (final de mes) [milímetros]

hD = humedad disponible [milímetro/mes]

PM = punto de marchitez [milímetro]

ETR = evapotranspiración real [milímetro/mes]

CC = capacidad de campo [milímetro]

También debe determinarse la humedad de suelo al inicio del mes, humedad inicial (hSi):

hSi = humedad de suelo final del mes anterior

hSi = humedad del suelo inicial (inicio de mes) [mm]

Déficit de capacidad de campo

Corresponde a la humedad en mm que falta para que la humedad del suelo alcance la capacidad de campo.

$$DCC = CC - hSf$$

Donde

DCC = déficit de capacidad de campo [milímetros]

CC = capacidad de campo [milímetros]

hSf = humedad del suelo al final del mes [milímetros]

Necesidad de riego

Cantidad de agua mediante riego que necesita el suelo por mes para mantenerlo a capacidad de campo y así obtener la máxima producción de un cultivo.

$$NR = DCC - ETR + ETP$$

Donde

NR = necesidad de riego mensual [milímetro/mes]

DCC = déficit de capacidad de campo [milímetro]

ETR = evapotranspiración real [milímetro /mes]

ETP = evapotranspiración potencial [milímetro /mes]

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

$$Rp = Pi + hSi - hSf - ETR$$

Donde

Rp = recarga potencial mensual en milímetro/mes

Pi = precipitación que infiltra en milímetro/mes

hSf = humedad del suelo al final del mes en milímetro

ETR = evapotranspiración real en milímetro/mes

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los escenarios de cambio climático realizados se basaron en el modelo climático regional PRECIS, adecuado para Guatemala. Se determinó la anomalía de las variables climáticas y, se sumó a la climatología real para el periodo 1960 a 2011.

Siendo el escenario A2 representativo de condiciones de aumento demográfico continuo, con corrientes tecnológicas fragmentadas, este presentó mayores afecciones sobre el recurso hídrico (figuras 13 a 20). Por el contrario, el escenario B1 representativo de condiciones más amigables con el medio ambiente, con conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad (figuras 21 a 28) presentó menores afecciones, aunque igualmente importantes.

Para ambos escenarios se observó la tendencia a la disminución de la recarga potencial de acuíferos determinada con la metodología de Schosinsky. Esta metodología desarrollada en Costa Rica, es aplicada ampliamente en Guatemala, por pertenecer ambos países al istmo centroamericano y por lo tanto, poseer características climáticas similares.

En la parte sur del departamento, correspondiente a la zona de captación del recurso hídrico de la vertiente del Pacífico, se observó mayor recarga, esto debido principalmente al tipo de geología presente, que ayuda al proceso de infiltración y por ende recarga de acuíferos, ya que se facilita el paso del agua a través del suelo hasta los estratos inferiores; por lo que es importante implementar medidas de protección de estas zonas para evitar la deforestación

y que se pierdan las zonas de recarga hídrica por el cambio de uso de suelo o urbanización.

Los escenarios de cambio climático son una herramienta para determinar alternativas con el fin de reducir la vulnerabilidad y mejorar la adaptación al cambio climático, las mismas deben acompañarse de un análisis costo-beneficio para establecer la estrategia adecuada. Por ello, es importante incentivar estudios sobre este tema, Guatemala es uno de los países más vulnerables al cambio climático y los impactos no solamente se traducen en costos económicos, sino también implican muertes.

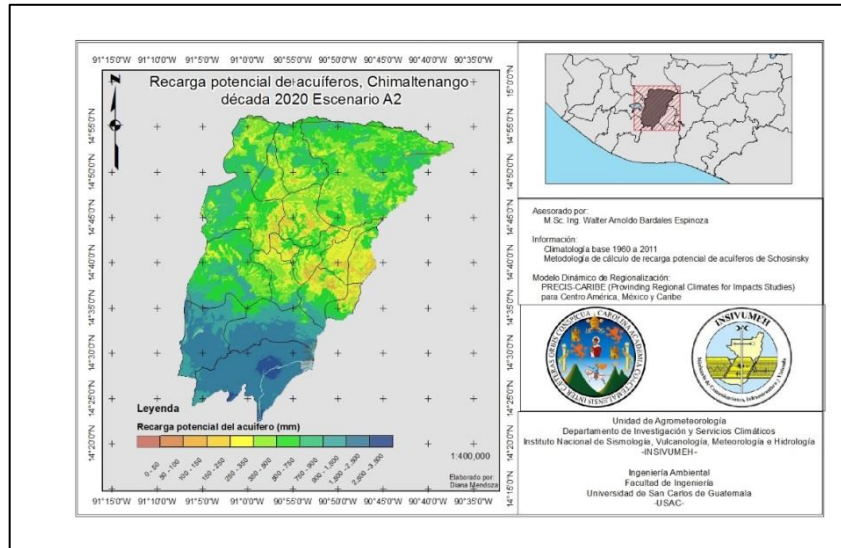
Esto se ha visto incrementado en los últimos años por el aumento en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos, como se evidenció con el huracán Mitch y Stan.

Estos mismos eventos extremos son parte de la variabilidad climática, por lo que una variable climática podría no seguir la tendencia, ya sea de aumento o disminución en el horizonte temporal.

4.1. Escenarios A2

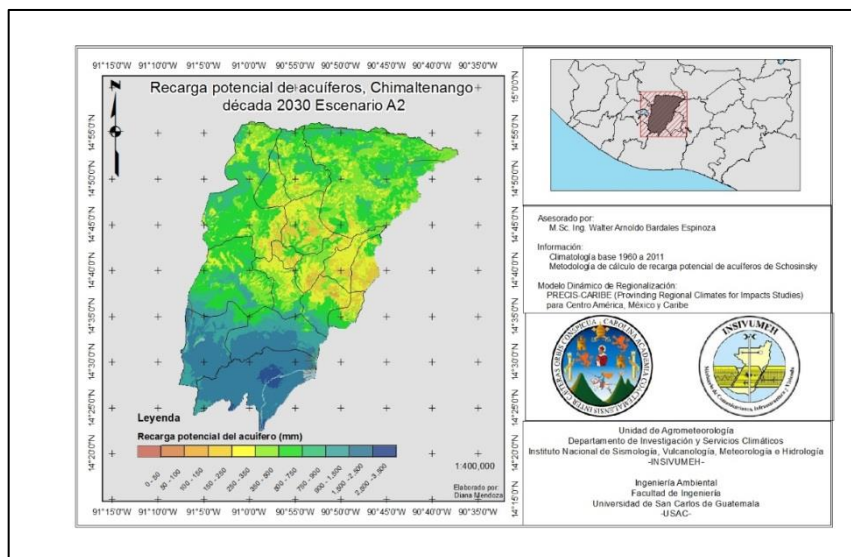
A continuación, en la figura 13 se presentan los escenarios A2.

Figura 13. Recarga potencial de acuíferos, década 2020



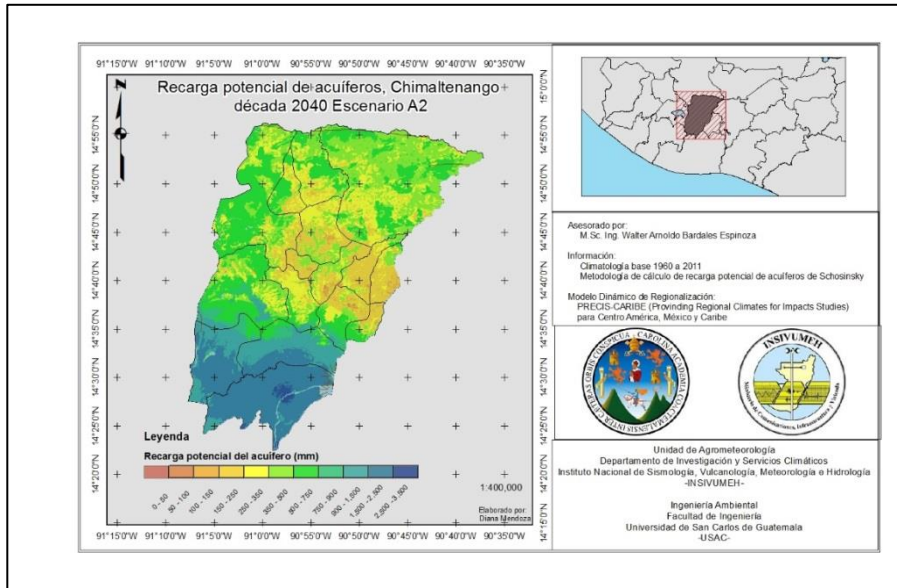
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 14. Recarga potencial de acuíferos, década 2030



