



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala.

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de

***MAGISTER SCIENTIAE*
en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

EDIO GIOVANNI GONZÁLEZ CELADA

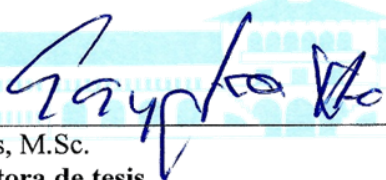
TURRIALBA, COSTA RICA

2016

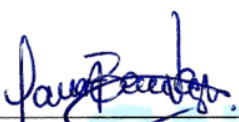
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS


FIRMANTES:



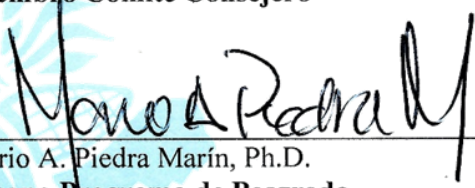
Ney Ríos, M.Sc.
Codirectora de tesis




Laura Benegas, Ph.D.
Codirectora de tesis



Fredy Argoty, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mario A. Piedra Marín, Ph.D.
Decano Programa de Posgrado



Edio Giovanni González Celada
Candidato

DEDICATORIA

*A mi familia;
por el apoyo en todo momento,
palabras de aliento, una llamada, una oración,
los amo.*

*A ti;
por todo tu cariño,
donde quiera que estés,
te amo.*

*A mi patria Guatemala,
rincón verde donde nací.*

*Al Todopoderoso;
por su acompañamiento permanente.*

AGRADECIMIENTOS

Al Todopoderoso quien ayudó a que este proceso se llevara a cabo, apoyándome con mi familia y seres queridos.

Al Programa Regional de Cambio Climático (PRCC) de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), quien me otorgó beca completa para mis estudios de posgrado en el CATIE.

A mi asesor Ney Ríos por el valioso aporte en el desarrollo de mi tesis, pero sobre todo por la paciencia, conocimientos transmitidos, dedicación, tiempo, palabras de ánimo y por su disposición en la discusión de mis inquietudes académicas; gracias por su amistad.

A mi asesores, Laura Benegas y Freddy Argotty por su importante apoyo en mi tesis, orientación, disposición de tiempo, y amistad brindada.

Al cuerpo de profesores con quien tuve el gusto de formarme, personal de la escuela de posgrado de CATIE. Personal de biblioteca Orton por el apoyo brindado en la búsqueda y acceso a información, y su hospitalidad; especialmente a Katya, don Javier y Andrés.

A los compañeros de promoción por las anécdotas y conocimientos compartidos.

Este estudio ha sido posible gracias al apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) a través del Programa Regional de Cambio Climático. Los contenidos y opiniones expresadas aquí no son responsabilidad del Programa Regional de Cambio Climático y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID o del Gobierno de los Estados Unidos. CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

CONTENIDO

RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS	1
1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	4
1.3 MARCO REFERENCIAL.....	4
1.4 PRINCIPALES RESULTADOS.....	8
1.5 PRINCIPALES CONCLUSIONES.....	9
1.6 LITERATURA CITADA	10
CAPÍTULO II.....	15
ARTÍCULO I. Impacto del cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab, Cuenca Lago de Atitlán, Guatemala.....	15
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. MÉTODOS Y MATERIALES.....	17
2.1 Área de estudio	17
2.2 Modelo SWAT.....	18
2.3 Calibración y análisis de incertidumbre	23
2.4 Escenario cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra	25
3. RESULTADOS.....	28
3.1 Calibración del modelo y análisis de incertidumbre.....	28
3.2 Análisis de sensibilidad	30
3.3 Efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica y erosión hídrica	31
3.4 Efecto del cambio de uso y cobertura en la respuesta hidrológica y erosión hídrica	35
4. DISCUSIÓN	40
4.1 Calibración y análisis de incertidumbre	40
4.2 Efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica y erosión hídrica	41
4.3 Efecto del cambio de uso y cobertura en la respuesta hidrológica y de erosión...	43

5. CONCLUSIONES.....	45
6. RECOMENDACIONES.....	46
7. LITERATURA CITADA.....	47
ARTÍCULO II. Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.	55
RESUMEN	55
ABSTRACT	55
1. INTRODUCCIÓN	56
2. MÉTODOS Y MATERIALES	57
2.1 Área de estudio.....	57
2.2 Modelo SWAT y escenario de cambio climático.....	57
2.3 Disponibilidad de agua per cápita para uso humano	58
2.4 Déficit hídrico del cultivo de maíz.....	59
3. RESULTADOS	60
3.1 Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano.....	60
3.2 Impacto del cambio climático en el déficit hídrico del maíz.....	62
4. DISCUSIÓN	64
4.1 Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano.....	64
4.2 Impacto del cambio climático en el déficit hídrico del maíz.....	65
5. CONCLUSIONES.....	66
6. RECOMENDACIONES.....	67
7. LITERATURA CITADA.....	68

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Cambios porcentuales en la respuesta hidrológica y erosión hídrica por el impacto del cambio climático (RCP 8.5 modelo HadGEM2-ES al 2050) y cambio de uso y cobertura de la tierra: -80% bosque (CUCT1) y +50% bosque (CUCT2), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.....	8
Cuadro 2. Disponibilidad hídrica per cápita por año ($m^3 km^2 año^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.....	9
Cuadro 3. Déficit hídrico del cultivo de maíz ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 205; y el cambio en el déficit hídrico, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.	9
Cuadro 4. Parámetros y sus rangos usados para la calibración automática con SUFI-2 de dos puntos: microcuenca Pamán y desembocadura del río Quiscab, subcuenca Quiscab, cuenca Lago Atitlán.	25
Cuadro 5. Estadísticos de ajuste hidrológico para los puntos calibrados: salida del río Pamán y salida de río Quiscab, en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.	30
Cuadro 6. Valores absolutos (t-Stat) y significancia (P-value) del análisis de sensibilidad global de los parámetros utilizados para calibración.	30
Cuadro 7. Erosión hídrica y recarga hídrica promedio mensual y anual durante	32
Cuadro 8. Erosión hídrica de línea base y escenarios de cambio climático RCP 8.5, modelo HadGEM2-ES	34
Cuadro 9. Coeficiente de variación (CV) durante el año para la línea base y escenario futuro RCP 8.5 modelo HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.	34
Cuadro 10. Erosión hídrica de línea base y escenarios de cambio de uso y cobertura -80% bosque (CUCT 1), para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.....	36
Cuadro 11. Coeficiente de variación (CV) durante el año para la línea base y escenario de cambio de uso y cobertura -80% bosque (CUCT 1), para la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.	37
Cuadro 12. Erosión hídrica de línea base y escenarios de cambio de uso y cobertura +50% bosque (CUCT 2), para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.....	38
Cuadro 13. Coeficiente de variación (CV) durante el año para la línea base y escenario de cambio de uso y cobertura +50% bosque (CUCT 2), para la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.	39
Cuadro 14. Disponibilidad hídrica superficial ($m^3 km^2 año^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.	61
Cuadro 15. Disponibilidad hídrica per cápita por año ($m^3 km^2 año^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.	62

Cuadro 16. Déficit hídrico del cultivo de maíz ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 205; y el cambio en el déficit hídrico, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.....63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio, subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán, Guatemala.....	18
Figura 2. Datos de entrada del modelo SWAT para delimitación de la subcuenca, microcuencas y definición de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), y ubicación de información climática y fluvial utilizada en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán. UCS hace referencia a las Unidades Cartográficas de Suelo del Estudio Semidetallado de suelos (MAGA-DIGEGR 2013).	21
Figura 3. Discretización espacial en microcuencas (división 1) y Unidades de Respuesta Hidrológica (división 2), y categorías de pendiente según FAO (2009), para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.....	22
Figura 4. Forzamiento radiativo natural y antropogénico por cada RCP. Fuente: Tomado de Meinshausen et al. (2011).....	27
Figura 5. Series temporales de los valores medios anuales globales de las anomalías de temperatura del aire en superficie, en relación con el periodo 1986-2005; del CMIP5. Fuente: Tomado de Collins et al. (2013).....	27
Figura 6. Incertidumbre de anomalías de temperatura y precipitación de 17 modelos y su ensamble.	27
Figura 7. Calibración de la microcuenca del río Pamán, subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán.	29
Figura 8. Calibración en la salida de la subcuenca del río Quiscab (microcuenca del mismo nombre), cuenca del Lago de Atitlán.....	29
Figura 9. Aporte medio anual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua en la línea base (1994-2015) en la subcuenca del río Quiscab, Cuenca Lago de Atitlán.....	31
Figura 10. Aporte mensual medio de las fracciones del balance hídrico, producción de agua e hidrograma anual de la línea base de simulación (1994-2015), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.....	32
Figura 11. Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua para el escenario RCP 8.5 al año 2050, con respecto a la línea base (1994-2015), en la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.....	33
Figura 12. Respuesta hidrológica y erosión hídrica ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al 2050, en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.	35
Figura 13. Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua en el escenario 1 de cambio de uso y cobertura de la tierra, comparado con el periodo 1994-2015, en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.....	36
Figura 14. Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua para el escenario 2 de cambio de uso y cobertura de la tierra, con respecto a la línea base (1994-2015), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.	38
Figura 15. Respuesta hidrológica y erosión hídrica ante los escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura -80% bosque (CUCT 1) y +50% de bosque (CUCT 2), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.....	39
Figura 16. Disponibilidad hídrica per cápita (m^3 persona ⁻¹ año ⁻¹) al 2015 y para el escenario futuro de cambio climático RCP 8,5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala	

HadGEM2-ES al año 2050, para las microcuencas de la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.....	62
Figura 17. Déficit hídrico del cultivo de maíz (mm) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 2050, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.	63

LISTA DE ACÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

RCP	Vías o trayectorias de concentración representativas (Representative concentration Pathways)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura,
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
AR5	Quinto informe del IPCC
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del AR5
HadGEM2-ES	Earth-System model-HadGEM2 from Met Office Hadley Centre
MCG	Modelos de circulación de clima global
AWR	Available Water Resources (Indicador de agua dulce renovable per cápita)
SWAT-CUP	Programa para calibración, sensibilidad y análisis de incertidumbre para simulaciones de SWAT
CUCT	Escenario de cambio de uso y cobertura de la tierra

RESUMEN

Este estudio se realizó en la subcuenca del río Quiscab (149.7 km²), perteneciente a la cuenca del Lago Atitlán ubicada en las Tierras Altas Volcánicas de Guatemala. El objetivo del presente estudio fue evaluar el impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano. Se utiliza el modelo conceptual semidistribuido SWAT (Soil Water Assessment Tool). Se utilizó información disponible de tipo de suelo, uso y cobertura, topografía, clima para ingresar al modelo SWAT. Se considera una línea base de 1994 al 2015; un escenario de cambio climático RCP 8.5, modelo HadGEM2-ES al 2050 con reducción de escala estadística de la plataforma MarkSim®; y dos escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura (-80 bosque, y +50% bosque). Se utiliza el algoritmo SUFI-2 del programa SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), para evaluar la sensibilidad y optimización (calibración y análisis de incertidumbre) de parámetros. La variable caudal se usa para calibración en dos puntos de la subcuenca, el primero ubicado en zona poco intervenida y el segundo en una zona de alta intervención. Ambos puntos de calibración presentan comportamiento hidrológico distinto entre las dos series de datos (observados y simulados). En el punto con menor intervención el ajuste hidrológico es muy bueno (NS=0.77; KGE=0.87). El punto ubicado en el sector de mayor intervención el ajuste hidrológico no fue satisfactorio (NS=-5; KGE=-0.8). Bajo escenarios futuros se prevé que el mayor impacto en la respuesta hidrológica y erosión hídrica será ocasionado por cambios en el clima, que por cambios en el uso y cobertura de la tierra; la producción de agua y erosión hídrica podrían reducirse hasta un 40% y 20%, respectivamente. Se sugiere que el cambio climático llevará a escasez extrema a cuatro microcuencas (Barreneché, Pamán, Xibalbay y Chuiscalera), dos a escasez crónica (Argueta y Novillero) y mantendrá una microcuenca en escasez extrema (Quiscab). La subcuenca pasará de estrés a escasez extrema, considerando 1,700 m³ per cápita como umbral de estrés hídrico. Se prevé que el déficit hídrico del cultivo de maíz se conserve en el inicio de etapa vegetativa y surge en la parte final del ciclo, pero se presentará un incremento severo en la magnitud del déficit hídrico (+ 535 m³ ha⁻¹) en estas etapas debido al cambio climático.

Palabras clave: modelo SWAT, SWAT-CUP, calibración, incertidumbre, sensibilidad, escasez de agua, déficit hídrico.

ABSTRACT

This study was carried out in the subbasin of the Quiscab River (149.7 km²), belonging to the basin of Lake Atitlán located in the Volcanic Highlands of Guatemala. The aim of the present study was to evaluate the impact of climate change and land use/cover change on the hydrological behavior, water erosion, and availability of water for agricultural and human use. The semi-distributed conceptual model SWAT (Soil Water Assessment Tool) is used. Was used available information of soil type, use and cover, topography, climate to get in SWAT model. A baseline from 1994 to 2015 was considered, a climate change scenario RCP 8.5, HadGEM2-ES model to 2050 with statistical scale reduction of the MarkSim ® platform; and two hypothetical scenarios of land use/cover change (-80% forest, and +50% forest) were analyzed. The SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction) algorithm is used to evaluate the sensitivity and optimization (calibration and uncertainty analysis) of parameters. The streamflow was used for two-point calibration of the subbasin, the first one located in a poorly intervened area and the second in an area of high intervention. Both calibration points showed different performance between the two datasets (observed and simulated). In the point with less intervention the performance is very good (NS = 0.77, KGE = 0.87). For the point located in the sector of high intervention the performance was not satisfactory (NS = -5; KGE = -0.8). Under future scenarios, it was predicted that the high impact on hydrological response and water erosion will be caused by changes in climate, rather than land use/cover changes. Water production and water erosion could be reduced by up to 40% and 20%, respectively. It is suggested that climate change will lead to extreme scarcity in four microbasins (Barreneché, Pamán, Xibalbay and Chuiscalera), Argueta and Novillero microbasin with chronic scarcity and maintain Quiscab microbasin in extreme scarcity. The subbasin Quiscab will go from stress to extreme scarcity, considering 1,700 m³ per capita as water stress threshold. The water deficit of maize is expected to be conserved at the beginning of the vegetative stage and appears at the end of the cycle, but there will be a severe increase in the magnitude of the water deficit (+ 535 m³ ha⁻¹) in these stages due to climate change.

Key words: SWAT model, SWAT-CUP, calibration, uncertainty, sensitivity, water scarcity, water deficit.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS

Bajo el enfoque de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, el agua es un servicio suministrado por los ecosistemas y juega un rol dinámico en distintos procesos biológicos, químicos y climáticos del planeta tierra (Vörösmarty *et al.* 2005). Es así que el agua dulce del ciclo hidrológico provee una gama de servicios ecosistémicos hídricos de beneficio para las personas, desde el aprovisionamiento de agua en cantidad y calidad hasta el ciclaje de nutrientes (MEA 2005a; MEA 2005b; Aylward *et al.* 2005; Coates *et al.* 2013).

El agua dulce es clave para la humanidad a través de sus usos y funciones, como la producción de alimentos, bebida, higiene personal, cocción y dilución y reciclaje de desechos (MEA 2005a). Ripl (2003) le denomina al agua la corriente sanguínea de la biósfera, ya que es el agua quien establece la sostenibilidad de los ecosistemas vivos. Por su parte Vörösmarty *et al.* (2005) señala que a través de la precipitación suministra a los ecosistemas y estos a su vez se encargan de regularla en los componentes del ciclo hidrológico.

El cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra son impulsores de cambio directo de los ecosistemas; mientras los cambios en demografía son impulsores indirectos de cambio en estos (MEA 2005a). Cambios directos e indirectos en los ecosistemas propiciará la existencia de cambios en la dotación de servicios ecosistémicos y consecuentemente se afectará el bienestar humano (MEA2005a; Carpenter *et al.* 2009). El cambio de uso y cobertura tiene un rol importante en la partición del ciclo hidrológico, ya que la evapotranspiración depende del tipo de cobertura, profundidad radicular, resistencia del dosel, área foliar, temperatura, disponibilidad de agua para la planta, entre otras (McNaughton y Jarvis 1983; Zhang *et al.* 1999; Zhang *et al.* 2001; Fitts 2012).

Los impactos del cambio climático en los procesos hidrológicos y otros procesos inherentes al ciclo del agua pueden ser: cambio en caudales, erosión hídrica, precipitación, escorrentía, deshielo, incremento de frecuencia y cambio de frecuencia en patrones de inundaciones, evapotranspiración, temperatura, infiltración, cambios en carga de nitratos y fósforo total por incremento de precipitación (Nijssen *et al.* 2001; Arnell 2004; Bouraoui *et al.* 2004; Simonovic y Li 2004; Zhang *et al.* 2005; Zierl y Bugmann 2005; Piao *et al.* 2007; Zhang *et al.* 2007; Shesh y Randall 2012; Lin *et al.* 2015; Mehdi *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2016b). El cambio climático también tiene influencia en la erosión hídrica, es así que Nearing *et al.* (2004) mencionan que la precipitación pluvial es el factor más importante que controla los cambios de erosión bajo cambio climático, a través de la cantidad e intensidad.

Arnell (2004) indica que el impacto del cambio climático en los recursos hídricos dependerá del manejo que se les dé en el futuro. El cambio climático afecta el acceso a servicios hidrológicos de los ecosistemas (Imbach *et al.* 2010), por probables alteraciones de las condiciones hidrológicas del lugar (Zhang *et al.* 2007). Por su parte el IPCC (2014) plantea que los cambios en precipitación repercuten en la calidad y cantidad de los recursos hídricos. Singh y Kumar (2014) indican que "la disponibilidad de agua básicamente depende de la precipitación

y la evapotranspiración". Por otro lado, Zhang y Cai (2013) a escala global encontró sensibilidad del déficit hídrico ante escenarios de cambio climático, tanto en cultivo regados como sin riego

Mientras que el cambio de uso y cobertura tiene efecto sobre la erosión, debido al rol que juega la cobertura de amortiguamiento; donde la parte aérea de las plantas absorben energía de la lluvia y el sistema radicular brinda resistencia mecánica del suelo (Morgan 1997). Por su parte, Nunes *et al.* (2011) indica que "la erosión puede controlarse mediante el cambio de uso de la tierra y el aumento de la cobertura del suelo".

El 2015 fue el año más caliente de la superficie global de la tierra con respecto a los períodos de análisis 1951-1980; 1961-1990 y 1981-2010 con $+0.87^{\circ}\text{C}$, $+0.76 \pm 0.09$, y $+0.42$, respectivamente (Hansen *et al.* 2016; Sánchez-Lugo *et al.* 2016; WMO 2016). En Guatemala se prevé que la temperatura incremente a la década de 2060 entre menos de 1°C y más de 3°C , presentándose los mayores cambios en las tierras altas, y cambios de precipitación de hasta 75 mm (Oglesby y Rowe 2014). Schmidt *et al.* (2012), indican que al 2050 el incremento promedio de temperatura para Guatemala será 2.4°C .

Bajo el contexto del cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra planteado anteriormente, se hace relevante evaluar el rol de estos impulsores sobre la dinámica del ciclo hidrológico y el proceso erosivo inherente a este; además de los cambios en disponibilidad hídrica para uso humano y agrícola, que pueda experimentarse en la subcuenca Quiscab.

Para lograr evaluar esto se realiza simulación hidrológica con el modelo de conceptual semi-distribuido de tiempo continuo y a escala de cuenca, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold *et al.* 1998; Arnold *et al.* 2012; Zhang 2014). Donde la condición actual está representada por la línea base (1994-2015). La condición futura está dada por un escenario de cambio climático, RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES (Collins *et al.* 2011; Jones *et al.* 2011; Martin *et al.* 2011) con reducción de escala estadística de la plataforma MarkSim® (Jones y Thornton 2013), y dos escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura de la tierra (-80% bosque y +50% bosque).

1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Giorgi (2006) denomina punto caliente tropical emergente a Centro América por su cambio en precipitación y temperatura futuro. En Centro América, Amador *et al.* (2016) evidencia que el 2015 presentó mayores frecuencias, días, con temperaturas por arriba del promedio del período de referencia 1981-2010, para una serie de estaciones meteorológicas monitoreadas en dichas región.

Imbach *et al.* (2012) simularon el comportamiento del ciclo hidrológico en Mesoamérica con el modelo MAPSS ante escenarios de cambio climático del CMIP3 al 2070-2099, resultando la cordillera de Guatemala, Honduras y Nicaragua junto a la Península de Yucatán con reducción de la escorrentía por arriba del 80%, en comparación al período 1950-2000. Hidalgo *et al.* (2013) sugiere que la escorrentía superficial reduciría entre 10% al 30%, resultado de la

reducción de precipitación para el período 2050-2099 ante el escenario de cambio climático A1B en Centro América.

En Guatemala se simuló el ciclo hidrológico con el modelo WEAP, evidenciando el déficit hídrico en la cuenca del Lago Atitlán y el incremento de la presión sobre el recurso hídrico al 2020, 2050 y 2080, ante escenarios de cambio climático y presión demográfica; con un uso de 1,700 m³ per cápita anual (IARNA-URL 2013; IARNA-URL 2015).

Lal (2001) menciona que la acelerada erosión exagera la degradación del suelo, y esta permanecerá principalmente en los países en desarrollo durante el siglo 21, provocando cambio en la dinámica de carbono en el suelo y siendo una fuente no puntual de contaminación hídrica. Mientras que "el cambio climático y la presión antrópica son los principales factores de degradación de suelo" (Comisión Europea 2013). Por otro lado, la erosión es uno de los más graves problemas de salud pública, debido a que los humanos obtienen arriba del 99% de su alimento de la tierra (Pimentel 2006), afectando de esta manera la seguridad alimentaria y la productividad (Oldeman 1998)

Guatemala es el país de América Latina y el Caribe con la mayor proporción de tierras degradadas (51.3%) de su territorio (PNUMA 2010b). La erosión hídrica potencial promedio en Guatemala en las zonas de sobreuso de la tierra es 91 ton ha⁻¹ año⁻¹, y en los otros usos 14 ton ha⁻¹ año⁻¹. Además, el área por sobreuso es responsable del 57% del total de erosión anual y representa el 15% del territorio (IARNA-URL 2009; Pineda 2009). En la subcuenca del río Quiscab la erosión potencial en zonas de sobreuso de la tierra es 33 ton ha⁻¹ año⁻¹ (IARNA-URL 2009). Además, las características de paisaje, pendiente y geomorfología de la zona de estudio exagera el problema de erosión (MAGA-DIGEGR 2013).

El instrumento de evaluación de los recursos hídricos es la base para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH), ya que este permite obtener información de la disponibilidad y demanda de agua que servirá a tomadores de decisión. A través de la evaluación se desarrolla conocimiento con información científica del ciclo hidrológico y sus interrelaciones con los ecosistemas, de manera que permite conocer la provisión del recurso hídrico con que se dispone y establecer los límite natural para una GIRH efectiva (GWP-TAC 2000).

Tomando en consideración los aspectos anteriormente expuestos, es evidente los problemas ambientales que se sugieren por la acción del cambio climático y cambio de uso y cobertura en sinergia con la falta de GIRH. Por ello es relevante la cuantificación temporal y espacial de los componentes del ciclo hidrológico, producción de agua, erosión hídrica y disponibilidad hídrica para uso humano y agrícola actual y futura de una subcuenca de poca instrumentación de las fracciones del ciclo del agua, como lo es la subcuenca del río Quiscab.

De esta forma se pretende brindar un conjunto de insumos de evaluación de puntos críticos para apoyar a los tomadores de decisión relacionados con el desarrollo de políticas, la Gestión Integral de los Recursos Hídricos y desarrollo sostenible de la cuenca del Lago Atitlán. Logrando con ello dar un enfoque holístico al principio de Dublín que estipula que "el agua dulce es un

bien finito y vulnerable, esencial para mantener la vida el desarrollo y el medio ambiente” debido a que se están considerando varios componentes de ciclo hidrológico y su interacción con otros recursos (ICWE 1992; GWP-TAC 2000), como lo son el recurso humano y natural.

1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del cambio climático y uso/cobertura en el comportamiento hidrológico, erosión hídrica y disponibilidad de agua para uso agrícola y humano en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar el impacto del cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab.

- a. ¿Cuál será la respuesta hidrológica ante el impacto de cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra?
- b. ¿Cuál será el impacto del cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra en la erosión hídrica?
- c. ¿Qué impulsor, cambio climático o cambio de uso y cobertura, provocará mayores cambios en la respuesta hidrológica y erosión hídrica?
- d. ¿Dónde se ubican los cambios en la respuesta hidrológica y erosión hídrica?

Identificar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab.

- a. ¿Cuáles serán los cambios en la disponibilidad hídrica para uso humano por el impacto del cambio climático en la subcuenca Quiscab?
- b. ¿Cuáles serán los cambios en déficit hídrico del cultivo de maíz por el impacto del cambio climático en la subcuenca Quiscab?
- c. ¿Dónde estarán ubicados estos cambios en disponibilidad hídrica para uso humano y de déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca Quiscab?

1.3 MARCO REFERENCIAL

1.3.1 Modelo SWAT

Este es un modelo conceptual, semi-distribuido y de tiempo continuo a escala de cuenca desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para predecir el impacto de prácticas de manejo del suelo en la generación de distintas cargas (agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas agrícolas) (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005; Gassman *et al.* 2007; Arnold *et al.* 2012; Zhang 2014). Presenta sensibilidad a los cambios del clima, ya que permite la incorporación de

factores de ajuste o anomalías para manipular los insumos del clima y simular el cambio climático, además de predecir patrones climáticos futuros (Neitsch *et al.* 2005; Gassman *et al.* 2007; Zhang 2014). En la simulación la cuenca es dividida dos veces, la primera en subcuencas y la segunda en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), estas son combinaciones únicas de tipo de suelo, cobertura y topografía (Gassman *et al.* 2007; Arnold *et al.* 2012).

Simula los procesos hidrológicos en dos fases: la fase terrestre y de enrutamiento del ciclo hidrológico. En la primera fase se controla la cantidad de cargas y se simula el ciclo del agua con la ecuación de balance de agua.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde SW_t y SW_0 representan el contenido final e inicial de agua en el suelo, respectivamente; t tiempo; R_{day} precipitación; Q_{surf} escorrentía superficial; E_a evapotranspiración actual, w_{seep} percolación y Q_{gw} flujo de retorno, todas las unidades en mm de agua al día. La fase de enrutamiento consiste en conducir o mover las cargas producidas en la fase terrestre hacia canales y reservorios (Neitsch *et al.* 2005; Arnold *et al.* 2012; Zhang 2014).

El balance hídrico se realiza a nivel de HRU e incluye los procesos de intercepción del dosel, partición del agua, deshielo, agua de riego, escorrentía superficial, flujo subterráneo, infiltración, redistribución en el perfil hasta los acuíferos y evapotranspiración (Gassman *et al.* 2007). La producción de agua neta de cada HRU para contribuir al canal está dada por la ecuación 2. Donde WYLD es la producción de agua; SURQ es la escorrentía superficial, LATQ flujo lateral en el perfil del suelo que ingresa al canal; GWQ es el flujo base; TLOSS pérdidas por transmisión a través de la cama del río y por abstracción de estanques, todos dados en mm de agua.

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ + TLOSS - \text{pond abstractions} \quad \text{Ecuación 2}$$

La escorrentía superficial (SURQ) es calculada por el método de la Curva Número desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-SCS 1972; Mockus y Hjelmfelt 2004), a través de la ecuación 3.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde Q_{surf} es la precipitación efectiva o exceso en mm de agua; R_{day} es la precipitación diaria y S es el parámetro de retención. Y la escorrentía superficial solo ocurre cuando R_{day} es mayor a las abstracciones iniciales (I_a). Neitsch *et al.* (2005) indica que el flujo lateral es calculado con un modelo cinemático de almacenamiento para cada horizonte del suelo,

cuantificando las variaciones de conductividad hidráulica, pendiente y contenido de humedad en el suelo, este método es resumido por Sloan y Moore (1984).

Según Neitsch *et al.* (2005) indica que SWAT usa el método de pérdidas por transmisión propuesto por Lane (1983), para las corrientes intermitentes. Este método considera el ancho y largo del canal y el volumen de escorrentía previo a las pérdidas por abstracción para ajustar la escorrentía superficial.

El modelo SWAT divide el agua subterránea en dos acuíferos, el primero es superficial y no confinado, y el segundo es profundo y confinado. El balance hídrico en el acuífero superficial está dado por la Ecuación 4, donde $aq_{sh,i}$ es el agua almacenada en el acuífero en un día i ; $aq_{sh,i-1}$ agua almacenada en el acuífero en el día $i - 1$; $w_{rchr,sh}$ recarga del acuífero en el día $i - 1$; Q_{gw} flujo base; w_{revap} agua que se mueve en la zona vadosa en respuesta a deficiencias de agua en el día i ; $w_{pump,sh}$ agua removida del acuífero por bombeo en el día i , todos los componentes están dados en mm de agua (Neitsch *et al.* 2005).

