

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS AGUAS SUPERFICIALES

en Centroamérica y La Española



SERVIR
Sistema Regional de Visualización y Monitoreo



Eric R. Anderson¹
Ashutosh Limaye²
Africa I. Flores¹
Emil A. Cherrington³

¹ Departamento de Ciencias Atmosféricas
de la Universidad de Alabama en
Huntsville, EEUU

² Centro de Vuelo Espacial Marshall,
Administración Nacional de Aeronáutica y
del Espacio, EEUU

³ Centro del Agua del Trópico Húmedo
para América Latina y el Caribe, Panamá

**IMPACTOS DEL CAMBIO
CLIMÁTICO SOBRE LAS
AGUAS SUPERFICIALES**

en Centroamérica y La Española



RESUMEN

Esta evaluación regional examina los impactos potenciales del cambio climático en el escurrimiento de las aguas superficiales bajo una amplia gama de escenarios de precipitación en el futuro. A través del uso de un modelo de precipitación-escorrentía con interpolación de alta resolución de escenarios de cambio climático y una serie de conjuntos de datos de la topografía, cobertura vegetal y las características del suelo, este análisis pretende determinar los cambios en la cantidad y, hasta cierto punto, la calidad del agua en las principales cuencas hidrográficas desde el sur de México Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Haití y República Dominicana. Los resultados indican que, a pesar de grandes desacuerdos entre los diferentes modelos climáticos, hay una tendencia general de estaciones de lluvias más secas, lo que resulta en menor disponibilidad de agua superficial. El análisis de erosión identifica

las porciones superiores de algunas cuencas hidrográficas que serán más propensas a la pérdida de suelo y localiza las cuencas hidrográficas con potencialmente más aguas turbias. Debido a la falta de escenarios de cambio de cobertura de la tierra disponibles para la región, el impacto de los tipos de cambio de la superficie no se ha considerado y, por lo tanto, los resultados obtenidos aquí con respecto a cambios en la erosión no representan adecuadamente cualquier cambio que sea experimentado en el futuro, sobre todo debido a la deforestación. Aunque el cambio climático global probablemente exacerbará los efectos actuales de la deforestación y la contaminación del agua, se pueden tomar medidas a nivel local y regional que no sólo mitigarán el cambio climático, pero también confrontarán desafíos más inmediatos, como la pérdida de hábitat y degradación de calidad del agua.

INTRODUCCIÓN

En una región que recibe abundante luz solar y precipitaciones, creando algunos de los hábitats más ricos de especies en el mundo, las naciones de Centroamérica y el Caribe todavía están luchando para proporcionar a toda su población una fuente confiable de agua fresca y limpia. Además de esto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que “los registros de observación y las proyecciones climáticas proporcionan pruebas abundantes de que los recursos de agua dulce son vulnerables y tienen el potencial de ser fuertemente afectados por el cambio climático, con consecuencias de gran alcance para las sociedades humanas y los ecosistemas” (2008).

A pesar de esta fuente abundante de agua de lluvia, algunas poblaciones de Centroamérica están amenazadas por los recursos de agua dulce contaminada o simplemente no tienen acceso adecuado al agua y muchas poblaciones del Caribe enfrentan los mismos desafíos que la mayoría de las islas pequeñas en la obtención y retención de agua dulce. Las condiciones ambientales y sociales en toda la región son muy dispares, un ejemplo de ello es el gran contraste entre las partes del Pacífico y el Caribe de Centroamérica. Para empezar, la mayoría de la población en Centroamérica se encuentra a lo largo o cerca de la costa del Pacífico (Figura 1).

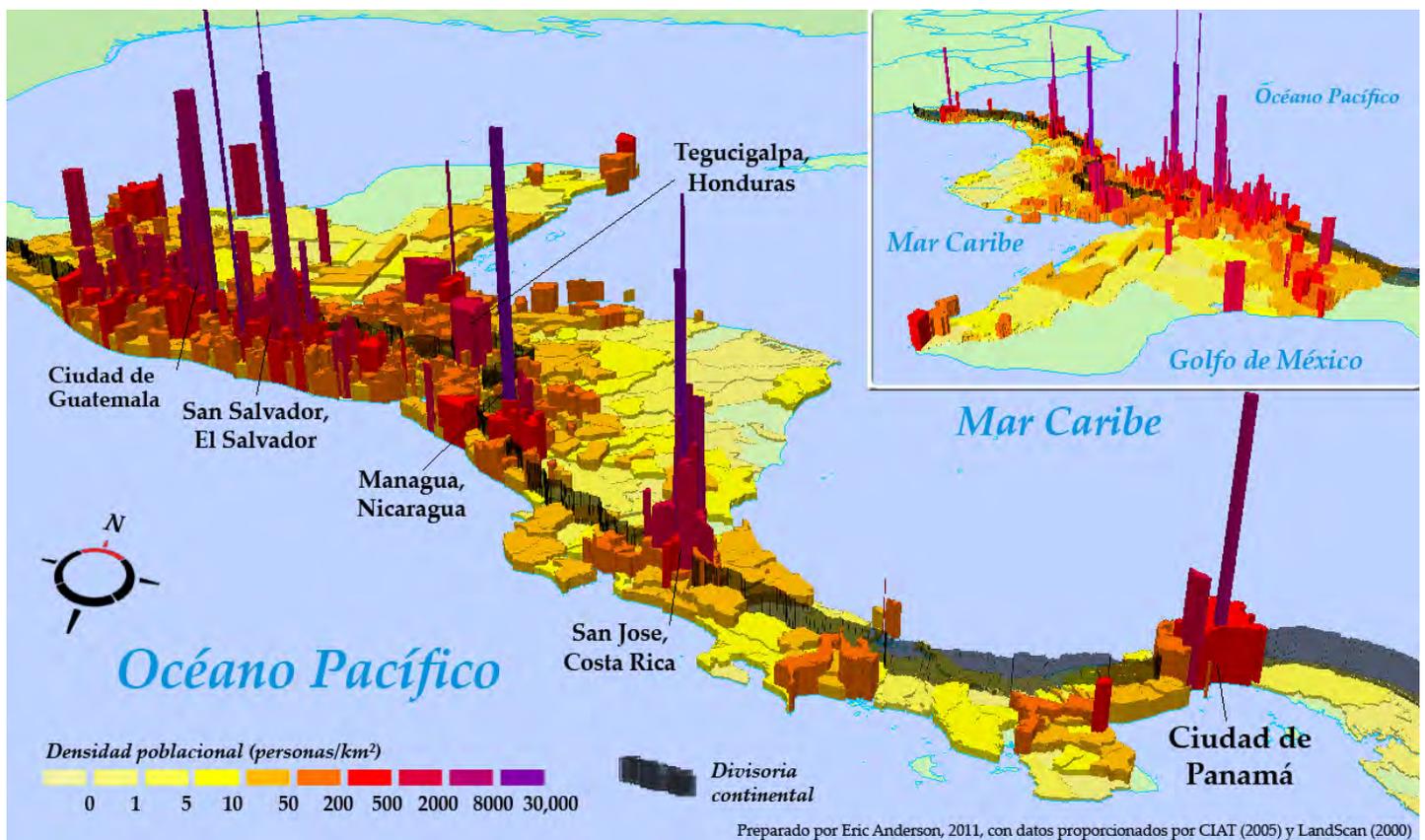


Figura 1. Este mapa de densidad de población por municipio muestra claramente que la mayoría de la población de Centroamérica está en el lado Pacífico de la divisoria continental. Las ciudades capitales han sido identificadas y se encuentran entre los centros de mayor densidad de población en la región. El mapa pequeño en la parte superior derecha muestra la misma información desde una perspectiva diferente. Los datos provienen de CIAT et al. (2005) y ORNL (2000).