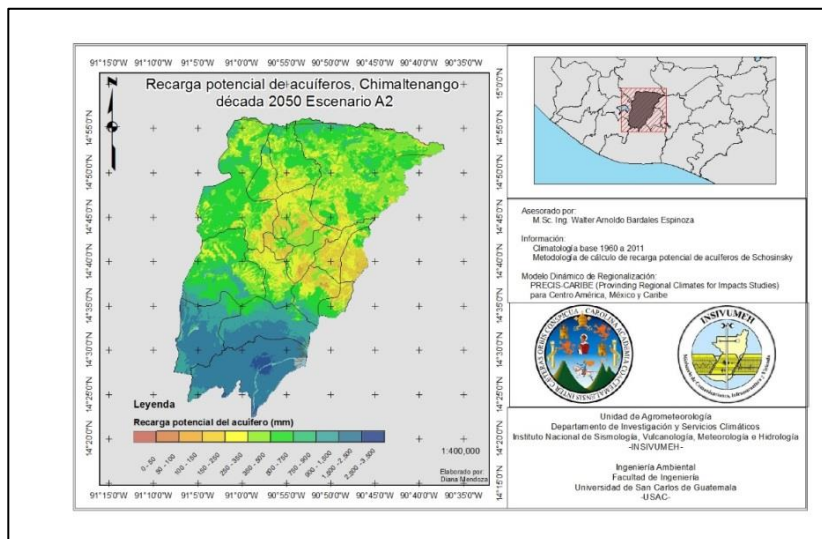
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 15. Recarga potencial de acuíferos década, 2040



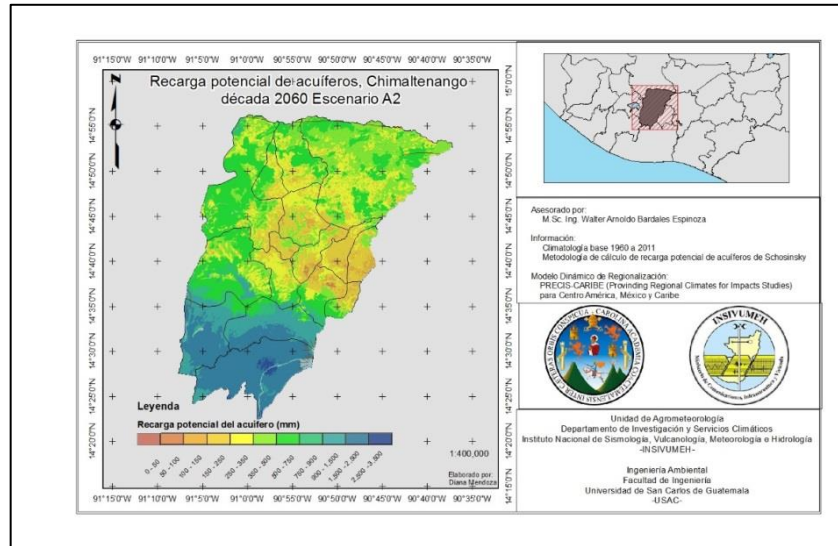
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 16. Recarga potencia de acuíferos, década 2050



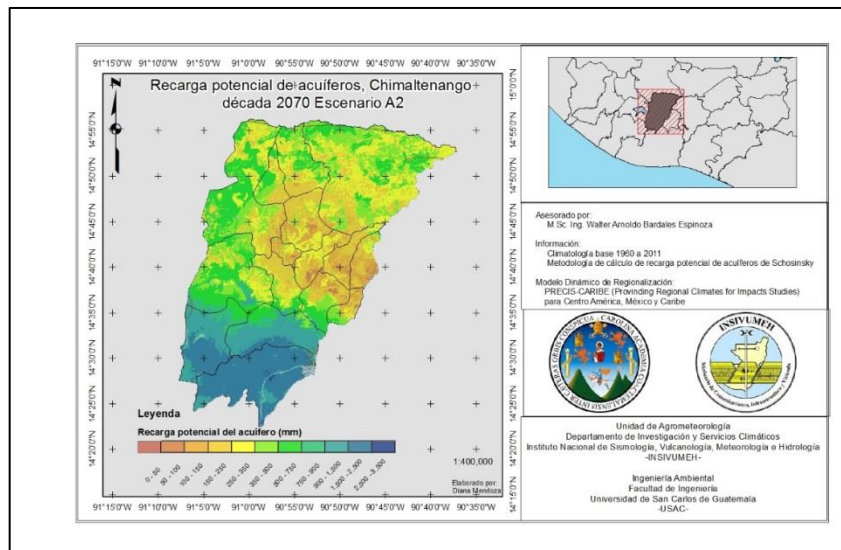
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 17. **Recarga potencial de acuíferos, década 2060**



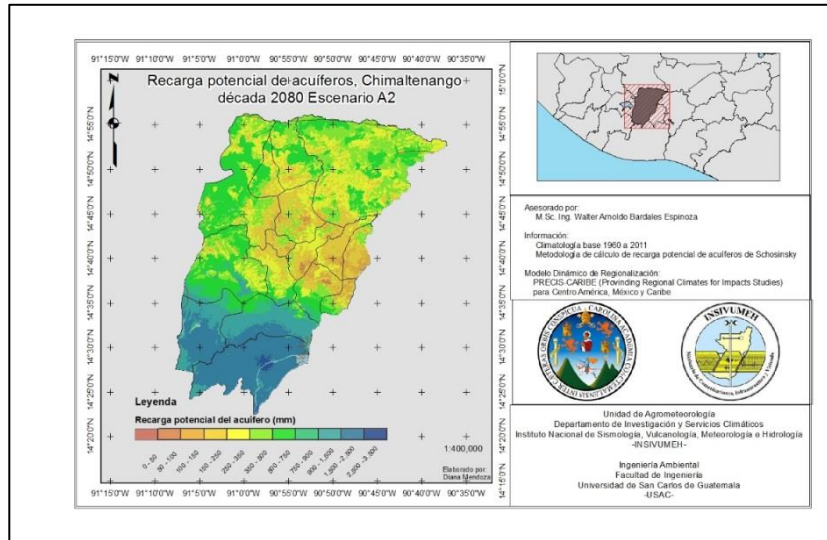
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 18. **Recarga potencial de acuíferos, década 2070**



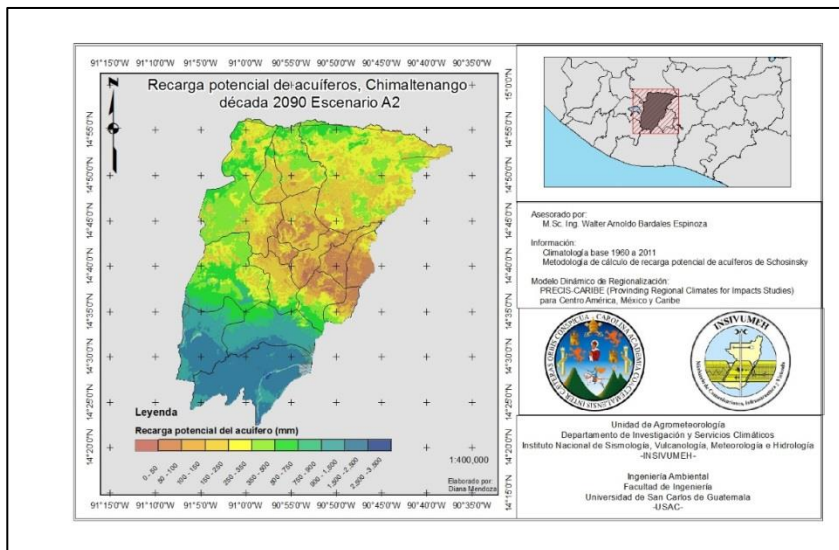
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 19. **Recarga potencial de acuíferos, década 2080**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 20. **Recarga potencial de acuíferos, década 2090**

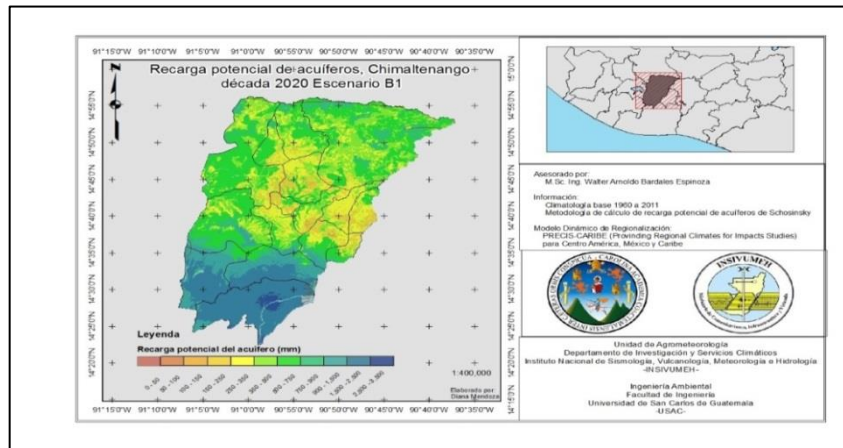


Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

4.2. Escenarios B1

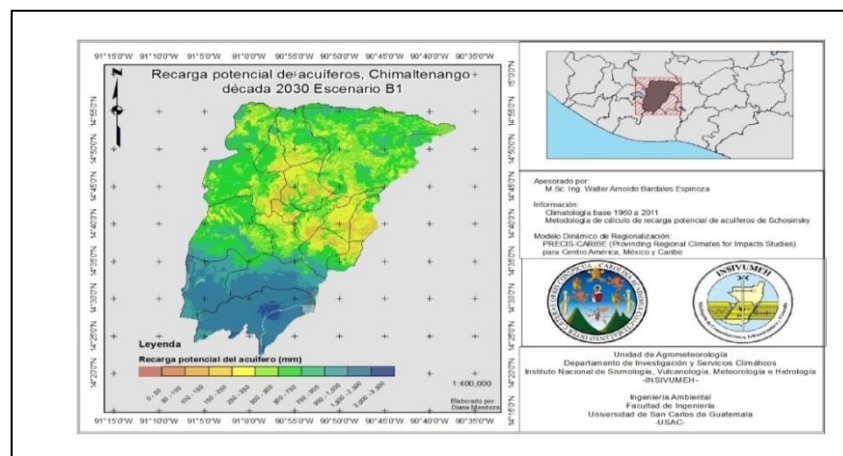
A continuación se presenta el escenario B1 en la figura 21.