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchr,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad \text{Ecuación 4}$$

La recarga hídrica para ambos acuíferos es calculada con la Ecuación 5.

$$w_{rchr,i} = \left(1 - \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right]\right) * w_{seep} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right] * w_{rchr,i-1} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde $w_{rchr,i}$ es la recarga para los acuíferos en el día i (mm H₂O); δ_{gw} tiempo de desfase (días); w_{seep} agua percolada en el perfil del suelo; $w_{rchr,i-1}$ recarga de los acuíferos en el día $i - 1$. El modelo simula el flujo base si el agua almacenada en el acuífero superficial es mayor al umbral de la tabla de agua para que contribuya al cauce principal, independientemente de la existencia de recarga hídrica (Neitsch *et al.* 2005). La percolación es calculada en cada horizonte del perfil del suelo, la percolación se lleva a cabo si el contenido de humedad de un horizonte es superior a la capacidad de campo y el horizonte inferior no está saturado.

El modelo SWAT ofrece tres métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia: Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985), Priestley-Taylor (Priestley 1972), y Penman-Monteith.

Para obtener la evapotranspiración real se calcula separadamente la evaporación del suelo y dosel, y la transpiración. Primero se evapora la precipitación interceptada por el dosel, y después se calcula la máxima tasa de transpiración de la vegetación y de evaporación del suelo. La transpiración bajo condiciones ideales es calculada con una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar (Ec. 6 y 7). Donde E_t es la máxima transpiración en un día dado (mm H₂O); E'_o es la evapotranspiración potencial ajustada por la evaporación en el dosel (mm H₂O); LAI es el índice de área foliar.

$$E_t = \frac{E'_o * LAI}{3.0} \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$E_t = E'_o \quad LAI > 3.0 \quad \text{Ecuación 7}$$

La evaporación del suelo es calculada con funciones exponenciales de profundidad y humedad del suelo, donde se considera que el 50% de la evaporación ocurre en los primeros 10 mm de profundidad de suelo, y esta se reduce si el contenido de humedad es inferior a la capacidad de campo (Neitsch *et al.* 2005).

La erosión por precipitación pluvial y escorrentía superficial es calculada con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE) por Williams (1975b) (Ec. 8)

$$SYLD = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde $SYLD$ es la erosión en un día dado (ton); Q_{surf} es la escorrentía superficial (mm H₂O ha⁻¹); q_{peak} es la tasa máxima de escorrentía (m³ s⁻¹); $area_{hru}$ es el área de la HRU (ha); K_{USLE} es el factor USLE de erodabilidad del suelo; C_{USLE} factor USLE de cobertura y gestión; P_{USLE} es el factor USLE de práctica de soporte; LS_{USLE} es el factor USLE topográfico; y $CFRG$ es el factor de fragmento macro.

1.3.2 Precipitación efectiva

Esta se calcula con el método de USDA-SCS (Martin y Gilley 1993) (Ec. 9 y 10), este es de simple cálculo, ya que depende solo de la precipitación mensual y evapotranspiración real, y no requiere calibración (Hess 2010).

$$P_{ef} = SF(0.7091 * Pt^{0.82416} - 0.11556) * (10^{0.02426 * ET_c}) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$SF = (0.531747 + 0.295164 * D - 0.057697 * D^2 + 0.003804 * D^3) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde P_{ef} , es la precipitación efectiva mensual, y Pt la precipitación pluvial mensual; ET_c evapotranspiración del cultivo, SF factor de almacenamiento de agua en el suelo, D agua útil almacenada en el suelo.

1.3.3 Indicador de disponibilidad de agua

El indicador desarrollado por Falkenmark *et al.* (1989), está basado en los requerimientos humanos (doméstico, agricultura e industria). Este relaciona la cantidad de agua renovable del ciclo hidrológico y la cantidad de personas. Considera que un país o región que posee arriba de 1,700 m³ per cápita anuales la escases de agua será poco frecuente u ocasional y, por debajo de ésta la falta de agua inicia a crear efectos negativos en salud, desarrollo y bienestar humano y desarrollo económico. Mientras que abajo de 500 m³ persona⁻¹ año⁻¹ la falta de disponibilidad limita la vida (Falkenmark *et al.* 1989; Hinrichsen *et al.* 1998); es un indicador muy utilizado por su fácil cálculo (FAO 2013), y puede incluir recursos hídricos renovables no

controlados (inundaciones) (Molle y Mollinga 2003). Pero, es insuficiente para medir el impacto en poblaciones pequeñas, ya que fue diseñado a escala de país (Brown y Matlock 2011). Utiliza la escala siguiente para clasificar el grado de estrés y/o escasez de agua per cápita anual (Falkenmark y Widstrand 1992)

- No estrés: > 1701 m³ per cápita anual
- Estrés hídrico: 1000 -1700 m³ per cápita anual
- Escasez crónica: 500 – 100 m³ per cápita anual
- Escasez extrema o absoluta: < 500 m³ per cápita anual

1.4 PRINCIPALES RESULTADOS

A futuro se prevé que por impacto del cambio climático la respuesta hidrológica y de erosión hídrica será la reducción en sus magnitudes, mientras que si se disminuye el bosque 80% los procesos hidrológicos: SURQ, WYLD, GW_Q, PERC y la erosión se sugiere incrementarían, mientras que la ET, LAT_Q y GW_RCHG disminuirían. Ante un escenario de incremento de bosque del 50% todos los flujos y erosión hídrica disminuirían, a excepción de LAT_Q que no sufriría cambio y la ET se incrementaría (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Cambios porcentuales en la respuesta hidrológica y erosión hídrica por el impacto del cambio climático (RCP 8.5 modelo HadGEM2-ES al 2050) y cambio de uso y cobertura de la tierra: -80% bosque (CUCT1) y +50% bosque (CUCT2), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Componente		Cambios en respuesta hidrológica y erosión, %		
		RCP 8.5 al 2050	CUCT 1	CUCT 2
PRECIP	Precipitación pluvial	-23	-	-
ET	Evapotranspiración real	-61	-3	2
SURQ	Escorrentía superficial	-51	4	-2
LAT_Q	Flujo lateral	-26	-1	0
GW_Q	Flujo base	-55	10	-8
WYLD	Producción de agua	-40	3	-2
GW_RCHG	Recarga a los acuíferos	-48	-1	-14
PERC	Percolación	-51	9	-7
SYLD	Erosión hídrica	-20	10	-1

Ante el impacto del cambio climático la subcuenca Quiscab se sugiere pasaría a escasez extrema, misma situación para cinco microcuencas. Mientras que las otras dos microcuencas se prevé llegarían a escasez crónica. Siendo el umbral de estrés hídrico 1, 700 m³ per cápita anual (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Disponibilidad hídrica per cápita por año ($\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala

Microcuenca	$\text{m}^3 \text{ persona}^{-1} \text{ año}^{-1}$ Cambio, %			Categoría estrés	
	2015	2050		2015	2050
Argueta	2,138	657	-69	No estrés	Escasez crónica
Barreneché	1,651	496	-70	Estrés hídrico	Escasez extrema
Pamán	727	337	-55	Escasez crónica	Escasez extrema
Novillero	1,751	681	-61	No estrés	Escasez crónica
Xibalbay	1,004	260	-74	Estrés hídrico	Escasez extrema
Chuiscalera	1,334	384	-71	Estrés hídrico	Escasez extrema
Quiscab	285	68	-76	Escasez extrema	Escasez extrema
Subcuenca Quiscab	1,270	412	-70	Estrés hídrico	Escasez extrema

El impacto del cambio climático al 2050 en el déficit hídrico del cultivo de maíz se sugiere sería el surgimiento de este en la parte final del ciclo y el incremento en su magnitud de $535 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Déficit hídrico del cultivo de maíz ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 205; y el cambio en el déficit hídrico, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Mes	Déficit hídrico del maíz				
	mm		$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$		
	Línea base	RCP 8.5	Línea base	RCP 8.5	Cambio
Marzo	-4.7	-13.6	47	136	89
Abril	-3.7	-44.4	37	444	407
Noviembre	0.0	-3.9	0	39	39
Total	-8.4	-61.9	84	619	535

1.5 PRINCIPALES CONCLUSIONES

La sensibilidad de los componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica ante el cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES al año 2050) presentará mayores cambios absolutos y relativos mensuales y anuales, y en variabilidad del régimen anual, en comparación con los escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura de la tierra en la subcuenca del río Quiscab.

El impacto del cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES) y presión demográfica al 2050 la llevarán a escasez extrema, reduciendo con ello la disponibilidad hídrica per cápita anual. Presentándose los mayores cambios espaciales en los lugares con mayor presión demográfica y menor producción de agua a futuro.

Se resalta el déficit hídrico potencial actual del cultivo de maíz en el establecimiento del cultivo (inicio de etapa vegetativa), además del surgimiento en la última parte del ciclo del cultivo ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 del HadGEM2-ES, y se prevé un incremento severo del déficit hídrico en ambas etapas (+ 535 m³ ha⁻¹). Este incremento severo es generalizado espacialmente en las áreas destinadas al cultivo de granos básicos en la subcuenca Quiscab.

1.6 LITERATURA CITADA

- Amador, J; Hidalgo, H; Alfaro, E; Durán-Quesada, A ; Calderón, B. 2016. Regional Climate: Central America and the Caribbean. (en línea). Bulletin of the American Meteorological Society 978:S178-S181. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Arnell, NW. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. Global environmental change 141:31-52.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; Van Griensven, A ; Van Liew, M. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS ; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1.
- Assessment, ME. 2005a. Ecosystems and human well-being : health synthesis : a report of the Millennium Ecosystem Assessment. Eds. J. Sarukhán; P. Weinstein. Washington, United States of America, Board of Review Editors.
- _____. 2005b. Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. Eds. J. Sarukhán; A. Whyte. Washington, United States of America,, Board of Review Editors. (World Resources Institute,).
- Aylward, B; Bandyopadhyay, J; Belausteguigotia, J-C; Borkey, P; Cassar, A; Meadors, L; Saade, L; Siebentritt, M; Stein, R; Tognetti, S ; Tortajada, C. 2005. Freshwater Ecosystem Services. In K. R. Chopra. ed. Ecosystems and human Well-Being : Policy Responses : Findings of the Responses Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. (en línea). Washington, United States of America,. p. 213-255. Disponible en <http://www.millenniumassessment.org/en/Responses.html>
- Bouraoui, F; Grizzetti, B; Granlund, K; Rekolainen, S ; Bidoglio, G. 2004. Impact of climate change on the water cycle and nutrient losses in a Finnish catchment. Climatic Change 661-2:109-126.
- Brown, A ; Matlock, MD. 2011. A review of water scarcity indices and methodologies. White paper 106:
- Carpenter, SR; Mooney, HA; Agard, J; Capistrano, D; DeFries, RS; Díaz, S; Dietz, T; Duraiappah, AK; Oteng-Yeboah, A ; Pereira, HM. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. Proceedings of the National Academy of Sciences 1065:1305-1312.
- Coates, D; Pert, PL; Barron, J; Muthuri, C; Nguyen-Khoa, S; Boelee, E ; Jarvis, DI. 2013. 3 Water-related Ecosystem Services and Food Security. Managing Water and Agroecosystems for Food Security 10:29.
- Collins, W; Bellouin, N; Doutriaux-Boucher, M; Gedney, N; Halloran, P; Hinton, T; Hughes, J; Jones, C; Joshi, M ; Liddicoat, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-system model–HadGEM2. Geoscientific Model Development 44:1051-1075.

- Europea, C. 2013. Cambio climático y degradación de los suelos en América Latina: escenarios, políticas y respuestas. (en línea). Bruselas, BEL, 188 p. (Serie de estudios temáticos EUROCLIMA). Consultado 20 jun.
- Falkenmark, M; Lundqvist, J ; Widstrand, C. 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. In, Blackwell Publishing Ltd. p. 258-267.
- Falkenmark, M ; Widstrand, C. 1992. Population and water resources: a delicate balance. Population bulletin 473:1-36.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2013. Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- Fitts, CR. 2012. Groundwater science. 2 ed ed. Academic press. 639 p.
- Gassman, PW; Reyes, MR; Green, CH ; Arnold, JG. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters 338:
- GWP-TAC, (Global Water Partnership Technical Advisory Committee, SE). 2000. Manejo integrado de recursos hídricos. Estocolmo, SE, (TAC BACKGROUND PAPERS NO. 4).
- Hansen, J; Sato, M; Ruedy, R; Schmidt, GA ; Lo, K. 2016. Global Temperature in 2015.
- Hargreaves, GH ; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection)(USA). no. fiche no. 85-2517.:
- Hess, T. 2010. Estimating green water footprints in a temperate environment. Water 23:351-362.
- Hidalgo, HG; Amador, JA; Alfaro, EJ ; Quesada, B. 2013. Hydrological climate change projections for Central America. Journal of Hydrology 495:94-112.
- Hinrichsen, D; Robey, B ; Upadhyay, UD. 1998. Solutions for a water-short world. Population Reports. Series M: Special Topics 14:1-31.
- IARNA-URL, (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT). 2009. Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el Desarrollo. Esc. (Guatemala: URL, IARNA. Serie Perfil Ambiental).
- IARNA-URL, (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT). 2013. Evaluación Regional de los Recursos Hídricos y las Necesidades de Gestión para apoyar la Agricultura de pequeños productores: Enfoque de gestión y adaptación a las amenazas inducidas por el cambio y la variabilidad climática en el Altiplano Occidental de Guatemala. Guatemala, 296 p. Disponible en http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/Informe_Final_PRS/Adjuntos/Parte%202.pdf
- IARNA-URL, IdA, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT). 2015. Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala: Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo. Guatemala, Disponible en <http://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=16>
- ICWE, (International Conference on Water and the Environment, IE). 1992. The Dublin Statement on Water and Report of Conference. Dublin, IE, 55 p.
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B ; Corrales, L. 2010. Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos hidrológicos al cambio climático en Mesoamérica. Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina:32.
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B; Roupsard, O; Mahé, G; Neilson, R; Corrales, L; Scholze, M ; Ciais, P. 2012. Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial water cycle of Mesoamerica under climate change scenarios*. Journal of Hydrometeorology 132:665-680.

- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change, ZH). 2014. Resumen para responsables de políticas. In Edenhofer; O. Pichs-Madruga; Y. Sokona; E. Farahani; S. Kadner; K. Seyboth; A. Adler; I. Baum; S. Brunner; P. Eickemeier; B. Kriemann; J. Savolainen; S. Schlömer; C. V. Stechow; T. Zwickel; J. Minx. eds. Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, UK. p. 1-33.
- Jones, C; Hughes, J; Bellouin, N; Hardiman, S; Jones, G; Knight, J; Liddicoat, S; O'Connor, F; Andres, RJ ; Bell, C. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* 43:543-570.
- Jones, PG ; Thornton, PK. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems* 114:1-5.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land degradation & development* 126:519-539.
- Lane, LJ. 1983. Chapter 19: Transmission Losses. In *National engineering handbook*, section 4: Hydrology. Washington, DC, SCS-USDA. p. 19-1-19-17.
- Lin, TP; Lin, YP ; Lien, WY. 2015. Evaluating Impacts of climate and land use changes on streamflow using SWAT and land use models based CESM1-CAM5 Climate scenarios. EGU General Assembly Conference Abstracts, 8713.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2013. Estudio Semidetallado de suelos del departamento de Sololá, Guatemala. Guatemala, GT, 948 p.
- Martin, D ; Gilley, J. 1993. Irrigation water requirements: Chapter 2, Part 623. *National Engrg. Handbook*, USDA, Soil Conservation Service 284:
- Martin, G; Bellouin, N; Collins, W; Culverwell, I; Halloran, P; Hardiman, S; Hinton, T; Jones, C; McDonald, R; McLaren, A; O'Connor, F; Roberts, M; Rodriguez, J; Woodward, S; Best, M; Brooks, M; Brown, A; Butchart, N; Dearden, C; Derbyshire, S; Dharssi, I; Doutriaux-Boucher, M; Edwards, J; Falloon, P; Gedney, N; Gray, L; Hewitt, H; Hobson, M; Huddleston, M; Hughes, J; Ineson, S; Ingram, W; James, P; Johns, T; Johnson, C; Jones, A; Joshi, M; Keen, A; Liddicoat, S; Lock, A; Maidens, A; Manners, J; Milton, S; Rae, J; Ridley, J; Sellar, A; Senior, C; Totterdell, I; Verhoef, P ; Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development* 43:723-757.
- McNaughton, K ; Jarvis, P. 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In T. Kozlowski. ed. *Water Deficits and Plant Growth*. London, UK, Academic Press, INC. p. 1-47.
- Mehdi, B; Ludwig, R ; Lehner, B. 2015. Evaluating the impacts of climate change and crop land use change on streamflow, nitrates and phosphorus: A modeling study in Bavaria. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 4:60-90.
- Mockus, V ; Hjelmfelt, A. 2004. Chapter 10: Estimation of direct runoff from stormwater rainfall. In *National Engineering Handbook*, Part 630 Hydrology. United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS)
- Molle, F ; Mollinga, P. 2003. Water poverty indicators: conceptual problems and policy issues. *Water policy* 55:529-544.
- Morgan, RPC. 1997. Erosión y conservación del suelo. Trads. P. U. Terrón; J. D. M. López De Meneses. 2 ed. Madrid, España, Mundi-Prensa. Disponible en https://books.google.com.pe/books/about/Erosi%C3%B3n_y_conservaci%C3%B3n_d_el_suelo.html?id=jcFqaFI-u1UC
- Nearing, M; Pruski, F ; O'neal, M. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation* 591:43-50.

- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J ; King, K. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. . Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX:
- Nijssen, B; O'Donnell, GM; Hamlet, AF ; Lettenmaier, DP. 2001. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic Change* 501-2:143-175.
- Nunes, AN; De Almeida, AC ; Coelho, CO. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography* 312:687-699.
- Oglesby, R ; Rowe, C. 2014. Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5. (en línea). Guatemala, 35 p. p. Consultado 01 nov 2015. Disponible en <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1442.pdf>
- Oldeman, LR. 1998. Soil degradation: a threat to food security. Report.
- Piao, S; Friedlingstein, P; Ciais, P; de Noblet-Ducoudré, N; Labat, D ; Zaehle, S. 2007. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO2 on global river runoff trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 10439:15242-15247.
- Pimentel, D. 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, development and sustainability* 81:119-137.
- Pineda, P. 2009. Conflictos del uso del territorio y deterioro de las tierras. In *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el Desarrollo*. Guatemala, Guatemala, IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT)
- PNUMA, (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PA). 2010b. *Perspectivas del medio ambiente: América Latina y el Caribe GEO ALC3* (en línea). Panamá, PA, 375 p. Disponible en <http://www.pnuma.org/geo/geoalc3/Doc%20COMPLETO/GEO%20ALC%203%20WEB%20VERSION%20C.pdf>
- Priestley, C. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. In, Citeseer
- Ripl, W. 2003. Water: the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 3581440:1921-1934.
- Sánchez-Lugo, A; Morice, C ; Berrisford, P. 2016. Temperature: Surface Temperature. (en línea). *Bulletin of the American Meteorological Society* 978:S12-S13. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Schmidt, A; Eitzinger, A; Sonder, K; Sain, G; Rizo, L; Rodriguez, B; Hellin, J; Fisher, M; Laderach, P ; San Vicente, F. 2012. Tortillas on the roaster (ToR) Central America maize-beans systems and the changing climate: full technical report.
- Shesh, RK ; Randall, WG. 2012. SWAT and Wavelet Analysis for Understanding the Climate Change Impact on Hydrologic Response. *Open Journal of Modern Hydrology* 0202:41-48.
- Simonovic, SP ; Li, L. 2004. Sensitivity of the Red River Basin flood protection system to climate variability and change. *Water resources management* 182:89-110.
- Singh, RB ; Kumar, D. 2014. Water Scarcity. In S. Eslamian. ed. *Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Managemen*. New York, US. p. 519-543.
- Sloan, P ; Moore, I. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply Sloping Forested Watersheds. *Water resources research* 2012:1815-1822.
- USDA-SCS, (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service, US). 1972. *SCS National engineering handbook, section 4: hydrology*.
- Vörösmarty, CJ; Léveque, C; Revenga, C; Bos, R; Caudill, C; Chilton, J; Douglas, EM; Meybeck, M ; Prager, D. 2005. Fresh Water. In M. H. Rashid; R. Scholes; A. Neville. eds. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition*

- and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, United States of America. p. 165-207.
- Williams, JR. 1975b. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. (en línea). Mississippi, US, ARS-USDA. p. 244-252. Consultado 20 jun. Disponible en <https://archive.org/stream/presentprospecti40sedi#page/244/mode/2up>
- WMO, (World Meteorological Association, CH). 2016. WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2015. Geneva, Switzerland: World Meteorological Association. 23 p.
- Zhang, G; Nearing, M ; Liu, B. 2005. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China. Transactions of the ASAE 482:511-517.
- Zhang, L; Walker, GR ; Dawes, W. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance.
- Zhang, L; Dawes, W ; Walker, G. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water resources research 373:701-708.
- Zhang, L; Nan, Z; Yu, W ; Ge, Y. 2016b. Hydrological Responses to Land-Use Change Scenarios under Constant and Changed Climatic Conditions. Environmental management 572:412-431.
- Zhang, X; Srinivasan, R ; Hao, E. 2007. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model. Transactions of the ASABE 503:901-910.
- Zhang, X ; Cai, X. 2013. Climate change impacts on global agricultural water deficit. Geophysical Research Letters 406:1111-1117.
- Zhang, Z. 2014. Nonpoint Source and Water Quality Modeling. In S. Eslamian. ed. Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Management. New York, US
- Zierl, B ; Bugmann, H. 2005. Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. Water resources research 412: Disponible en <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004WR003447/full>

CAPÍTULO II

ARTÍCULO I. Impacto del cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab, Cuenca Lago de Atitlán, Guatemala.

RESUMEN

Se determina el impacto del cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán. Se utiliza el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool). La subcuenca tiene un área de 149.7 km². Se considera una línea base de 1994 al 2015; un escenario de cambio climático RCP 8.5, modelo HadGEM2-ES al 2050 con reducción de escala estadística de la plataforma MarkSim®; y dos escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura (-80 bosque, y +50% bosque). Se utiliza el algoritmo SUFI-2 del programa SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), para evaluar la sensibilidad y optimización (calibración y análisis de incertidumbre) de parámetros. La variable caudal se usa para calibración en dos puntos de la subcuenca, el primero ubicado en zona poco intervenida y el segundo en una zona de alta intervención. Los puntos de calibración presentan comportamiento hidrológico distinto entre caudales simulados y observados. Punto con menor intervención el ajuste hidrológico fue muy bueno (NS=0.77; KGE=0.87). Punto en sector de mayor intervención el ajuste hidrológico no fue satisfactorio (NS=-5; KGE=-0.8). Bajo escenarios futuros se prevé que el mayor impacto en la respuesta hidrológica y erosión hídrica será ocasionado por cambios en el clima, que por cambios en el uso y cobertura de la tierra; la producción de agua y erosión hídrica podrían reducirse hasta un 40% y 20%, respectivamente. Contar con información de uso y gestión de agua es necesario para un mejor ajuste hidrológico.

Palabras clave: modelo SWAT, SWAT-CUP, modelación hidrológica, escenarios, algoritmo SUFI-2, ajuste hidrológico, calibración, incertidumbre, sensibilidad, simulación

ABSTRACT

Determination of the impact of climate change and land use/cover change on the hydrological response and water erosion in the Quiscab River subbasin, basin of Lake Atitlán. The SWAT (Soil Water Assessment Tool) model is used. The subbasin has an area of 149.7 km². A baseline is considered from 1994 to 2015; a climate change scenario RCP 8.5, model HadGEM2-ES to 2050 with statistical reduction of the MarkSim® platform; and two hypothetical scenarios of land use/cover change (-80 forest, and + 50% forest). The SUFI-2 algorithm of the SWAT-CUP (SWAT-Uncertainty Prediction) program is used to evaluate the sensitivity and optimization (calibration and uncertainty analysis) of parameters. The streamflow is used for calibration at the points of the subbasin, the first located in a poorly intervened area and the second in a high intervention zone. The calibration points present a different performance between simulated and observed flows. Point with poorly intervention the performance was very good (NS = 0.77, KGE = 0.87). Point in sector of high intervention the performance was not

satisfactory (NS = -5; KGE = -0.8). Under future scenarios, it is expected that the high impact on hydrological response and water erosion will be caused by changes in climate, rather than changes in land use and land cover; water production and water erosion could reduce until 40% and 20%, respectively. Having information on water use and management in intervened areas is necessary for a better performance.

Key words: SWAT model, SWAT-CUP, hydrological modeling, scenarios, SUFI-2 algorithm, hydrological adjustment, calibration, uncertainty, sensitivity, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos son aquellos beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, y dentro de la gama de beneficios se establecen cuatro categorías: servicios básicos clave, de regulación, culturales y de aprovisionamiento (MEA2005a; MEA2005b). Rippl (2003) le denomina al agua "la corriente sanguínea de la biósfera", ya que el agua establece la sostenibilidad de los ecosistemas vivos. Es decir, juega roles en distintos procesos y se complica definirla en una de las cuatro categorías de beneficios ecosistémicos (Vörösmarty *et al.* 2005). Por ello, el recurso hídrico podría ser considerado un servicio ecosistémico transversal.

El río Quiscab es uno de los dos principales ríos que drenan hacia el Lago de Atitlán (MAGADIGEGR 2013). Este lago se sugiere fue formado por el último ciclo de erupciones, denominada Los Chocoyos, que dio lugar a la formación de la más moderna caldera donde este se ubica. Después de la mencionada erupción, se dio la formación de los tres estratovolcanes al sur de la caldera (Volcán San Pedro, Toliman y Atitlán) y dos deltas al norte del lago (Newhall *et al.* 1987; Newhall 1987; Rose *et al.* 1987). Este lago se encuentra dentro de una cuenca con sistema de drenaje endorreico con área de 541 km² (Hernandez *et al.* 2011; Harvey 2012).

La subcuenca del río Quiscab pertenece a la Reserva de Uso Múltiple de la Cuenca del Lago de Atitlán (RUMCLA), que tiene gran atracción turística por la belleza escénica del Lago y riqueza cultural (CONAP 2007). Es uno de los lagos más importantes en todo el mundo (Rejmánková *et al.* 2011). En las últimas décadas el Lago de Atitlán ha presentado problemas de incremento de contaminación del agua debido a concentración de sedimentos, nutrientes, aguas residuales y otros contaminantes, además de las floraciones de cianobacterias; impactando negativamente sus funciones y dando lugar al actual proceso acelerado de eutrofización (Dix *et al.* 2003; Hernandez *et al.* 2011; Rejmánková *et al.* 2011; Komárek *et al.* 2013).

El cambio climático continuará su avance y se debe estar preparado para adaptarse a este y ser resiliente (Locatelli 2014). Imbach *et al.* (2010) afirma que a nivel Mesoamericano la producción de agua potable es vulnerable al reducirse la precipitación a futuro, afectando el acceso a servicios hidrológicos de los ecosistemas por impacto del cambio climático. Esto como resultado de probables alteraciones de las condiciones hidrológicas del lugar (Zhang *et al.* 2007).

Se prevé que Guatemala cambiará su temperatura del 2010 a 2060 entre menos de +1°C a mayor de +3°C; siendo los mayores cambios en las tierras altas, y cambio de hasta 75 mm de precipitación (Oglesby y Rowe 2014). Bajo este contexto conocer la dinámica del ciclo hidrológico y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab ante cambios futuros del clima es necesario

Asimismo basándose en el enfoque de servicios ecosistémicos, el cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra son impulsores directos de cambio en los ecosistemas, es decir, ocasionarán cambios en la dotación de servicios ecosistémicos y con ello del bienestar humano (MEA2005a; Carpenter *et al.* 2009). El cambio de uso y cobertura de la tierra juega un papel importante en la partición del ciclo hidrológico, ya que procesos como la evapotranspiración dependen del tipo de cobertura, factores de clima, capacidad de agua disponible para la planta entre otros (McNaughton y Jarvis 1983; Zhang *et al.* 1999; Zhang *et al.* 2001; Fitts 2012); y, este puede incrementar la escorrentía superficial o atenuarla.

El presente estudio pretende determinar la respuesta hidrológica y erosión hídrica ante el cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán. Para tal fin se utilizó el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005), el cual tiene la capacidad de incorporar las anomalías climáticas y cambios de uso y cobertura en el proceso de simulación (Neitsch *et al.* 2005). Se pretende brindar insumos técnicos para contribuir al desarrollo de políticas locales que contribuyan a la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca del Lago de Atitlán, además de ser un escenario prospectivo.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Área de estudio

La subcuenca del río Quiscab (14° 48' 32.9" N, 91° 13' 51.89" O), pertenece a la cuenca endorreica del Lago de Atitlán, y forma parte de la vertiente del Pacífico. Su área es 149.7 km² y comparte superficie con cinco municipios de dos departamentos, Sololá y Totonicapán (**Figura 1**). La población total proyectada al 2016 que habita en esta subcuenca es 101,070 personas (INE 2004a). Pertenece al área fisiográfica de las Tierras Altas Volcánicas (MAGA-DIGEGR 2013). Su rango altitudinal es 1,547 hasta 3,303 metros sobre el nivel del mar. Su geología se debe a erupciones volcánicas de silicatos que dieron origen al Lago de Atitlán (Newhall *et al.* 1987; Newhall 1987; Rose *et al.* 1987). Los materiales consolidados y no consolidados de piroclastos ha promovido la formación de relieves abruptos en más del 90% de Sololá (MAGA-DIGEGR2013).