Debido principalmente a la topografía y el clima, éste también es el lado más seco de la región en muchos lugares. Mientras que algunas áreas en el lado del Pacífico pueden no recibir lluvia durante varios meses en estación seca, el lado del Atlántico recibe mucho más lluvia en general, hasta el punto que se han visto inhibido las tasas de desarrollo en comparación a los de la vertiente del Pacífico. Muy probablemente debido a esta abundancia de precipitaciones y la falta de infraestructura en Centroamérica y La Española (la FAO y la NRL 2011), de 80 a 95% de las tierras de cultivo entre Costa Rica, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, México, Nicaragua y Panamá, son de secano, un indicador de alta vulnerabilidad (Banco

Mundial 2009). A nivel mundial, la agricultura representa aproximadamente el 70% del uso global del agua, seguido por la industria y el uso municipal en aproximadamente el 20% y 10%, respectivamente (FAO y la NRL 2011), y los países de Centroamérica y el Caribe en general, siguen el mismo patrón (Figura 2). Tal vez la falta de información sobre recursos de aguas subterráneas en la región (FAO y la NRL 2011) es también un indicador de la enorme importancia de la lluvia y el agua superficial.

Un debate considerable se puede hacer sobre las responsabilidades de Centroamérica y

del Caribe en la mitigación del cambio climático global, debido a su escasa contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero e impactos desproporcionadamente grandes esperados (Bates et al. 2008). La deforestación—contribuyente número uno a las emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina—tiene implicaciones no sólo en términos de cambio climático, sino también trae impactos más inmediatos y obvios, tales como la pérdida de hábitat (una amenaza a la biodiversidad) y la degradación del suelo.

Con respecto a los impactos generales que el IPCC ha identificado en términos de cambio de precipitación en Centroamérica, se espera un clima futuro con condiciones generalmente más secas, interrumpido por tormentas más intensas (Bates et al. 2008). Esto, sin duda, aumentará la erosión y potencialmente impactará negativamente la calidad del agua superficial por aumento de turbidez y carga de contaminantes, ya que con las temperaturas más altas se reduciría la humedad del suelo, haciéndolos más susceptibles a la erosión. La Figura 3 proporciona una visión general de los cambios a gran escala de la escorrentía anual, de acuerdo a un conjunto de modelos. Tenga en cuenta que el nivel de resolución de esta información no permite una interpretación de los impactos a nivel de cuencas hidrográficas en Centroamérica o el Caribe.

A pesar de la falta de información sobre los impactos a nivel de cuencas hidrográficas del cambio climático sobre las aguas superficiales, se ha realizado trabajo previo en la preparación de proyecciones climáticas interpoladas de alta resolución (Hijmans et al. 2005). Un uso de esta información fue la identificación de áreas críticas para la conservación de la biodiversidad en Centroamérica, México y República Dominicana (Anderson et al. 2008b). Este esfuerzo sentó las bases para nuevas aplicaciones relacionadas con los impactos potenciales del cambio climático a nivel regional, principalmente aquellas relacionadas con el medio ambiente y recursos hídricos.

Proporción del total de agua extraída para la agricultura (2001)

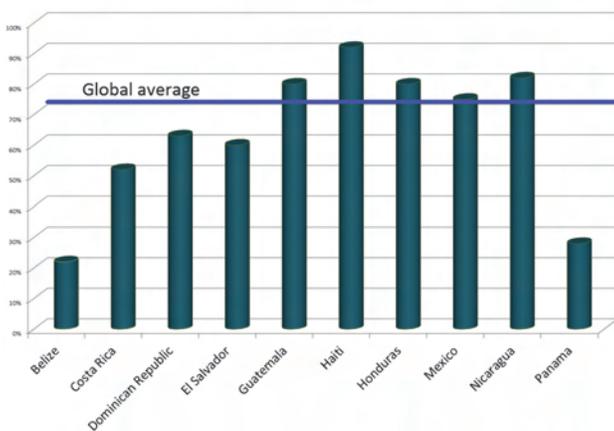


Figura 2. Proporción del total de agua extraída para la agricultura en América Central, Haití, México y la República Dominicana, en comparación con la media mundial (Banco Mundial 2009)

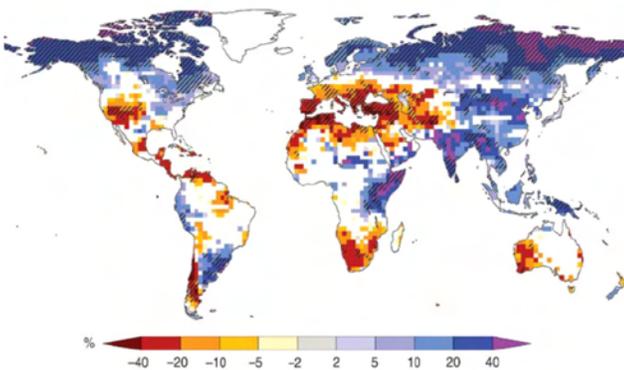


Figura 3. Esta figura del Informe de Síntesis 4 muestra los cambios a gran escala en la escorrentía anual prevista en 2090-2099, utilizando 1980-1999 como línea base (Bates et al. 2008).

OBJETIVOS

El objetivo principal de esta evaluación regional es aplicar un modelo de precipitación-escorrentía para cuantificar los impactos del cambio de los patrones de precipitación inducido por el cambio climático mundial en la escorrentía superficial a nivel de cuencas en Costa Rica, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua. Además, esta evaluación tiene por objeto profundizar conocimientos de los patrones de erosión actual y considerar los impactos del cambio climático sobre la cantidad y calidad de agua superficial. Dada la abundancia de los modelos climáticos globales y posteriores evaluaciones de impacto a gran escala, la novedad de este análisis es su intento de utilizar los insumos de más alta resolución disponibles con el objetivo de caracterizar los posibles impactos a una escala mucho más pequeña. Los resultados están expresados por cuencas hidrográficas conocidas, y por dominios hidrológicos de mayor tamaño, que para continuidad también incluyen a Belize, Haití, Panamá y el sur de México.

MÉTODOS

Usando ecuaciones comúnmente utilizadas para medir la escorrentía y erosión, la metodología involucró un análisis celda por celda de diversos factores biofísicos en la región, incluyendo la topografía, la cobertura terrestre, características del suelo y precipitación. Varios aportes se obtuvieron de una serie de organizaciones e iniciativas que se reconocen en el presente informe.

Los dos fenómenos principales medidos fueron la escorrentía superficial y la erosión del suelo. Escorrentía, Q , fue derivada por las siguientes ecuaciones (NOAA 2004):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S},$$

$$I_a = 0.2S,$$

$$S = \left(1000 / CN\right) - 10,$$

Donde:

Q = escorrentía (pulgadas)

P = precipitación (pulgadas)

S = potencial máximo de retención después que se inicia la escorrentía (pulgadas)

I_a = abstracción inicial (pulgadas)

CN = número de curva de escorrentía

Nota: Si $(P - I_a) = 0$, entonces $Q = 0$

Los insumos de precipitación se obtuvieron de la base de datos WorldClim (Hijmans 2005). Los números de curva de escurrimiento se determinaron mediante la combinación del producto de cobertura de la tierra GlobCover de la ESA (Arino et al 2007), redefinida al sistema de clasificación (NOAA 2005) del Programa de Análisis de Cambio Costero (C-PAC), con grupos de suelos hidrológicos (FAO 1998). Véase el **Apéndice A** para obtener detalles sobre la preparación de estos insumos.