Figura 21. **Recarga potencial de acuíferos, década 2020**



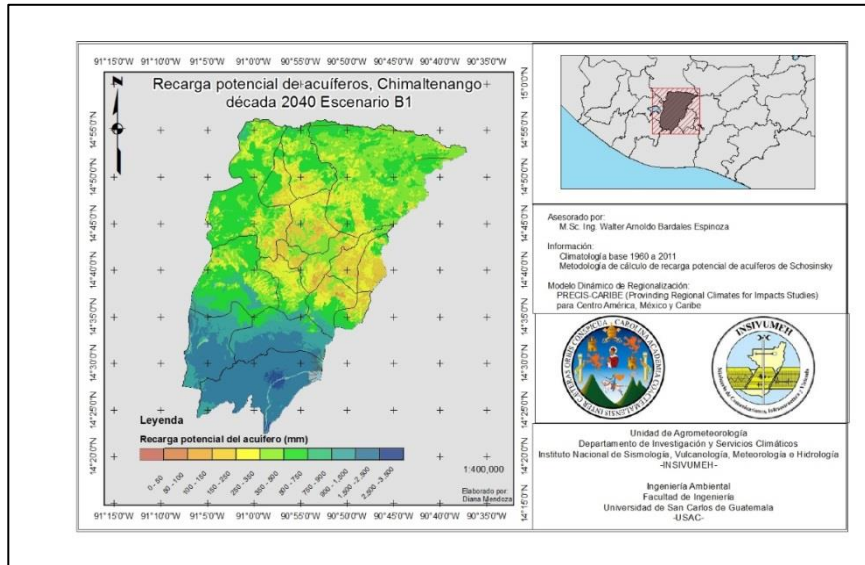
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 22. **Recarga potencial de acuíferos, década 2030**



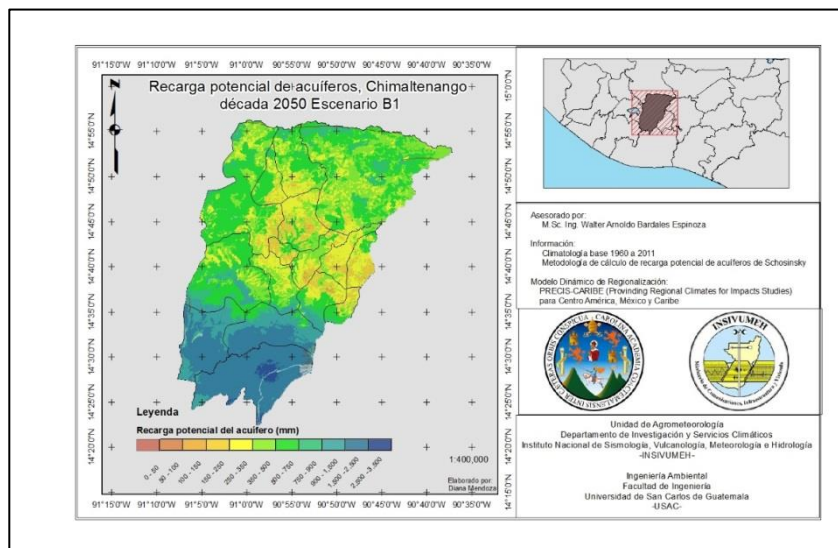
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 23. Recarga potencial de acuíferos, década 2040



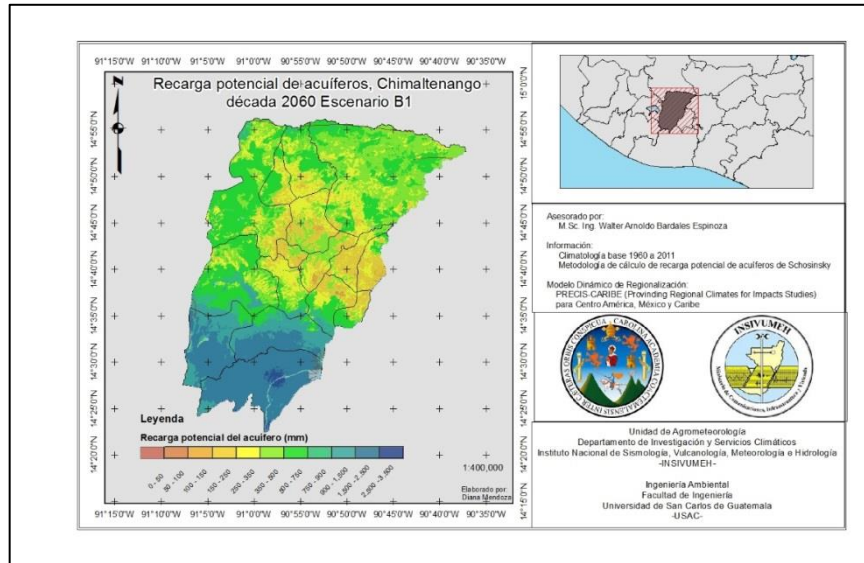
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 24. Recarga potencial de acuíferos, década 2050



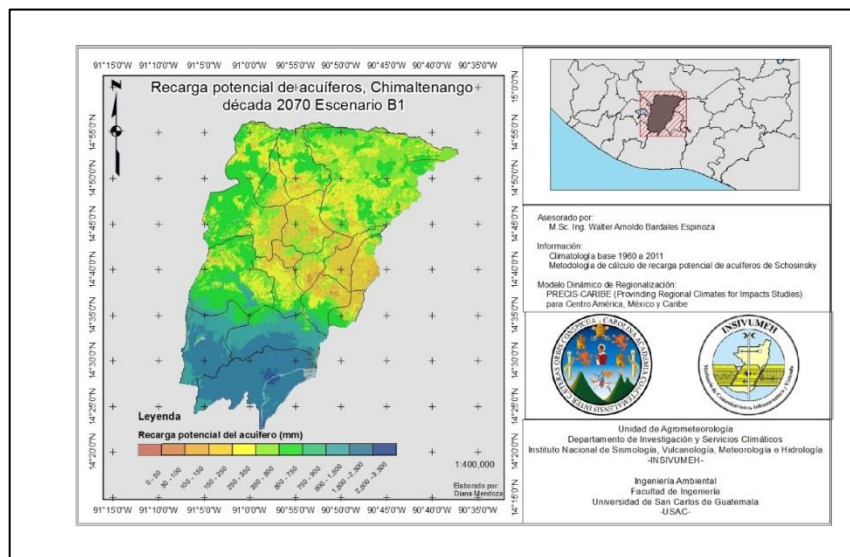
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 25. Recarga potencial de acuíferos, década 2060



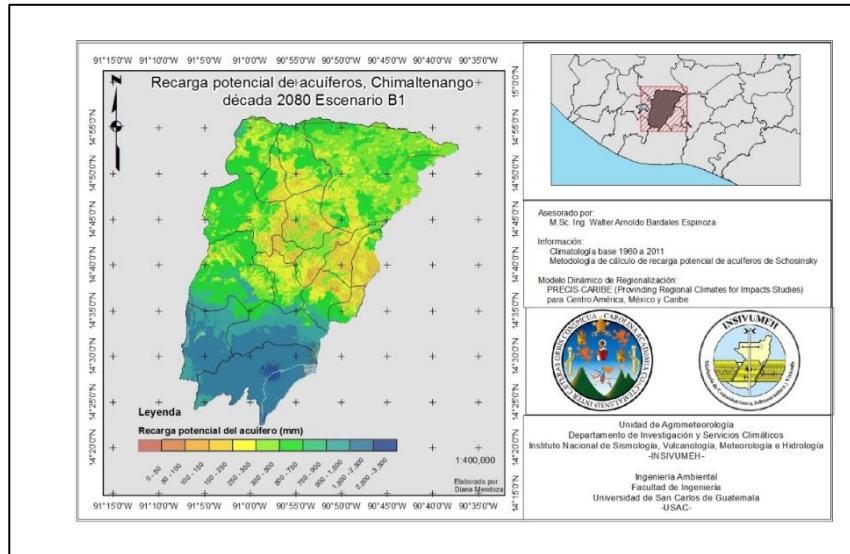
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 26. Recarga potencial de acuíferos, década 2070



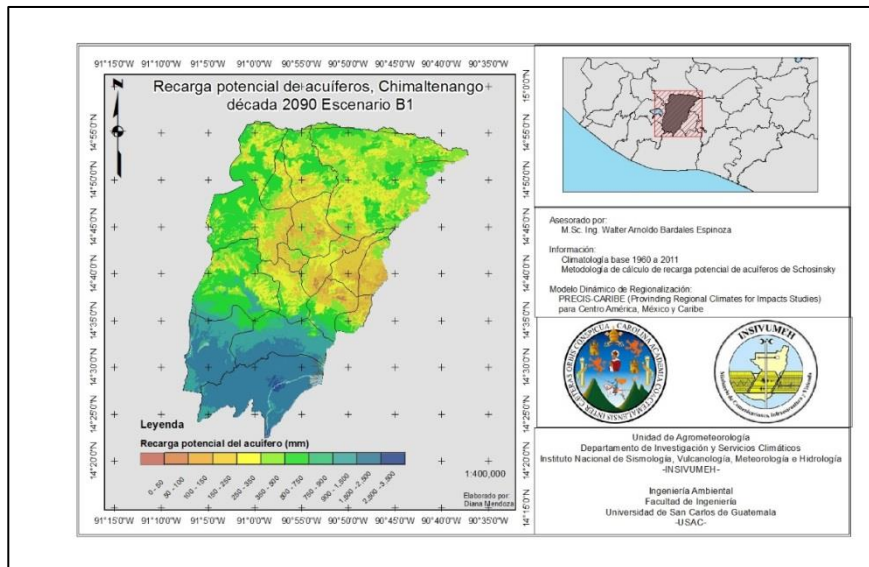
Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 27. **Recarga potencial de acuíferos, década 2080**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

Figura 28. **Recarga potencial de acuíferos, década 2090**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcMap.