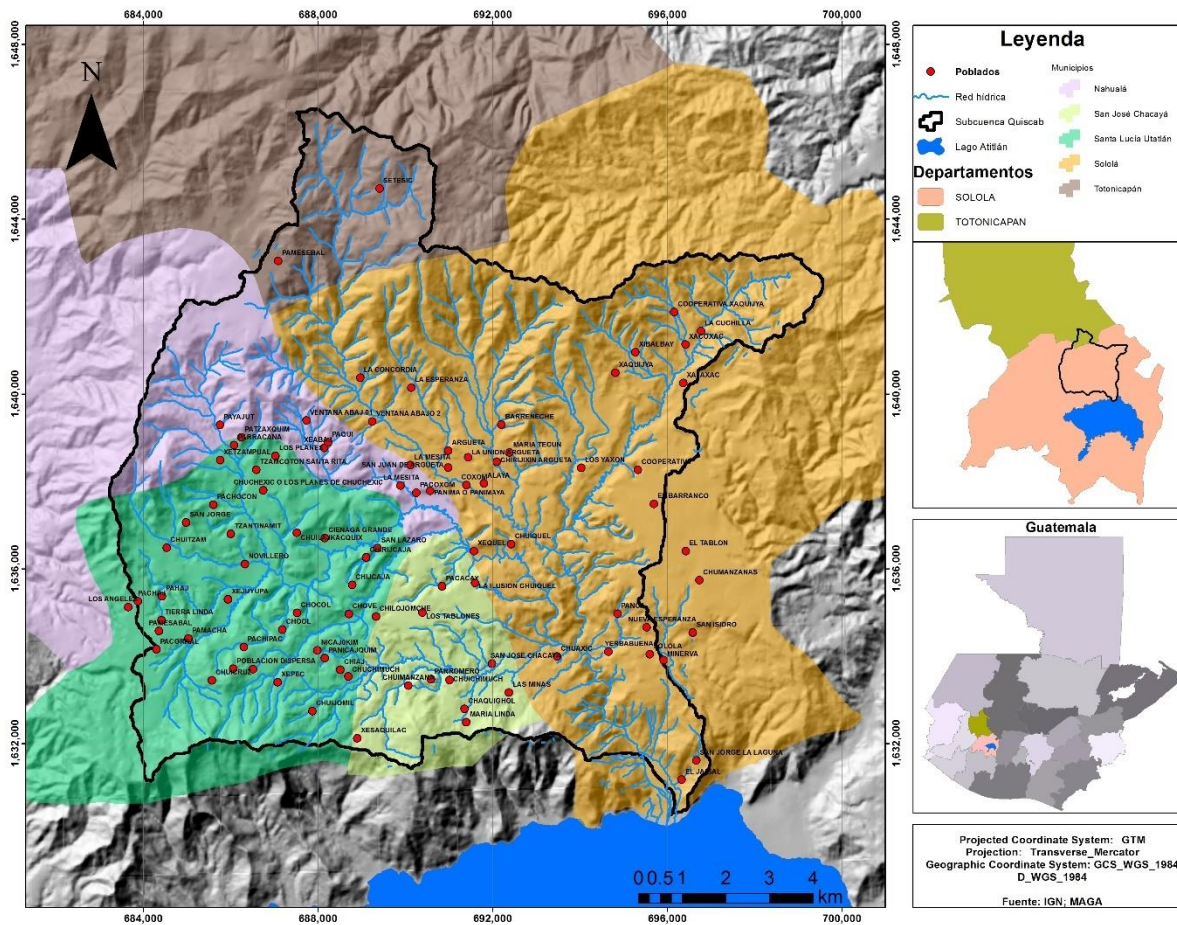


Figura 1. Ubicación del área de estudio, subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán, Guatemala.

La subcuenca forma parte de la Reserva de Uso Múltiple de la Cuenca del Lago de Atitlán (RUMCLA), área protegida creada como parque nacional en 1955 (CONAP 2007). Según el mapa de clasificación climática de Thornthwaite, el clima en la subcuenca las categorías que van de Frío húmedo a semicálido muy húmedo (MAGA-UPGGR 2009; MAGA-DIGEGR 2013). Según el mapa de zonas de vida de Holdridge la subcuenca del río Quiscab comprende tres zonas de vida: Bosque muy húmedo Montano Subtropical (bmh-M); Bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical (bmh-MB); y el Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical (bh-MB). Respecto a su cobertura, los bosques mixtos, latifoliado y coníferas representan el 35% de su área; granos básicos (maíz y frijol) el 38.6%; cultivos anuales (hortalizas) con 4.8%; pastos 1.3%; matorrales y lugares con poca vegetación el 18.3% y 0.1%, respectivamente (GIMBOT 2014; INAB y CONAP 2015; MAGA-DIGEGR 2015).

2.2 Modelo SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo operacional o conceptual Arnold *et al.* (1998); (Zhang 2014), semi-distribuido (Arnold *et al.* 2012) y de tiempo continuo a escala de cuenca, operando en intervalos de tiempo diario; fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS)

para evaluar y predecir el impacto de las prácticas de manejo suelo en la generación de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas agrícolas (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005; Gassman *et al.* 2007; Arnold *et al.* 2012). Tiene sensibilidad a los cambios de clima, manejo y cobertura vegetal; logrando con ello predecir los efectos en el movimiento de agua, sedimentos y transporte de nutrientes (Zhang 2014).

Arnold *et al.* (1998) mencionan que el modelo SWAT no requiere calibración para cumplir con su objetivo de predicción, esta es una realidad en cuencas sin historial de aforo de caudales. Los procesos hidrológicos se simulan en dos fases, la primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico y controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y cargas de pesticidas en el canal principal de cada subcuenca (Neitsch *et al.* 2005; Arnold *et al.* 2012; Zhang 2014). El ciclo hidrológico en la fase terrestre es simulado con base en la ecuación de balance de agua (Ec. 11), esta define el contenido final de agua en el suelo en función del contenido inicial de agua en el suelo (SW_0), tiempo (t), precipitación (R_{day}), escorrentía (Q_{surf}), evapotranspiración (E_a), percolación en el perfil del suelo (w_{seep}), y flujo de retorno (Q_{gw}); todos lo anteriores en escala diaria y en milímetros (Neitsch *et al.* 2005).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 11}$$

La segunda fase de la simulación es el enrutamiento del ciclo hidrológico, este contempla la conducción o movimiento de las cargas determinadas en la fase terrestre (agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas), hacia los ríos y reservorios de la cuenca (Neitsch *et al.* 2005; Arnold *et al.* 2012; Zhang 2014). Cada carga utiliza un método de enrutamiento distinto, la producción de agua utiliza el método de enrutamiento de Muskingum (Neitsch *et al.* 2005). Este método asume la existencia de relación lineal entre el almacenamiento de un canal y la descarga en la entrada y salida del mismo; y está basado en la ecuación de almacenamiento (Brutsaert 2005; Baláž *et al.* 2010).

Con fines de simulación la cuenca es dividida en subcuencas y luego en unidades de respuesta hidrológica (HRU), estas son unidades homogéneas que resultan de combinaciones únicas posibles de uso del suelo, tipo de suelo y pendiente (Gassman *et al.* 2007; Arnold *et al.* 2012). A través de ambas divisiones el modelo considera dos niveles de heterogeneidad espacial, el primero por el proceso hidrológico (subcuencas) y, el otro por el tipo de suelo, uso y pendiente (Zhang 2014). Las HRU están representadas como un porcentaje del área de las subcuencas, sin identificación espacial (Arnold *et al.* 2012); por ello se tiene falta de realismo y se debe tener precaución en interpretar los resultados (Zhang 2014).

El balance hídrico en la cuenca se simula para cada HRU, el cual incluye las intercepciones del dosel, particiones de agua, deshielo, agua de riego, escorrentía superficial, flujo subterráneo lateral, infiltración, redistribución del agua en el perfil de suelo hasta la llegada a los acuíferos poco profundos y evapotranspiración (Gassman *et al.* 2007). Para la cuenca es a través de la combinación del total de HRU's que se obtiene el componente que se desea (Neitsch *et al.* 2005).

El modelo permite realizar modificaciones a los datos climáticos de entrada: incluir bandas de elevación para tomar en cuenta el efecto orográfica sobre la precipitación y temperatura, manipular los insumos del clima para simular el cambio climático y, predecir patrones climáticos futuros (Neitsch *et al.* 2005; Gassman *et al.* 2007). Neitsch *et al.* (2005) indican que SWAT permite ajustar de manera sencilla la precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y niveles de CO₂ por subcuenca para simular el cambio climático. La Ec. 12 y Ec. 13 representan el ajuste en precipitación y temperatura futura que realiza el modelo.

$$R_{day} = R_{day} \times \left(1 + \frac{adj_{pcp}}{100} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

R_{day} es la precipitación en mm en un día dado, y adj_{pcp} la anomalía de precipitación en porcentaje. Para la temperatura el ajuste está dado por la Ec. 3:

$$T_{mx} = T_{mx} + adj_{tmp} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde T_{mx} es la temperatura diaria máxima en grados Celsius y, adj_{tmp} la anomalía de temperatura.

2.2.1 Datos para el modelo SWAT

Los datos de entrada de SWAT especialmente explícitos, se obtienen a través de sistemas de información geográfica (SIG) (Olivera *et al.* 2006). Para el presente estudio la topografía está representada por el modelo de elevación digital (MED), con resolución espacial de 20 metros. Datos de uso y cobertura de la tierra de la cuenca del río Quiscab se obtuvieron de las fuentes: Mapa de bosques y uso de la tierra 2012 (GIMBOT 2014); Mapa forestal por tipo y subtipo de bosque (INAB y CONAP 2015); y el Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra de la República de Guatemala (MAGA-DIGEGR 2015).

Las categorías de uso y cobertura de la tierra se reclasificaron de acuerdo al listado de especies de plantas por defecto en la base de datos de SWAT (Arnold *et al.* 2013). El estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sololá a escala 1:50,000 (MAGA-DIGEGR 2013), se utilizó como insumo para elaborar las base de datos de suelo de la subcuenca bajo estudio. También se utilizó el programa *Soil Water Characteristic* desarrollado por Saxton y Rawls (2006), para estimar otras características de suelo no contenidas en el estudio semidetallado.

Los datos meteorológicos fueron colectados de la estación el Tablón del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología y Meteorología (INSIVUMEH). Se usó 22 años de registro diario para la simulación (1994 a 2015). Las variables utilizadas para la simulación en SWAT fueron precipitación diaria y temperatura mínima y máxima diaria. Datos de caudales mensuales se obtuvieron para dos microcuencas del Quiscab (río Pamán y Quiscab) con un registro de 15 meses entre 2013 y 2014 (URL *et al.* 2014), y de 12 meses de 2007 a 2008 (Xicay 2011).

Información topográfica, de cobertura, suelos de clima y caudales fue sistematizada y analizada (**Figura 2**).

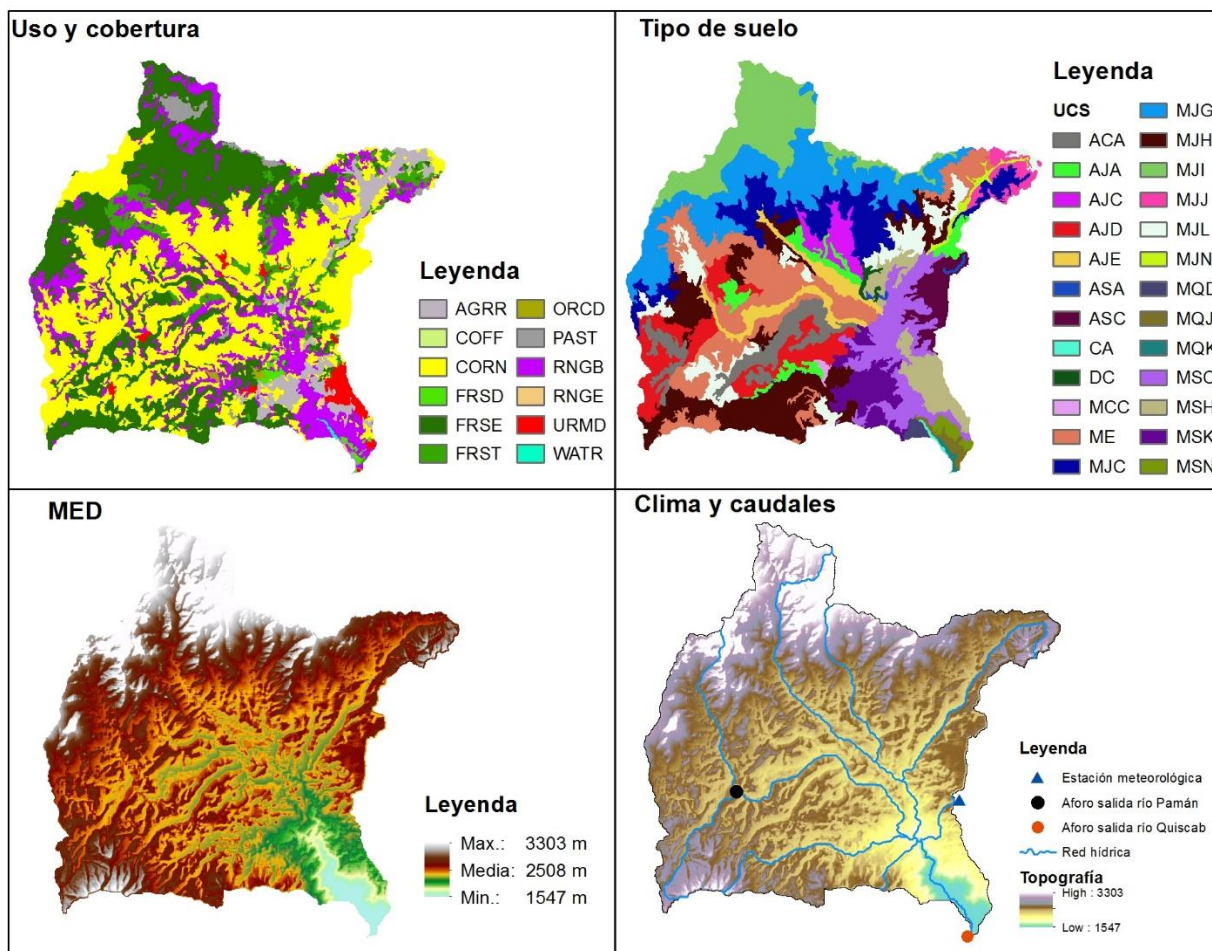


Figura 2. Datos de entrada del modelo SWAT para delimitación de la subcuenca, microcuencas y definición de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), y ubicación de información climática y fluvial utilizada en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán. UCS hace referencia a las Unidades Cartográficas de Suelo del Estudio Semidetallado de suelos (MAGA-DIGEGR 2013).

La información del clima futuro mensual se obtuvo del generador de datos de clima MarkSim®, los datos tienen reducción de escala estadística (Jones y Thornton 2013). MarkSim® actualmente cuenta con 17 Modelos de Circulación General del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (CMIP5); y sus respectivos escenarios de cambio climático. La respuesta hidrológica de la cuenca se simula con el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES para el año 2050. Se consideran anomalías mensuales de precipitación y temperatura calculadas con datos de clima futuro y de la estación observada. Estadísticas de las variables de clima se calcularon con la Macro 4.1 de Microsoft Excel; posteriormente se ingresaron al archivo WGNuser del modelo SWAT.

2.2.2 Configuración preliminar y simulación con modelo SWAT

Se consideran siete microcuencas en la subcuenca del río Quiscab. Un traslape de tipo de suelos, uso y cobertura de la tierra y, pendiente es desarrollado para generar las HRU; la pendiente es categorizada según clasificación de pendiente de la FAO (2009). Las HRU's generadas no consideran umbrales de exclusión de sus fracciones ni refinamientos de uso y cobertura (**Figura 3**).

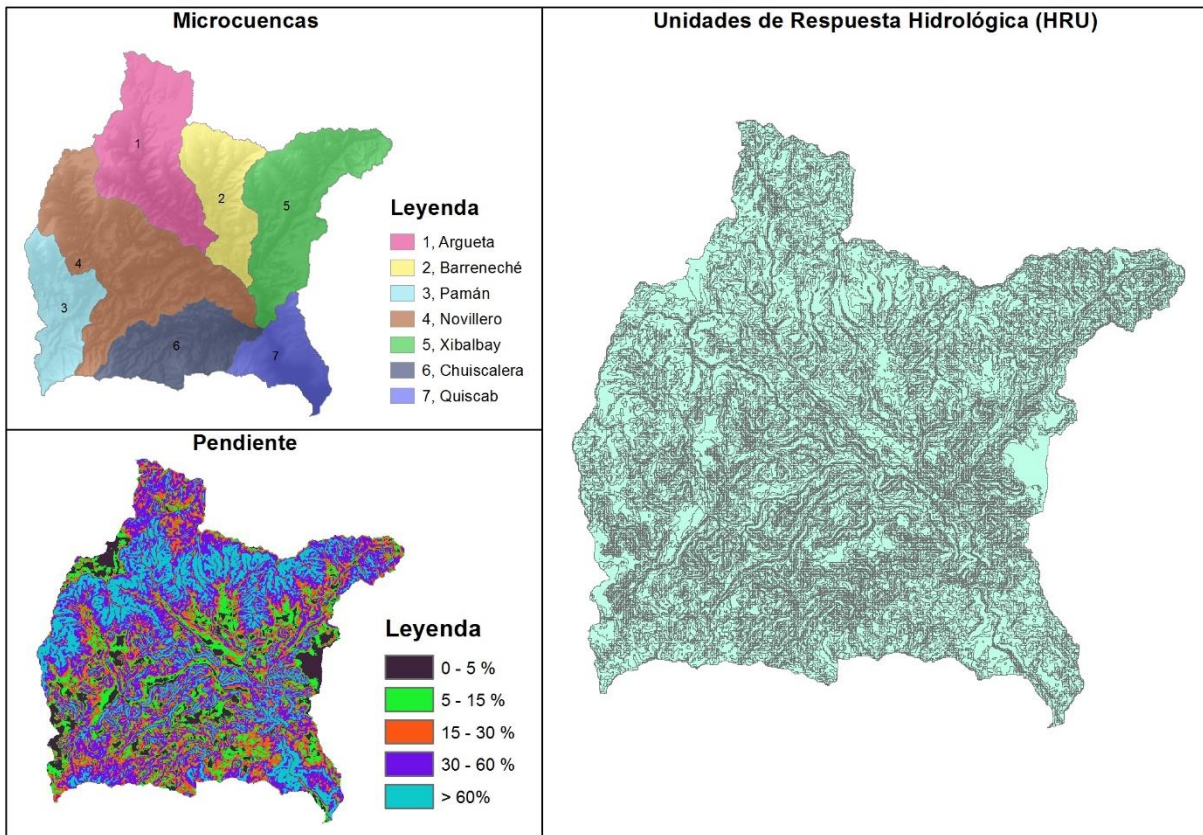


Figura 3. Discretización espacial en microcuencas (división 1) y Unidades de Respuesta Hidrológica (división 2), y categorías de pendiente según FAO (2009), para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Previo a calibración se realizó ajustes de parámetros en toda la subcuenca para lograr la mejor simulación de referencia. El método de evapotranspiración potencial (IPET) seleccionado fue Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985) porque en el estudio solo se tiene las variables temperatura mínima y máxima, y el método por defecto en SWAT Penman-Monteith requiere mayor número de variables climáticas. La curva número inicial de escorrentía (CN2) se varió en función de la condición hidrológica de cada uso y cobertura y el grupo hidrológico de los suelos (Cronshey 1986). El Coeficiente de rugosidad "n" de Manning para el flujo superficial se modificó para cada uso y cobertura tomando valores propuestos por Engman (1986). Para modificar la rugosidad en el canal principal y tributarios se usa el método de la tabla de Manning de acuerdo al tipo de corriente y características del canal; siendo 0.04 y 0.07 respectivamente (Chow 1994).

2.3 Calibración y análisis de incertidumbre

El análisis de sensibilidad, calibración y análisis de incertidumbre se realiza con el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2) (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007) incluido en el programa SWAT-CUP (SWAT Calibration, Uncertainty Procedures) (Abbaspour 2015). Este es un procedimiento de modelado inverso semi-automatizado que combina optimización (calibración y análisis de sensibilidad) y análisis de incertidumbre (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007). "La incertidumbre de los parámetros se expresa en rangos de distribución uniforme y, considera todas las fuentes de incertidumbre de las variables de conducción, modelo conceptual, parámetros y datos observados en el modelo hidrológico" (Abbaspour *et al.* 2007; Yang *et al.* 2008; Abbaspour *et al.* 2015).

SUFI-2 cuantifica la incertidumbre de las salidas del modelo con la banda de predicción de incertidumbre del 95% (95 PPU), calculada en la posición 2.5% y 97.5% de la distribución acumulada de las variables de salida obtenidas a través de muestreo por Hipercubo latino (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007). Utiliza dos reglas para evaluar la bondad de ajuste o fuerza de la calibración del modelo: *P-factor*, es la fracción de datos observados más su error contenido en la banda del 95% de predicción de incertidumbre; esta banda varía de 0 a 1, el 1 equivale al 100% (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007; Abbaspour *et al.* 2015). La otra es *R-factor*, es la fracción entre la distancia media de los valores mínimo y máximo de la banda 95 PPU y la desviación estándar de los datos observados, y se sugiere que este ratio sea inferior a 1 y lo más cercano a 0 (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007). Se recomienda un balance entre ambos ratios para alcanzar la calibración de los parámetros (Abbaspour *et al.* 2015).

El tener un *P-factor* cercano a 1 asegura la representación de todas las incertidumbres en la incertidumbre de los parámetros (Yang *et al.* 2008). Abbaspour *et al.* (2015) señalan que $1 - P\text{-factor}$, se podría referir al error del modelo. La calibración se ejecutó con la variable caudal a nivel mensual; y se realizó en dos puntos y/o ríos de la subcuenca del río Quiscab. Uno en el río Pamán, ubicado en una zona de baja intervención y en la desembocadura del río Quiscab, área con alta actividad humana, que incluye extracción de agua para consumo doméstico y riego. Se corrió el modelo con tres años de calentamiento y el periodo de calibración en la microcuenca del río Pamán fue de abril 2014 a agosto del 2015. Mientras que para la desembocadura del río Quiscab, además del mismo periodo del río Pamán, se agregó otro registro (setiembre 2007 a agosto 2008).

Para la calibración u optimización SUFI-2 requiere iniciar con la selección de una función objetivo (Abbaspour *et al.* 2007; Abbaspour 2015). Una función objetivo "es un indicador de la desviación entre la serie simulada y observada" (Van Griensven y Bauwens 2003), por ello evalúa el ajuste hidrológico de la calibración. En este estudio se definió el criterio de Kling-Gupta (KGE, Ec. 14 y 15) (Gupta *et al.* 2009). KGE es una optimización de la función de eficiencia Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe 1970), y permite que las subestimación de picos de escorrentía no sea tan graves en comparación a Nash-Sutcliffe (Gupta *et al.* 2009).

$$KGE = 1 - ED$$

Ecuación 14

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2(\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Ecuación 15

Donde ED es la distancia Euclídea desde el punto ideal; β es ratio entre la media de la simulación y la media de valores observados, representa el sesgo; α , ratio entre las desviaciones estándar de la simulación y los datos observados, representa la variabilidad; r , coeficiente de correlación lineal entre los datos simulados y los observados (Gupta *et al.* 2009; Abbaspour 2015).

También se calculó otros estadísticos de ajuste del modelo: Nash-Sutcliffe (NS); coeficiente de determinación (R^2); porcentaje de sesgo (PBIAS); coeficiente de determinación ponderado (bR^2) y, el ratio RSR. Santhi *et al.* (2001) señala que el coeficiente de eficiencia NS "indica como el gráfico entre valores observados y simulados se ajusta a una línea de relación 1:1". Moriasi *et al.* (2007) clasifica de ajuste satisfactoria aquella simulación con $NS > 0,5$.

El R^2 indica la proporción de los datos observados que se explica a través del modelo de simulación. Tiene un rango de 0 a 1, valores más cercanos a 1 indican menor varianza del error. Santhi *et al.* (2001) consideran de predicción "no aceptable o pobre" cuando el R^2 y NS son cercanas a cero. El R^2 tiene el inconveniente que solo cuantifica la dispersión de los datos y puede dar valores cercanos a 1 aún cuando el modelo genere predicciones sobreestimadas o subestimadas (Krause *et al.* 2005); además de ser muy sensible a valores atípicos (Moriasi *et al.* 2007). Por ello, Krause *et al.* (2005) introdujo el R^2 ponderado (bR^2), con el cual las sobre y subestimaciones son cuantificadas en conjunto (Ec. 16).

$$bR^2 = \begin{cases} |b| * R^2 & \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1} * R^2 & \text{for } b > 1 \end{cases}$$

Ecuación 16

Donde R^2 , es el coeficiente de determinación y, b representa la pendiente de la regresión entre los datos observados y simulados (Krause *et al.* 2005). Otro estadístico del ajuste de rendimiento es la estandarización de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), denominada RSR y, desarrollada por Moriasi *et al.* (2007) incluye un índice de error y un factor de normalización. El mismo autor propone que existe un ajuste satisfactorio si $RSR \leq 0,7$.

2.3.1 Análisis de sensibilidad

Abbaspour *et al.* (2007) mencionan que a través del muestreo Hipercubo latino SUFI-2 lleva a cabo "n" combinaciones de parámetros; el número de combinaciones, "n", debe estar entre 500 y 1,000. Para el estudio se realizaron 600 simulaciones y dos iteraciones. Para iniciar a evaluar las simulaciones (muestreos), SUFI-2 calcula la función objetivo; luego la significancia relativa de cada parámetro (prueba de t), como medida de sensibilidad de los mismos (Abbaspour *et al.* 2007). En el estudio se utilizó el método de sensibilidad global del algoritmo SUFI-2.

La sensibilidad estima el cambio medio en la función objetivo dado un cambio en los parámetros, y la prueba de "t" depende del rango de los parámetros (Abbaspour *et al.* 2007). En este caso para calibración y análisis de sensibilidad se inició con 24 parámetros y finalmente se seleccionaron los 12 parámetros de mayor sensibilidad para realizar calibración (**Cuadro 4**). Se realizó la definición de los parámetros a calibrar y sus respectivos rangos a través de revisión de literatura (Rostamian *et al.* 2008; Santhi *et al.* 2008; Arnold *et al.* 2012; Marcinkowski *et al.* 2013; Singh *et al.* 2013; Abbaspour 2015; Abbaspour *et al.* 2015; Me *et al.* 2015) y los resultados de análisis de sensibilidad global de SUFI-2.

2.3.2 Parametrización

La parametrización o regionalización de parámetros se realiza con la finalidad de generalizar los ajustes sugeridos en la calibración realizada en las dos microcuencas (Pamán y Quiscab). Se consideran los términos de modificación global: multiplicador (r) y reemplazar (v) con base a tipo de suelo, uso y cobertura, ubicación, pendiente o por una combinación de los anteriores, número de subcuenca, capa del suelo, etc. (Rostamian *et al.* 2008; Abbaspour 2015). El **cuadro 4** muestra los términos de modificación global aplicados a los 12 parámetros más sensibles para llevar a cabo la parametrización en dos puntos o microcuencas de la subcuenca del río Quiscab.

Cuadro 4. Parámetros y sus rangos usados para la calibración automática con SUFI-2 de dos puntos: microcuenca Pamán y desembocadura del río Quiscab, subcuenca Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Parámetro	Descripción	Rango final de calibración
r_CN2.mgt	Curva número para condición de humedad II.	-0,17 a 0,03
r_SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo, mm/mm suelo.	-0,15 a 0,03
v_GW_REVAP.gw	Coefficiente de revapotranspiración	0,07 a 0,24
v_ALPHA_BF.gw	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo, 1/días.	0,34 a 1,0
v_GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo para recarga del acuífero, días	0,00 a 243,97
v_ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo	0,20 a 0,75
v_CH_N2.rte	Coefficiente "n" de Manning para el canal principal	0,14 a 0,30
r_SOL_K().sol	Conductividad hidráulica saturada, mm/h	-0,80 a -0,0066
v_CH_K1.sub	Conductividad hidráulica efectiva en el canal tributario, mm/h	17,18 a 55,32
v_RCHRG_DP.gw	Coefficiente de percolación del acuífero profundo.	0,40 a 1,00
r_SLSUBBSN.hru	Longitud de pendiente promedio, m.	0,09 a 1,00
r_SOL_BD().sol	Densidad aparente del suelo, g/cm ³	-0,10 a 0,14

2.4 Escenario cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra

Luego de calibrar el modelo con la línea base se realizaron simulaciones con la incorporación de un escenario de cambio climático y dos de cambio de uso y cobertura de la tierra para evaluar la sensibilidad en la respuesta hidrológica y de erosión hídrica del modelo, en estas simulaciones se mantuvo los valores de ajuste de los parámetros calibrados resueltos por SUFI-2 para ambas microcuencas.

2.4.1 Escenario de cambio climático

En cuanto al cambio climático se evalúa el escenario futuro RCP 8.5 para el año 2050, por ser el escenario más crítico del CMIP5 (Cubasch *et al.* 2013), y con ello las medidas de adaptación y mitigación por plantearse en la cuenca estarían considerando el calentamiento más severo proyectado. Otro punto que llevó a la selección de este escenario es la relación del forzamiento radiativo y las RCP's que propone Meinshausen *et al.* (2011) (**Figura 4**) donde se evidencia cierta similitud de RCP 8.5 con los escenarios más cercanos (RCP 4.5 y RCP 6.0) en el forzamiento radiativo proyectado al año 2050; caso contrario se da al año 2010 donde las cuatro RCP's se distancian significativamente. Por su parte Collins *et al.* (2013) (**Figura 5**) relaciona la anomalía de temperatura con las RCP's, y en el año 2050 la anomalía media es muy parecida entre RCP 4.5 y RCP 6 con 1.4°C y 1.3°C, respectivamente; mientras que la RCP 8.5 con 2.0°C.