La erosión, A , se calculó utilizando una versión simplificada de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida del Suelo (RUSLE) (Renard et al. 1997):

$$A = K \times LS \times C \times P$$

Donde:

A = promedio mensual de pérdida de suelo

K = factor de erodabilidad del suelo

LS = factor de longitud de la pendiente

C = factor de gestión de cobertura

P = precipitación

A diferencia de la mayoría de los cálculos RUSLE, esta evaluación intentó estimar la erosión mensual utilizando la ecuación anterior. El factor de erodabilidad del suelo, K , se obtuvo a través del mismo conjunto de datos de suelos mencionado anteriormente (FAO 1998). El factor LS se obtuvo a partir de los análisis hidrológicos y de superficie efectuados en el modelo de elevación digital HydroSHEDS (Lehner et al. 2008), y el factor de la gestión de cobertura, C , se obtuvo del mismo conjunto de datos de cobertura de tierras preparados para los cálculos de escorrentía (Véase el **Apéndice A**).

Aunque los insumos fueron elaborados sobre la plataforma ArcGIS de ESRI, los cálculos de precipitación-escorrentía y los cálculos del modelo de erosión fueron desarrollados en lenguaje Fortran 95 y ejecutados en un sencillo ambiente de línea de comandos. Todos los insumos anteriores se convirtieron en archivos ASCII para su ingestión en el modelo. Además de la Q y la A calculadas celda por celda, también se calculó una relación $A:Q$ por celda para medir la proporción de erosión a escorrentía del agua superficial. Por último, un promedio de valores de Q y un promedio de valores A de cada cuenca se calcularon y documentaron en un archivo de texto. Se ejecutaron doce corridas de modelos para crear

las condiciones de la referencia—una para cada mes. Las condiciones de futuro incluyeron las precipitaciones mensuales generadas por tres modelos climáticos globales (MCG): Modelo Acoplado del Centro Hadley del Reino Unido, versión 3 (HADCM3), el Modelo Climático Global Acoplado (CGCM3T47) del Centro Canadiense de Modelado y Análisis del Clima, y el modelo acoplado de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad de Australia (CSIRO Mk3), cada MCG ejecutando dos escenarios de emisiones: A2 y B2, “como de costumbre” y un

escenario de un caso mejor, respectivamente (IPCC 2000). Esto llevó a un total de 216 corridas de condiciones futuras. Para acceder al código completo véase el **Apéndice B**.

Con el fin de interpretar los resultados de las corridas de estos modelos, primero más en general que en todas las cuencas de la región, el promedio de Q, A, y la proporción A:Q fueron separados en cinco amplios dominios hidrológicos, derivados del modelo de elevación digital. Estos dominios han sido: el vertiente del Pacífico, vertiente del Caribe, el



Figura 4. Cinco Dominios Hidrológicos registrados para el área de estudio. Estos se han definido para caracterizar la dirección en la que fluye el agua superficial dentro de un dominio. Por ejemplo, el agua superficial dentro de la vertiente del Pacífico fluirá hacia el Océano Pacífico, el Usumacinta hacia el Golfo de México, etc. Tenga en cuenta que para La Española, lo que ha sido identificado aquí como "vertiente del Sur" a menudo se llama "vertiente del Caribe," y lo que se ha identificado aquí como "vertiente del Norte" también se conoce como "vertiente del Atlántico."

complejo del Usumacinta, la vertiente del Sur (La Española), la vertiente del Norte (La Española), con el fin de caracterizar la dirección en la que las aguas superficiales fluyen dentro de un dominio (Figura 4).

Además, los resultados de estas corridas del modelo fueron extraídos para siete cuencas prioritarias de los archivos de texto generados para cada ejecución. Estas cuencas fueron identificadas a través de una serie de procesos de consulta, por lo general durante talleres de capacitación realizados en CATHALAC (por

ejemplo, "Modelación Espacial de las Fuentes No Puntuales de Contaminación y Erosión en el Caribe", 2008), y en este estudio se enfoca en aquellos " " perteneciendo a los países CAFTA-DR. Muchas de estas son cuencas hidrográficas transfronterizas—las que abarcan dos o más países. El manejo de estas cuencas en particular es especialmente importante y requiere una cantidad adicional de atención y la cooperación internacional (Figura 5). Véase el Apéndice C para obtener más información acerca de cada una de estas cuencas prioritarias.



Figura 5. Las siete cuencas prioritarias seleccionadas en los países del CAFTA-DR. Véase el Apéndice C para obtener más información acerca de cada cuenca.

RESULTADOS

Los Dominios Hidrológicos de mayor tamaño permiten una interpretación más generalizada de los resultados, a costo de variabilidad local. Es aquí donde las estadísticas de las cuencas hidrográficas son útiles, ya que delimitan naturalmente las variables en cuestión, sin embargo, cualquier inexactitud de estos insumos de alta resolución de precipitación puede ser reflejado en muchas de estas cuencas más pequeñas, que a su vez es la razón por la cual los Dominios Hidrológicos de mayor tamaño fueron creados.

En primer lugar, en términos de resultados más amplios, la **Figura 6** y la **Figura 7** muestran la precipitación de referencia anual por celda cuadrada de 1 km y calculada en volumen por año. Uno puede ver que los dominios más grandes reciben un mayor volumen de precipitaciones, simplemente debido a su gran área. Por el contrario, en la **Figura 6**, se puede apreciar la heterogeneidad de la precipitación anual acumulada, lo que indica que esta interpolación de alta resolución ha tratado de captar los efectos de la topografía.

Todos los gráficos generados a partir de los resultados obtenidos se encuentran en el **Apéndice C**. Para cada una de las cuencas prioritarias, se muestra la Q mensual. Se describen dos meses de temporada representativos; en el caso de la estación seca el mes de marzo fue elegido, mientras que para la temporada de lluvias se seleccionó octubre.

Cada gráfico mensual contiene una comparación de los tres modelos de clima global, cada corrida bajo dos escenarios de emisiones, y modela un escurrimiento promedio, Q, para los años 2020, 2050 y 2080. Cada una de las siete cuencas hidrográficas prioritarias tiene un gráfico para marzo y octubre. También es importante tener presente que los rangos de la escorrentía media mensual varían mucho entre los dos meses. Por ejemplo, en algunos casos, como resultado de la casi nula precipitación, el promedio mensual Q para la cuenca en cuestión puede parecer que fluctúa violentamente hacia el futuro, pero el cambio absoluto es muy pequeño. Volúmenes mucho más altos

de la escorrentía se experimentan en octubre en todas las cuencas hidrográficas. En general se puede deducir que los resultados de los modelos no muestran una tendencia entre ellos; sin embargo, las interpretaciones específicas de cada cuenca aclararán más acerca del escurrimiento promedio modelado bajo diferentes escenarios.

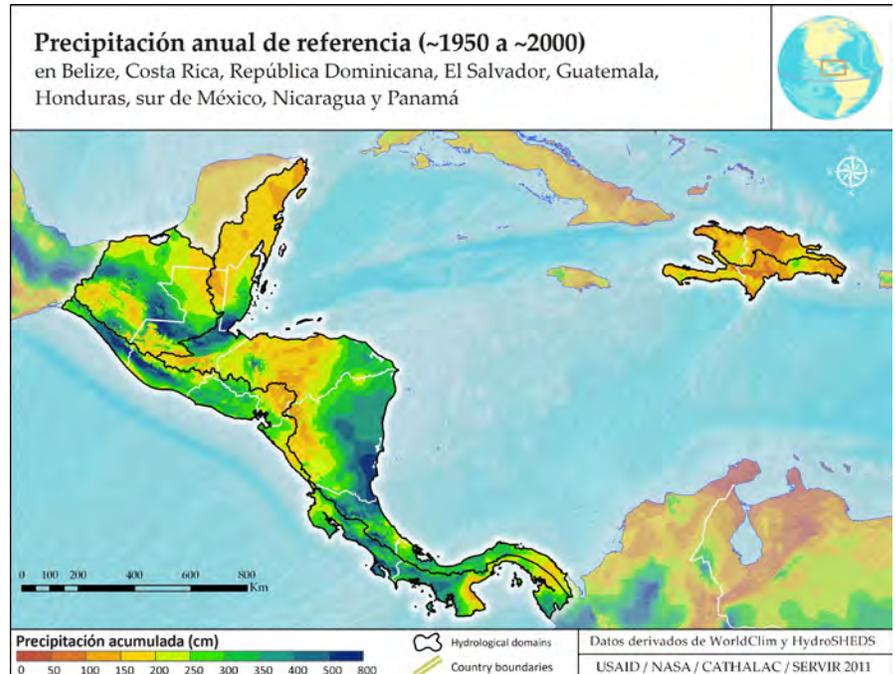


Figura 6. Este mapa muestra la precipitación promedio anual para el área de estudio, usando datos de alrededor de 1950-2000. Los datos son derivados de WorldClim (Hijmans et al. 2005)