4.3. Tablas resumen

Las variables generadas e integradas con el sistema de información geográfica fueron resumidas en promedio por década, para el departamento de Chimaltenango; en las siguientes tablas, se cuantificó la precipitación en milímetro, precipitación que infiltra en milímetro, escorrentía en milímetro, evapotranspiración en milímetro, temperaturas máximas, mínimas y medias en grados Celsius, y la recarga potencial del acuífero en milímetro.

Tabla IX. **Tabla resumen, escenario A2**

ESCENARIO a2								
Década	20	30	40	50	60	70	80	90
P (mm)	1 656,53	1 610,64	1 439,95	1 542,88	1 434,59	1 247,99	1 370,4	1 182,93
Pi (mm)	868,326	846,016	762,185	812,47	760,308	665,738	727,269	636,348
ESC (mm)	788,206	764,628	677,767	730,407	674,281	582,252	643,126	546,584
ETR (mm)	43,164	44,0588	44,4925	45,1841	45,4845	43,7863	46,2965	47,0601
Tmax	25,0855	25,3458	26,3493	26,8054	27,3533	28,4871	29,2597	30,2246
Tmex	18,8686	19,068	19,8374	20,3861	20,5945	21,4461	22,057	22,7958
Tmin	12,3944	12,5387	13,1573	13,5883	13,7521	14,3498	14,9373	15,488
Rp (mm)	824,565	802,482	719,387	767,72	714,95	624,307	680,454	588,998

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Tabla resume, escenario B1**

ESCENARIO b1								
década	20	30	40	50	60	70	80	90
P (mm)	1 565,98	1 611,92	1 503,4	1 578,74	1 502,28	1 406,11	1 508,74	1 398,77
Pi (mm)	822,915	847,081	793,493	830,519	793,466	745,607	796,174	742,818
ESC (mm)	743,064	764,838	709,905	748,216	708,812	660,5	712,567	655,955
ETR (mm)	43,744	43,9444	44,4058	44,523	44,7401	44,239	45,0204	45,5517
Tmax	24,9507	25,1951	25,6962	25,9951	26,4401	26,5629	27,0492	27,6514
Tmex	18,7509	18,9233	19,3096	19,6414	19,8851	19,9841	20,3484	20,7969
Tmin	12,3309	12,4547	12,7569	13,0223	13,2038	13,2995	13,6149	13,9314
RP (mm)	779,868	803,538	750,818	786,504	749,106	702,906	751,438	697,31

Fuente: elaboración propia.

4.4. Gráficas comparativas

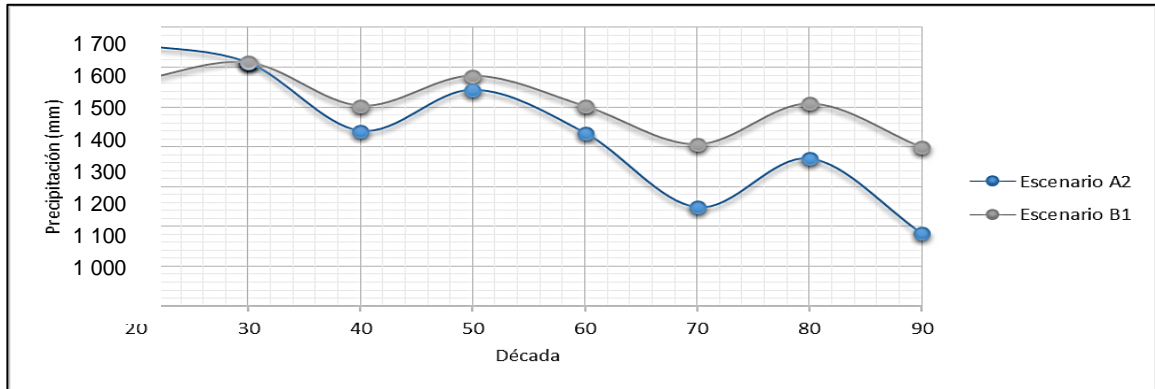
Se graficaron los promedios resumidos para observar la tendencia de cada variable por década, comparando ambos escenarios.

La precipitación presentó variabilidad, una disminución para las décadas 30 a 40, 50 a 70 y un aumento entre las décadas 40 a 50 y 70 a 80, ambos escenarios con una tendencia similar a disminuir; las fluctuaciones en los promedios pueden deberse al incremento de la intensidad de las lluvias y a la variabilidad de la frecuencia de las mismas. El escenario A2 presentó variaciones mucho más marcadas o drásticas que el B1, como es de esperarse.

Los municipios ubicados al sur del departamento; Yepocapa, Pochuta, Acatenango y Patzún, presentaron mayores acumulados de precipitación, debido a la rugosidad topográfica presente, en especial por los dos volcanes ubicados en las cercanías, lo que produce produce lluvias orográficas.

Debido a que la agricultura constituye la fuente de subsistencia de muchos habitantes de Chimaltenango es importante implementar programas de sistemas de captación de agua de lluvia, principalmente al sur del departamento, así como de protección para los suelos, evitando así la erosión de los mismos, pues la mayor parte del territorio de Chimaltenango tiene una pendiente fuerte, por estar situada sobre la Sierra Madre, lo cual contribuye a la contaminación de cuerpos de agua.

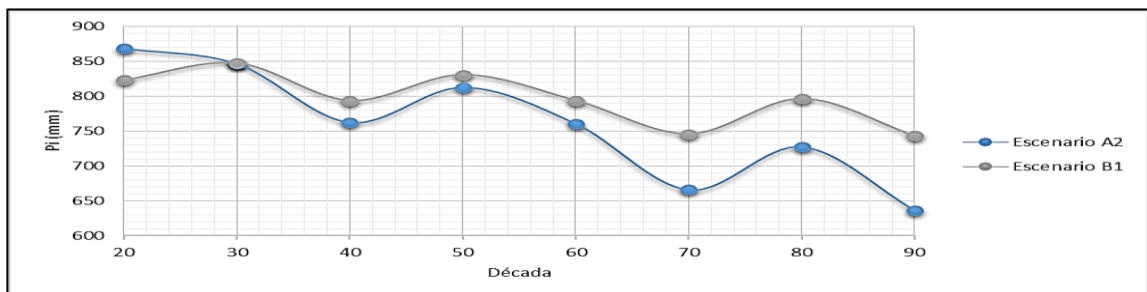
Figura 29. Precipitación, escenario A2 vs. B1



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

La precipitación que infiltra será menor para el escenario A2 que para el B1, como resultado de las proyecciones de precipitación, esta llegó a disminuir en un 26 % para el escenario pesimista y 9 % para el optimista. Como se mencionó, la parte sur del departamento, debido a su geología, cobertura pastizal y boscosa posee mayor infiltración, lo que ayuda a recargar el acuífero; por ello, es necesario proteger estas zonas de recarga hídrica y hacer conciencia en la población de los servicios ambientales que otorgan.

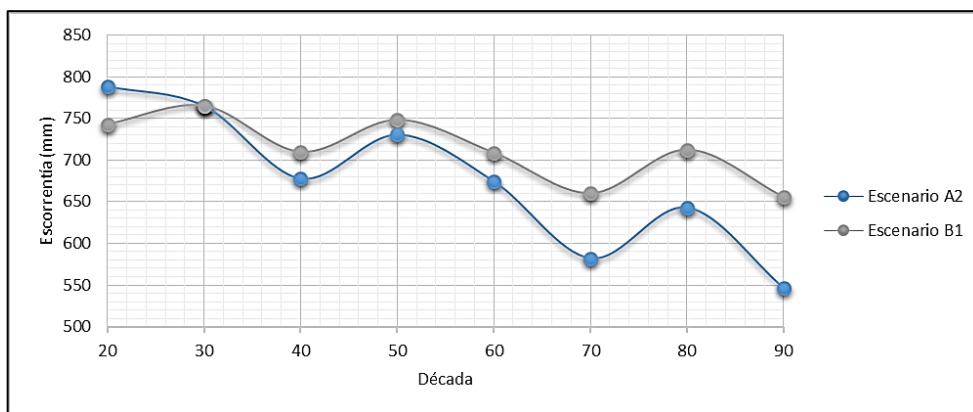
Figura 30. Precipitación que infiltra, escenarios A2 vs. B1



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

La escorrentía presentó tendencia a disminuir en ambos escenarios, pues se ve influenciada por la frecuencia y patrones de precipitación, al aumentar las temperaturas, como se estima para las proyecciones futuras, aumenta la evapotranspiración y esto también afecta la cantidad de escorrentía. El escenario A2 presentó una disminución de 788 mm para la década del 2020, a 546 para la década del 2090; el escenario B1 presentó una disminución de 743 mm a 655 mm.