Además, el año 2015 fue el más caliente en la superficie global de la tierra con respecto al periodo de análisis 1951-1980; su anomalía fue +0.87°C (Hansen *et al.* 2016). A la misma conclusión llegó WMO (2016), quien evidenció que la anomalía media fue $+0.76 \pm 0.09$ en relación al periodo 1961-1990; incluyendo datos de HadCRUT4.4.0.0¹; GISTEMP de la NASA² y, GlobalTemp de NOAA³. Mientras que Sánchez-Lugo *et al.* (2016) señalan que con respecto al periodo de referencia 1981-2010 la temperatura global al 2015 aumento entre 0.42°C y 0.46°C; la fuente de los datos para el análisis fueron NASA-GISS (Hansen *et al.* 2010); HadCRUT4; NOAA-GlobalTemp (Smith *et al.* 2008); y JMA⁴.

A nivel regional, Amador *et al.* (2016) afirman que en el 2015 la mayoría de estaciones monitoreadas en Centro América presentaron mayores frecuencias (días) con temperatura diaria superiores al promedio de temperatura media en el periodo 1981-2010; las dos estaciones de Guatemala (pacífico y atlántico) también evidenciaron tal aumento. Para Guatemala se prevé que la temperatura incremente a la década de 2060 entre menos de 1°C y más de 3°C, presentándose los mayores cambios en las tierras altas, y cambios de precipitación de hasta 75 mm, con el enfoque CMIP5 (Oglesby y Rowe 2014). Schmidt *et al.* (2012), indican que al 2050 el incremento promedio de temperatura para Guatemala será 2.4°C, con el enfoque CMIP3.

Se usó el Modelo de Circulación General (GCM) HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model versión 2, Earth System Model) (Collins *et al.* 2011; Jones *et al.* 2011; Martin *et al.* 2011) con reducción de escala por el método estadístico de la plataforma MarkSim® (Jones y Thornton 2013). La elección de este modelo se relaciona con la dirección, magnitud e incertidumbre de la anomalía de temperatura de los 17 modelos contenidos en la plataforma.

¹ Met Office Hadley Centre y Climatic Research Unit at the University of East Anglia, UK

² National Aeronautics and Space Administration, Goddard Institute for Space Studies, USA

³ National Oceanic and Atmospheric Administration National Centers for Environmental Information, USA

⁴ Japan Meteorological Agency

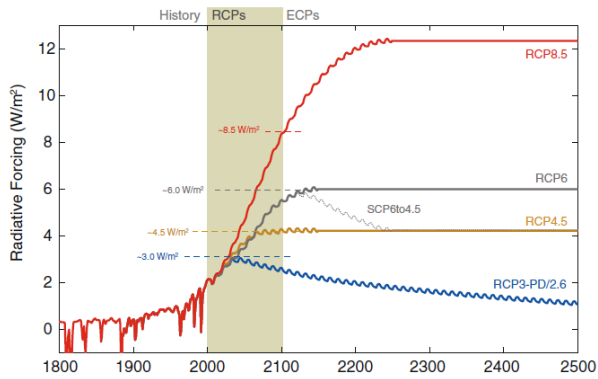


Figura 4. Forzamiento radiativo natural y antropogénico por cada RCP. Fuente: Tomado de Meinshausen *et al.* (2011)

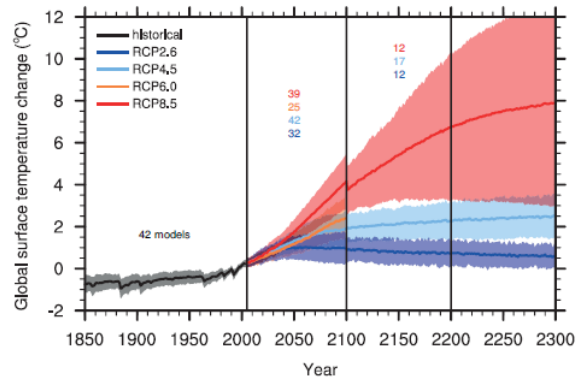


Figura 5. Series temporales de los valores medios anuales globales de las anomalías de temperatura del aire en superficie, en relación con el periodo 1986-2005; del CMIP5. Fuente: Tomado de Collins *et al.* (2013)

En primer lugar, se graficó la anomalía de todos los modelos y su ensamble de la plataforma MarkSim®, todos los modelos presentaron dirección de incremento con distintas magnitudes. Luego se eligió un modelo (HadGEM2-ES) ubicado en el tercio de modelos con mayor magnitud (> 66%), de este modo se dice que es *probable* que las anomalías de estos modelos sucedan (Stocker *et al.* 2013). La incertidumbre de los 17 modelos de MarkSim® en temperatura y precipitación es de +1.09°C y 30.98%, respectivamente (**Figura 6**).

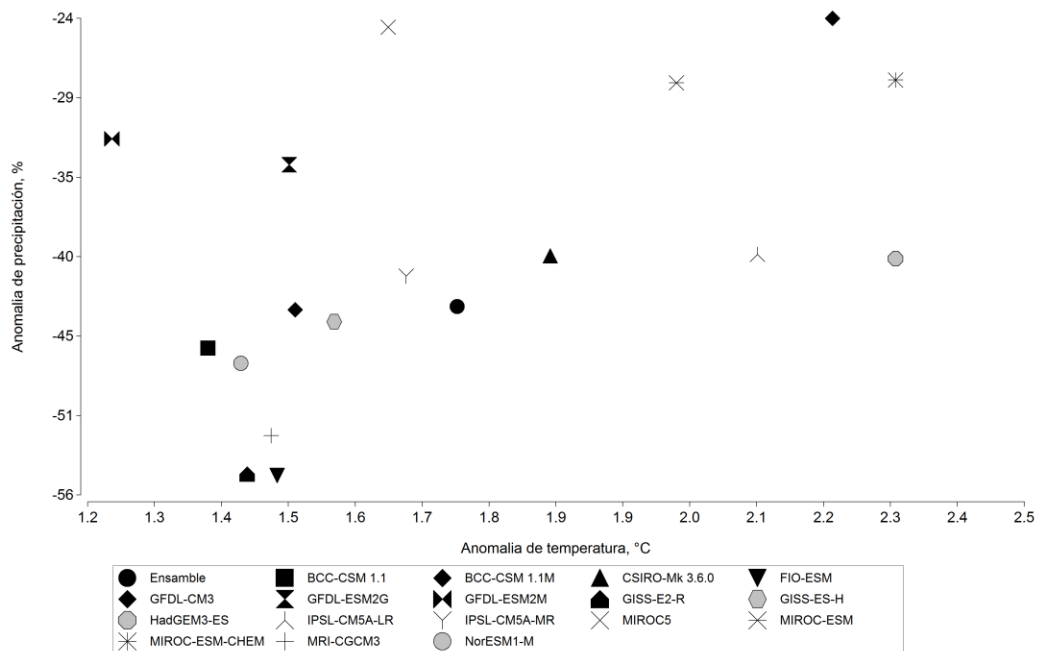


Figura 6. Incertidumbre de anomalías de temperatura y precipitación de 17 modelos y su ensamble. Fuente: elaborado con base en datos de MarkSim® (Jones y Thornton 2013).

Jones *et al.* (2011); Martin *et al.* (2011) señalan que el HadGEM2 incluye componentes de la atmósfera, océano, estratósfera y del sistema terrestre (Earth-System, ES); este último contiene la dinámica de la vegetación, la biología del océano y la química de la atmósfera. El HadGEM2 incluye mejoras en la configuración del clima para corregir errores de sesgo de temperaturas, pobre variabilidad, y errores en El Niño-Oscilación del Sur, con respecto a su predecesor HadGEM1 (Martin *et al.* 2010; Collins *et al.* 2011).

Este modelo acoplado tiene escala horizontal atmosférica de $1.875^{\circ}\text{C} \times 1.25^{\circ}\text{C}$ y, resolución vertical con 38 niveles de configuración, esto representa más de 39 km (Collins *et al.* 2011; Jones *et al.* 2011). Jones *et al.* (2011) indican que el modelo contribuyó con el CMIP5. Los principales procesos incluidos son tropósfera, superficie de la tierra e hidrología, aerosoles, océano y hielo marino, ciclo de carbono terrestre, biogeoquímica del océano y química de la tropósfera (Collins *et al.* 2011; Jones *et al.* 2011; Martin *et al.* 2011).

2.4.2 Escenarios de cambio de uso y cobertura

Para la dinámica de cambio en uso y cobertura se desarrollaron dos escenarios hipotéticos con el fin de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca a futuro; ambos escenarios pretenden explicar qué sucedería si se da un incremento (50%) y/o reducción (80%) del área ocupada por las categorías de bosque. Estos escenarios están representados por la dinámica entre bosque y pastos, matorrales y lugares con poca vegetación; esta conversión fue establecida por la proximidad espacial. El uso de escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura de la tierra y cambio climático es aplicado en varios estudios consultados (Gassman *et al.* 2007; Qi *et al.* 2009; Morán-Tejeda *et al.* 2014; Chen *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2016a).

3. RESULTADOS

3.1 Calibración del modelo y análisis de incertidumbre.

La calibración del modelo SWAT se realizó para dos puntos de la subcuenca, con datos disponibles de descarga mensual. Uno de ellos es la microcuenca del Río Pamán, el otro corresponde a la microcuenca del Río Quiscab, esta última es la desembocadura de la subcuenca del mismo nombre al Lago de Atitlán. La mejor fuerza de calibración y evaluación de incertidumbre la presentó río Pamán (**Figura 7**), donde el P-factor fue 57% y 12% para la desembocadura del río Quiscab (**Figura 8**); el río Pamán está próximo al 70% recomendado por Abbaspour *et al.* (2015), para la descarga. El R-factor en ambos ríos presentó un valor deseable inferior a la unidad, pero al ver más allá, la microcuenca Pamán tiene un R-factor mayor a la desviación estándar de los datos observados de caudal, lo cual no es deseable; situación contraria se dio en el río Quiscab, siendo esta última la deseable (Rouholahnejad *et al.* 2014; Abbaspour *et al.* 2015).

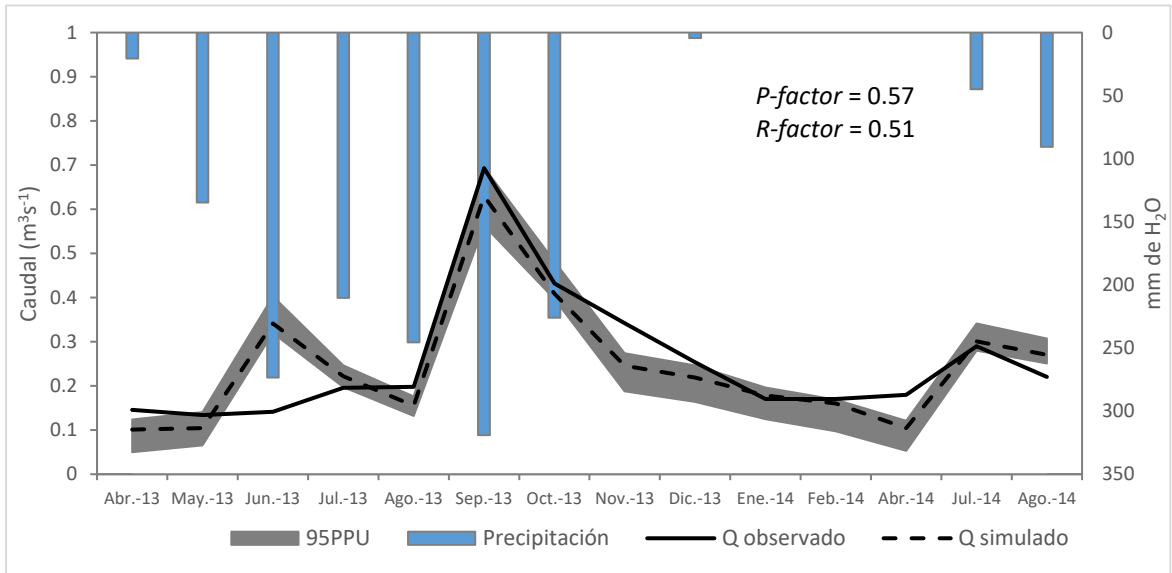


Figura 7. Calibración de la microcuenca del río Pamán, subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán.

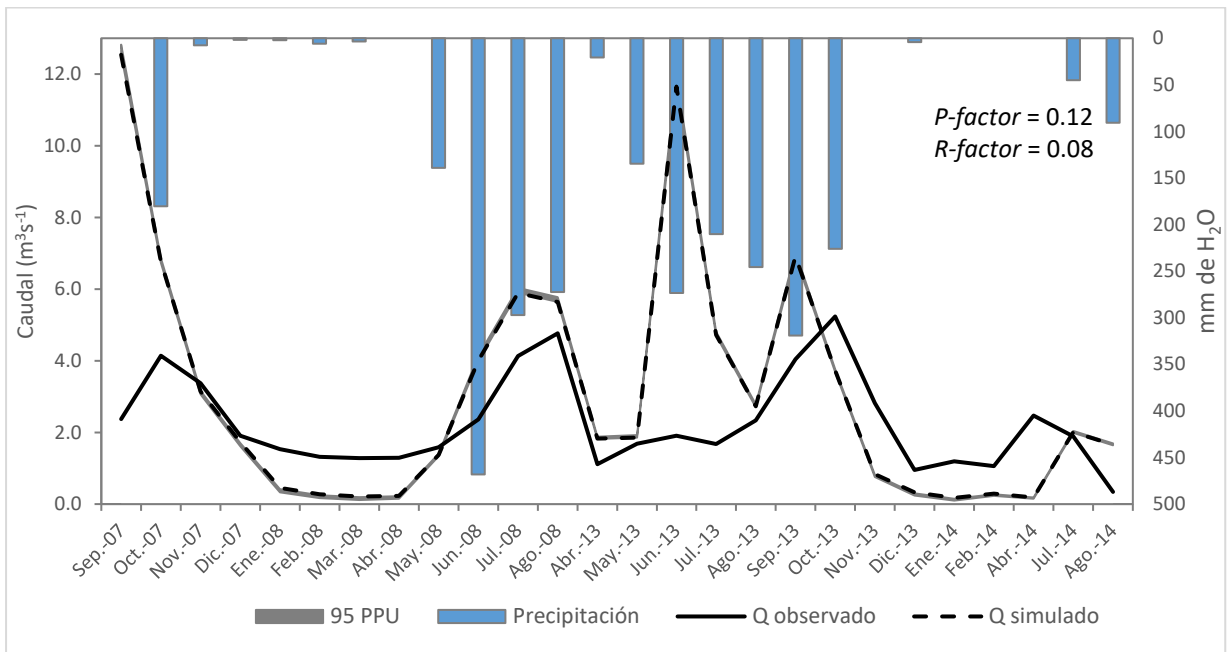


Figura 8. Calibración en la salida de la subcuenca del río Quiscab (microcuenca del mismo nombre), cuenca del Lago de Atitlán.

En la microcuenca del río Pamán, el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), la estandarización de la raíz del error cuadrático medio (RSR) y porcentaje de sesgo (PBIAS) presentaron valores muy buenos según la escala propuesta por Moriasi *et al.* (2007). El coeficiente de determinación (R^2) es muy cercano al límite inferior que Abbaspour *et al.* (2004), considera como satisfactorio.

El coeficiente de determinación ponderado (bR^2) es pobre en comparación a R^2 , y Kling-Gupta (KGE) tuvo un comportamiento muy bueno en el ajuste hidrológico del río Pamán, debido a que sus tres componentes están cercanos a su valor óptimo (1): sesgo (β), variabilidad (α), y coeficiente de correlación lineal (r), igual a 1, 0.93 y 0.88 respectivamente. Para la desembocadura del río Quiscab (microcuenca Quiscab) los seis estadísticos anteriores presentaron valores pobres, lo que resulta en un ajuste hidrológico no satisfactorio (**Cuadro 5**). El error del modelo en río Pamán y Quiscab fue 43% y 88%, respectivamente.

Cuadro 5. Estadísticos de ajuste hidrológico para los puntos calibrados: salida del río Pamán y salida de río Quiscab, en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Estadístico		Microcuenca	
		Río Pamán (salida)	Río Quiscab (salida)
KGE	Eficiencia de Kling-Gupta	0.87	-0.8
NS	Eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.77	-5
PBIAS	Porcentaje de sesgo	3.5	-38
R^2	Coficiente de determinación	0.78	0.21
bR^2	Coficiente de determinación ponderado	0.65	0.17
RSR	Ratio RSR	0.48	2.5

3.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad para los ríos Pamán y Quiscab se llevó a cabo en el mismo período de tiempo que la calibración y análisis de incertidumbre. De los 12 parámetros del análisis de sensibilidad, ocho presentaron la mayor sensibilidad, y con ello un cambio en sus valores tiene efecto significativo en los caudales simulados por el modelo. Los más sensibles son aquellos que tienen una probabilidad menor o igual a 0.05 y mayor valor absoluto del estadístico "t". El **cuadro 6** muestra la sensibilidad global de los parámetros para la microcuenca de mejor ajuste hidrológico, río Pamán.

Cuadro 6. Valores absolutos (t-Stat) y significancia (P-value) del análisis de sensibilidad global de los parámetros utilizados para calibración de la salida del río Pamán, subcuenca río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Parámetro	t-Stat	P-Value	Clasificación de sensibilidad
5:V__GW_DELAY.gw	-0.47	0.64	
3:V__GW_REVAP.gw	0.79	0.43	
7:V__CH_N2.rte	-0.97	0.33	
4:V__ALPHA_BF.gw	1.19	0.23	
12:R__SOL_BD(..).sol	-4.18	0.00	
2:R__SOL_AWC(..).sol	-4.68	0.00	
11:R__SLSUBBSN.hru	4.90	0.00	
10:V__RCHRG_DP.gw	7.04	0.00	
6:V__ESCO.hru	-9.26	0.00	
9:V__CH_K1.sub	17.07	0.00	
1:R__CN2.mgt	-35.06	0.00	
8:R__SOL_K(..).sol	-84.40	0.00	

Entre los parámetros más sensibles hay parámetros físicamente y no basados, estos últimos no se miden en campo. Para este estudio solo dos variables del suelo (SOL_AWC y SOL_BD) son producto de mediciones en laboratorio, el resto de parámetros son estimados por el modelo SWAT. Tal es el caso de la curva número (CN2), que se relaciona con la escorrentía superficial y por efecto es uno de los más sensibles. Justamente es el método de curva número del Servicio de Conservación de Suelos de la Agencia de Servicio de Conservación de suelos de los Estados Unidos (USDA-SCS 1972), que se utiliza en el presente estudio para calcular el volumen de escorrentía superficial a partir de la precipitación. En el desarrollo del método la derivación de la curva número no está físicamente basada, a pesar que satisface la conservación de la masa (Mockus y Hjelmfelt 2004).

3.3 Efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

El aporte medio anual de las fracciones del balance y producción de agua, en la subcuenca del Río Quiscab durante la línea base de simulación (1994-2015) se muestra en la **figura 9**, donde el 47% de la precipitación se convierte en producción de agua (WYLD). La producción de agua se compone 34% de escorrentía superficial (SURQ); 10% de flujo base (GW_Q); y 45% de escorrentía lateral (LATQ). La evapotranspiración actual (ET), percolación (PERC), y recarga de acuíferos representan (GW_RCHG) el 51%, 10% y 15% de la precipitación pluvial, respectivamente. La recarga hídrica (GW_RCHG) anual en el período base es igual a 225 mm. Mientras que la erosión hídrica promedio en la línea base fue 26.8 ton ha⁻¹ año⁻¹.

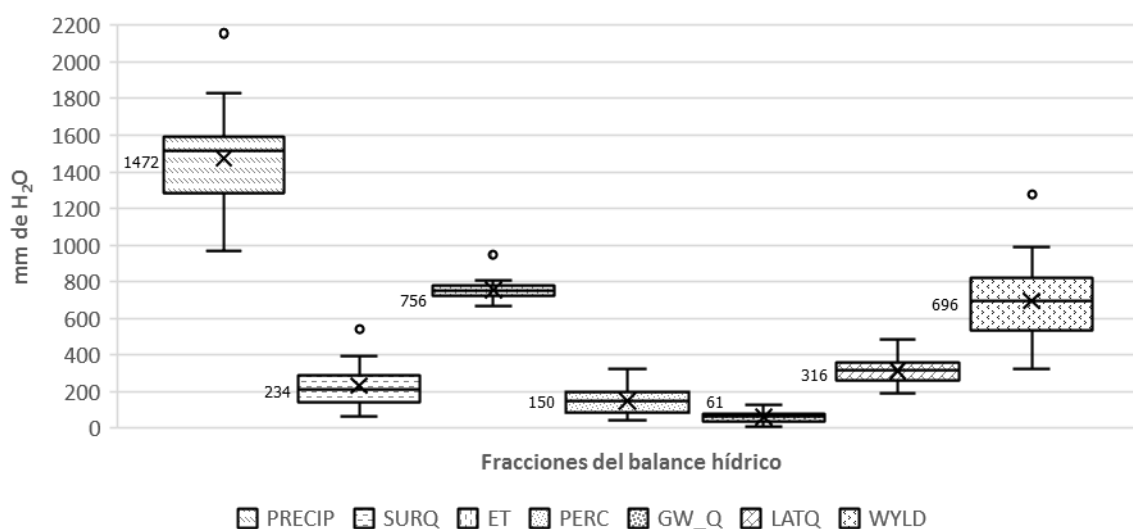


Figura 9. Aporte medio anual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua en la línea base (1994-2015) en la subcuenca del río Quiscab, Cuenca Lago de Atitlán.

Por otro lado, se tiene el aporte promedio de la línea base a lo largo del año (**Figura 10**). Donde, la precipitación pluvial mínima se dio en enero, con 7.9 mm; y la máxima en junio, 304.4 mm. La mínima producción de agua fue en febrero (10.8 mm) y la máxima en junio (132.5 mm). La ET mínima figuró en 16.2 mm (febrero) y la máxima en 104 mm (julio). Entretanto el caudal simulado medio anual en la salida de la subcuenca del río Quiscab, fue 3.3 m³ s⁻¹.

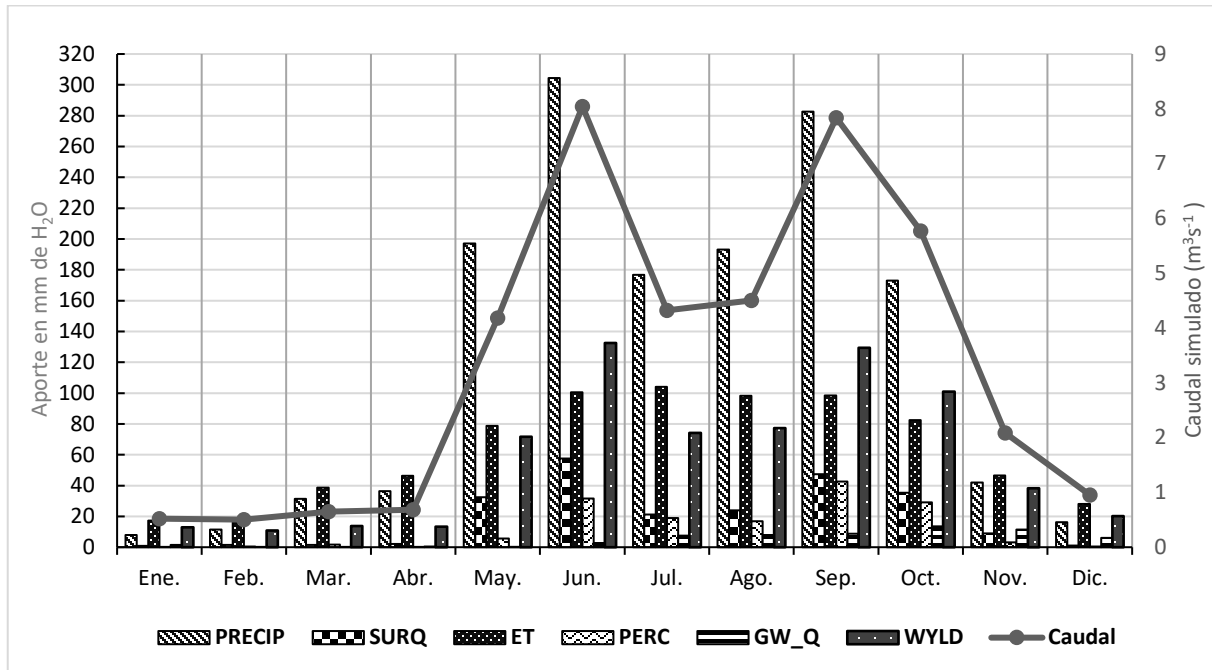


Figura 10. Aporte mensual medio de las fracciones del balance hídrico, producción de agua e hidrograma anual de la línea base de simulación (1994-2015), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

La recarga hídrica (GW_RCHG) máxima se da en octubre (48.3 mm) y la mínima en abril (2.5 mm). La erosión hídrica (SYLD) tiene su pico en junio (6.74 ton ha⁻¹ año⁻¹) y el mínimo en diciembre (0.13 ton ha⁻¹ año⁻¹); presentando la mayor carga en época lluviosa en comparación a la seca, 23.5 ton ha⁻¹ año⁻¹ y 3.3 ton ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Erosión hídrica y recarga hídrica promedio mensual y anual durante la línea base de simulación (1994-2015), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Mes	Erosión hídrica Recarga hídrica	
	ton ha ⁻¹ año ⁻¹	mm
Enero	0.30	7.36
Febrero	0.24	3.96
Marzo	0.17	3.28
Abril	0.31	2.51
Mayo	3.79	3.01
Junio	6.74	21.27
Julio	1.73	30.53
Agosto	2.35	25.30
Setiembre	4.89	37.08
Octubre	4.04	48.33
Noviembre	2.10	28.22
Diciembre	0.13	14.35
Promedio anual	26.8	225.2

Para evaluar el efecto del cambio climático futuro se comparó las salidas del modelo hidrológico SWAT de la línea base (1994-2015), y el escenario futuro RCP 8.5 al año 2050 bajo el modelo con reducción de escala, HadGEM2-ES; considerando cambios relativos, absolutos y variabilidad (coeficiente de variación). Se considera que la distribución espacial de la precipitación y temperatura se mantienen a futuro, y no hay cambio de uso y cobertura de la tierra. Al año 2050 se tienen cambios anuales de 23%; -6%; -40%, y -51% para precipitación pluvial (PRECIP), ET, WYLD y PERC respectivamente. La recarga hídrica disminuiría 48% y, la erosión hídrica se prevé experimentará una reducción anual del 20%.

La **figura 11** muestra el cambio medio durante el año, donde la precipitación pluvial (PRECIP) en octubre presentará el menor cambio, +8% (13.3 mm); y el máximo en febrero y diciembre (-100%), 11.4 mm y 16.3 mm, respectivamente. Además, setiembre pasará a ser el más lluvioso, 262 mm. La evapotranspiración real (ET) tendrá su mayor cambio en febrero, con -19% (3.1 mm); y el mínimo cambio en abril, +1% (0.3 mm). La producción de agua experimentará su más drástico cambio en marzo, -68% (9.5 mm), y el más pequeño en octubre, -6% (6.5 mm).

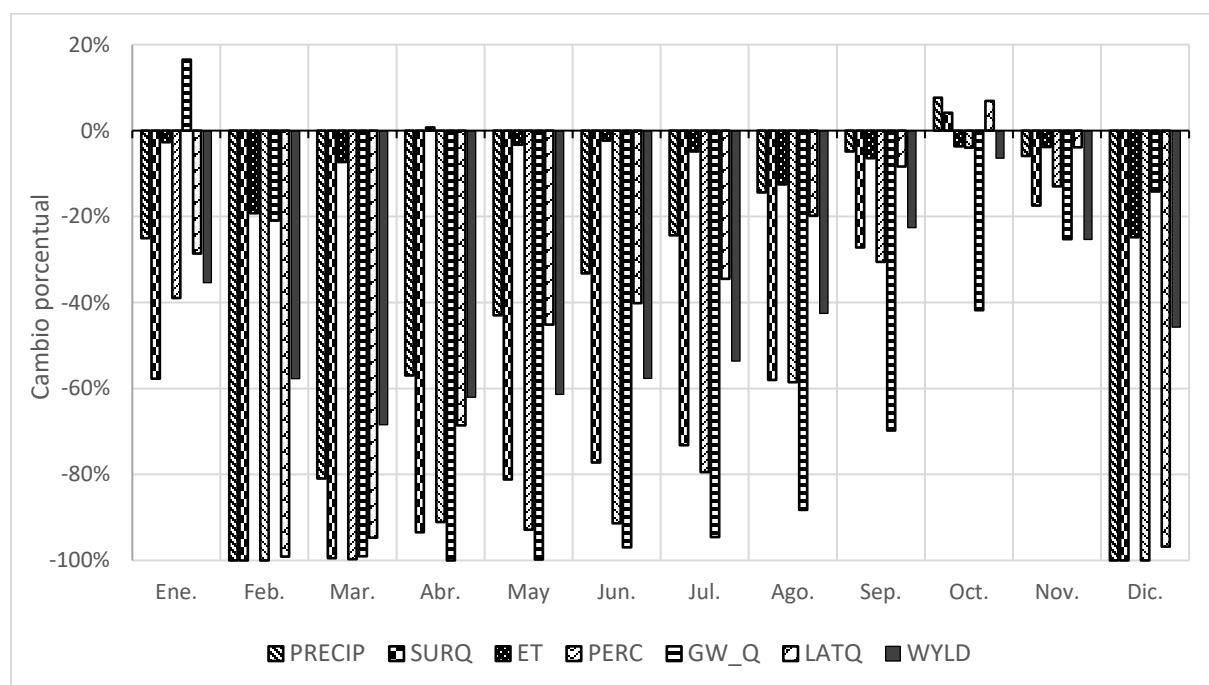


Figura 11. Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua para el escenario RCP 8.5 al año 2050, con respecto a la línea base (1994-2015), en la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.