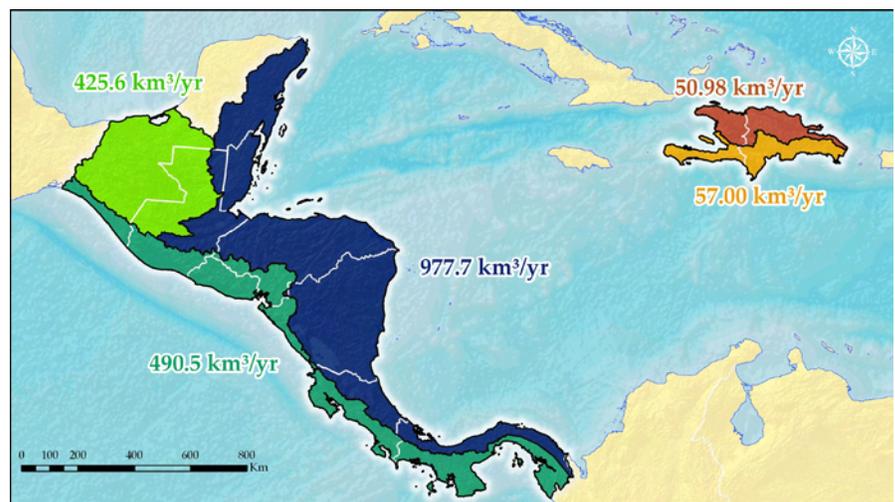


Figura 7. Teniendo en cuenta la precipitación promedio anual y el área de cada uno de los dominios hidrológicos, esta figura muestra el volumen de lluvia por año para cada uno. Los datos son derivados de WorldClim (Hijmans et al. 2005) y HydroSHEDS (Lehner 2008)

Cuenca del Coco En la cuenca del Coco, la corrida HadCM3, A2 muestra la menor escorrentía mensual de marzo y, en octubre, este mismo modelo y escenario también representan algunos de los valores más bajos (por debajo del punto de referencia), con excepción de la corrida HadCM3 B2 para los meses de octubre en la década de 2080. En octubre, dos modelos muestran valores por encima del punto de referencia para la década de 2020, que se diferencian de los otros cuatro, los cuales presentan volúmenes de escurrimiento por debajo del punto de referencia para la década de 2020.

Figura 8. Relación A:Q, resumida por dominio hidrológico para el clima de referencia (arriba: de marzo, parte inferior: de octubre)

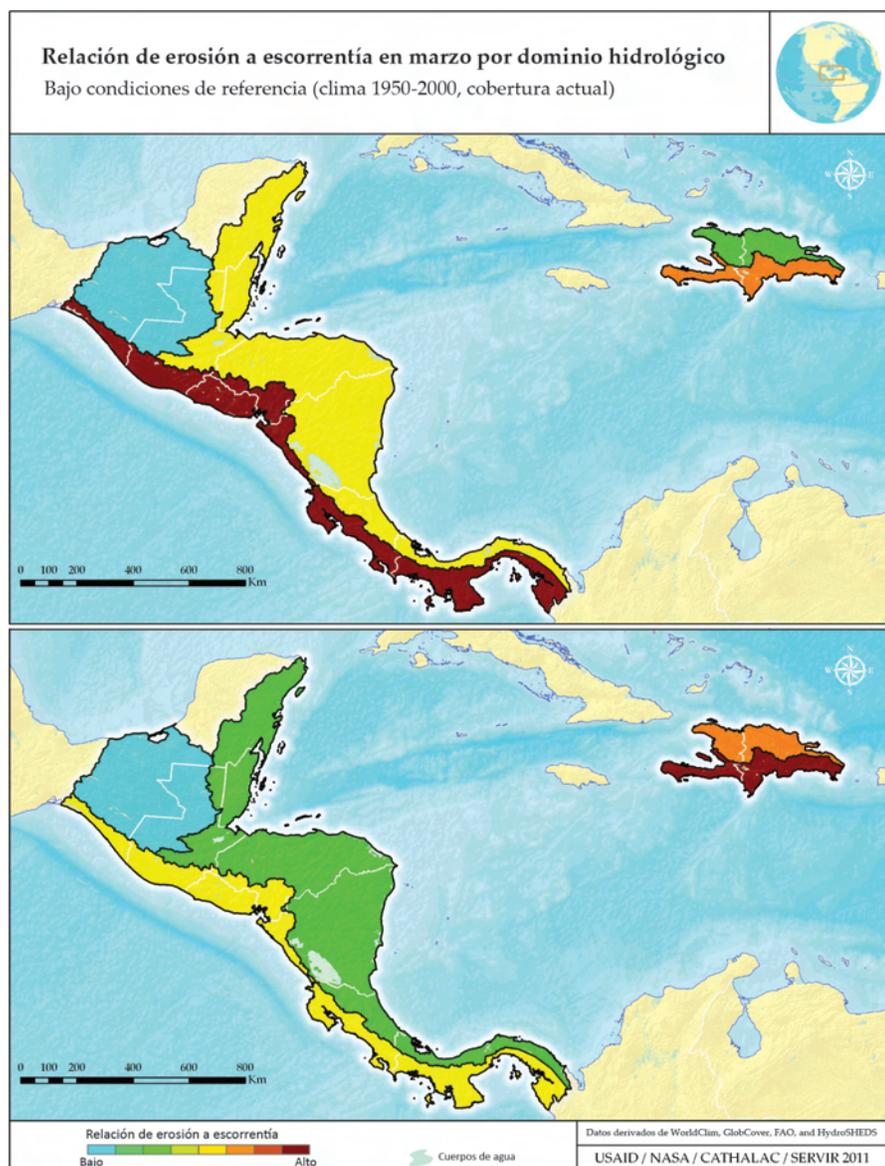
Cuenca del Lempa La cuenca del río Lempa sufre un cambio drástico entre la estación seca y húmeda, experimentando diez a quince veces la escorrentía de aguas superficiales en

octubre, en comparación a marzo. Los modelos canadienses parecen proyectar condiciones más húmedas en esta cuenca en octubre, especialmente hacia la década de 2020. Además de esto, existe una amplia gama de proyecciones por encima, debajo y a la par con el escurrimiento actual de aguas superficiales.

Cuenca del Motagua Para el análisis de marzo de la cuenca del Motagua, casi todas las proyecciones para 2020, 2050 y 2080 están a la altura o por debajo del punto de referencia, la más baja de la escorrentía media mensual presentada por HadCM3, A2, un modelo característicamente caliente y seco. Parece nuevamente que para el 2050 todos los modelos representan un valor similar que está más cerca al punto de referencia. Para la década de 2080 los modelos muestran una variedad de valores en un rango más amplio. La gráfica de octubre muestra que el caso más extremo fue el representado por CGCM3T74, B2, uno de los modelos más húmedos, en la década de 2020, donde el escurrimiento promedio mensual alcanzó el mayor volumen en toda la serie de corridas.

Cuenca del San Juan En marzo, casi todos los modelos muestran un ligero aumento en el escurrimiento superficial, mientras que en octubre, la mayoría de las proyecciones están disminuyendo, más gravemente en los modelos Hadley. Las excepciones a esta última afirmación son los dos modelos de Canadá que siguen proyectando un gran aumento en el escurrimiento de los meses de octubre en la década de 2020. Esta es una de las cuencas hidrográficas que sufre un drástico cambio estacional en el escurrimiento superficial, experimentando casi 20 veces la escorrentía en octubre que en marzo.