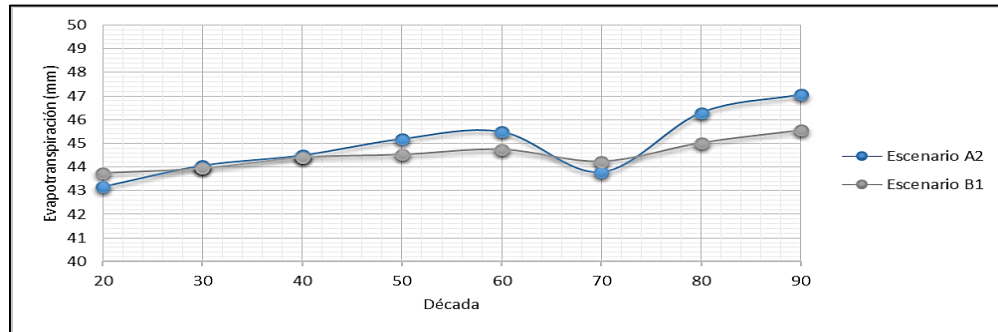
Figura 31. **Escorrentía, escenario A2 vs. B1**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

La evapotranspiración se ve afectada por la temperatura, precipitación, infiltración y escorrentía, pero al contrario de estas variables, aumenta con el crecimiento de temperatura estimado para las próximas décadas; un 9 % para el escenario A2 (47,06 mm de 43,164) y un 4 % para el B1 (45,55 mm de 43,744 mm).

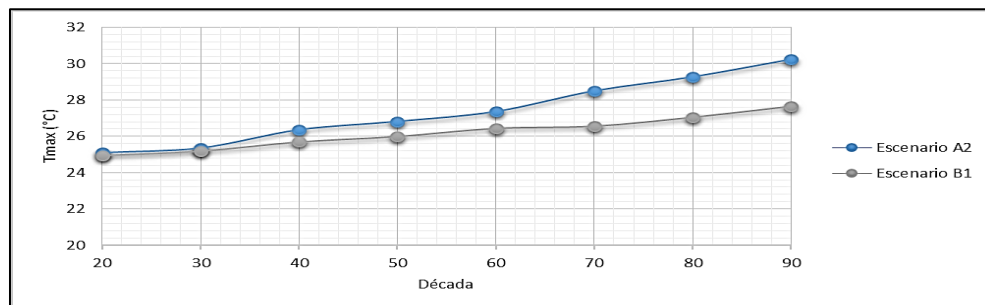
Figura 32. **Evapotranspiración, escenario A2 vs. B1**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

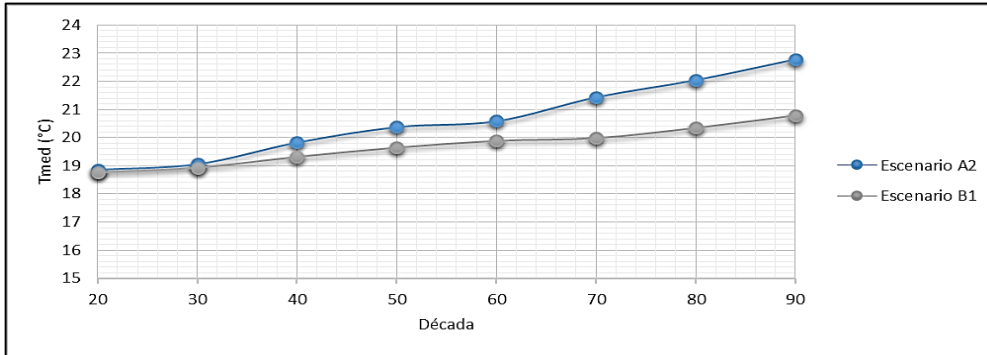
Se proyectaron mayores temperaturas para el escenario A2, con un grado de diferencia en promedio respecto del escenario optimista B1. El escenario A2 llegó a tener un aumento en promedio de 3 °C de temperatura en los horizontes de tiempo, mientras que el B1 presentó un aumento de 2 °C. Estos aumentos de temperatura no solamente afectan a las demás variables del ciclo hidrológico, sino que también causan variabilidad en cadenas tróficas, cultivos, afecciones sobre la salud humana, expansión territorial de climas semiáridos y húmedos secos.

Figura 33. **Temperatura máxima, escenario A2 vs. B1**



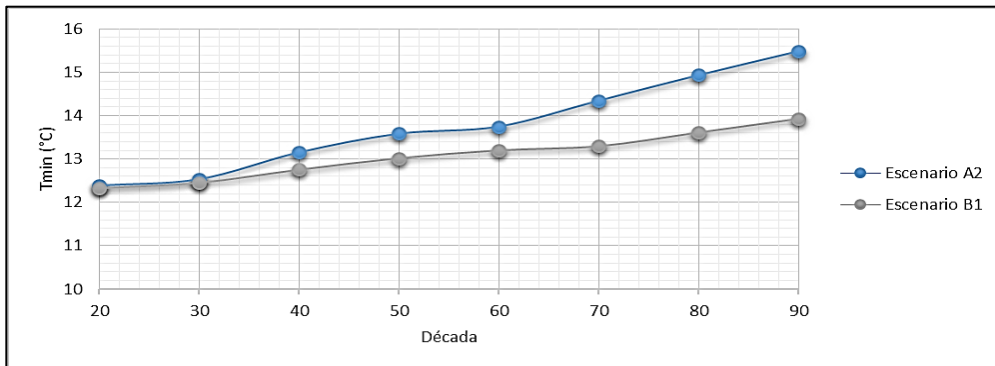
Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Figura 34. **Temperatura media, escenario A2 vs. B1**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

Figura 35. **Temperatura mínima, escenario A2 vs. B1**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

La recarga potencial del acuífero, que se da luego de eventos de precipitación, siendo el sobrante de la precipitación que infiltra luego de haber llevado al suelo a capacidad de campo y de haber cumplido con la evapotranspiración, para el departamento de Chimaltenango, decrecerá con el paso de las décadas, lo que afectará la disponibilidad del recurso hídrico, la recarga será mayor bajo un escenario optimista que para uno pesimista,

dependiendo del desarrollo social, económico y tecnológico futuro. Con el escenario A2 llegó a darse una disminución de la recarga hasta de un 28 % y con el escenario B1 un 10 % de disminución. Este déficit del recurso hídrico pone en peligro la productividad del agua, su capacidad de generación hidroeléctrica, biodiversidad, redes tróficas, salud y seguridad alimentaria, especialmente en un departamento como Chimaltenango, pues la mayor parte de su población es dependiente de la agricultura y vive en condiciones de pobreza.

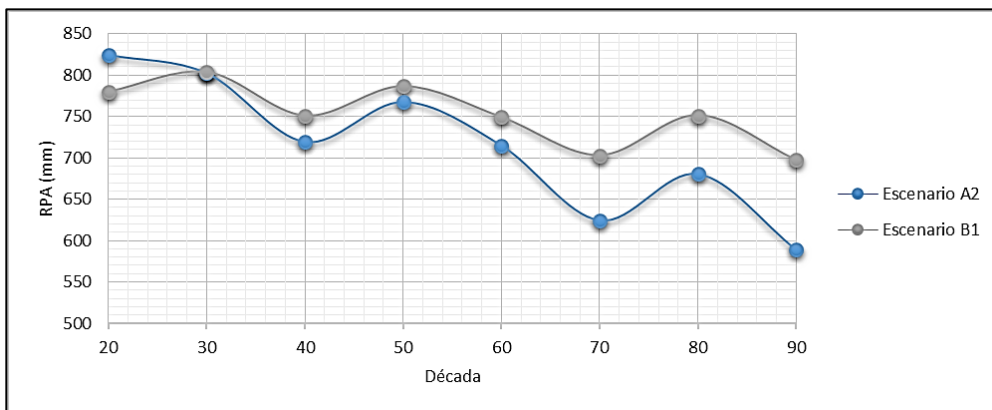
En la década del 20 se observó que la recarga potencial del acuífero será mayor para el escenario pesimista, al contrario de las otras proyecciones, las variables climáticas influyen en este parámetro, la precipitación aumenta para el escenario A2 en la década del 20, por ende la precipitación que infiltra y la recarga del acuífero serán mayores para el escenario pesimista A2 que para el optimista B1, según las predicciones generadas por el PRECIS.

Los municipios ubicados al sur del departamento, Yepocapa, Pochuta, Acatenango, San Andrés Itzapa, Patzicía y Patzún, son los que poseen la mayor recarga de acuíferos; esto se debe a su geología de origen volcánico, que permite una mayor infiltración, zona de vida de bosque húmedo subtropical, por lo tanto su protección como zonas de recarga hídrica es fundamental. En especial el caso de la montaña El Soco que abarca los municipios de Zaragoza, San Andrés Itzapa y Patzicía, divisoria de aguas de la vertiente del Atlántico y del Pacífico.