La recarga hídrica se prevé presente su mayor cambio en junio con -86% (18.2 mm), y el menor en noviembre -20% (5.7 mm), es evidente la reducción de recarga hídrica en los doce meses. La erosión hídrica tendrá su mayor cambio en tres meses de la época seca (-100%), y el menor cambio en setiembre (-35%) (**Cuadro 8**).

Cuadro 8. Erosión hídrica de línea base y escenarios de cambio climático RCP 8.5, modelo HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Mes	Erosión hídrica, ton ha ⁻¹ año ⁻¹		Recarga hídrica, mm	
	Línea Base	RCP 8.5	Línea Base	RCP 8.5
Enero	0.30	0.05	7.36	5.61
Febrero	0.24	0.00	3.96	2.73
Marzo	0.17	0.00	3.28	1.71
Abril	0.31	0.02	2.51	0.98
Mayo	3.79	0.60	3.01	0.79
Junio	6.74	1.25	21.27	3.05
Julio	1.73	0.48	30.53	6.09
Agosto	2.35	1.33	25.30	7.51
Setiembre	4.89	6.61	37.08	19.47
Octubre	4.04	9.89	48.33	36.06
Noviembre	2.10	1.29	28.22	22.54
Diciembre	0.13	0.00	14.35	10.99
Promedio anual	26.8	21.5	225.2	117.5

A lo largo del año con el escenario RCP 8.5 al 2050 se espera que la variabilidad incremente levemente para ET, PRECIP y LATQ (6-15%), moderadamente para SURQ, WYLD y GW_RCHG (entre 15% y 35%) y severamente para PERC, GW_Q y SYLD (> 35%) (**Cuadro 9**).

Cuadro 9. Coeficiente de variación (CV) durante el año para la línea base y escenario futuro RCP 8.5 modelo HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.

Variable		Línea base	RCP 8.5 al 2050
		CV (%)	
PRECIP	Precipitación pluvial	89.9	100.8
ET	Evapotranspiración real	54.3	55.6
SURQ	Escorrentía superficial	102.8	136.5
LATQ	Flujo lateral	96.4	109.0
GW_Q	Flujo base	94.7	138.0
WYLD	Producción de agua	79.4	96.4
PERC	Percolación	119.2	173.9
GW_RCHG	Recarga hídrica de los acuíferos	82.0	111.4
SYLD	Erosión pluvial	98.7	175.1

En la época seca y lluviosa la precipitación pluvial disminuirá en promedio 61% (43 mm) y 19% (13 mm), respectivamente. En las mismas épocas, la evapotranspiración real presentará cambio de -10% (2.5 mm), -6% (5.3 mm), correspondientemente. Por su lado, la producción de agua disminuirá 7.9 mm (49%) en la época de estiaje y 38 mm (41%) en la temporada lluviosa. La recarga hídrica de los acuíferos se reducirá en temporada seca y lluviosa 35% (2.5 mm) y 64% (15.4 mm), respectivamente. La erosión hídrica tendrá cambios en temporada seca y lluviosa de -86% y -17%, respectivamente.

Mientras que el cambio espacial de los componentes del balance hídrico, producción de agua, recarga hídrica y erosión hídrica se presenta en la **figura 12**, donde se observa el efecto

del escenario RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al 2050, siendo evidente la reducción generalizada de las variables estudiadas.

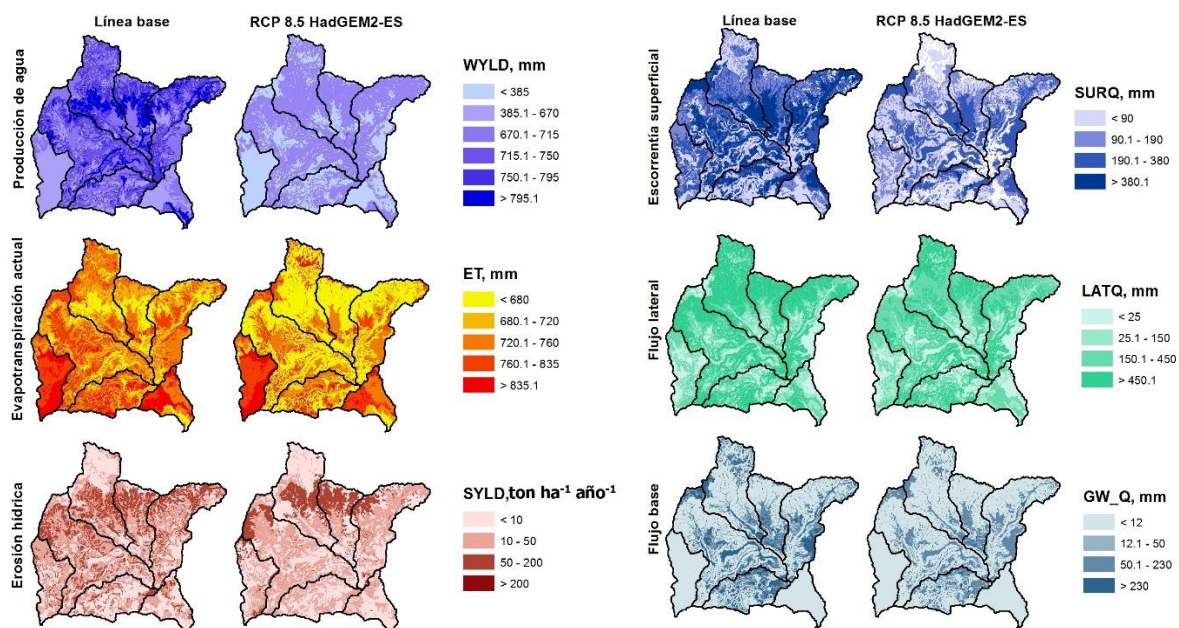


Figura 12. Respuesta hidrológica y erosión hídrica ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al 2050, en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.

3.4 Efecto del cambio de uso y cobertura en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

Tal como se evaluó el efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica, en el efecto del cambio de uso y cobertura de la tierra (CUCT) se comparó las variables hidrológicas de la línea base contra los dos escenarios de CUCT hipotéticos planteados. El escenario 1 de CUCT contempla reducción del bosque en 80%, y el escenario 2 un incremento del bosque en 50%. Se considera que se mantienen las condiciones de línea base, es decir la distribución espacial y temporal, y cantidad de precipitación pluvial; lo mismo para las temperaturas.

El cambio promedio anual para el escenario CUCT 1 será -3% para la evapotranspiración real; la producción de agua, escorrentía superficial, escorrentía lateral, flujo base, recarga hídrica y erosión hídrica se prevé cambiarán: +3%; +4%; -1%; +10%; -1%; +10%, respectivamente. Los cambios medios a lo largo del año se muestran en la **figura 13**, donde la evapotranspiración real experimentaría su mayor cambio en marzo, con -36% (14 mm); por el contrario, julio mantiene su valor de la línea base (104.3 mm). La producción de agua presentaría incremento en los doce meses, siendo el máximo en julio (5%), y el mínimo aumento de 1% (marzo y abril). La escorrentía superficial y flujo base experimentarían incremento máximo +8% (abril, mayo y junio) y 24% (junio), respectivamente.

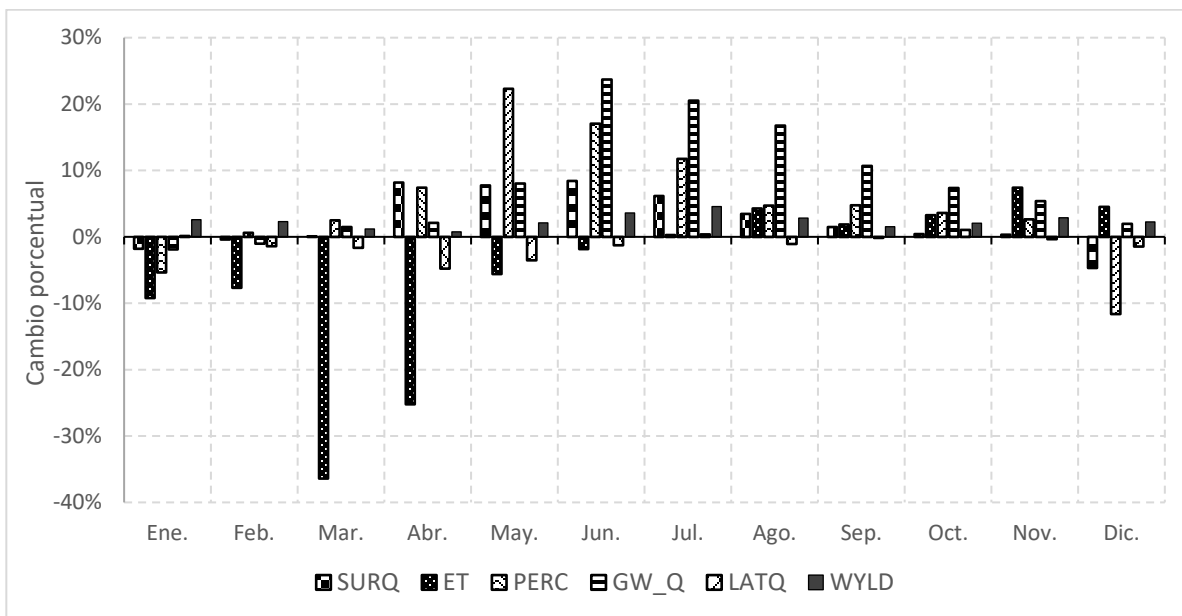


Figura 13. Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua en el escenario 1 de cambio de uso y cobertura de la tierra, comparado con el periodo 1994-2015, en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

La recarga hídrica incrementaría en mayo, junio y julio un 10%, 9% y 5%; en agosto no habría cambio y en el resto de meses disminuiría a lo sumo 5% (setiembre y octubre). La erosión hídrica presentaría el mayor incremento en el mes de junio, +61% y la menor reducción en enero, -59% (**Cuadro 10**).

Cuadro 10. Erosión hídrica de línea base y escenarios de cambio de uso y cobertura -80% bosque (CUCT 1), para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Mes	Erosión hídrica, ton ha ⁻¹ año ⁻¹		Recarga hídrica, mm	
	Línea Base	CUCT 1	Línea Base	CUCT 1
Enero	0.30	0.12	7.36	7.21
Febrero	0.24	0.10	3.96	3.89
Marzo	0.17	0.13	3.28	3.24
Abril	0.31	0.40	2.51	2.48
Mayo	3.79	5.72	3.01	3.31
Junio	6.74	10.86	21.27	23.12
Julio	1.73	2.36	30.53	31.98
Agosto	2.35	2.46	25.30	25.27
Setiembre	4.89	3.93	37.08	35.30
Octubre	4.04	2.35	48.33	46.12
Noviembre	2.10	0.98	28.22	27.06
Diciembre	0.13	0.07	14.35	13.82
Promedio anual	26.8	29.5	225.2	222.8

En promedio en la época seca la evapotranspiración real no cambió, y en la época lluviosa disminuyó 11%. Mientras que la producción de agua, escorrentía superficial y lateral, y flujo base durante la época seca tendrían la dinámica siguiente: +2%, se mantiene, -2%, +1%,

correspondientemente. En la temporada de lluvias la dinámica de las anteriores variables sería: +3%, +5%, -1%, +15%, respectivamente. La recarga hídrica incrementaría en la época lluviosa y disminuiría en la época seca, 2% en ambas temporadas. La erosión hídrica se sugiere incrementaría en la época lluviosa un 15%, y en la época seca disminuye 34%.

Mientras que la variabilidad (coeficiente de variación) a lo largo del año presentará muy leves cambios (< 6%) para las variables SURQ, PERC, GW_Q, LATQ, WYLD y GW_RCHG. Cambios leves para ET (entre 6% y 15%), y moderado para la erosión hídrica (entre 15% y 35%) (**Cuadro 11**).

Cuadro 11. Coeficiente de variación (CV) durante el año para la línea base y escenario de cambio de uso y cobertura -80% bosque (CUCT 1), para la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.

Variable		Línea base	CUCT 1
		CV (%)	
PRECIP	Precipitación pluvial	89.9	89.9
ET	Evapotranspiración real	54.3	59.6
SURQ	Escorrentía superficial	102.8	103.9
LATQ	Flujo lateral	96.4	96.7
GW_Q	Flujo base	94.7	93.8
WYLD	Producción de agua	79.4	79.5
PERC	Percolación	119.2	118.5
GW_RCHG	Recarga hídrica de los acuíferos	82.0	80.4
SYLD	Erosión	98.7	129.9

El escenario 2 de CUCT estudia el efecto de incrementar 50% el bosque sobre la respuesta hidrológica de la subcuenca Quiscab, donde el cambio medio anual sería: evapotranspiración real incrementaría 2% (13.8 mm); escorrentía superficial -2% (4.8 mm); el flujo base -8% (4.6 mm), y la producción de agua -2% (12.8 mm). El flujo lateral no experimentaría cambios en el balance anual. La recarga y erosión hídrica disminuirían 14% y 1%, respectivamente.

Mientras que a lo largo del año la evapotranspiración real tendría su máximo incremento en marzo, con 25% (9.7 mm); y su máxima reducción en noviembre, 5% (2.5 mm). La producción de agua disminuiría en todos los meses, siendo su menor y mayor reducción 1% y 3%, respectivamente. La escorrentía superficial tendría ganancias y pérdidas en el año, donde la máxima ganancia y pérdida serían del 4%. La misma dinámica presenta en el año el flujo base y flujo lateral, donde experimentarían una pérdida máxima de 23% y 1%; y una ganancia máxima del 3% y 2%, respectivamente (**Figura 14**).

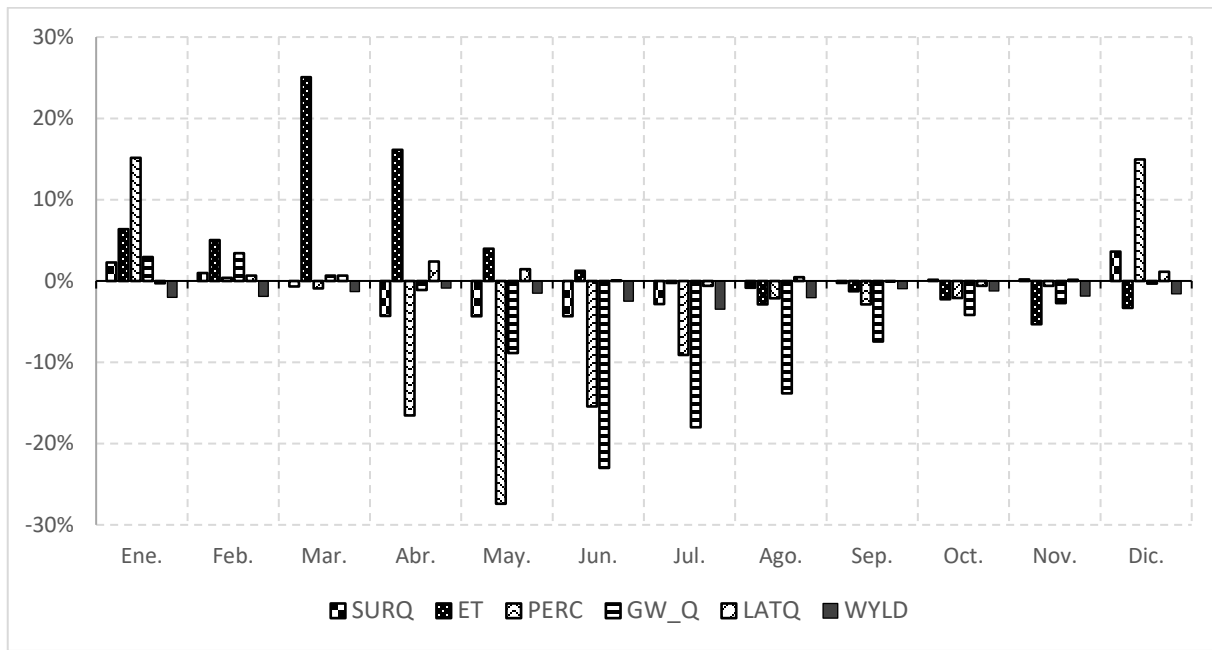


Figura 14. Cambio porcentual medio mensual de las fracciones del balance hídrico y producción de agua para el escenario 2 de cambio de uso y cobertura de la tierra, con respecto a la línea base (1994-2015), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

La recarga hídrica disminuiría en los doce meses, siendo su mayor y menor reducción 28% (junio) y 7% (dic. a abril), respectivamente. La erosión hídrica se sugiere presentaría su mayor incremento del 34% (noviembre) y, la mayor reducción de 25% (junio) (**Cuadro 12**).

Cuadro 12. Erosión hídrica de línea base y escenarios de cambio de uso y cobertura +50% bosque (CUCT 2), para la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago Atitlán.

Mes	Erosión hídrica, ton ha ⁻¹ año ⁻¹		Recarga hídrica, mm	
	Línea Base	CUCT 2	Línea Base	CUCT 2
Enero	0.30	0.39	7.36	6.86
Febrero	0.24	0.31	3.96	3.69
Marzo	0.17	0.19	3.28	3.05
Abril	0.31	0.28	2.51	2.34
Mayo	3.79	2.95	3.01	2.26
Junio	6.74	5.04	21.27	15.22
Julio	1.73	1.51	30.53	24.12
Agosto	2.35	2.39	25.30	21.27
Setiembre	4.89	5.54	37.08	32.81
Octubre	4.04	5.06	48.33	43.90
Noviembre	2.10	2.82	28.22	25.92
Diciembre	0.13	0.17	14.35	13.29
Promedio anual	26.8	26.7	225.2	194.7

En la época lluviosa el cambio de escorrentía superficial, flujo base, producción de agua y percolación serían: -2%; -13%; -2% y -10%, respectivamente. En la temporada seca la evapotranspiración real cambiaría un +7%. La percolación, flujo lateral y producción de agua +2%; +1% y -2%, correspondientemente. La recarga hídrica disminuiría 18% y 7%, en época

lluviosa y seca. La erosión hídrica incrementaría en época seca 20%, y disminuiría en temporada lluviosa -3%. En cuanto a la variabilidad (coeficiente de variación) durante el año se esperaría cambios muy leves para todas las variables analizadas en el presente estudio (<6%) (**Cuadro 13**).

Cuadro 13. Coeficiente de variación (CV) durante el año para la línea base y escenario de cambio de uso y cobertura +50% bosque (CUCT 2), para la subcuenca del río Quisca, cuenca Lago Atitlán.

Variable		Línea base	CUCT 2
		CV (%)	
PRECIP	Precipitación pluvial	89.9	89.9
ET	Evapotranspiración real	54.3	51.7
SURQ	Escorrentía superficial	102.8	102.2
LATQ	Flujo lateral	96.4	96.2
GW_Q	Flujo base	94.7	97.1
WYLD	Producción de agua	79.4	79.5
PERC	Percolación	119.2	121.0
GW_RCHG	Recarga hídrica de los acuíferos	82.0	83.9
SYLD	Erosión	98.7	93.6

La dinámica espacial de los componentes del balance hídrico, producción de agua, recarga y erosión hídrica se presenta para los dos escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura, donde es evidente que -80% de la cobertura bosque provocaría incremento en producción de agua, escorrentía superficial y flujo base, y reducción de la evapotranspiración. Situación contraria ocurre con el incremento de 50% (**Figura 15**).

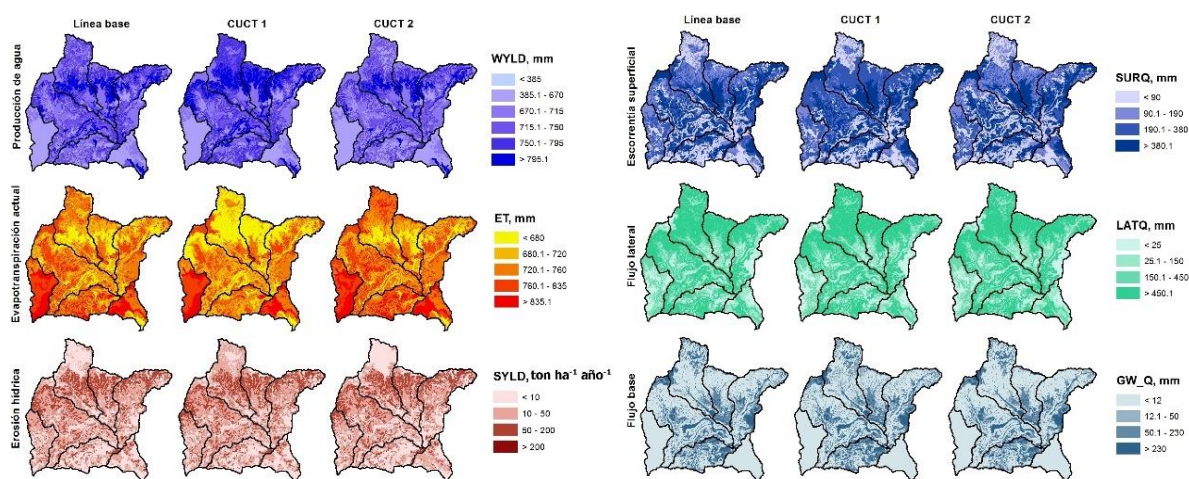


Figura 15. Respuesta hidrológica y erosión hídrica ante los escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura -80% bosque (CUCT 1) y +50% de bosque (CUCT 2), en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.

4. DISCUSIÓN

4.1 Calibración y análisis de incertidumbre

La falta de ajuste entre caudales simulados y observados en los dos puntos sujetos a calibración denota un no emparejamiento general de estas dos señales de datos. La utilización de los dos puntos de calibración encaja en lo que es el enfoque de calibración multisitio (Cao *et al.* 2006; Zhang *et al.* 2008; Chien *et al.* 2013). Este enfoque "reduce la incertidumbre en el proceso de parametrización del modelo" (Cao *et al.* 2006).

Sin embargo, para este estudio los datos observados disponibles para calibración son poco "detallados y espacialmente distribuidos", como lo recomienda Zhang *et al.* (2008) para este enfoque. De los 22 años de simulación, se tiene como máximo dos años continuos a escala mensual y dos puntos de calibración, esta situación llevó a tener una limitada calibración espacial, tal como Arnold *et al.* (2012) hace hincapié en que la insuficiencia de datos no permite una completa calibración y validación espacial. Otra desventaja de no tener datos de calidad espacialmente distribuidos es que las variaciones espaciales de las salidas del modelo estén "enmascaradas" (Takken *et al.* 1999), es decir a pesar de que en la salida de la cuenca tenga un buen ajuste entre caudales, el patrón de variación espacial no este reflejado en este punto. Por lo tanto, las limitaciones en tiempo y espacio de datos recurren a una fuente de error de los modelos de simulación según lo menciona Refsgaard y Storm (1996).

Además, los factores de evaluación de incertidumbre reflejan la mala calidad de los datos observados, a pesar de que en un punto de calibración se estuvo cerca del 0.7 de P-factor (Abbaspour *et al.* 2007). La subcuenca Quiscab tiene un tiempo de concentración bajo (2.25 horas), que se traduce en alta velocidad del flujo y baja capacidad de respuesta aguas abajo; por los flujos turbulentos cargados de sedimentos propios de ríos de alta montaña que dificultan establecer puntos de aforo significativos (Hernández Moreno y Núñez Álvarez 2011). Lo anterior al unirse con la hora de medición, acceso al punto de aforo, la incertidumbre del instrumento y personal dificultan la toma de datos que reflejen adecuadamente la descarga natural del río. Esto puede llevar a errores en los registros de los datos observados (Refsgaard y Storm 1996).

Por otro lado, a pesar que SUFI-2 considera la incertidumbre de las entradas del modelo (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007), en este estudio solo se usó una estación meteorológica, de este modo no se representa adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación y temperatura con respecto a la altitud, enfatizando que la subcuenca se caracteriza por corrientes de montaña, que van desde 1,547 msnm hasta 3,303 msnm. Ciertamente el modelo conceptual de SWAT considera adicionar la extracción de agua para consumo de cualquier fuente (reservorio, acuíferos o ríos) (Neitsch *et al.* 2005; Arnold *et al.* 2013), sin embargo para este estudio no se ingresó esta variable. Puesto que no se dispone de un registro histórico de puntos de aforo y monitoreo en la subcuenca, situación observada en el recorrido de campo. La extracción es un factor para considerar a monitorear, debido que la fuente principal de acceso hídrico en esta zona es a través de ríos y manantiales (IARNA-URL 2013)

Finalmente, a pesar de las limitaciones de datos observados para calibración en esta subcuenca poco instrumentada fue posible realizar calibración con los parámetros más sensibles en dos puntos de la misma. Lo positivo de esto fue evidenciar la variabilidad espacial de la variable caudal, debido a que en una microcuenca (Pamán) poco intervenida la calibración fue satisfactoria, situación que no se presentó en otro punto de alta intervención. Evidenciándose que la información de uso, consumo y gestión es necesaria en zonas de alta intervención, así también la calidad y cantidad de datos observados para calibrar el modelo que fueron determinantes para no realizar la validación.

4.2 Efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

Al incorporar la anomalía de precipitación y temperatura de un escenario de clima futuro (RCP 8.5) se esperaría que los otros componentes del ciclo del agua se modifiquen, ya que la precipitación es el principal componente de este ciclo y básicamente le da movilidad (Brutsaert 2005; Davie 2008; Han 2010). Por otro lado la temperatura, es uno de los componentes que gobierna la evapotranspiración (Fitts 2012), y la fracción transpiración es el proceso de mayor pérdida de agua del sistema cuenca (Fetter 2000). Es por ello que, al realizar un cambio en estos impulsores, los componentes del balance hídrico también se modifican.

Estos cambios en la temperatura del aire y la precipitación pluvial en la subcuenca del río Quiscab, sugieren que provocarán cambios moderados a severos en el régimen de los componentes del ciclo del agua evaluados; representados todos por la reducción absoluta y relativa. Es decir, la tasa de evapotranspiración se reducirá porque habrá una reducción de la capacidad de agua disponible en el suelo para las plantas y el agua interceptada por el dosel; debido a la reducción de la precipitación pluvial, considerando que no habrá cambio del uso y cobertura de la tierra. Es decir, el impacto sobre los componentes hidrológicos será lineal ante dichas anomalías climáticas, desconociéndose cuáles serán los impactos de un escenario de cambio climático severo sobre la capacidad de amortiguamiento de los ecosistemas de la zona de estudio.

En la subcuenca Quiscab a futuro se esperaría que la variabilidad del régimen de los elementos del balance hídrico se incremente, debido a que la variabilidad total anual se incrementó con el escenario de clima futuro modelando. Los cambios sugeridos serán mayores en la época seca que la lluviosa, lo que podría provocar estrés hídrico y escasez de agua (Revenga *et al.* 2000; Arnell 2004), cambio en la aptitud agrícola (Bouroncle *et al.* 2016), impactos en el agua potable (Imbach *et al.* 2010), y otros servicios hidrológicos de los ecosistemas naturales.

Otros estudios sugieren respuestas hidrológicas variables de los elementos del ciclo hidrológico, ante el efecto de escenarios de cambio climático futuro alrededor del mundo. Por ejemplo en los Estados Unidos de Norte América Jin y Sridhar (2012) caracterizaron el impacto del cambio climático en la hidrología de dos cuencas de Idaho, la del río Spokane y Boise, donde la proyección del caudal máximo estuvo en el rango $-198 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $+88 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; y $-58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $+106 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente; y el cambio en precipitación tiene un efecto en cascada

sobre los componentes del balance hídrico. Chien *et al.* (2013) sugieren una reducción del caudal anual entre 41.1% y 45.2% para el período 2051-2060 en cuatro cuencas del oeste medio de los Estados Unidos. Luo *et al.* (2013) sugieren que el cambio de $\pm 10\%$ de la precipitación resultaría en un cambio del 13% del caudal anual, debido al cambio en escorrentía superficial durante el invierno en California. Qi *et al.* (2009) indica que al incrementar 2.8°C la temperatura la evapotranspiración real y producción de agua cambiaría en +6.2% y -13.9%, respectivamente.

En África Koch y Cherie (2013) simularon el efecto del cambio climático (A2) al 2050 en la cuenca alta del río Nilo azul, donde con el modelo de reducción de escala estadística, SDSM (mono-modelo) obtuvieron los mayores cambios de precipitación y producción de agua, -13% y -45%, respectivamente; mientras que la evapotranspiración fue -2%. Awotwi *et al.* (2015) mostraron la sensibilidad hidrológica ante el cambio climático durante el período 2030-2043, donde la escorrentía superficial, flujo base y evapotranspiración incrementarían 26%, 24% y 6%, respectivamente. Andreini *et al.* (2000) concluyeron que los grandes cambios que se dan en la escorrentía superficial, corresponden a un cambio de menor magnitud en la precipitación.

En la India, Pandey *et al.* (2016) cuantificó el impacto del cambio climático (2071-2100) en la cuenca Arum usando SWAT, donde la evapotranspiración y producción de agua incrementarán 28% y 49%, respectivamente. En Chile, Stehr *et al.* (2010) modelaron la respuesta hidrológica ante el cambio climático en dos subcuencas del río Biobío, donde la disminución del 30% de precipitación sugiere una reducción de 45% y 32% en el caudal de cada subcuenca.

La erosión promedio anual de la subcuenca Quiscab actualmente es moderada según la clasificación de FAO-PNUMA-UNESCO (1980). Esta situación se debe a las características de la zona de estudio, como el paisaje, relieve, cobertura y geomorfología (MAGA-DIGEGR 2013). La erosión de la línea base, 26.8 ton ha⁻¹ año⁻¹, se asemeja al promedio entre erosión potencial y erosión potencial por sobreuso en la subcuenca Quiscab (24 ton ha⁻¹ año⁻¹); ambas estimadas a nivel nacional (IARNA-URL 2009; Pineda 2009). Es probable que a pesar de la existencia de terrazas en la subcuenca Quiscab, los aspectos de relieve al combinarse con malas prácticas de conservación de la vegetación y el suelo exacerben la erosión en esta zona.