Cuenca del Sixaola En contraste con la cuenca del San Juan, la cuenca del Sixaola no se somete a un cambio estacional muy grande, debido a las lluvias continuas durante su estación seca. Este es otro caso donde las proyecciones de marzo tienden a incrementar, mientras que las proyecciones de octubre tienden a disminuir o permanecer igual. El gráfico de octubre presenta corridas de modelos que tienden a estar de acuerdo unos con otros en el futuro próximo y luego empiezan a divergir en gran



medida hacia la década de 2080. Por el contrario, las corridas de los modelos de marzo divergen de inmediato y luego convergen hacia la década de 2080, lo que es inesperado, sobre todo porque los modelos Hadley presentan condiciones inusualmente más húmedas (en comparación con otras partes de la región).

Cuenca del Usumacinta En los resultados generados para marzo en la cuenca con mayor área en este análisis, existe una variabilidad significativa en todos los modelos de la década de 2020, pero en el caso de la década de 2050, todos los modelos regresan a un valor similar, que está muy cerca del punto de referencia. Sin embargo, para la proyección de la década de 2080, los resultados divergen de nuevo significativamente en un rango amplio. En octubre, lidiando con diez veces el volumen del mes de marzo, la proyección de 2020 presenta una característica similar a la de marzo, ya que los valores futuros modelados extienden desde debajo a encima del punto de referencia, pero el modelo CGCM3T47, escenario B2 es atípico, mostrando una tendencia muy peculiar arriba-abajo-arriba, en picada hacia la década de 2050 después de subir hacia la década de 2020. En 2080 el CGCM3T47, B2 vuelve a subir.

Cuenca del Yaqué del Sur Por último, esta importante cuenca hidrográfica de drenaje en el Caribe (Sur) en la República Dominicana es similar a muchos otros casos en los cuales el escurrimiento de octubre está generalmente disminuyendo con el tiempo, mientras que el escurrimiento en marzo sí incrementa. Un punto importante es que en muchas de las cuencas hidrográficas, incluida la presente, los descensos de octubre superan los aumentos de marzo, resultando en un cambio anual neto negativo de escurrimiento de agua superficial. De acuerdo con los gráficos de cada cuenca, parece que para la década de 2020, los modelos proyectan valores dispares, en un rango de por debajo del punto de referencia hasta más arriba del mismo y luego, para los resultados de la década de 2050, muchos resultados tienden a converger a un volumen de escurrimiento similar al punto de referencia. Por último, hacia la década de 2080, los valores entre los diferentes modelos están en desacuerdo de nuevo. Sólo en el caso de

la cuenca del Yaqué del Sur las proyecciones de 2020 tienden a permanecer más cerca al punto de referencia y con el tiempo tienden a divergir en una gama más amplia de valores de escorrentía, por debajo y por encima del punto de referencia, dependiendo del modelo y escenario.

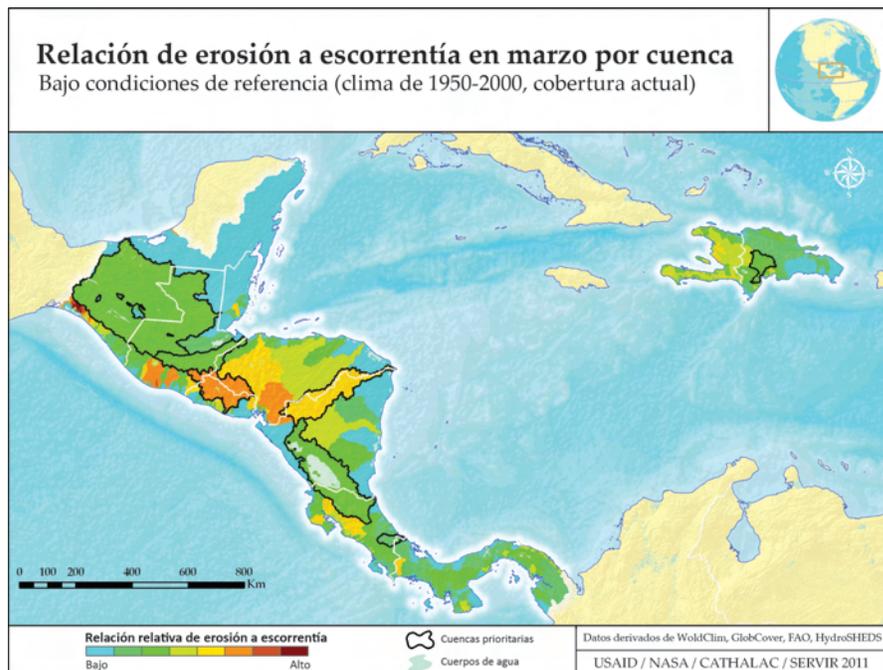


Figura 9. La relación de Erosión Escorrentía de marzo, por cuenca, bajo condiciones de referencia

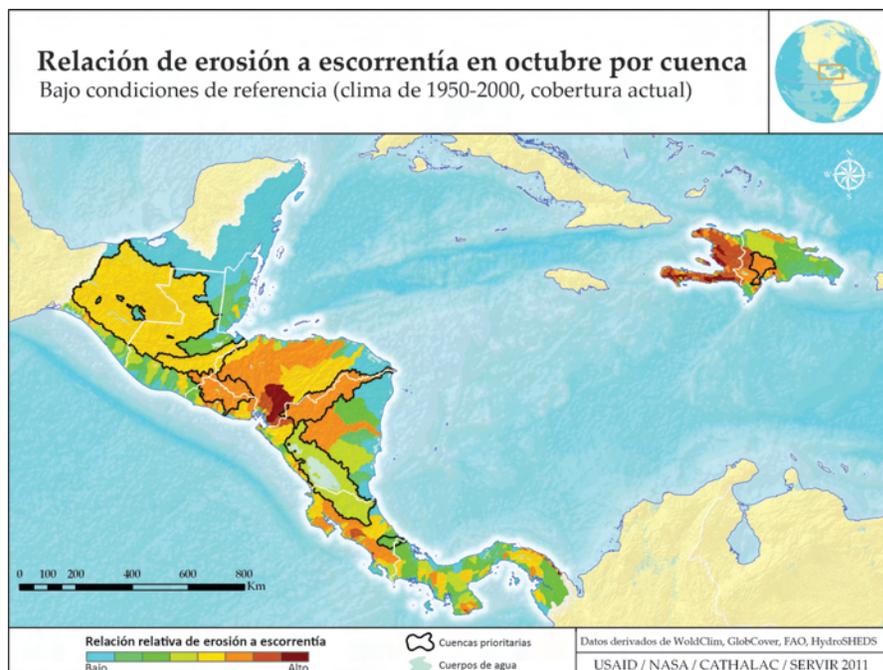


Figura 10. La relación de Erosión Escorrentía de octubre, por cuenca, en condiciones de referencia

Erosión Dado que información futura sobre cobertura de la tierra no estaba disponible, ésta fue considerada constante en el tiempo. Aunque poco realista en el mundo real, igual permite un análisis más claro de los impactos del cambio de los patrones de precipitaciones en forma independiente. Sin embargo, las relaciones A:Q de cada cuenca se muestran en la **Figura 9** y la **Figura 10**. En ambos meses, mayores tasas de erosión se ven en la vertiente del Pacífico, especialmente en El Salvador y en el Golfo de Fonseca. Llegando octubre esto se amplía ya que otras cuencas hidrográficas comienzan a presentar una mayor erosión. Haití resalta contra las tasas bastante bajas de erosión en la República Dominicana; sin embargo, la cuenca del Yaqué del Sur tiene una erosión muy elevada en la temporada de lluvias en comparación con el resto del país. Centrándose de nuevo en el Usumacinta, se puede apreciar la relativamente baja pérdida del suelo en marzo, pero en octubre, las lluvias tropicales parecen tener su efecto en la gran cuenca. El Sixaola no parece tener esta dinámica tan dicotómica, manteniendo una erosión relativamente baja. Puesto que hay más erosión que ocurre durante la temporada de lluvias, en la página siguiente se proporciona una relación erosión-escorrentía más detallada (**Figura 14**).