También tienen alta recarga de acujero las áreas protegidas pertenecientes a los volcanes de Fuego y Acatenango, debido a que los volcanes son superficies de cuencas capaces de recibir, almacenar y conducir el flujo de agua de precipitaciones hasta los acuíferos subterráneos; además de

ello, siendo el Acatenango un claro ejemplo, las faldas de los volcanes poseen zonas muy fértiles que pueden ser aprovechadas para la producción.

Figura 36. **Recarga potencial de acuíferos, escenario A2 vs. B1**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel.

CONCLUSIONES

1. La precipitación presentó variabilidad en las proyecciones, atribuibles al incremento de la intensidad de las lluvias y a la variabilidad en su frecuencia. El escenario A2 presentó cambios más drásticos con una disminución de la precipitación de 16,56 mm para la década del 2020 a 1182 mm para la década del 2090; el escenario B1 de igual manera siguió la tendencia a disminuir de 1656 mm para la década del 2020, a 1398 mm para la década del 2090.
2. La evapotranspiración se vio afectada por la temperatura, precipitación, infiltración y escorrentía, pero al contrario de estas variables aumenta con el crecimiento de temperatura estimado para las próximas décadas, un 9 % para el escenario A2, y un 4 % para el B1.
3. La escorrentía presentó tendencia a disminuir en ambos escenarios, pues se ve influenciada por la frecuencia y patrones de precipitación; al aumentar las temperaturas, como se estima para las proyecciones futuras, aumenta la evapotranspiración y esto también afecta la cantidad de escorrentía. El escenario A2 presentó una disminución de 788 mm para la década del 2020, a 546 para la década del 2090; el escenario B1 presentó una disminución de 743 mm a 655 mm.
4. La precipitación que infiltra será menor para el escenario A2, hasta un 26 %, y para el escenario B1 un 9 %, como resultado de las proyecciones de precipitación. La parte sur del departamento, por su

geología, posee mayor infiltración y por ende mayor recarga de acuíferos.

5. Se proyectaron mayores temperaturas para el escenario A2, con un grado de diferencia en promedio respecto del escenario optimista B1. El escenario A2 llegó a tener un aumento en promedio de 3 °C de temperatura en los horizontes de tiempo, mientras que el B1 presentó un aumento de 2 °C.

6. La recarga potencial del acuífero decrecerá con el paso de las décadas, lo que afectará la disponibilidad del recurso hídrico, dependiendo del desarrollo social, económico y tecnológico futuro. Con el escenario A2 llegó a darse una disminución de la recarga hasta de un 28 % y con el escenario B1 un 10 %. Los municipios ubicados al sur del departamento, Yepocapa, Pochuta, Acatenango, San Andrés Itzapa, Patzicía y Patzún, son los que poseen la mayor recarga de acuíferos; esto se debe a su geología de origen volcánico, que permite una mayor infiltración, y a la zona de vida de bosque húmedo subtropical.

RECOMENDACIONES

En relación con la mitigación

1. Dar prioridad al cuidado de los bosques especialmente en Zaragoza, San Andrés Itzapa y Patzicía, por ser zonas de recarga hídrica; pues los bosques además de capturar dióxido de carbono, ayudan a conservar el recurso hídrico.
2. Que el Consejo Nacional de Áreas Protegidas junto con la Municipalidad de Chimaltenango promuevan las áreas protegidas del departamento, pues además de los servicios ambientales que otorgan constituyen ingresos para la población por parte del turismo.
3. Que la Municipalidad junto con organizaciones gubernamentales capaciten a la población que se dedica a actividades agrícolas en técnicas de uso y conservación de suelo, evitando así su pérdida y degradación por malas prácticas y químicos.

En relación con la adaptación

4. Que la Municipalidad de Chimaltenango implemente en las comunidades métodos para la captación de agua de lluvia y descontaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

5. Fortalecer la distribución de estaciones meteorológicas de la región y así poder contar con datos representativos y generar información para este tipo de investigaciones.

6. Que la Municipalidad junto con la comunidad, le den flexibilidad al sector agrícola, cultivando distintos productos, no dependiendo de uno solo que puede ser destruido con una ola de calor o sequía.

BIBLIOGRAFÍA

1. CAMPOS, Daniel Francisco. *Procesos del ciclo hidrológico*. 3a ed. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1998. 30 p.
2. CASTELLANOS, Edwin; GUERRA, Alex. *El cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala*. Guatemala: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, 2009. 52 p.
3. Consejo de Desarrollo Departamental de Chimaltenango. *Plan de Desarrollo Departamental de Chimaltenango*. Guatemala: Segeplan, 2011. 96 p.
4. Consejo Nacional de Áreas Protegidas. *Listado de áreas protegidas* [en línea]. <http://www.conap.gob.gt/index.php/component/phocadownload/category/24-areas-protegidas.html?download=481:listado-de-areas-protegidas-mayo-2013>. Guatemala: 31 de mayo de 2013. [Consulta: abril de 2014].
5. GOYAL, Andhra. *Dynamic Downscaling for future climate scenario and hydrologic simulation using WRF and VIC models*. Maestría en Tecnología en Teledetección y SIG. Dirección General de Recursos Hídricos, Universidad de Andhra, Visakhapatnam, 2013. 88 p.

6. Hadley Centre for Climate Prediction and Research. *generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Centre, UK, 2004. 37 p.
7. Instituto de Hidrología de España. *Métodos de cálculo del balance hídrico*. España: UNESCO, 1981. 182 p.
8. Instituto Nacional de Estadística. *Caracterización departamental: Chimaltenango 2012*. Guatemala: INE, 2013. 12 p.
9. _____. *Compendio Estadístico Ambiental*. Guatemala: INE, 2010. 353 p.
10. LENNTECH. *Escenarios IPCC* [en línea]. <<http://www.lenntech.es/efecto-invernadero/escenarios-ipcc.htm>>. [Consulta: abril de 2014].
11. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Chimaltenango, Guatemala*. Convenio de Cooperación Nro. 43-2006 MAGA – Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC. Guatemala, 2010. 753 p. vol. 2. ISBN: 978-9929-8088-1-2.
12. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, MARN. *Política Nacional de Cambio Climático*. Guatemala: 2009. 23 p.
13. _____. *Primera comunicación Nacional Sobre Cambio Climático*. Guatemala: 2001. 110 p.

14. Ministerio de Medio Ambiente de España. *Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro*. España: 2005. 161 p.
15. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. *Afirmaciones principales del Resumen para responsables de políticas*. Suiza: IPCC, 2014. 2 p.
16. _____. *Cambio climático 2007. Informe de Síntesis*. Suiza: IPCC, 2007. 102 p.
17. _____. *Climate Change 2007 The Physical Science Basis*. IPCC. Suiza, 2007. 981 p.
18. _____. *Tercer Informe de Evaluación cambio climático 2001; Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. IPCC, 2001. 93 p.
19. _____. *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Suiza, 2001. 873 p.
20. SABORÍO, Javier. *Elaboración del mapa de precipitación que infiltra, hacia la recarga hídrica para Centro América*. 57 p.
21. SCHOSINSKY, Gunther; LOSILLA, Marcelino. *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. Costa Rica: Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, 1999. 13 p.

22. _____. *Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología 2007. 18 p.
23. Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. *Plan de desarrollo departamental de Chimaltenango*. Guatemala: Segeplan, 2011. 91 p.
24. TRIOLA, Mario. *Estadística*. 9a ed. México: Pearson Educación, 2004. 795 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de requisitos académicos