La erosión hídrica se reduce 20% debido a que el factor decisivo de erosión hídrica, precipitación se redujo 23%, esto provocó que el otro factor decisivo, escorrentía superficial, se redujera 51%; y con ello se disminuyó el coeficiente de escorrentía superficial (0.27) resultando en pérdidas de suelo menores que la línea base. Esto asumiendo que los otros factores decisivos de erosión hídrica se mantienen constantes: intensidad de lluvia, características de suelo, tipo de cobertura vegetal y grado y longitud de pendiente (FFTC 1995; Morgan 1997)

La disminución de la escorrentía superficial es clave, ya que el método de estimación de erosión (MUSLE) utilizado en el presente estudio usa como factor de energía la escorrentía superficial (Williams 1975a; Williams 1975b). Mientras que la cantidad e intensidad de lluvia

son los factores de mayor importancia que controlan los cambios de erosión bajo cambio climático (Nearing *et al.* 2004). Otro impacto que se muestra ante cambio climático es el incremento significativo de la erosividad de la lluvia (Zhang *et al.* 2005). Es así como se explica que la lluvia favorece la erosión del suelo, desde el desprendimiento de partículas de suelo hasta la contribución de escorrentía superficial que origina erosión laminar (Morgan 1997).

Prácticas de conservación del suelo pueden jugar un rol protagónico en el control de las fases erosivas de desprendimiento y transporte de suelo (Morgan 1997). Por ejemplo, los residuos vegetales que cubren el suelo (mulch) reducen las pérdidas de suelo por erosión (Cogo *et al.* 1984; Jin *et al.* 2008; Jordán *et al.* 2010), también otras medidas agronómicas que favorezcan mantener e incrementar la densidad de cobertura vegetal (Fullen *et al.* 2014) También las medidas de manejo del suelo, como lo es el subsolado, que al combinarse o no con cobertura de residuos vegetales reduce las pérdidas de suelo (Jin *et al.* 2008). Sin olvidar los métodos mecánicos de conservación de suelos, como terrazas, cortinas rompevientos, barreras de protección entre otras (Morgan 1997; Fullen *et al.* 2014).

4.3 Efecto del cambio de uso y cobertura en la respuesta hidrológica y de erosión

Los escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura de la tierra son el resultado de la dinámica entre el bosque (mixto, conífera y latifoliado) y los pastos, matorrales y lugares con poca vegetación. En esta dinámica existen cambios anidados de los componentes del ciclo hidrológico, por ejemplo, la evapotranspiración real de la cubierta vegetal (ET), porque según Neitsch *et al.* (2005) en el modelo SWAT esta es calculada en función de la evaporación del agua interceptada por el dosel, máxima tasa de transpiración vegetal y máxima tasa de evaporación del suelo. Es decir, existe relación entre el uso y cobertura y la evapotranspiración.

Por otro lado, Morán-Tejeda *et al.* (2014) señalan que la evapotranspiración “es el elemento clave para entender el efecto del cambio de uso de la tierra sobre la producción de agua”. Por tal motivo, se debe saber y entender los elementos que constituyen la evapotranspiración. De este modo, varios autores mencionan que la evapotranspiración se ve afectada por diversos factores, tales como: temperatura, albedo de la superficie, radiación neta, advección, déficit de presión de vapor, resistencia estomática o del dosel, transporte turbulento, área foliar, profundidad radicular y capacidad de agua disponible para la planta superficial y del subsuelo (McNaughton y Jarvis 1983; Zhang *et al.* 1999; Zhang *et al.* 2001; Fitts 2012).

Por tales razones, al reducir el uso y cobertura de bosque un 80%, se disminuyó el área foliar potencial e índice de área foliar de la cobertura vegetal en la subcuenca Quiscab, y se afectó la interceptación de la precipitación, reduciendo la cantidad de evapotranspiración. Esto se debe a que según Zhang *et al.* (1999) “el área foliar afecta la interceptación de precipitación, radiación y define el área disponible para evapotranspiración”. Por lo tanto, el agua que se dejó de evapotranspirar (-3%), favoreció los otros flujos del ciclo del agua, incrementando la escorrentía superficial, flujo base y consecuentemente la producción de agua +4%; +10% y +3%, respectivamente. Puesto que, de acuerdo a Zhang *et al.* (1999); Zhang *et al.* (2001) “la

escorrentía superficial se afecta por la vegetación, a través de la intercepción y evapotranspiración”.

De esta manera el aumento de la cobertura de bosque representó cambio en los flujos del balance contrarios a los detallados anteriormente por reducción de bosque. En donde la evapotranspiración real incrementó (+2%) por el aumento del área foliar y por defecto se incrementó la intercepción de la precipitación, esto provocó la reducción de la escorrentía superficial, flujo base y producción de agua -2%; -8% y -2%, respectivamente.

En otras partes del mundo hallazgos del impacto del cambio de uso y cobertura de la tierra en los componentes del balance hídrico se han evidenciado. Por ejemplo en Estados Unidos, Schilling *et al.* (2008) sugiere que ante la dinámica de pastizales a maíz (93%), la escorrentía superficial cambiaría de 84 mm a 91mm (+8.3%), la producción de agua de 193 mm a 209 mm (+8.3%), y la evapotranspiración real de 610 mm a 594 mm (-2.6%). Qi *et al.* (2009) muestra la reducción en 7% de la evapotranspiración y un incremento del 14% de producción de agua, si se da un cambio completo de cobertura boscosa a cultivos y pastizales.

En China, Zhang *et al.* (2016a) sugiere la reducción de escorrentía superficial, flujo base y caudal -0.89%, -0.54% y -0.31%, respectivamente. Mientras un incremento de la evapotranspiración real del 0.17%; como resultado de la expansión de los pastizales y disminución de tierras de cultivo. En África Akpoti *et al.* (2016) mostraron que la escorrentía superficial, flujo lateral y evapotranspiración real incrementaron 27%, 19%, y 5% respectivamente, resultado del incremento de bosque, suelo desnudo, áreas urbanas y agricultura. En la cuenca Aragón de España, Morán-Tejeda *et al.* (2014) estimó con el modelo SWAT bajo un escenario de cambio de uso/cobertura (arbusto y pastos a bosque de pino) una reducción de la escorrentía superficial anual de 7.4%.

La dinámica de erosión por el cambio de bosques a pastos, matorrales y áreas de poca vegetación; considerando que los otros factores erosivos se mantienen constantes está representada por cambios leves de erosión (+10% y -1% por CUCT 1 y 2, respectivamente). Una razón de esto es que los bosques y pastizales tienen un efecto de reducción de la erosión similar (Li *et al.* 2015). Por manifestar ambas capacidad de infiltración que reduce la fuerza erosiva de la lluvia, favoreciendo menor tasa de erosión; en comparación con las tierras de cultivos (Nunes *et al.* 2011). Otra razón, tal como la expone Morgan (1997) es que “la cobertura bosque es la más efectiva en reducir la erosión, no obstante el tener una cubierta herbácea densa puede tener casi la misma eficiencia”. Los cambios en la respuesta de sedimentos y erosión pueden ser más sensibles si se da una dinámica entre pasturas o bosque y cultivos agrícolas, tal como lo han mostrado otros autores (Alibuyog *et al.* 2009; Huang y Lo 2015), ya que las tierras de cultivo son más propensas a erosión que el bosque en lugares de pendiente pronunciada (Bakker *et al.* 2008).

5. CONCLUSIONES

A pesar de contar con datos observados limitados temporal y espacialmente se logró realizar la simulación del ciclo hidrológico y estimación de erosión hídrica de la subcuenca del río Quiscab, calibrando satisfactoriamente para un punto de la cuenca (río Pamán) con poca intervención, y para otro con alta intervención la calibración fue no satisfactoria. Resaltando la importancia de la necesidad de datos de calidad, además de información del uso y gestión del agua en la subcuenca para lograr mejores resultados de ajuste hidrológico en zonas intervenidas. La modelación de las condiciones actuales (línea base) y escenarios futuros, cambio climático y cambio de uso y cobertura de la tierra, permite ser un instrumento de toma de decisiones sobre el manejo y gestión del recurso hídrico en la subcuenca Quiscab, además de ser una herramienta prospectiva de planificación.

Se evidencia que la respuesta hidrológica en la subcuenca Quiscab ante anomalías de precipitación y temperatura del escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al año 2050 con reducción de escala, tiende a una reducción severa generalizada de los componentes del balance hídrico y producción de agua, en ambos casos anual y mensual. Además de cambios leves a severos en la variabilidad del régimen anual hidrológico.

Por otra parte, la respuesta hidrológica de la subcuenca ante escenarios de cambio de uso y cobertura propuestos, -80% (CUCT 1) y +50% (CUCT 2) de cobertura bosque, se sugiere será incrementar y reducir levemente la producción de agua y componentes del balance hídrico. Con cambios muy leves a moderados en la variabilidad del régimen hidrológico.

Ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 la erosión hídrica disminuirá a escala mensual y anual, como resultado de la reducción en la magnitud de los componentes del balance hídrico que la impulsan, precipitación pluvial y escorrentía superficial. La variabilidad durante el año incrementará severamente.

Los escenarios de cambio de uso y cobertura, -80% y +50% de bosque sugieren que la erosión hídrica se incrementará y reducirá, respectivamente; siendo mayor la magnitud de cambio en los meses de la época lluviosa. Ante el CUCT 1 y CUCT 2 se prevé cambios moderados y muy leves en la variabilidad durante el año, respectivamente.

La sensibilidad de los componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica ante el cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES al año 2050) presentará mayores cambios absolutos y relativos mensuales y anuales, y en variabilidad del régimen anual, en comparación a los escenarios hipotéticos de cambio de uso y cobertura de la tierra en la subcuenca del río Quiscab.

6. RECOMENDACIONES

Para próximos estudios en cuecas poco instrumentadas es necesario incluir el mayor número de estaciones meteorológicas tanto en la zona de estudio como en sus alrededores, que ayude a explicar mejor la relación entre altitud y variables de clima, esto ayudará a tener mayor variación espacial del clima. No se debe olvidar que entre mayor sea el registro de datos mejor representación temporal de esta se tendrá.

Además de revisión de literatura del contexto de la zona a modelar, también es imperativo previo a modelar la realización de recorridos de campo, con la idea de evidenciar puntos de extracción de agua. Acá se decidirá si es necesario realizar un registro rápido de los puntos y su respectivo aforo para incluirlo en el modelo conceptual de SWAT.

Implementar prácticas de conservación del suelo y agua que integren medidas agronómicas, métodos del suelo y mecánicos; principalmente en tierras de cultivos agrícolas y granos básicos, dadas las características de relieve pronunciado de la subcuenca. Con estas medidas se logrará reducir las pérdidas de suelo por erosión y el coeficiente de escorrentía, favoreciendo la infiltración.

Dado los escenarios de escasez extrema y crónica que se predicen para la subcuenca, es imperativo promover la cultura de cosecha de agua, especialmente en la época seca (noviembre-abril), ya que es una práctica generalmente desconocida y no implementada en la zona. El primer paso se sugiere sea la implementación participativa a nivel comunitario, con esto se lograría un efecto multiplicador de la práctica en la comunidad. La sistematización de experiencias sería un proceso enriquecedor en el proceso de aprendizaje de esta práctica, la cual puede realizarse tiempo después de estar funcionando la práctica en las comunidades.

En esta zona el rol que juegan los acuíferos es importante, ya que las principales fuentes de agua para consumo son los ríos y manantiales. Esto hace necesario el monitoreo de la fluctuación de los niveles de agua en los acuíferos (tabla de agua), para determinar la recarga hídrica neta. También es necesario realizar un mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la zona de estudio.

En el proceso de gestión integral del recurso hídrico en la cuenca Atilán es necesario realizar mediciones de los componentes del balance hídrico, por ello se propone monitorear la evapotranspiración real de los usos y coberturas más importantes (bosque y granos básicos) a través de lisímetros.

Evitar disminuir la cobertura de bosque para propiciar cultivos agrícolas, principalmente en granjas ribereñas, zonas de recarga y con pendientes superiores al 30%. En los lugares donde busca aprovechar el bosque se sugiere realizar planes de manejo forestal comunitario, para evitar impactos severos permanentes en el régimen hidrológico local.

7. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K; Johnson, C ; Van Genuchten, MT. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 34:1340-1352.
- Abbaspour, K. 2015. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Disponible en http://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf
- Abbaspour, K; Rouholahnejad, E; Vaghefi, S; Srinivasan, R; Yang, H ; Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524:733-752.
- Abbaspour, KC; Yang, J; Maximov, I; Siber, R; Bogner, K; Mieleitner, J; Zobrist, J ; Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333:413-430.
- Akpoti, K; Antwi, EO ; Kabo-bah, AT. 2016. Impacts of rainfall variability, land use and land cover change on stream flow of the black Volta Basin, West Africa. *Hydrology* 33:26.
- Alibuyog, N; Ella, V; Reyes, MR; Srinivasan, R; Heatwole, C ; Dillaha, T. 2009. Predicting the effects of land use change on runoff and sediment yield in Manupali River subwatersheds using the SWAT model. *International Agricultural Engineering Journal* 181:15.
- Amador, J; Hidalgo, H; Alfaro, E; Durán-Quesada, A ; Calderón, B. 2016. Regional Climate: Central America and the Caribbean. (en línea). *Bulletin of the American Meteorological Society* 978:S178-S181. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Andreini, M; Van de Giesen, N; Van Edig, A; Andah, W ; Fosu, M. 2000. Volta basin water balance.
- Arnell, NW. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change* 141:31-52.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; Van Griensven, A ; Van Liew, M. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS ; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1.
- Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR; Haney, E ; Neitsch, S. 2013. Soil and Water Assessment tool input/output file documentation version 2012. Texas Water resources institute technical report:
- Assessment, ME. 2005a. Ecosystems and human well-being : health synthesis : a report of the Millennium Ecosystem Assessment. Eds. J. Sarukhán; P. Weinstein. Washington, United States of America, Board of Review Editors.
- _____. 2005b. Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. Eds. J. Sarukhán; A. Whyte. Washington, United States of America,, Board of Review Editors. (World Resources Institute,).
- Awotwi, A; Kumi, M; Jansson, P; Yeboah, F ; Nti, I. 2015. Predicting hydrological response to climate change in the White Volta catchment, West Africa. *Journal of Earth Science & Climatic Change* 61:1.
- Bakker, MM; Govers, G; van Doorn, A; Quetier, F; Chouvardas, D ; Rounsevell, M. 2008. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern. *Geomorphology* 983:213-226.
- Baláž, M; Danáčová, M ; Szolgay, J. 2010. On the use of the Muskingum method for the simulation of flood wave movements. *Slovak Journal of Civil Engineering* 183:14-20.

- Bouroncle, C; Imbach, P; Rodríguez-Sánchez, B; Medellín, C; Martínez-Valle, A ; Läderach, P. 2016. Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder agricultural livelihoods in Central America: ranking and descriptive approaches to support adaptation strategies. (journal article). *Climatic Change*:1-15. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1792-0>
- Brutsaert, W. 2005. *Hydrology: an introduction*. Wiley Online Library.
- Cao, W; Bowden, WB; Davie, T ; Fenemor, A. 2006. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes* 205:1057-1073.
- Carpenter, SR; Mooney, HA; Agard, J; Capistrano, D; DeFries, RS; Díaz, S; Dietz, T; Duraiappah, AK; Oteng-Yeboah, A ; Pereira, HM. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 1065:1305-1312.
- Chen, Y; Ale, S; Rajan, N; Morgan, CL ; Park, J. 2015. Hydrological responses of land use change from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to cellulosic bioenergy crops in the Southern High Plains of Texas, USA. *GCB Bioenergy*:
- Chien, H; Yeh, PJ-F ; Knouft, JH. 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. *Journal of Hydrology* 491:73-88.
- Chow, VT. 1994. *Hidráulica de canales abiertos*. Trad. J. Saldarriaga. McGraw-Hill Interamericana.
- Cogo, N; Moldenhauer, W ; Foster, G. 1984. Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil science society of America Journal* 482:368-373.
- Collins, M; Knutti, R; Arblaster, J; Dufresne, J-L; Fichet, T; Friedlingstein, P; Gao, X; Gutowski, W; Johns, T ; Krinner, G. 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In T. Stocker; D. Qin; G. Plattner; M. Tignor; S. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; B. Bex; B. Midgley. eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK. p. 1029-1136.
- Collins, W; Bellouin, N; Doutriaux-Boucher, M; Gedney, N; Halloran, P; Hinton, T; Hughes, J; Jones, C; Joshi, M ; Liddicoat, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2. *Geoscientific Model Development* 44:1051-1075.
- CONAP, (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, GT). 2007. Plan Maestro de la Reserva de Uso Múltiple del Lago de Atitlán 2007-2011. (en línea). Eds. C. Santizo; E. Secaira. Guatemala, GT, 186 p. Disponible en https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwil5pflqrJAhVEdR4KHdGfCBQQFggdMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.conap.gob.gt%2Findex.php%2Fsigap%2Fplanes-maestros.html%3Fdownload%3D347%3Aplan-maestro-reserva-de-uso-multiple-cuenca-del-lago-de-atitlan%26start%3D20&usq=AFQjCNFBojmD-iALm_ODQuk0QcQoqHEzLg&sig2=ALyPxVTqb6exB5SQYyK2Mw
- Cronshey, R. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Cubasch, U; Wuebbles, D; Chen, D; Facchini, M; Frame, D; Mahowald, N ; Winther, J. 2013. Introduction. In T. Stocker; D. Qin; G. Plattner; M. Tignor; S. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; B. Bex; B. Midgley. eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK. p. 119-158.
- Davie, T. 2008. *Fundamentals of hydrology*. Taylor & Francis.

- Dix, M; Fortin, I ; Medinilla, O. 2003. Diagnóstico Ecológico-Social y Plan Preliminar de Conservación del Área de Atitlán. TNC, UVG:
- Engman, ET. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 1121:39-53.
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma:
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2009. Guía para la descripción de suelos. Trad. R. Vargas Rojas; A. Arias Jiménez; P. V. Straaten; P. Lavelle; S. Zonn; P. Ibish; S. Buol; R. Graham; P. Rc Mcdaniel; A. Vessel. FAO, Roma (Italia).
- Fetter, CW. 2000. *Applied hydrogeology*. Prentice hall.
- FFTC, (Food and Fertilizer Technology Center for Asian and Pacific Region, China). 1995. SOIL CONSERVATION HANDBOOK (en línea). Republic of China, 408 p. Disponible en http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABX373.pdf
- Fitts, CR. 2012. *Groundwater science*. 2 ed ed. Academic press. 639 p.
- Fullen, MA; Guerra, AJ; Jorge, MdCO ; Alexandre, ST. 2014. Soil Erosion and Conservation in Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*:
- Gassman, PW; Reyes, MR; Green, CH ; Arnold, JG. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.
- GIMBOT, (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, GT). 2014. Mapa de bosques y uso de la tierra 2012. Guatemala, Guatemala, Esc. 1:50.000. color.
- Gupta, HV; Kling, H; Yilmaz, KK ; Martinez, GF. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 3771:80-91.
- Han, D. 2010. *Concise hydrology*. Bookboon.
- Hansen, J; Ruedy, R; Sato, M ; Lo, K. 2010. Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics* 484:
- Hansen, J; Sato, M; Ruedy, R; Schmidt, GA ; Lo, K. 2016. *Global Temperature in 2015*.
- Hargreaves, GH ; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection)(USA). no. fiche no. 85-2517.:
- Harvey, T. 2012. Cyanobacteria blooms: Maya peoples between the politics of risk and the threat of disaster. *Medical anthropology* 316:477-496.
- Hernandez, B; Flores, A; GARCIA, B ; Clemente, A. 2011. Satellite Monitoring of Lake Atitlan in Guatemala. In A. Tarté; E. Soto; E. Messina. eds. *Second International Symposium on Building Knowledge Bridges for a Sustainable Water Future*. Panamá. p. 234.
- Hernández Moreno, MA ; Núñez Álvarez, L. 2011. Estudio hidrológico-hidráulico de avenida en el río San Francisco (Panajachel, Guatemala).
- Huang, TC ; Lo, KFA. 2015. Effects of Land Use Change on Sediment and Water Yields in Yang Ming Shan National Park, Taiwan. *Environments* 21:32-42.
- IARNA-URL, (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT). 2009. Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el Desarrollo. Esc. (Guatemala: URL, IARNA. Serie Perfil Ambiental).
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B ; Corrales, L. 2010. Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos hidrológicos al cambio climático en Mesoamérica. *Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina*:32.

- INAB, (Instituto Nacional de Bosques, GT) ; CONAP, (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, GT). 2015. Mapa Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque, 2012. Guatemala, Esc. 1:25.000. color.
- INE, (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2004a. Proyecciones de Población con Base al XI Censo de Población y VI de Habitación 2002, Período 2000 - 2020. (CD). Guatemala,
- Jin, K; Cornelis, WM; Gabriels, D; Schiettecatte, W; De Neve, S; Lu, J; Buysse, T; Wu, H; Cai, D ; Jin, J. 2008. Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *Catena* 75:191-199.
- Jin, X ; Sridhar, V. 2012. Impacts of Climate Change on Hydrology and Water Resources in the Boise and Spokane River Basins1.
- Jones, C; Hughes, J; Bellouin, N; Hardiman, S; Jones, G; Knight, J; Liddicoat, S; O'Connor, F; Andres, RJ ; Bell, C. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* 43:543-570.
- Jones, PG ; Thornton, PK. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems* 114:1-5.
- Jordán, A; Zavala, LM ; Gil, J. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena* 81:77-85.
- Koch, M ; Cherie, N. 2013. SWAT Modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia. In. p. 3-7.
- Komárek, J; Zapomělová, E; Šmarda, J; Kopecký, J; Rejmánková, E; Woodhouse, J; Neilan, BA ; Komárková, J. 2013. Polyphasic evaluation of *Limnoraphis robusta*, a water-bloom forming cyanobacterium from Lake Atilán, Guatemala, with a description of *Limnoraphis* gen. nov. *Fottea* 131:39-52.
- Krause, P; Boyle, D ; Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5:89-97.
- Li, Y; Zhang, S ; Peng, Y. 2015. Soil Erosion and Its Relationship to the Spatial Distribution of Land Use Patterns in the Lancang River Watershed, Yunnan Province, China. *Agricultural Sciences* 68:823.
- Locatelli, B. 2014. Sinergias de adaptación-mitigación. Disponible en <http://hal.cirad.fr/cirad-01056394>
- Luo, Y; Ficklin, DL; Liu, X ; Zhang, M. 2013. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with a watershed modeling approach. *Science of the total environment* 450:72-82.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2015. Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra República de Guatemala, año 2010. Guatemala Esc. 1:50.000. color.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2013. Estudio Semidetallado de suelos del departamento de Sololá, Guatemala. Guatemala, GT, 948 p.
- MAGA-UPGGR, (Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2009. Mapa de Clasificación Climática de la República de Guatemala, a escala 1:50,000, adaptado del Sistema Thornthwaite. Guatemala, Esc. 1:50,000. 195 p.
- Marcinkowski, P; Piniewski, M; Kardel, I; Gielczewski, M ; Okruszko, T. 2013. Modelling of discharge, nitrate and phosphate loads from the Reda catchment to the Puck Lagoon using SWAT. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation* 452:125-141.

- Martin, G; Milton, S; Senior, C; Brooks, M; Ineson, S; Reichler, T ; Kim, J. 2010. Analysis and reduction of systematic errors through a seamless approach to modeling weather and climate. *Journal of Climate* 23:22:5933-5957.
- Martin, G; Bellouin, N; Collins, W; Culverwell, I; Halloran, P; Hardiman, S; Hinton, T; Jones, C; McDonald, R; McLaren, A; O'Connor, F; Roberts, M; Rodriguez, J; Woodward, S; Best, M; Brooks, M; Brown, A; Butchart, N; Dearden, C; Derbyshire, S; Dharssi, I; Doutriaux-Boucher, M; Edwards, J; Falloon, P; Gedney, N; Gray, L; Hewitt, H; Hobson, M; Huddleston, M; Hughes, J; Ineson, S; Ingram, W; James, P; Johns, T; Johnson, C; Jones, A; Joshi, M; Keen, A; Liddicoat, S; Lock, A; Maidens, A; Manners, J; Milton, S; Rae, J; Ridley, J; Sellar, A; Senior, C; Totterdell, I; Verhoef, P ; Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development* 43:723-757.
- McNaughton, K ; Jarvis, P. 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In T. Kozlowski. ed. *Water Deficits and Plant Growth*. London, UK, Academic Press, INC. p. 1-47.
- Me, W; Abell, J ; Hamilton, D. 2015. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:10:4127-4147.
- Meinshausen, M; Smith, SJ; Calvin, K; Daniel, JS; Kainuma, M; Lamarque, J; Matsumoto, K; Montzka, S; Raper, S ; Riahi, K. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109:1-2:213-241.
- Mockus, V ; Hjelmfelt, A. 2004. Chapter 10: Estimation of direct runoff from stormwater rainfall. In *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology*. United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS)
- Morán-Tejeda, E; Zabalza, J; Rahman, K; Gago-Silva, A; López-Moreno, JI; Vicente-Serrano, S; Lehmann, A; Tague, CL ; Beniston, M. 2014. Hydrological impacts of climate and land-use changes in a mountain watershed: uncertainty estimation based on model comparison. *Ecohydrology* 88:1396-1416.
- Morgan, RPC. 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Trads. P. U. Terrón; J. D. M. López De Meneses. 2 ed. Madrid, España, Mundi-Prensa. Disponible en https://books.google.com.pe/books/about/Erosi%C3%B3n_y_conservaci%C3%B3n_d_el_suelo.html?id=jcFqaFI-u1UC
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD ; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50:3:885-900.
- Nash, JE ; Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 103:282-290.
- Nearing, M; Pruski, F ; O'neal, M. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation* 59:1:43-50.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J ; King, K. 2005. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. . Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX:
- Newhall, C; Paull, C; Bradbury, J; Higuera-Gundy, A; Poppe, L; Self, S; Sharpless, NB ; Ziagos, J. 1987. Recent geologic history of Lake Atitlán, a caldera lake in western Guatemala. *Journal of volcanology and Geothermal Research* 33:1:81-107.
- Newhall, CG. 1987. Geology of the Lake Atitlan region, western Guatemala. *Journal of volcanology and Geothermal Research* 33:1-3:23-55.
- Nunes, AN; De Almeida, AC ; Coelho, CO. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography* 31:2:687-699.