A partir de la cuenca del Coco, se pueden apreciar los valores más altos en la proporción A:Q en el oeste, que son las tierras altas, mientras que las tierras bajas, más planas, hacia el mar Caribe, no estarían contribuyendo tanto a la sedimentación en el río Coco y sus afluentes. Fuertes lluvias cientos de kilómetros al oeste podrían causar que grandes cargas de sedimentos salgan por la desembocadura de este río al mar Caribe, y la **Figura 14** permite la identificación de aquellas zonas que más contribuyen a la pérdida de suelo. No se nota una tendencia tan identificable entre tierras altas y bajas en la cuenca más plana Usumacinta. Esto también se refleja en la **Figura 9** y la **Figura 10**. Sin embargo, se trata de una cuenca muy grande y tiene una gran cantidad de sedimentación potencial. La cuenca del río Lempa abarca tres países, cubriendo una gran parte del territorio de El Salvador. La cordillera que separa a El Salvador y Hondu-



Figura 11. Concentración de sedimentos en el delta del río Coco (NASA)

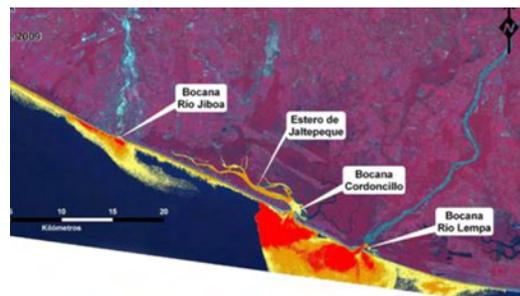


Figura 12. Después de lluvias fuertes, los sedimentos están resaltados en rojo, naranja y amarillo en la desembocadura del río Lempa (SERVIR, 2009)



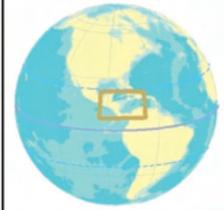
Figura 13. Lago de Nicaragua recibiendo toneladas de sedimentos tras lluvias fuertes (SERVIR, 2010)

ras tiene una relación de erosión-escorrentía muy alta causando que los afluentes del río Lempa lleven sedimentos en descenso desde las tierras altas hasta el Océano Pacífico.

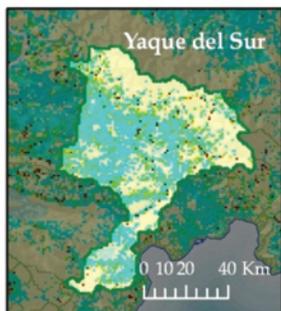
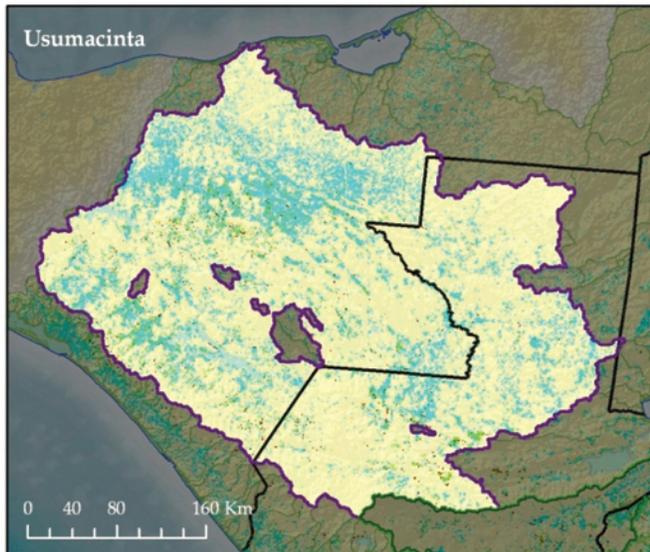
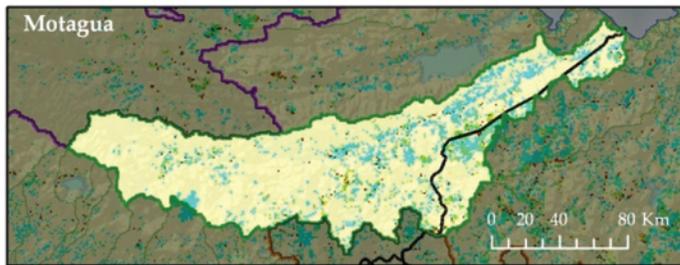
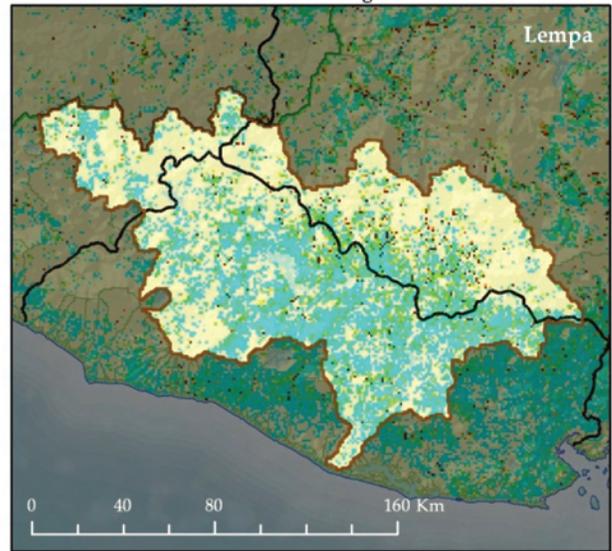
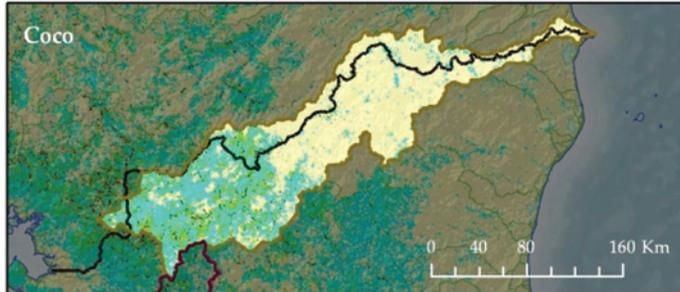
Altas proporciones de erosión-escorrentía también se detectan cerca del lago de Nicaragua en la cuenca del San Juan. La **Figura 13** muestra los efectos de las lluvias fuertes de mediados a finales de 2010, que provocó el vertido de toneladas de sedimentos en este sistema de agua dulce.

Relación de Erosión a Escorrentía: Octubre

en Belize, Costa Rica, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Honduras, sur de México, Nicaragua y Panamá



Relación relativa de erosión a escorrentía



Derivado de WorldClim, GlobCover, FAO, HydroSHEDS

USAID / NASA / CATHALAC / SERVIR 2011

Figura 14. Esta relación A:Q celda por celda identifica cantidades altas de erosión relativa al volumen de escorrentía por km² ultimadamente localiza fuentes de sedimentación

DISCUSIÓN

Debido a que la precipitación fue la única variable de prueba, la respuesta de la erosión a los cambios de las precipitaciones fue directamente proporcional a la escorrentía. Sin embargo, una serie de mapas de la relación erosión-escorrentía demuestra cuáles son las cuencas hidrográficas y cursos de agua que están sometidos a la sedimentación. Las cuencas hidrográficas con la deforestación actual (CATHALAC-SIMEPAR) tendrán una mayor propensión a la erosión y por lo tanto los cursos de agua declinarán en calidad (en términos de claridad). Estas cuencas también corren un riesgo mayor a ocasionar disminución de productividad del suelo.