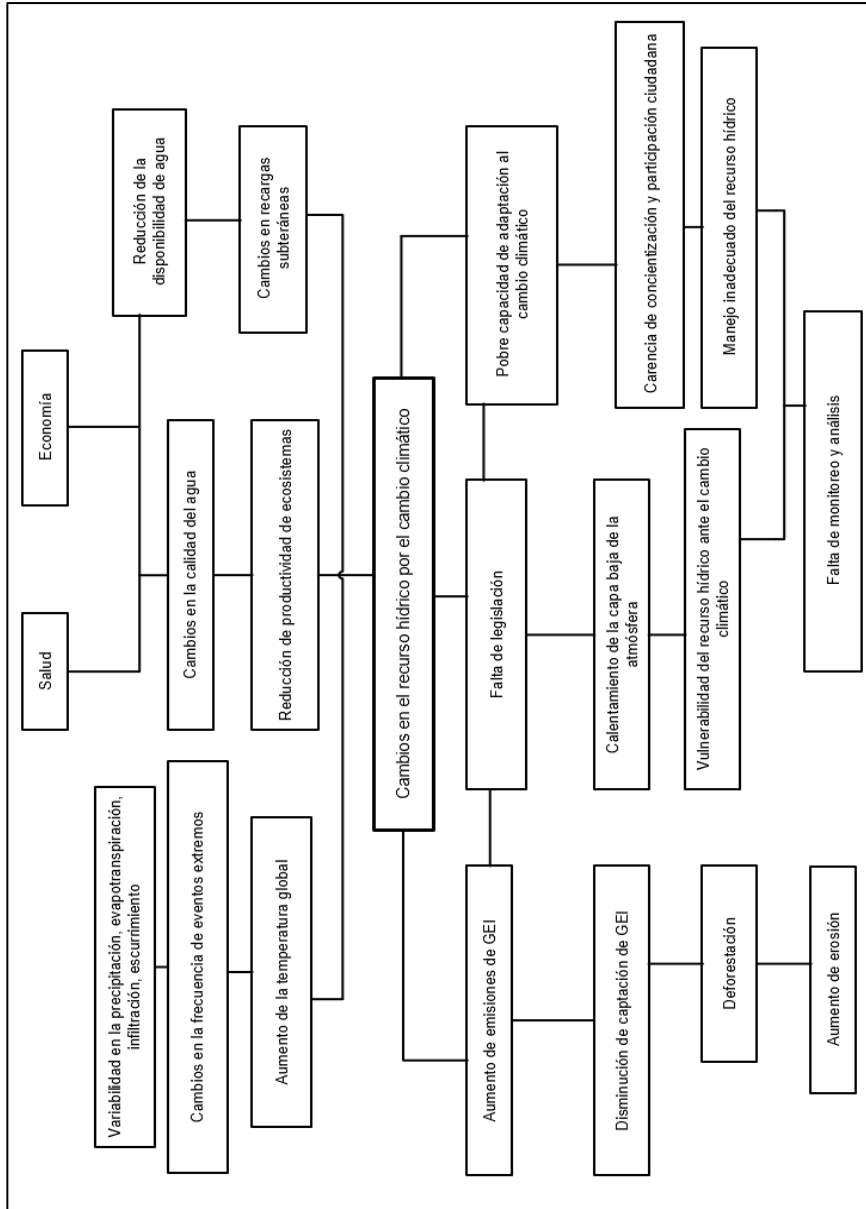
Carrera	
Ingeniería Química Ingeniería Ambiental	
Campos del conocimiento científico y tecnológico	
1. Ciencias naturales y exactas	4. Ciencias de la salud
2. Ingeniería y tecnología	5. Ciencias agropecuarias
3. Ciencias sociales	6. Humanidades
Disciplinas	
<u>Ciencias naturales y exactas</u>	
1. Matemáticas	5. Ciencias biológicas
2. Ciencias físicas	6. Ciencias de la Tierra, relacionadas con el ambiente
3. Estadística	7. Informática
4. Ciencias químicas	
<u>Ingeniería y tecnología</u>	
8. Físicoquímica	10. Ingeniería aplicada y diseño
9. Operaciones unitarias	
<u>Ciencias sociales</u>	
11. Economía	13. Sociología
12. Psicología	14. Derecho

Continuación del apéndice 1.

<u>Humanidades</u>	
1. Lengua y literatura	4. Arte
2. Historia	5. Deporte
3. Filosofía	
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. **Medidas de mitigación ante los efectos del cambio climático**

Internacional		Nacional	
Medida	Año	Medida	Año
Primera conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo)	1972		
Primera conferencia mundial sobre el clima Ginebra	1979	Creación de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) mediante la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente	1986
Creación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)	1988	CONAMA se integra a la Red de Formación Ambiental de América Latina y el Caribe	1988
		Ley de Áreas Protegidas	1989
Primer Informe de Evaluación del IPCC, Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima	1990	Documento Programa Nacional de Inversión en Educación, Capacitación y Concientización Ambiental en Guatemala	1990
		Estrategia Nacional de Educación Ambiental	
Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, "Cumbre de Tierra Río"	1992	Firma del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático	1992
COP1 Berlín, Alemania	1995	Ratificación del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático	1995
Segundo Informe de Evaluación del IPCC			
COP 2 Ginebra, Suiza	1996	Creación del Instituto Nacional de Bosques (INAB), por medio la Ley Forestal	1996
		Ley de Fomento de la Difusión de la Conciencia Ambiental	
		Creación de la Red Nacional de Formación e Investigación Ambiental REDFIA	

Continuación del apéndice 3.

COP3 Kyoto, Japón	1997		
COP4 Buenos Aires, Argentina	1998	Proyecto Primera Comunicación Nacional	1998
		Plan de Acción sobre Cambio Climático.	
		Firma del Protocolo de Kyoto	
COP5 Bonn, Alemania	1999	Ratificación del Protocolo de Kyoto	1999
COP6 Haya, Holanda	2000	Ley de Creación del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales	2000
Cumbre del Milenio Nueva York			
COP7 Marrakech, Marruecos	2001	Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático	2001
Tercer Informe de Evaluación del IPCC		Creación de la Unidad de Cambio Climático	
Cumbre de la Tierra de Johannesburgo (Sudáfrica)	2002	Primer Informe Metas del Milenio.	2002
COP8 Nueva Delhi, India			
COP9 Milán, Italia	2003	Creación de la unidad encargada del Programa Nacional de Cambio Climático.	2003
		Ley de incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energías Renovables	
		Política Marco de Gestión Ambiental	
COP10 Buenos Aires, Argentina	2004	Política Nacional de Educación Ambiental	2004
Entra en vigor el Protocolo de Kyoto	2005	Oficina Nacional de Desarrollo Limpio y Reglamento de sus procedimientos	2005
COP11 Montreal, Canadá, en paralelo con la Primera Reunión de las Partes del Protocolo de Kyoto (CMP1)			
Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres, Marco de Acción de Hyogo			

Continuación del apéndice 3.

COP12 Nairobi, Kenia, en paralelo con la Segunda Reunión de las Partes del Protocolo de Kyoto (CMP2)	2006	II Informe de Avances de los Objetivos del Milenio en Guatemala	2006
COP13 Bali, Indonesia, en paralelo con la Tercera Reunión de las Partes del Protocolo de Kyoto (CMP3)	2007	Política de Conservación, Protección y Mejoramiento del Ambiente y los Recursos Naturales	2007
Cuarto Informe de Evaluación del IPCC		Proyecto Estudios de Cambio Climático con Énfasis en Adaptación, Programa Nacional de Cambio Climático	
COP14 Poznan, Polonia	2008	Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático	2008
		Fomento de las capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba	
COP15 Copenhague, Dinamarca, en paralelo con la CMP5	2009	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo publicó el cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala.	2009
		Creación de la Mesa Nacional de Cambio Climático	
		Política Nacional de Cambio Climático	
COP16 Cancún, México, en paralelo con la CMP6	2010	Creación del Instituto Privado de Investigación Sobre el Cambio Climático	2010
Cumbre de las Naciones Unidas sobre los Objetivos de Desarrollo del Milenio		III Informe de Avances de los Objetivos de Desarrollo del Milenio	
COP17 Durban, Suráfrica	2011	Política Nacional para la Reducción de Riesgo a los Desastres en Guatemala	2011

Continuación del apéndice 3.

COP18 Doha, Catar	2012		
Conferencia de desarrollo sostenible de Naciones Unidas, Río de Janeiro, Brasil, conocida como Río +20			
COP19 Varsovia, Polonia	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
COP20 Lima, Perú	2014		
Quinto Informe de Evaluación del IPCC			

Fuente: elaboración propia.