- Oglesby, R ; Rowe, C. 2014. Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5. (en línea). Guatemala, 35 p. p. Consultado 01 nov 2015. Disponible en <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1442.pdf>
- Olivera, F; Valenzuela, M; Srinivasan, R; Choi, J; Cho, H; Koka, S ; Agrawal, A. 2006. ARCGIS-SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 422:295-309.
- Pandey, BK; Gosain, A; Paul, G ; Khare, D. 2016. Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi-distributed model. Applied Water Science:1-13.
- Pineda, P. 2009. Conflictos del uso del territorio y deterioro de las tierras. In Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el Desarrollo. Guatemala, Guatemala, IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT)
- Qi, S; Sun, G; Wang, Y; McNulty, S ; Myers, JM. 2009. Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. Transactions of the ASABE 523:739-749.
- Refsgaard, JC ; Storm, B. 1996. Construction, calibration and validation of hydrological models. Distributed hydrological modelling:41-54.
- Rejmánková, E; Komárek, J; Dix, M; Komárková, J ; Girón, N. 2011. Cyanobacterial blooms in Lake Atitlan, Guatemala. Limnologia-Ecology and management of Inland waters 414:296-302.
- Revenge, C; Brunner, J; Henninger, N; Kassem, K ; Payne, N. 2000. PILOT ANALYSIS OF GLOBAL ECOSYSTEM. (en línea). Ed. W. R. I. a. W. Institute. Washington, US, Disponible en http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/page_freshwater.pdf
- Ripl, W. 2003. Water: the bloodstream of the biosphere. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 3581440:1921-1934.
- Rose, WI; Newhall, CG; Bornhorst, TJ ; Self, S. 1987. Quaternary silicic pyroclastic deposits of Atitlán Caldera, Guatemala. Journal of volcanology and Geothermal Research 331:57-80.
- Rostamian, R; Jaleh, A; Afyuni, M; Mousavi, SF; Heidarpour, M; Jalalian, A ; Abbaspour, KC. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. Hydrological Sciences Journal 535:977-988.
- Rouholahnejad, E; Abbaspour, KC; Srinivasan, R; Bacu, V ; Lehmann, A. 2014. Water resources of the Black Sea Basin at high spatial and temporal resolution. Water resources research 507:5866-5885.
- Sánchez-Lugo, A; Morice, C ; Berrisford, P. 2016. Temperature: Surface Temperature. (en línea). Bulletin of the American Meteorological Society 978:S12-S13. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Santhi, C; Arnold, JG; Williams, JR; Dugas, WA; Srinivasan, R ; Hauck, LM. 2001. validation of the swat model on a large RWER basin with point and nonpoint sources1.
- Santhi, C; Kannan, N; Arnold, J ; Di Luzio, M. 2008. Spatial Calibration and Temporal Validation of Flow for Regional Scale Hydrologic Modeling1.
- Saxton, K ; Rawls, W. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil science society of America Journal 705:1569-1578.
- Schilling, KE; Jha, MK; Zhang, YK; Gassman, PW ; Wolter, CF. 2008. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions. Water resources research 447:

- Schmidt, A; Eitzinger, A; Sonder, K; Sain, G; Rizo, L; Rodriguez, B; Hellin, J; Fisher, M; Laderach, P ; San Vicente, F. 2012. Tortillas on the roaster (ToR) Central America maize-beans systems and the changing climate: full technical report.
- Singh, V; Bankar, N; Salunkhe, SS; Bera, AK ; Sharma, J. 2013. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP. *Current Science(Bangalore)* 1049:1187-1199.
- Smith, TM; Reynolds, RW; Peterson, TC ; Lawrimore, J. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *Journal of Climate* 2110:2283-2296.
- Stehr, A; Debels, P; Arumi, JL; Alcayaga, H ; Romero, F. 2010. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y ciencias del agua* 14:37-58.
- Stocker, TF; Qin, D; Plattner, G-K; Alexander, LV; Allen, SK; Bindoff, NL; Bréon, F-M; Church, JA; Cubasch, U; Emori, S; Forster, P; Friedlingstein, P; Gillett, N; Gregory, JM; Hartmann, DL; Jansen, E; Kirtman, B; Knutti, R; Krishna Kumar, K; Lemke, P; Marotzke, J; Masson-Delmotte, V; Meehl, GA; Mokhov, II; Piao, S; Ramaswamy, V; Randall, D; Rhein, M; Rojas, M; Sabine, C; Shindell, D; Talley, LD; Vaughan, DG ; Xie, S-P. 2013. Technical Summary. Eds. T. F. Stocker; D. Qin; G.-K. Plattner; M. Tignor; S. K. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; V. Bex; P. M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 33–115 p. (Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Disponible en www.climatechange2013.org
- Takken, I; Beuselinck, L; Nachtergaele, J; Govers, G; Poesen, J ; Degraer, G. 1999. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena* 373:431-447.
- URL, (Universidad Rafael Landivar, Gt); URN, (University of Nevada Reno, USA); UVG, (Universidad del Valle, GT); DRI, (Desert Research Institute, USA) ; UC, (The University of California DAVIS, USA). 2014. Estado del Lago Atitlán Informe 2014. 33 p.
- USDA-SCS, (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service, US). 1972. SCS National engineering handbook, section 4: hydrology.
- Van Griensven, A ; Bauwens, W. 2003. Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water resources research* 3912:
- Vörösmarty, CJ; Léveque, C; Revenga, C; Bos, R; Caudill, C; Chilton, J; Douglas, EM; Meybeck, M ; Prager, D. 2005. Fresh Water. In M. H. Rashid; R. Scholes; A. Neville. eds. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, United States of America. p. 165-207.
- Williams, J. 1975a. SEDIMENT ROUTING FOR AGRICULTURAL WATERSHEDS1.
- Williams, JR. 1975b. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. (en línea). Mississippi, US, ARS-USDA. p. 244-252. Consultado 20 jun. Disponible en <https://archive.org/stream/presentprospecti40sedi#page/244/mode/2up>
- WMO, (World Meteorological Association, CH). 2016. WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2015. Geneva, Switzerland: World Meteorological Association. 23 p.
- Xicay, O. 2011. Análisis del impacto del cambio de uso de la tierra en el comportamiento del ciclo hidrológico de la subcuenca del Río Quiscab, Sololá. Ingeniera agrónoma en Recursos Naturales Renovables. Guatemala, FAUSAC,,. 133 p.

- Yang, J; Reichert, P; Abbaspour, K; Xia, J ; Yang, H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology* 358:1-23.
- Zhang, G; Nearing, M ; Liu, B. 2005. Potential effects of climate change on rainfall erosivity in the Yellow River basin of China. *Transactions of the ASAE* 48:511-517.
- Zhang, L; Walker, GR ; Dawes, W. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance.
- Zhang, L; Dawes, W ; Walker, G. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research* 37:701-708.
- Zhang, L; Nan, Z; Xu, Y ; Li, S. 2016a. Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China. *PloS one* 11:e0158394.
- Zhang, X-s; Srinivasan, R ; Van Liew, M. 2008. Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE* 51:2039-2049.
- Zhang, X; Srinivasan, R ; Hao, E. 2007. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model. *Transactions of the ASABE* 50:901-910.
- Zhang, Z. 2014. Nonpoint Source and Water Quality Modeling. In S. Eslamian. ed. *Handbook of Engineering Hydrology: Environmental Hydrology and Water Management*. New York, US

ARTÍCULO II. Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán.

RESUMEN

Se identifica el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica superficial para uso humano, y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca Lago de Atitlán. Se usó el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) para obtener la disponibilidad de agua superficial en la subcuenca y la evapotranspiración real. Los cambios se obtienen comparando la línea base (1994-2015) con el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al 2050, con reducción de escala de MarkSim®. Se utilizó el algoritmo SUFI-2 con el programa SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction), para evaluar la sensibilidad y optimización de parámetros, utilizando la variable caudal para dicho fin en dos puntos de diferente intervención. Punto en zona con menor intervención presentó ajuste hidrológico muy bueno ($KGE=0.87$), y en punto de alta intervención este fue no satisfactorio ($KGE=-0.8$). Se usó el método de USDA-SCS para calcular la precipitación efectiva del cultivo. Se sugiere que el cambio climático llevará a escasez extrema a cuatro microcuencas (Barreneché, Pamán, Xibalbay y Chuiscalera), dos a escasez crónica (Argueta y Novillero) y mantendrá una microcuenca en escasez extrema (Quiscab). La subcuenca Quiscab pasará de estrés a escasez extrema, considerando $1,700 \text{ m}^3$ per cápita como umbral de estrés hídrico. Se prevé que el déficit hídrico del cultivo de maíz se conserve en el inicio de etapa vegetativa y surge en la parte final del ciclo, pero se presentará un incremento severo del déficit hídrico ($+535 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en estas etapas debido al cambio climático.

Palabras clave: SWAT, disponibilidad hídrica, déficit hídrico, escasez de agua.

ABSTRACT

The impact of climate change on the surface water availability for human use and on the water deficit of the maize crop in the Quiscab River sub basin, basin of Lake Atitlán, is identified. The SWAT (Soil Water Assessment Tool) was used to obtain surface water availability and actual evapotranspiration in the subbasin. The changes are obtained by comparing the baseline (1994-2015) with the climate change scenario RCP 8.5 of the HadGEM2-ES model to 2050, with MarkSim® scale reduction. The SWAT-CUP (SWAT-Calibration Uncertainty Prediction) algorithm was used to evaluate the sensitivity and optimization of parameters, using the streamflow for this purpose in two points of different intervention. Point in zone with poorly intervention presented very good performance ($KGE = 0.87$), and in point of high intervention was not satisfactory ($KGE = -0.8$). The USDA-SCS method was used to calculate the effective precipitation of the crop. It is suggested that climate change will lead to extreme scarcity in four microbasins (Barreneché, Pamán, Xibalbay and Chuiscalera), two to chronic scarcity (Argueta and Novillero) and maintain a microbasin in extreme scarcity (Quiscab). The subbasin Quiscab will go from stress to extreme scarcity, considering $1,700 \text{ m}^3$ per capita as a threshold

of water stress. The water deficit of the maize crop is expected to be conserved at the beginning of the vegetative stage and appears at the end of the cycle, but there will be a severe increase in the water deficit ($+ 535 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) in these stages due to climate change.

Key words: SWAT, water availability, water deficit, water scarcity.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global el 70% del agua dulce (2.5%) extraída es utilizada en el sector agrícola, 20% y 10% para uso industrial y doméstico, respectivamente. Adicional a ello, el crecimiento de la población mundial incrementa la demanda del recurso hídrico, y con ello se dan problemas de escasez de agua para satisfacer las necesidades humanas, y ante cambio climático se prevé que se intensifique dicha escasez (FAO 2016b; FAO 2016a). Centro América es un punto caliente tropical emergente dado el cambio en precipitación y temperatura futura (Giorgi 2006). El cambio climático prevé el calentamiento medio en Guatemala a la década de 2060 de menos a 1°C a más de 3°C , con el mayor incremento en las tierras altas según lo propone Oglesby y Rowe (2014) con el modelo CCSM4. Por su parte Schmidt *et al.* (2012), indican que al 2050 el incremento promedio de temperatura del país será 2.4°C , con el enfoque CMIP3.

En Mesoamérica Imbach *et al.* (2012) simularon el comportamiento del ciclo hidrológico con el modelo MAPSS ante escenarios de cambio climático del CMIP3 al 2070-99, donde en la cordillera de Guatemala, Honduras y Nicaragua junto a la Península de Yucatán la escorrentía mostró reducción de más del 80% en comparación al período de referencia 1950-2000. Al existir cambios en el régimen hidrológico de una cuenca, también se darían dinámicas en los servicios ecosistémicos hidrológicos, por ejemplo, disminución de la dotación de agua para uso humano.

El indicador de agua dulce renovable per cápita desarrollado por Falkenmark *et al.* (1989) es un indicador de requerimientos humanos, y toma en consideración el uso doméstico, agrícola e industria. Es uno de los indicadores de escasez más conocido y globalmente utilizado; este relaciona el agua renovable del ciclo hidrológico y la cantidad de habitantes; fijando como límite de estrés hídrico la disponibilidad per cápita anual de $1,700 \text{ m}^3$. Revenga *et al.* (2000) utilizaron este indicador para evaluar la oferta por habitante a escala de cuenca. Mientras que Arnell (2004) indica que para el 2055 Mesoamérica tendrá altas poblaciones en cuencas con estrés hídrico en ausencia de cambio climático y, será mayor la población que incremente su estrés hídrico que las que lo reduzcan, bajo el escenario A2 del HadCM3. El autor usó el umbral de estrés hídrico $1,000 \text{ m}^3 \text{ persona}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La disponibilidad hídrica per cápita del país al 2014 es $6,818 \text{ m}^3$ (BM y AQUASTAT 2016). Por su parte la disponibilidad hídrica por superficie a nivel nacional se encuentra alrededor de 110 billones de metros cúbicos (IARNA-URL 2015; BM y AQUASTAT 2016), de la cual el 22% representa el consumo (IARNA-URL 2015). Según IARNA-URL (2015), actualmente la cuenca del Lago de Atitlán presenta disponibilidad hídrica per cápita por debajo de $1,700 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$,

mientras que bajo un escenario de cambio climático (A2) del modelo HadCM3 al 2020, sin considerar reforestación la disponibilidad per cápita reduciría entre 10 y 15%.

Zhang y Cai (2013) a escala global encontró sensibilidad del déficit hídrico ante escenarios de cambio climático, tanto en cultivo regados y sin riego. Esto brinda una idea para evaluar el déficit hídrico agrícola en la subcuenca Quiscab ante el cambio climático. La mayor superficie de cultivos anuales en el departamento de Sololá es de granos básicos, siendo maíz el predominante (INE 2004b). El asociado de maíz y otros cultivos representa el 72% y, el monocultivo un 28% en tal departamento (Cifuentes *et al.* 2014). Actualmente el IARNA-URL (2013) muestra que la necesidad potencial de riego según el potencial hortícola en la subcuenca Quiscab es superior a $3,000 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Se utiliza el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005), para simular una línea base (1994-2015) y, sobre él se incorporaron anomalías de precipitación y temperatura. El modelo brinda la simulación del ciclo hidrológico particionado, utilizando como insumos la producción de agua (escorrentía superficial, flujo lateral y base) y la evapotranspiración real del cultivo de maíz. Este estudio identifica el impacto del cambio climático, escenario RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES con reducción de escala, en la disponibilidad hídrica superficial para uso humano y en el déficit hídrico del cultivo de maíz en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en la subcuenca del río Quiscab ($14^{\circ} 48' 32.9'' \text{ N}$, $91^{\circ} 13' 51.89'' \text{ O}$), que pertenece a la cuenca del Lago de Atitlán. Tiene un área de 149.7 km^2 , que incluye cinco municipios de dos departamentos (Sololá y Totonicapán), con población total de 101,070 habitantes al 2016 (INE 2004a). La precipitación promedio es de 1,472 mm al año, y la temperatura mínima y máxima promedio es 8.8°C y 20.6°C , respectivamente. Posee un rango altitudinal que va de 1,580 a 3,300 metros sobre el nivel del mar. Los usos y coberturas predominantes en la subcuenca son los bosques (mixto, latifoliado y coníferas) y granos básicos (maíz y frijol), con 35% y 38.6% respectivamente (GIMBOT 2014; INAB y CONAP 2015; MAGA-DIGEGR 2015).

2.2 Modelo SWAT y escenario de cambio climático

Se utilizó el modelo semi-distribuido y de tiempo continuo a escala de cuenca SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desarrollado por el Dr. Jeff Arnold del Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) (Arnold *et al.* 1998; Neitsch *et al.* 2005; Arnold *et al.* 2012). El modelo se elaboró con información de tipo de suelo (MAGA-DIGEGR 2013), uso y cobertura de la tierra (GIMBOT 2014; INAB y CONAP 2015; MAGA-DIGEGR 2015), topografía y pendientes, y clima (precipitación, temperatura mínima y máxima diaria) propia del área de estudio.

La simulación del ciclo hídrico se realizó para el período 1994-2015; con tres años de calentamiento. Se realizó calibración, análisis de incertidumbre y sensibilidad (12 parámetros) con la variable caudal, usando el algoritmo SUFI-2 (Abbaspour *et al.* 2004; Abbaspour *et al.* 2007), incluido en el programa SWAT-CUP. También, la parametrización para dos sitios: microcuencas Pamán y Quiscab, donde el período de calibración para la primera fue de un año, y la segunda de 2.16 años. De ambas microcuencas, la del río Pamán presentó mejor ajuste hidrológico; con los criterios de eficiencia: Nash-Sutcliffe (NS), estandarización de la raíz del error cuadrático medio (RSR) y PBIAS catalogados como muy buenos según Moriasi *et al.* (2007); y el coeficiente de determinación (R^2) muy cercano al límite inferior de satisfactorio de Abbaspour *et al.* (2004); por último, el coeficiente de determinación ponderado (br^2), y Kling-Gupta (KGE) tuvieron comportamiento satisfactorio.

El modelo SWAT permite la incorporación de anomalía de clima para simular el cambio climático y predecir patrones climáticos futuros (Neitsch *et al.* 2005; Gassman *et al.* 2007), con ello permite calcular las modificaciones de los componentes del balance hídrico y demás cargas. Se usó la anomalía de precipitación y temperatura del Modelo de Circulación General (GCM) HadGEM2-ES (Collins *et al.* 2011; Jones *et al.* 2011; Martin *et al.* 2011), con reducción de escala estadística de la plataforma MarkSim® (Jones y Thornton 2013), bajo el escenario RCP 8.5 del CMIP5 (Cubasch *et al.* 2013) al año 2050.

El escenario RCP 8.5 tiene un conjunto de supuestos: rápido incremento de la población, tasa de desarrollo económico lento, ritmo lento de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética (dominada por combustibles fósiles), donde la combinación de estos a largo plazo incrementará las emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas climáticas (Riahi *et al.* 2011). Este escenario extremo de cambio climático incrementa las emisiones y concentración de gases de efecto invernadero hasta provocar un forzamiento radiativo de 8.5 W m^{-2} y más de 1,370 ppm de CO_2 -eq. al 2100, con tendencia creciente después del 2100 (Moss *et al.* 2008; Moss *et al.* 2010)

Las razones para seleccionar el RCP 8.5 al 2050 son: 1) la similitud del forzamiento radiativo al 2050 entre los RCP's 8.5; 6.0 y 4.5 (Meinshausen *et al.* 2011); 2) el incremento de la temperatura global al 2050 fue 0.42°C y 0.46°C con respecto al periodo de referencia (1981-2010) (Sánchez-Lugo *et al.* 2016); 3) Las estaciones de Guatemala incluidas en el monitoreo de Centro América presentaron frecuencias mayores (días) con temperatura superior a la media del período 1981-2010 (Amador *et al.* 2016); 4) entre menos de 1°C y más de 3°C se prevé el calentamiento para Guatemala, donde el mayor cambio será en las tierras altas para la década de 2060 (Oglesby y Rowe 2014); 5) Schmidt *et al.* (2012) para el país al 2050 prevé un incremento anual promedio de la temperatura de 2.4°C ; 5) finalmente, la anomalía media global al 2050 del RCP 8.5 será 2.0°C (Collins *et al.* 2013).

2.3 Disponibilidad de agua per cápita para uso humano

Se usó el indicador de disponibilidad de agua dulce renovable per cápita (AWR, por sus siglas en inglés), desarrollado por Falkenmark *et al.* (1989), el cual es de fácil cálculo

(FAO2013). Este es un indicador de requerimiento humano que relaciona la cantidad de agua renovable del ciclo hidrológico con la cantidad de personas y categoriza dicha relación en diferentes niveles. Para este estudio se utilizó la producción de agua media (WYLD) de la subcuenca Quiscab obtenida por simulación hidrológica con SWAT, como oferta hídrica superficial; la producción de agua contiene los flujos: escorrentía superficial, flujo lateral y base, mismos que conforman el caudal. La producción de agua promedio de la línea base se utilizó para calcular el indicador de disponibilidad de agua dulce renovable per cápita.

Para la línea base se usó la proyección de población 2000-2020 a nivel municipal del Censo Nacional XI de Población y VI de habitación de 2002 (INE 2004a), para aplicar la misma tasa de incremento anual hasta el 2015 a escala de poblados; sumando la población proyectada al 2015 de todos los poblados dentro de la subcuenca Quiscab. Se utilizó la población al 2015 para integrar el indicador de disponibilidad de Falkenmark *et al.* (1989).

Para el escenario futuro de cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES) se realizó regresión lineal simple en función del año, donde la fuente de datos es la proyección de población 2000-2020 del INE (2004a), para obtener la población proyectada a escala municipal al 2050. Luego se calculó la tasa anual de crecimiento aritmética para cada municipio. Finalmente se aplicó la tasa de crecimiento anual aritmético de cada municipio a sus respectivos poblados, hasta obtener la población de la subcuenca al año 2050. No se utilizó la tasa de crecimiento proyectada por el INE (2002) a nivel república para el 2050, ya que los municipios de la subcuenca han presentado tasas de crecimiento históricas superiores a la nacional.

2.4 Déficit hídrico del cultivo de maíz

El déficit hídrico se obtuvo relacionando la evapotranspiración actual o real del cultivo de maíz (ET) y la precipitación efectiva (Pef). Existe un déficit hídrico si $ET > Pef$, en condiciones de ausencia de riego. Si $ET \leq Pef$ no existe déficit hídrico. Se definió solo el cultivo de maíz de la categoría de uso granos básicos por las razones siguientes: 1) es la base del sistema milpa del departamento de Sololá, donde en los municipios que convergen en la subcuenca Quiscab, 31% es producido en monocultivo y el 69% en asocio con otros cultivos (Cifuentes *et al.* 2014); 2) en los mapas de uso y cobertura no se puede separar por fotointerpretación el maíz y el frijol (MAGA-DIGEGR 2015); 3) según el IV Censo Agropecuario el cultivo de maíz es el de mayor área cosechada en el departamento (INE 2004b). También se realizó una entrevista para conocer la duración del calendario agrícola (etapas del cultivo), donde el tamaño de la muestra fue 29 poblados, efectuando una entrevista por poblado.

2.4.1 Evapotranspiración del cultivo

Se utilizó el método de Hargreaves y Samani (1985) (Ec. 17) para determinar la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (PET) a escala mensual, mediante la simulación hidrológica del modelo SWAT. Las razones de utilizar este método son: 1) el tipo, calidad y longitud del registro de datos, solo se tienen datos observados temperatura mínima y máxima con registro confiable de 22 años (1994-2015); 2) el uso que se le dará a la

evapotranspiración, como lo menciona Zhang (2015): “los datos de clima proyectados tiene alto riesgo de incertidumbre como para aplicarse en una ecuación tan sensible como lo de Penman-Monteith”; 3) la ecuación de Hargreaves ha producido resultados de “exactitud razonable” validados a nivel global (Hargreaves y Samani 1985; Allen 2006); 4) es un método simple y práctico que calcula la PET solo con el uso de temperatura mínima y máxima, y requiere poca o nula calibración (Hargreaves y Samani 1985).

$$PET = 0.0023 * R_a * (T_{\bar{x}} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde, R_a es la radiación extraterrestre; $T_{\bar{x}}$ temperatura media; T_{max} y T_{min} temperatura mínima y máxima, respectivamente. Mientras que la evapotranspiración actual (ET) mensual del cultivo maíz se obtuvo a través del algoritmo del modelo SWAT; el cual primero evapora el agua interceptada por el dosel, luego calcula las tasas máximas de transpiración de la vegetación y de evaporación del suelo (Neitsch *et al.* 2005).

2.4.2 Precipitación efectiva

Debido a que el modelo SWAT no calcula la precipitación efectiva necesaria para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos, se usó el método de USDA-SCS (Martin y Gilley 1993) para calcular la precipitación efectiva de la línea base (1994-2015) y el escenario de cambio climático futuro al 2050 (Ec. 18 y 193). Se usa este método por ser de cálculo simple al depender solo de la precipitación mensual y evapotranspiración real, y como menciona Hess (2010) no requiere calibración.

$$P_{ef} = SF(0.7091 * Pt^{0.82416} - 0.11556) * (10^{0.02426*ET_c}) \quad \text{Ecuación 18}$$

$$SF = (0.531747 + 0.295164 * D - 0.057697 * D^2 + 0.003804 * D^3) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde P_{ef} , es la precipitación efectiva mensual, y Pt la precipitación pluvial mensual; ET_c evapotranspiración del cultivo, SF factor de almacenamiento de agua en el suelo, D agua útil almacenada en el suelo.

3. RESULTADOS

3.1 Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano

La disponibilidad hídrica superficial para cada microcuenca de la subcuenca del río Quiscab se muestra en el **Cuadro 1**, actualmente se tiene un promedio de 695,630 m³ km² año⁻¹. Por el contrario, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al año 2050 se sugiere que la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca sería 419,345 m³ km² año⁻¹, representando un cambio de -40%. Las microcuencas que actualmente tienen mayor oferta hídrica superficial son: Barreneché, Argueta y Novillero. El resto de microcuencas se encuentra entre 566,482 m³ km² año⁻¹ (Pamán) y 695,592 m³ km² año⁻¹ (Chiscalera). Las microcuencas que se prevé presentarán mayor cambio en la disponibilidad hídrica superficial al

2050 ante cambio climático son: Pamán (48%); Quiscab (-43%); y Chiscalera (-41%), el resto reducirán su oferta entre 36% (Barreneché) y 38% (Novillero) (**Cuadro 14**).

Cuadro 14. Disponibilidad hídrica superficial ($\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Microcuenca	2015	2050	
	Disponibilidad hídrica superficial, $\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$	Disponibilidad hídrica superficial, $\text{m}^3 \text{ km}^2 \text{ año}^{-1}$	Cambio %
Argueta	735,306	467,233	-37
Barreneché	752,669	478,387	-36
Pamán	566,482	295,794	48
Novillero	720,627	444,645	-38
Xibalbay	736,746	458,811	-38
Chiscalera	695,592	410,577	-41
Quiscab	661,988	379,970	-43
Subcuenca Quiscab	695,630	419,345	-40

Actualmente, la disponibilidad de agua superficial per cápita anual en la subcuenca del río Quiscab es de $1,270 \text{ m}^3$, encontrándose bajo estrés según Falkenmark *et al.* (1989). En los años de incidencia de los eventos meteorológicos extremos, la subcuenca salió de estrés hídrico per cápita, alcanzando valores de $2,382 \text{ m}^3$ en el 2010 (Tormenta Tropical Agatha y Depresión Tropical 11E); y $2,272 \text{ m}^3$ (Huracán Stand). Las microcuencas del río Argueta y Novillero no están en estrés hídrico; Barreneché, Xibalbay y Chiscalera presentan estrés hídrico; Pamán está en escasez crónica; y la microcuenca Quiscab está bajo escasez extrema (**Cuadro 15 y figura 16**).

Ante cambio climático al año 2050 (HadGEM2-ES, RCP 8.5) las microcuencas que actualmente no se encuentran en estrés hídrico, se sugiere pasarán a estar en escasez crónica (Argueta y Novillero), disminuyendo su disponibilidad por arriba del 60%. Mientras que las de estrés y escasez crónica probablemente estarán bajo escasez extrema (Barreneché, Pamán, Xibalbay, Chiscalera); reduciendo su disponibilidad per cápita más allá del 50%. La microcuenca Quiscab se mantendrá en escasez extrema, con reducción de su disponibilidad per cápita del 76.1% en comparación a la línea base. Por su parte la subcuenca del río Quiscab pasará de estrés a escasez extrema, tal desplazamiento de categoría se debe a la reducción del 70% de su disponibilidad actual (**Cuadro 15 y figura 16**).

Cuadro 15. Disponibilidad hídrica per cápita por año ($m^3 km^2 año^{-1}$) para cada microcuenca al 2015 y bajo un escenario de cambio climático al 2050 (RCP 8.5) del Modelo de Circulación General HadGEM2-ES con reducción de escala, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Microcuenca	$m^3 persona^{-1} año^{-1}$ Cambio, %			Categoría estrés	
	2015	2050		2015	2050
Argueta	2,138	657	-69	No estrés	Escasez crónica
Barreneché	1,651	496	-70	Estrés hídrico	Escasez extrema
Pamán	727	337	-55	Escasez crónica	Escasez extrema
Novillero	1,751	681	-61	No estrés	Escasez crónica
Xibalbay	1,004	260	-74	Estrés hídrico	Escasez extrema
Chuiscalera	1,334	384	-71	Estrés hídrico	Escasez extrema
Quiscab	285	68	-76	Escasez extrema	Escasez extrema
Subcuenca Quiscab	1,270	412	-70	Estrés hídrico	Escasez extrema

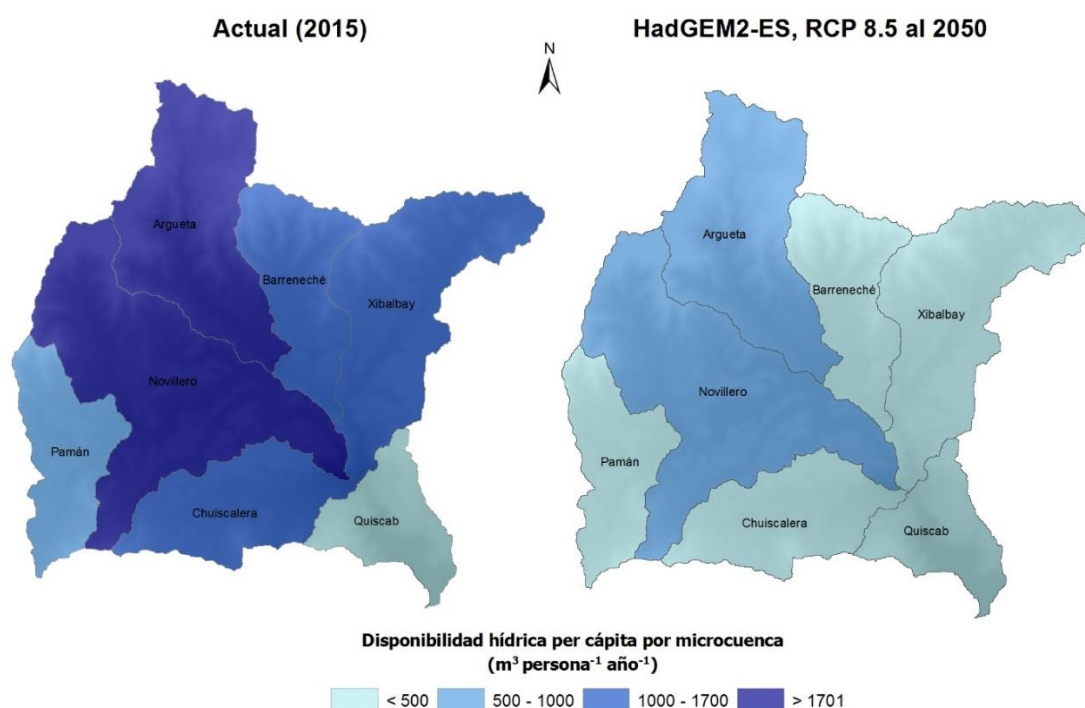


Figura 16. Disponibilidad hídrica per cápita ($m^3 persona^{-1} año^{-1}$) al 2015 y para el escenario futuro de cambio climático RCP 8,5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al año 2050, para las microcuencas de la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

3.2 Impacto del cambio climático en el déficit hídrico del maíz.

La siembra en los primeros días de marzo presenta la mayor frecuencia en la entrevista realizada ($n=24$), y la duración promedio del ciclo es 270 días. Por este motivo se estableció para el presente análisis, el 1 de marzo como fecha de siembra del cultivo de maíz en la subcuenca Quiscab. Actualmente (línea base) se evidencia déficit hídrico únicamente en la parte inicial de la etapa vegetativa del cultivo. Donde el total de déficit hídrico del cultivo de maíz es $-8.4 mm$ de agua, lo que equivale a $84 m^3 ha^{-1} año^{-1}$, en el área cubierta por granos básicos (maíz y frijol) (**Cuadro 16**). Bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de

Circulación General HadGEM2-ES, se sugiere que el déficit hídrico del cultivo de maíz incrementa en la etapa inicial vegetativa $496 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (50mm; marzo y abril). Se prevé el surgimiento de déficit hídrico en la parte final del ciclo del cultivo (noviembre), representando $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (3.9 mm). El déficit hídrico total durante el ciclo del cultivo será $619 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (-62 mm) (**Cuadro 16**).