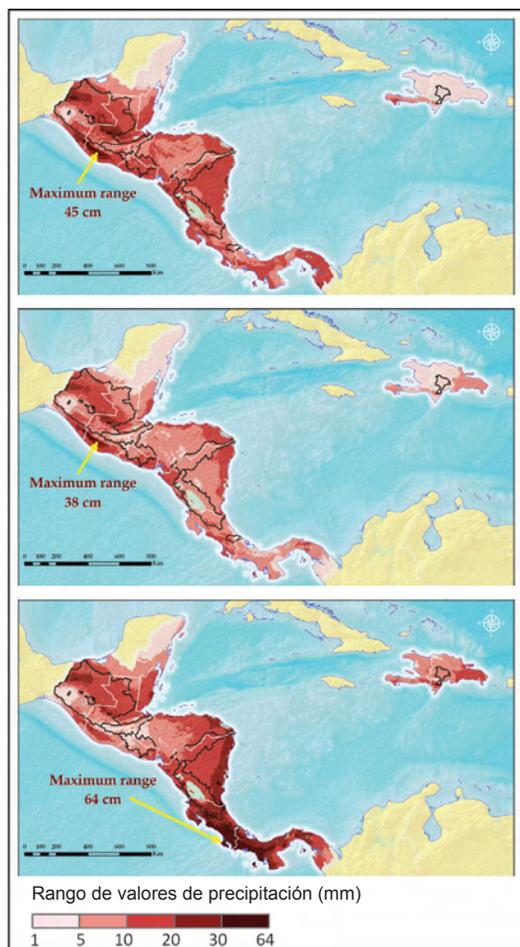


Figura 15. Esta serie de mapas muestra el rango entre las seis corridas de modelo de precipitación en octubre. De arriba a abajo: 2020s, 2050s, 2080s; mientras más oscuro el color mayor es el desacuerdo entre los modelos en esas áreas específicas.

Este tipo de modelo de precipitación-escorrentía tiene limitaciones y un modelo sólo puede ser tan bueno como sus insumos. Las proyecciones de precipitación varían a gran escala entre los modelos climáticos globales; la **Figura 15** muestra el rango de valores de precipitación proyectado a través del área de estudio, destacando donde las mayores disparidades se encuentran en marzo y octubre en la década de 2020. El **Apéndice E** también provee gráficos de cambios en las precipitaciones proyectados para cada una de las ciudades capitales de los países CAFTA-DR, lo que demuestra en otra forma el desacuerdo entre los modelos. Incertidumbre en los impactos del cambio climático sobre las aguas superficiales es mayormente el resultado de las incerti-

dumbres en las proyecciones de precipitación, en lugar de los modelos hidrológicos (Kaspar 2003). Todavía queda mucho por entender sobre el sistema climático global. En cuanto a los cálculos de erosión, se utilizó una versión simplificada de la común Ecuación Universal Revisada de Pérdida del Suelo, debido a una falta de información sobre la intensidad de la precipitación a futuro, también conocida como el factor R en la metodología RUSLE (sólo estaba disponible magnitud en mm). Mientras que algunos modelos globales generan este factor, parece que los esfuerzos por hacerse en el desarrollo de proyecciones de intensidad de precipitación de mayor resolución, un factor importante en la erosión.

Relacionado a la intensidad de lluvia, otro detalle que no se refleja en este modelo es el consenso general que el IPCC presenta en términos de cambio de precipitación, un clima futuro con condiciones generalmente más secas, interrumpido por tormentas más intensas. Esto sin duda aumentaría la erosión, ya que las temperaturas más altas reducirían la humedad del suelo, haciéndolos más susceptibles a la erosión (Bates et al. 2008). Las tasas actuales de pérdida de suelo y sedimentación normalmente inducidas por el mal uso del suelo ya son alarmantes y si esto se juntara con los cambios a mayor escala en el clima, se necesitarían medidas serias para la conservación del suelo.

Al interpretar los volúmenes de escurrimiento en cada cuenca, el "punto medio" o resultado promedio no debe confundirse como un escenario más probable a ocurrir. En vez, cada resultado proporciona una característica posible de la escorrentía, asumiendo que los modelos del cambio climático global y su reducción de escala son fiables, lo que no siempre es el caso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general, esta evaluación consideró un rango de escenarios climáticos futuros, en los que los cambios en las precipitaciones afectan la escorrentía superficial. Debido a la falta de acuerdo entre los modelos, es imposible concluir de este análisis cuáles serían los cambios probables en el escurrimiento superficial a una escala de cuenca. Esto podría remediarse mediante el desarrollo continuo de proyecciones de alta resolución del clima, con el fin de tener una gama amplia de insumos, en lugar de sólo seis por período de tiempo, del cual se podría construir un conjunto. Sin embargo, los escenarios presentados aquí son útiles ya que proporcionan una gama de futuros posibles, aunque sea muy amplia.

Independientemente del cambio climático global debido a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, se ha observado en numerosos casos que los cambios de uso de la tierra locales tienen un impacto significativo en el clima regional, que afectan especialmente a las montañas a barlovento de las zonas deforestadas (Nair et al. 2000; Fairman et al. 2011). Además, casos documentados muestran que los bosques pueden regular el flujo a través del año, reduciendo los caudales máximos durante las tormentas y permitiendo mayores flujos durante la estación seca (Jones y Grant, 1996). Comprensión y aplicación de esta teoría se demuestra en la Cuenca del Canal de Panamá (CICH 2011).

Si bien esta evaluación regional consideró los impactos del cambio de los patrones de precipitación en la cantidad y la calidad de las aguas superficiales, los cambios a las coberturas del suelo también deben ser incorporados en estos escenarios. Es posible que los cambios globales en temperatura y precipitación cambien la vegetación dominante en muchos ecosistemas tropicales (Cherrington et al. 2011), lo que afecta sus tasas de infiltración de agua y escorrentía. Otros cambios más bruscos a la tierra son la deforestación, en particular la expansión de la frontera agrícola y el crecimiento de los centros poblados. Esta conversión tendrá un impacto mucho más directo sobre las tasas de infiltración de agua de lluvia (y la recarga de aguas subterráneas), el escurrimiento superficial y la erosión. Grandes extensiones de superficies impermeables (por ejemplo, concreto, asfalto) puede dar lugar a más inundaciones y pérdida de suelo (Carter 2006). A pesar de esta amenaza inminente del cambio de uso del suelo y el hecho de que la deforestación es el contribuyente número uno de América Latina al cambio climático global, ningún esfuerzo concertado se ha hecho para desarrollar escenarios regionales de cambios a la cubierta de la tierra. Mientras que unos pocos sí existen, o son globales y a muy baja escala (Alcamo et al. 2008) o sólo cubren un área pequeña (Burke y Sugg, 2006), por lo que no son adecuados para tales proyecciones a nivel de cuenca sobre la calidad y cantidad del agua. Los incendios también inducen mayor pérdida de suelo,

ya que eliminan la vegetación y degradan los suelos, haciéndolos más susceptibles a la erosión. En un plazo más inmediato, se deben tomar precauciones si lluvias fuertes ocurren después de incendios en pendientes empinadas, ya que incluso pueden provocar deslizamientos de tierra (Cannon 2008).