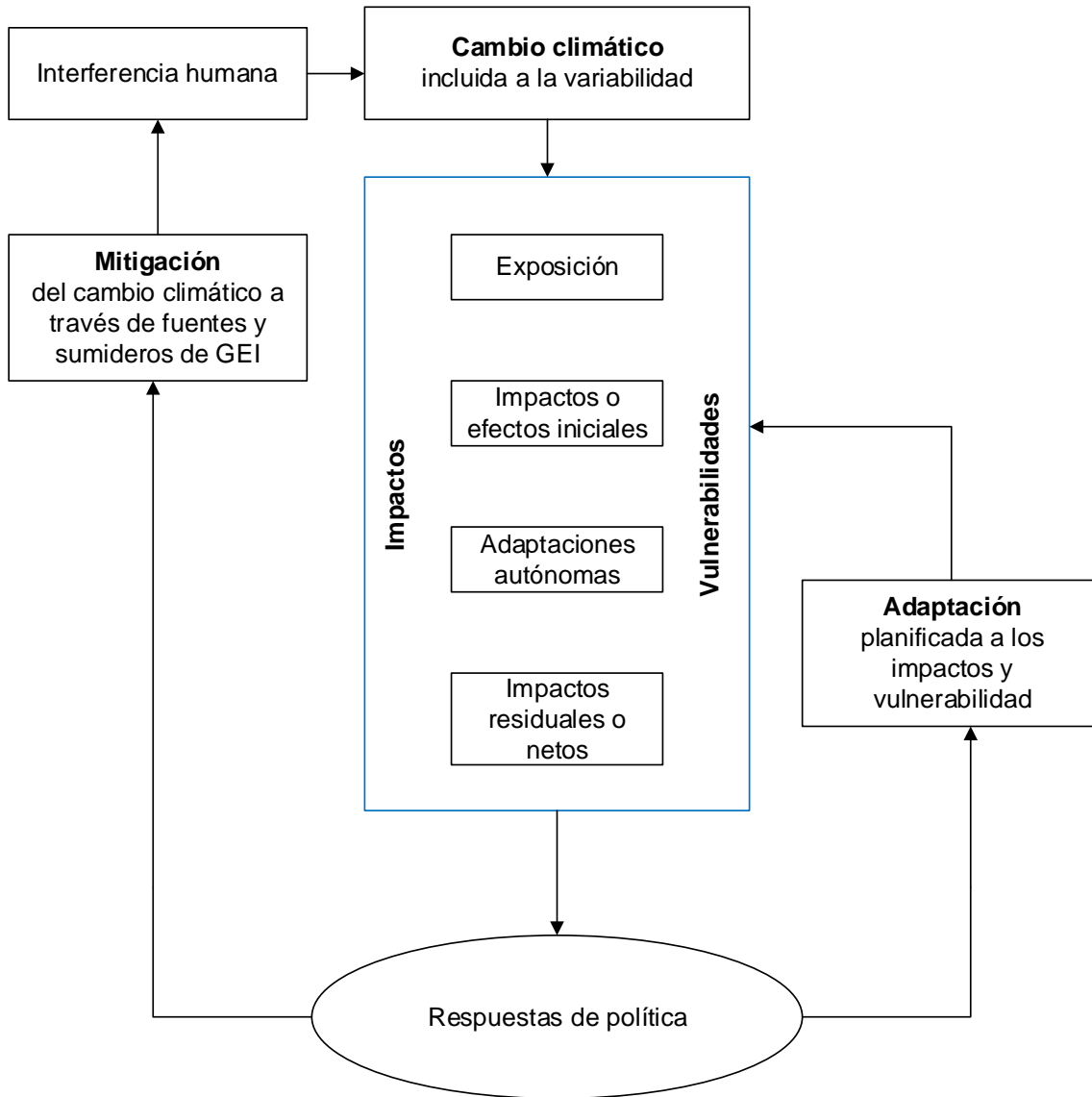
ANEXOS

Anexo 1. Inventario de emisiones de GEI, 1990 en Gg

GEI y categoría de sumidero	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	COVDM	SO ₂
Totales	7489,619	199,556	20,709	43,792	961,655	105,949	74,497
Energía	3700,402	34,401	0,520	36,905	725,726	91,743	74,235
Procesos industriales	544,664					14,206	0,263
Uso de solventes y otros productos	No estimado	No estimado	No estimado	No estimado	No estimado	No estimado	
Agricultura			129,872	19,691	5,670	193,085	
Cambio de uso de tierra y silvicultura	3,244.553	4,896	0,034	1,217	42,844	0	0
Desechos	0	30,387	0,464	0	0	0	0

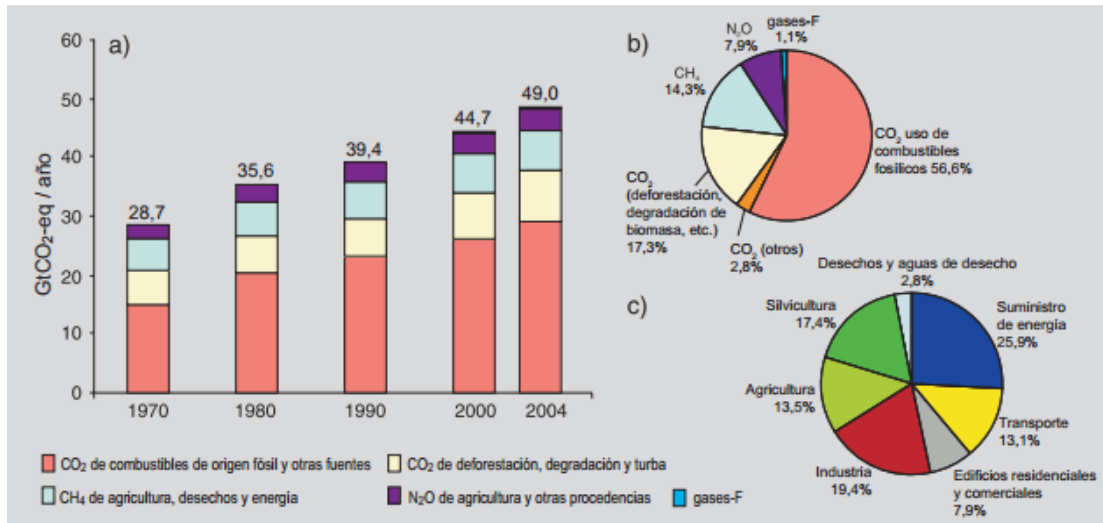
Fuente: CASTELLANOS, Edwin; GUERRA, Alex. *El cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala*. p. 24.

Anexo 2. **Ámbito de la evaluación de cambio climático**



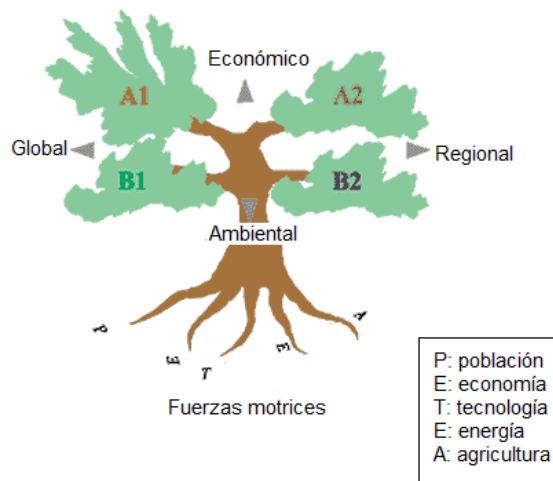
Fuente: IPCC. *Tercer Informe de evaluación cambio climático 2001; Impactos, adaptación y vulnerabilidad.* p. 22

Anexo 3. Emisiones mundiales de GEI antropógenos



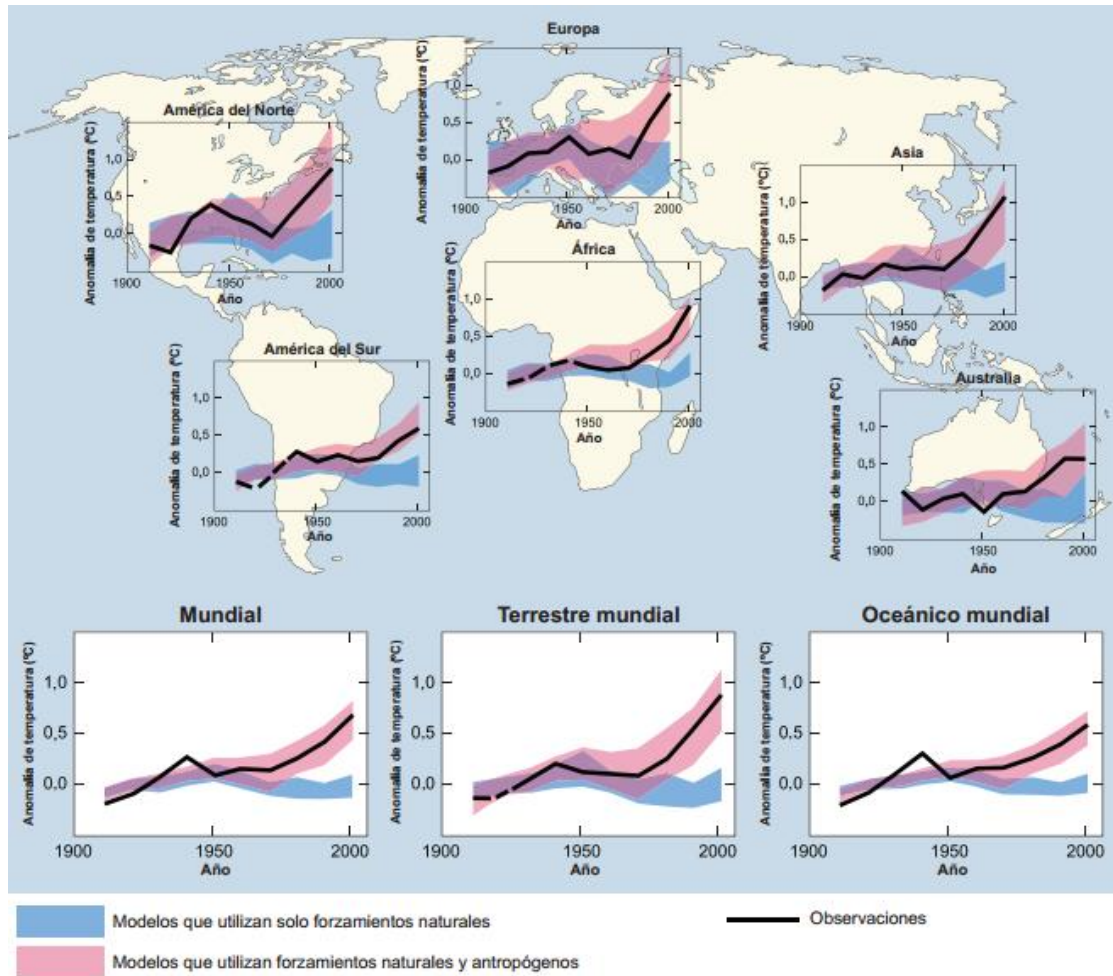
Fuente: IPCC. *Cambio climático 2007, Informe de síntesis*. p. 5.

Anexo 4. Representación esquemática de los escenarios SRES



Fuente: Lenntech. *Escenarios IPCC*. <http://www.lenntech.es/efecto-invernadero/escenarios-ipcc.htm>. Consulta: 1 de abril de 2014.

Anexo 5. Cambio de la temperatura mundial y continental



Fuente: IPCC. *Cambio climático 2007, Informe de síntesis*. p. 6.