Cuadro 16. Déficit hídrico del cultivo de maíz ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 205; y el cambio en el déficit hídrico, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

Mes	Déficit hídrico del maíz				
	mm		$\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$		Cambio
	Línea base	RCP 8.5	Línea base	RCP 8.5	
Marzo	-4.7	-13.6	47	136	89
Abril	-3.7	-44.4	37	444	407
Noviembre	0.0	-3.9	0	39	39
Total	-8.4	-61.9	84	619	535

Espacialmente, el déficit actual es mayor en la dirección Sur Oeste de la subcuenca Quiscab, alcanzando valores inferiores a -40 mm; mientras que en el resto de superficie cultivada es menor a -20 mm. Ante cambio climático la mayor superficie del área cultivada con maíz (granos básicos) presenta déficit hídrico menor a -40 mm (**Figura 17**). Recordando que el déficit hídrico al 2050 bajo cambio climático se ubica en la etapa inicial vegetativa y en la parte final del ciclo (**Figura 17**).

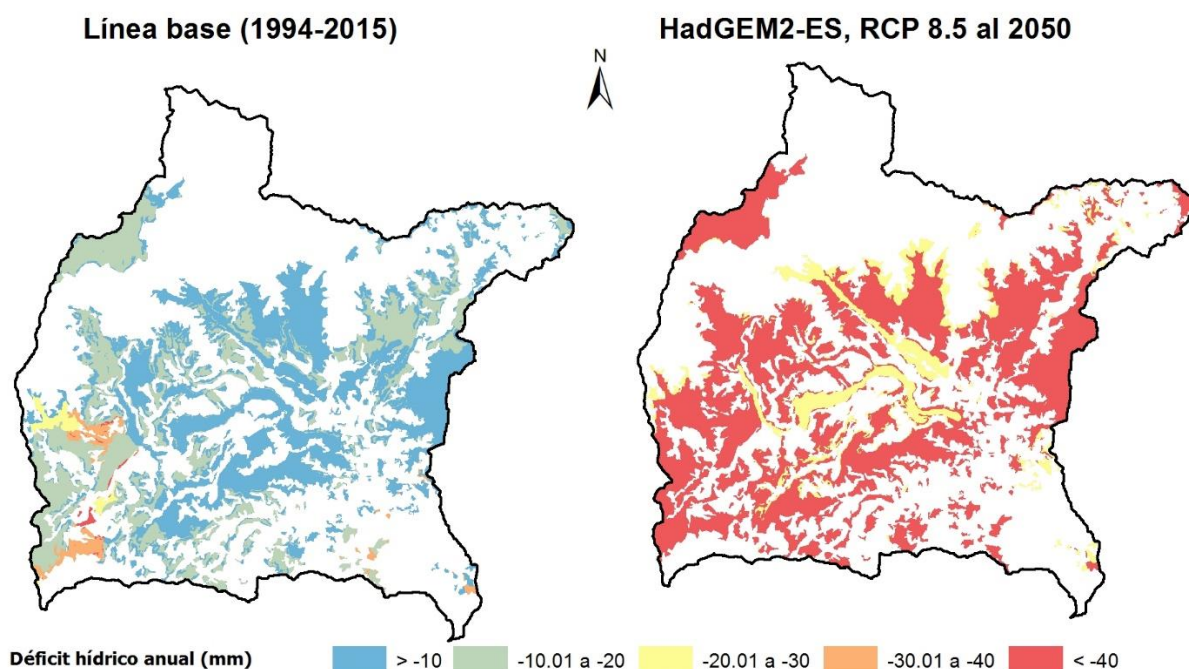


Figura 17. Déficit hídrico del cultivo de maíz (mm) para la línea base (1994-2015), y bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del Modelo de Circulación General con reducción de escala HadGEM2-ES al 2050, para la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago de Atitlán, Guatemala.

4. DISCUSIÓN

4.1 Impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para uso humano

La subcuenca del río Quiscab actualmente se encuentra bajo estrés hídrico, esto significa que su población está por debajo del umbral de 1,7000 metros cúbicos por persona por año para satisfacer las necesidades de uso en el hogar, agricultura e industria (Falkenmark *et al.* 1989; Falkenmark 1991). Pero al ir a escala de microcuencas encontramos escasez crónica y extrema, con ello se ve limitada la satisfacción de sus necesidades de consumo de agua para los usos mencionados.

El impulsor de dicho estrés hídrico actual es la presión demográfica sobre el territorio de estudio. Por ello, en los municipios que comparten superficie en la subcuenca se calculó la tasa de crecimiento exponencial promedio anual, donde la población base fue la del último censo (INE 2002), y la población más reciente aquella proyectada al 2015 sobre el mismo censo (INE 2004a). De esto, cuatro municipios (San José Chacayá 6.01%; Sololá 5.85%; Totonicapán 3.16%; y Santa Lucía Utatlán 2.80%) presentan tasa de crecimiento exponencial anual superior en comparación a la tasa exponencial de la República de Guatemala para el período 2000 – 2015 (2.44%) presentada por INE (2004a). La densidad demográfica de los cinco municipios a 2015 se encuentra entre 340 habitantes km⁻² (San José Chacayá) y 905 habitantes km⁻² (Sololá), con base en la proyección de población de INE (2004a).

Mientras que el impulsor de cambio a futuro además del crecimiento poblacional es el cambio climático, donde al combinarse con la presión demográfica se sugiere llevaría a la subcuenca Quiscab a la escasez absoluta o extrema (< 500 m³ persona⁻¹ año⁻¹). Esto sucedería si el cambio en la disponibilidad hídrica superficial en la subcuenca (-40%) sugerido por el escenario de cambio climático RCP 8.5 del HadGEM2-ES al año 2050 se lleva a cabo, y la población incrementa su presión. Es así que al incorporar este segundo impulsor se hace presente el factor climático inductor de escasez de agua, que a su vez modifica la oferta hídrica superficial debido a anomalías de precipitación y temperatura. Ambas son muy importantes en la movilidad del ciclo hidrológico; la precipitación es el principal componente de este que dota de agua a los ecosistemas (Brutsaert 2005; Vörösmarty *et al.* 2005; Davie 2008; Han 2010), y la temperatura en conjunto con la humedad del aire, agua disponible en la superficie y subsuelo son los principales factores que rigen la evapotranspiración (Fitts 2012).

Considerando que la subcuenca Quiscab actualmente se encuentra en estrés hídrico, misma situación para tres microcuencas (Barreneché, Xibalbay y Chuiscalera); una con escasez crónica (500-1000 m³ persona⁻¹ año⁻¹); y otra con escasez extrema (< 500 m³ persona⁻¹ año⁻¹), y que esta situación se sugiere se agravaría por el cambio climático y aumento poblacional, llevando las microcuencas sin estrés hídrico a la escasez, es imperativo prestar atención desde ya a los potenciales riesgos derivados de dicha situación. Es así que los riesgos potenciales relacionados con la problemática actual y futura de estrés y escasez de agua en las microcuencas de la subcuenca del río Quiscab, son y podrían ser: cambio en la dotación de agua, lo cual promovería conflictos sociales por el acceso al agua; el incremento de la población aumentaría la contaminación de las fuentes de agua; inseguridad alimentaria, degradación de

las tierras, inseguridad hídrica y pobreza, y disminución de los niveles de agua subterránea (Falkenmark y Widstrand 1992; Rijsberman 2004; UN-WATER 2007; PNUMA 2010a).

Este complejo de riesgos latentes incrementaría el deterioro del bienestar humano, por el impacto de sus impulsores de cambio directo e indirecto; cambio climático y crecimiento poblacional, respectivamente (MEA2005a; Carpenter *et al.* 2009). Es probable que los riesgos se acentúen e incrementen durante la época seca (noviembre-abril) ante el cambio climático, ya que la proporción de producción de agua en la época seca es 15% y 16%, en el escenario base y escenario de cambio climático al 2050, respectivamente. Por ello, el adecuado manejo y gestión del recurso hídrico es y será fundamental para establecer medidas de adaptación y mitigación al cambio climático y crecimiento poblacional, esto conduciría a reducir el impacto real de estos dos impulsores de cambio sobre la disponibilidad hídrica superficial en las microcuencas de la subcuenca Quiscab.

En el manejo y gestión del agua se debe considerar que este recurso es complejo por la dinámica de sus flujos (Rijsberman 2004), y que participa en distintos procesos biológicos (Vörösmarty *et al.* 2005), por ello Rijsberman (2003) le denomina la "corriente sanguínea de la biosfera". Por otro lado, y que queda fuera del alcance del indicador de Falkenmark *et al.* (1989), se debe evidenciar el acceso real de agua para los usos característicos de cada microcuenca.

Finalmente, queda fuera de análisis en el presente estudio las consideraciones siguientes: 1) la oferta de agua dulce almacenada en el acuífero; 2) capital construido para almacenamiento de agua; 3) importación de agua de cuencas adyacentes; 4) acceso real de agua para los diferentes usos, que al considerarse se tendría una perspectiva más amplia del contexto del manejo y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Lago de Atitlán, sin olvidar que los dos departamentos que comparten superficie con la subcuenca Quiscab presentan los mayores niveles de pobreza al 2014 (> 75%); pobreza extrema (~ 40%); y brecha de pobreza (34%), y el departamento de Sololá es uno de los de mayor acceso a agua mejorada (tubería dentro y fuera del hogar, y chorro público) según INE (2015); PNUD (2016).

4.2 Impacto del cambio climático en el déficit hídrico del maíz.

El déficit hídrico del cultivo de maíz se incrementaría severamente en el inicio de la etapa vegetativa y se propiciaría el surgimiento en la última fase del ciclo. Esto sugiere sucedería en la época seca del régimen pluvial, ante cambio de precipitación en esta época de -61% y temperatura (+1.72°C) propiciado por el escenario RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES con reducción de escala. Este cambio de intensidad de déficit hídrico en la fase vegetativa afectaría la densidad de plantas por falta de agua para la germinación y emergencia, se disminuiría el crecimiento foliar lo que reduciría la interceptación de radiación solar (Lafitte 1994). Dicha reducción de radiación solar interceptada podría limitar el rendimiento, por el papel de esta en el proceso fotosintético.

Otro efecto de la falta de agua en el establecimiento del cultivo podría ser la modificación del calendario agrícola, cambiando la fecha de siembra; considerando que el cultivo de maíz continúe su producción sin riego a futuro. Además el incremento de temperatura podría propiciar acortar el ciclo de los cultivares nativos, que en el departamento representan más del 90% (Cifuentes *et al.* 2014). También, el déficit hídrico en la etapa vegetativa puede reducir la producción de materia seca entre 28-32% (Cakir 2004), y 17% cuando el déficit ocurre 3 semanas previo al 75% de floración (Claassen y Shaw 1970a). Además, la falta de agua en esta etapa podría reducir el número de granos, pero tener poco efecto sobre su peso (Eck 1986).

En la época lluviosa (mayo-octubre) el cultivo de maíz mantendrá su estatus de no déficit hídrico al 2050, ante una reducción de precipitación pluvial y temperatura en la misma de 19% y 2.75°C, respectivamente. Durante esta temporada se da la finalización de la etapa vegetativa y se lleva a cabo la etapa reproductiva. Siendo en esta última más sensible y crítico el maíz al déficit hídrico, especialmente en la floración y llenado de granos (Claassen y Shaw 1970b; Hall *et al.* 1982; Otegui *et al.* 1995; Schussler y Westgate 1995), ya que en esta etapa se determina el número y peso final de los granos de la mazorca (Bolaños y Edmeades 1993).

Los hallazgos de este estudio puede relacionarse con el estudio de Bouroncle *et al.* (2016), donde se encontró un incremento de la aptitud climática del cultivo de maíz en los municipios que convergen en la subcuenca Quiscab para el período 2020-2049 (2030); ante el escenario A1B de 24 Modelos Generales de Circulación. Por otro lado, Schmidt *et al.* (2012) muestra que para el departamento Sololá el cambio de aptitud del maíz será positivo, pero muy marginal (<20) al año 2050, ante un cambio de la temperatura media del país de +2.4°C, y reducción de la precipitación (3%).

Por lo tanto, el no presentarse déficit hídrico del cultivo ante cambio climático en la época lluviosa es probable que se deba al metabolismo del cultivo, siendo el maíz una planta de metabolismo C4 que posee alta eficiencia del uso del agua, altas tasa de crecimiento y fotosíntesis asociadas a mayor exposición a luz y temperatura (Hesketh 1963; Waggoner *et al.* 1963; Hatch 2002). Esta idea no brinda una respuesta sobre lo que sucederá con el rendimiento de grano de maíz, el que actualmente en el departamento de Sololá es 2.9 ton ha⁻¹ (Cifuentes *et al.* 2014) y a nivel nacional es de 1.62 ton ha⁻¹ (INE 2004b). Lo anterior provoca incertidumbre sobre el futuro de la seguridad alimentaria de los habitantes de la subcuenca, quienes destinan para autoconsumo el 85% y 96% de la producción de maíz y frijol, respectivamente, según Cifuentes *et al.* (2014).

5. CONCLUSIONES

En cuanto a las necesidades humanas el presente estudio aporta la existencia de puntos críticos en la disponibilidad hídrica superficial en la subcuenca Quiscab, donde por el impacto del cambio climático (RCP 8.5 HadGEM2-ES) y presión demográfica al 2050 la llevarán a escasez extrema, misma situación en el 70% de microcuencas. El 30% de microcuencas restantes pasarán a escasez crónica, con ello se reducirá la disponibilidad hídrica per cápita anual.

Espacialmente los cambios en la disponibilidad per cápita anual son más acentuados en las zonas que experimentarán mayor presión demográfica con menor producción de agua, destacan la microcuenca del río Quiscab.

Se resalta el déficit hídrico potencial actual del cultivo de maíz en el establecimiento del cultivo (inicio de etapa vegetativa, además del surgimiento en la última parte del ciclo del cultivo ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 del HadGEM2-ES, y se prevé un incremento severo del déficit hídrico estas dos etapas. Este incremento severo es generalizado espacialmente en las áreas destinadas al cultivo de granos básicos en la subcuenca Quiscab.

Esto contribuye identificando los puntos de potencial interés que actualmente y a futuro provocarán estrés hídrico al cultivo de maíz, aportando elementos para combinarse con la capacidad adaptativa y resiliencia de los productores para determinar la vulnerabilidad de su producción ante la amenaza de cambio climático latente modelada en este estudio, y las repercusiones que tendría en la seguridad alimentaria de sus habitantes, por afectar la producción.

Al combinar la dinámica de disponibilidad hídrica per cápita y el déficit hídrico del cultivo de maíz entre la situación actual y futura, se hace evidente las implicaciones negativas potenciales que tiene el cambio climático en la disponibilidad hídrica para las necesidades humanas (industria, agricultura y del hogar), que pueden contribuir a la conflictividad del paisaje social. Es por ello la necesidad imperativa de una gestión integral del recurso hídrico inclusiva, participativa y activa en esta subcuenca que descarga sus aguas hacia el Lago de Atitlán, escenario de alto atractivo turístico para el país.

Los puntos fuertes del estudio se refieren a la solidez y estrecho uso del modelo hidrológico SWAT, al ser un modelo físicamente basado y que requiere información detallada del área de interés. Mientras que las limitaciones están relacionadas a la deficiencia temporal y espacial de datos pluviales, fluviales y de extracción para calibración y validación.

6. RECOMENDACIONES

Monitorear las fluctuaciones de la tabla de agua permanentemente y en varios puntos de la cuenca Atitlán, con el fin de determinar la recarga neta de agua subterránea, ya que a futuro la presión sobre esta fuente de agua dulce será mayor, por el cambio climático y demográfico. La gestión integral de los recursos hídricos en esta cuenca debe ir a sensibilizar a la población sobre el papel del agua subterránea que se obtiene de los manantiales y a través de pozos artesanales.

Promover e implementar prácticas de conservación de suelo y agua en la cuenca Atitlán, que puedan brindar mejores condiciones de humedad en el suelo y favorecer los cultivos. Las medidas agronómicas que buscan incrementar la rugosidad del terreno en combinación con

métodos del suelo, como la incorporación de materia orgánica, en conjunto mejoran la estabilidad de los agregados del suelo y la infiltración. También los métodos mecánicos ayudan como barrera en el proceso de transporte de la pérdida del suelo, tal es el caso de las terrazas que en años anteriores se han implementado en la zona de estudio.

Promover prácticas de cosecha de agua para uso en los hogares, y de reservorios comunitarios para uso agrícola. La implementación de ambas necesitará de un proceso de planificación adaptado a las condiciones locales de pendiente, características del suelo, régimen pluvial y escala de usuarios, además de la participación de actores locales.

Promover el mejoramiento genético comunitario de los cultivos criollos de maíz y frijol, ya que ante cambio climático serán necesarios cultivos precoces. Se sugiere iniciar pronto, ya que el mejoramiento genético es un proceso largo.

Construir una estrategia local de adaptación al cambio climático con énfasis en los recursos hídricos, involucrando a diferentes actores e insertarla en las agendas de desarrollo de las entidades participantes. Esta permitirá conocer la percepción local sobre exposición, sensibilidad y adaptación al cambio climático de los recursos hídricos en la zona.

Se sugiere elaborar el índice de pobreza de agua (WPI, por sus siglas en inglés) para relacionar la disponibilidad hídrica con el bienestar de los habitantes, y determinar, así como la escasez de agua afecta a la población local.

Cuantificar otras dimensiones de la escasez de agua, como la disponibilidad de calidad, infraestructura y acceso a los servicios hídricos, escasez económica, política e institucional.

7. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K; Johnson, C ; Van Genuchten, MT. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 34:1340-1352.
- Abbaspour, KC; Yang, J; Maximov, I; Siber, R; Bogner, K; Mieleitner, J; Zobrist, J ; Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333:413-430.
- Allen, RG. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Org.
- Amador, J; Hidalgo, H; Alfaro, E; Durán-Quesada, A ; Calderón, B. 2016. Regional Climate: Central America and the Caribbean. (en línea). *Bulletin of the American Meteorological Society* 978:S178-S181. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Arnell, NW. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change* 14:31-52.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; Van Griensven, A ; Van Liew, M. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation.

- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS ; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1.
- Assessment, ME. 2005a. Ecosystems and human well-being : health synthesis : a report of the Millennium Ecosystem Assessment. Eds. J. Sarukhán; P. Weinstein. Washington, United States of America, Board of Review Editors.
- BM, (Banco Mundial, US) ; AQUASTAT, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, datos de AQUASTAT, IT). 2016. Datos de libre acceso del Banco Mundial: Guatemala. Disponible en <http://datos.bancomundial.org/pais/guatemala>
- Bolaños, J ; Edmeades, GO. 1993. La fenología del maíz.
- Bouroncle, C; Imbach, P; Rodríguez-Sánchez, B; Medellín, C; Martínez-Valle, A ; Läderach, P. 2016. Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder agricultural livelihoods in Central America: ranking and descriptive approaches to support adaptation strategies. (journal article). Climatic Change:1-15. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1792-0>
- Brutsaert, W. 2005. Hydrology: an introduction. Wiley Online Library.
- Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research 891:1-16.
- Carpenter, SR; Mooney, HA; Agard, J; Capistrano, D; DeFries, RS; Díaz, S; Dietz, T; Duraiappah, AK; Oteng-Yeboah, A ; Pereira, HM. 2009. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. Proceedings of the National Academy of Sciences 1065:1305-1312.
- Cifuentes, R; Sierra, C; Arévalo, LA; Beteta, C; Herrera, E ; Alvarez, MR. 2014. El sistema Milpa del departamento de Sololá visto desde la experiencia y vivencia de los productores de maíz de la región. (en línea). Revista de la Universidad del Valle de Guatemala 27:11-30. Consultado 28 abril. Disponible en <http://www.uvg.edu.gt/publicaciones/revista/volumenes/Revista-27.pdf>
- Claassen, M ; Shaw, R. 1970a. Water deficit effects on corn. I. Vegetative components. Agronomy Journal 625:649-652.
- Claassen, M ; Shaw, RH. 1970b. Water deficit effects on corn. I. Grain components. Agronomy Journal 625:652-655.
- Collins, M; Knutti, R; Arblaster, J; Dufresne, J-L; Fichet, T; Friedlingstein, P; Gao, X; Gutowski, W; Johns, T ; Krinner, G. 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In T. Stocker; D. Qin; G. Plattner; M. Tignor; S. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; B. Bex; B. Midgley. eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. p. 1029-1136.
- Collins, W; Bellouin, N; Doutriaux-Boucher, M; Gedney, N; Halloran, P; Hinton, T; Hughes, J; Jones, C; Joshi, M ; Liddicoat, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-system model—HadGEM2. Geoscientific Model Development 44:1051-1075.
- Cubasch, U; Wuebbles, D; Chen, D; Facchini, M; Frame, D; Mahowald, N ; Winther, J. 2013. Introduction. In T. Stocker; D. Qin; G. Plattner; M. Tignor; S. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; B. Bex; B. Midgley. eds. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. p. 119-158.
- Davie, T. 2008. Fundamentals of hydrology. Taylor & Francis.
- Eck, HV. 1986. Effects of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. Agronomy Journal 786:1035-1040.
- Falkenmark, M; Lundqvist, J ; Widstrand, C. 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. In, Blackwell Publishing Ltd. p. 258-267.

- Falkenmark, M. 1991. The Ven te Chow memorial lecture: environment and development: urgent need for a water perspective. *Water International* 164:229-240.
- Falkenmark, M ; Widstrand, C. 1992. Population and water resources: a delicate balance. *Population bulletin* 473:1-36.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2013. Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- _____. 2016a. Coping with water scarcity in agriculture: a global framework for action in a changing climate. (en línea). 4 p. Disponible en <http://www.fao.org/documents/card/en/c/8dd680fd-70d3-4725-8d9f-30f9a02455a0/>
- _____. 2016b. Soils, Land and Water for climate change adaptation and mitigation. (en línea). 16 p. Disponible en http://www.fao.org/documents/card/en/c/68b10350-9839-4759-94ba-0cb866cfde80/?utm_source=facebook&utm_medium=social+media&utm_campaign=ao+facebook
- Fitts, CR. 2012. *Groundwater science*. 2 ed ed. Academic press. 639 p.
- Gassman, PW; Reyes, MR; Green, CH ; Arnold, JG. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.
- GIMBOT, (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, GT). 2014. Mapa de bosques y uso de la tierra 2012. Guatemala, Guatemala, Esc. 1:50.000. color.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 338:
- Hall, A; Vilella, F; Trapani, N ; Chimenti, C. 1982. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research* 5:349-363.
- Han, D. 2010. *Concise hydrology*. Bookboon.
- Hargreaves, GH ; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche collection)(USA). no. fiche no. 85-2517.:
- Hatch, MD. 2002. C4 photosynthesis: discovery and resolution. *Photosynthesis Research* 731-3:251-256.
- Hesketh, JD. 1963. Hesketh JD & Moss D N. Variation in the response of photosynthesis to light. *Crop Sci.* 3: 107-10, 1963. *Crop Sci* 3:107-10.
- Hess, T. 2010. Estimating green water footprints in a temperate environment. *Water* 23:351-362.
- IARNA-URL, (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT). 2013. Evaluación Regional de los Recursos Hídricos y las Necesidades de Gestión para apoyar la Agricultura de pequeños productores: Enfoque de gestión y adaptación a las amenazas inducidas por el cambio y la variabilidad climática en el Altiplano Occidental de Guatemala. Guatemala, 296 p. Disponible en http://www.infoiarna.org.gt/rediarna/Informe_Final_PRS/Adjuntos/Parte%202.pdf
- IARNA-URL, IdA, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, GT). 2015. Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala: Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo. Guatemala, Disponible en <http://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=16>
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B; Rouspard, O; Mahé, G; Neilson, R; Corrales, L; Scholze, M ; Ciais, P. 2012. Modeling potential equilibrium states of vegetation and terrestrial water cycle of Mesoamerica under climate change scenarios*. *Journal of Hydrometeorology* 132:665-680.
- INAB, (Instituto Nacional de Bosques, GT) ; CONAP, (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, GT). 2015. Mapa Forestal por Tipo y Subtipo de Bosque, 2012. Guatemala, Esc. 1:25.000. color.

- INE, (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2002. XI Censo nacional de población y VI de habitación.
- _____. 2004a. Proyecciones de Población con Base al XI Censo de Población y VI de Habitación 2002, Período 2000 - 2020. (CD). Guatemala,
- _____. 2004b. IV Censo Nacional Agropecuario, Tomo II. Guatemala,
- _____. 2015. República de Guatemala: Encuesta Nacional de Condiciones de Vida 2014. Guatemala, 47 p. Disponible en <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2015/12/11/vjNVdb4IZswOj0ZtuivPicaAXet8LZqZ.pdf>
- Jones, C; Hughes, J; Bellouin, N; Hardiman, S; Jones, G; Knight, J; Liddicoat, S; O'Connor, F; Andres, RJ ; Bell, C. 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development* 43:543-570.
- Jones, PG ; Thornton, PK. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems* 114:1-5.
- Lafitte, H. 1994. Identificación de problemas en la producción de maíz tropical: Guía de campo. CIMMYT.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2015. Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra República de Guatemala, año 2010. Guatemala Esc. 1:50.000. color.
- MAGA-DIGEGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgo, GT). 2013. Estudio Semidetallado de suelos del departamento de Sololá, Guatemala. Guatemala, GT, 948 p.
- Martin, D ; Gilley, J. 1993. Irrigation water requirements: Chapter 2, Part 623. *National Engrg. Handbook*, USDA, Soil Conservation Service 284:
- Martin, G; Bellouin, N; Collins, W; Culverwell, I; Halloran, P; Hardiman, S; Hinton, T; Jones, C; McDonald, R; McLaren, A; O'Connor, F; Roberts, M; Rodriguez, J; Woodward, S; Best, M; Brooks, M; Brown, A; Butchart, N; Dearden, C; Derbyshire, S; Dharssi, I; Doutriaux-Boucher, M; Edwards, J; Falloon, P; Gedney, N; Gray, L; Hewitt, H; Hobson, M; Huddleston, M; Hughes, J; Ineson, S; Ingram, W; James, P; Johns, T; Johnson, C; Jones, A; Joshi, M; Keen, A; Liddicoat, S; Lock, A; Maidens, A; Manners, J; Milton, S; Rae, J; Ridley, J; Sellar, A; Senior, C; Totterdell, I; Verhoef, P ; Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development* 43:723-757.
- Meinshausen, M; Smith, SJ; Calvin, K; Daniel, JS; Kainuma, M; Lamarque, J; Matsumoto, K; Montzka, S; Raper, S ; Riahi, K. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 1091-2:213-241.
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD ; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 503:885-900.
- Moss, RH; Nakicenovic, N ; O'Neill, B. 2008. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies.
- Moss, RH; Edmonds, JA; Hibbard, KA; Manning, MR; Rose, SK; Van Vuuren, DP; Carter, TR; Emori, S; Kainuma, M ; Kram, T. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 4637282:747-756.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J ; King, K. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. . Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX:
- Oglesby, R ; Rowe, C. 2014. Impactos climáticos para Guatemala: Resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5. (en línea). Guatemala, 35 p. p. Consultado 01 nov 2015. Disponible en <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/1442.pdf>

- Otegui, ME; Andrade, FH ; Suero, EE. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 402:87-94.
- PNUD, (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, GT). 2016. Más allá del conflicto, luchas por el bienestar: Informe Nacional de Desarrollo Humano 2015/2016. Guatemala, Guatemala, 404 p.
- PNUMA, (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, KE). 2010a. El enverdecimiento del derecho de aguas: la gestión de los recursos hídricos para los seres humanos y el medioambiente. (en línea). Disponible en http://www.unep.org/delc/Portals/119/UNEP_Greening_water_law_spanish.pdf
- Revenga, C; Brunner, J; Henninger, N; Kassem, K ; Payne, N. 2000. PILOT ANALYSIS OF GLOBAL ECOSYSTEM. (en línea). Ed. W. R. I. a. W. Institute. Washington, US, Disponible en http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/page_freshwater.pdf
- Riahi, K; Rao, S; Krey, V; Cho, C; Chirkov, V; Fischer, G; Kindermann, G; Nakicenovic, N ; Rafaj, P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 1091-2:33-57.
- Rijsberman, FR. 2004. Water scarcity: fact or fiction? New directions for a diverse planet. *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress* 1:14.
- Ripl, W. 2003. Water: the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 3581440:1921-1934.
- Sánchez-Lugo, A; Morice, C ; Berrisford, P. 2016. Temperature: Surface Temperature. (en línea). *Bulletin of the American Meteorological Society* 978:S12-S13. Disponible en <https://www.ametsoc.org/ams/index.cfm/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/state-of-the-climate/>
- Schmidt, A; Eitzinger, A; Sonder, K; Sain, G; Rizo, L; Rodriguez, B; Hellin, J; Fisher, M; Laderach, P ; San Vicente, F. 2012. Tortillas on the roaster (ToR) Central America maize-beans systems and the changing climate: full technical report.
- Schussler, J ; Westgate, M. 1995. Assimilate flux determines kernel set at low water potential in maize. *Crop Science* 354:1074-1080.
- UN-WATER, (United Nations Water, IT). 2007. Coping with water scarcity: challenge of the twenty-first century. Prepared for World Water Day:
- Vörösmarty, CJ; Léveque, C; Revenga, C; Bos, R; Caudill, C; Chilton, J; Douglas, EM; Meybeck, M ; Prager, D. 2005. Fresh Water. In M. H. Rashid; R. Scholes; A. Neville. eds. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, United States of America. p. 165-207.
- Waggoner, PE; Moss, D ; Hesketh, J. 1963. Radiation in the plant environment and photosynthesis. *Agronomy Journal* 551:36-39.
- Zhang, X ; Cai, X. 2013. Climate change impacts on global agricultural water deficit. *Geophysical Research Letters* 406:1111-1117.
- Zhang, X. 2015. Integrated assessment of global agricultural land and water resources in a changing world. University of Illinois at Urbana-Champaign.