Los sensores remotos pueden ser de utilidad en la cuantificación de la cobertura del suelo y cambio de cubierta terrestre en el espacio y tiempo, pero este tipo de imágenes y productos derivados no pueden explicar las condiciones que conducen esos cambios; por lo tanto, éstos tienen una utilidad muy limitada en la proyección futura de la cobertura terrestre / uso de la tierra. Con el fin de proyectar mejor la calidad y cantidad de agua superficial en Mesoamérica y el Caribe, se recomienda que se realice una serie de talleres nacionales en los que planificadores del uso del suelo, administradores de recursos naturales, demógrafos y sociólogos, ecologistas, geógrafos y profesionales de SIG, discutan las tendencias y condiciones que conducen el cambio de la cubierta de tierra histórica y actual. Posteriormente, diferentes escenarios de crecimiento de la población, uso de los recursos naturales, estrategias de conservación, y los conductores detrás de cada uno de estos, deben ser desarrollados por el grupo con el fin de construir una base de conocimientos sobre la cual mapas de futuras coberturas terrestres / uso de la tierra puedan ser creados. Una vez que proyecciones de cobertura terrestre estén creadas, estudios adicionales sobre la erosión y

la sedimentación en el futuro serían posibles, proporcionando una perspectiva mucho más comprensiva sobre la futura calidad de aguas superficiales. Además, estas proyecciones de cobertura de la tierra podrían utilizarse en los modelos climáticos de mesoescala para comprender los impactos del cambio de uso del suelo en el clima regional.

Mientras que las tasas actuales de deforestación y crecimiento de la población son amenazas contemporáneas a los recursos hídricos, según las proyecciones del clima, es probable que esta situación sea exacerbada por el cambio climático. En el caso de Centroamérica y el Caribe, condiciones generalmente más secas pueden acelerar la desertificación en curso y la degradación de la tierra, incluso cambiando los tipos de ecosistemas que componen la región. La respuesta más sencilla es reconsiderar los hábitos de consumo de agua a niveles agrícola, industrial y municipal. La comprensión de posibles regímenes futuros de precipitación y el clima más amplio permite una apreciación de las medidas y preparativos que se deben tomar, en vista del aumento de la presión sobre el recurso hídrico y escasez del mismo. A pesar de que el cambio climático se percibe como un fenómeno global, muchos tipos de estrategias de mitigación del cambio climático, como la reducción de la deforestación y la conservación de los recursos hídricos, nacen de nivel local y tienen impactos locales más inmediatos, de tal modo amortiguando cualquier impacto potencial causado por el cambio climático mundial.

AGRADECIMIENTOS

Esta evaluación regional sólo fue posible a través de las contribuciones de un número de profesionales e instituciones y se llevó a cabo como uno de los componentes del proyecto titulado "Fortalecimiento de las Capacidades Nacionales en Gestión de Desastres y Monitoreo del Medio Ambiente en Mesoamérica y la República Dominicana a través de la Aplicación del Sistema Regional de Visualización y Monitoreo (SERVIR)." Implementado por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe, esta evaluación regional fue financiada por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y supervisada por la Administración Aeronáutica y Espacial Nacional de EE.UU. (NASA). Además del personal de CATHALAC y NASA-MSFC que contribuyeron a este estudio, agradecemos adicionalmente a Daniel Irwin, Director del Proyecto SERVIR de la NASA por su constante aliento y entusiasmo, a Sundar Christopher, presidente del Departamento de Ciencias Atmosféricas de la UA Huntsville, por su visión en sistemas de ciencias de la tierra aplicados, y Tom Sever,

Profesor de la Universidad de Alabama en Huntsville por sus conversaciones inspiradoras e iluminadoras sobre las amenazas al agua. La ejecución de este proyecto comenzó en CATHALAC en Panamá, a continuación recibió el apoyo de la NASA-MSFC y se completó en el Centro Nacional de Tecnología y Ciencia Espacial de la UA Huntsville. Durante las fases iniciales en Panamá, varios talleres internacionales relacionados con el cambio climático y el agua se llevaron a cabo, y en particular se agradece a los estudiantes tan entusiasmados y curiosos con diversas perspectivas del taller "Modelación Espacial de las Fuentes No Puntuales de Contaminación y Erosión en el Caribe," realizado en febrero de 2008 y "Modelación de la contaminación por fuentes difusas y dinámica de sedimentos aplicando SIG" realizada en octubre del mismo año.

Este estudio no habría sido posible sin la riqueza de los conjuntos de datos ambientales de acceso público provenientes de una variedad de fuentes mencionadas anteriormente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcamo, J., van Vuuren, D., Cramer, W., 2005. Changes in Ecosystem Services and Their Drivers across the Scenarios. Chapter 9. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Scenarios, Volume 2. Editado por Steve R. Carpenter, et al. p. 300-367
- Anderson, E.R., Cherrington, E.A., Flores, A.I., Perez, J.B., Carrillo, R., and E. Sempris, 2008a. Potential Impacts of Climate Change on Biodiversity in Central America, Mexico and the Dominican Republic. CATHALAC / USAID. Ciudad de Panamá, Panamá. 94 pp.
- Anderson, E.R., Cherrington, E.A., Tremblay-Boyer, L., Flores, A.I., and E. Sempris, 2008b. "Identifying Critical Areas for Conservation using measures of Biodiversity and Climate Change in Central America, Mexico and the Dominican Republic." *Biodiversity* 9: 89-99.
- Arino, O., Gross, D., Ranera, F., Bourg, L., Leroy, M., Bicheron, P., Latham, J., Di Gregorio, A., Brockmann, C., Witt, R., Defourny, P., Vancutsem, C., Herold, M., Sambale, J., Achard, F., Durieux, L., Plummer, S., Weber, J-L., 2007. "GlobCover: ESA Service for Global Land Cover from MERIS." Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. 2412-2415.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., and J.P. Palutikof, Eds., 2008. "Climate Change and Water." Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Burke, L., and Z. Sugg, 2006. "Hydrologic Modeling of Watersheds Discharging Adjacent to the Mesoamerican Reef." WRI/ICRAN MAR/USAID. 40 p.
- Cannon, S.H., Gartner, J.E., Wilson, R.C., and J.L. Laber, 2008. "Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California." *Geomorphology* 96:250-269.
- Carter, J., 2006. "N-SPECT and ISAT: Visualizing the Relationships between Land Cover, Nonpoint-Source Pollution, and Erosion and Identifying Impervious Surface Areas." NOAA.
- CATHALAC-SIMEPAR. "Informe Final: Mapa Centroamericano de Cobertura y Uso de la Tierra Cambios de Cobertura y Uso de la Tierra 1980-1990-2000-2010" Implementación de la plataforma geográfica e hidrometeorológica integrada de la Región Centroamericana y sus aplicaciones prácticas. PREVDA/UGR/SER/14/08. En Preparación.
- Cherrington, E.A., Anderson, E.R., Flores, A.I., Hernandez, B., Clemente, A.H., Sempris, E., Picado, F., and D.E. Irwin, 2011. "Implications of Climate Change in Forest Structure and Carbon Storage in the Tropical Zones of Latin America and the Caribbean." Evaluación de Impacto Regional SERVIR. USAID / NASA / CATHALAC.
- CIAT, UNEP, CIESIN y el Banco Mundial, 2005. "Latin America and the Caribbean (LAC) Population Database." Version 3. Disponible desde <http://www.na.unep.net/datasets/datalist.php3> o <http://gisweb.ciat.cgiar.org/population/dataset.htm>
- CICH, 2011. "Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá." Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. Disponible en línea: <http://www.cich.org/publicaciones.htm>
- Fairman, J. G., Jr., Nair, U.S., Christopher, S.A. and T. Mölg, 2011. "Land use change impacts on regional climate over Kilimanjaro." *Journal of Geophysical Research* 116: D03110, 24pp.
- FAO, 1998. "Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties CD-ROM. FAO, Land and Water Digital Media Series Number1, ISBN 92-5-104050-8, Rome, Italia. Disponible en línea: <http://www.fao.org/ag/agl/agll/dsmw.stm>

- FAO and NRL, 2011. "AQUASTAT – FAO's Information System of Water and Agriculture." Disponible en línea: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, and A. Jarvis, 2005. "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas." *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- IPCC, 2000. IPCC Special Report Emissions Scenarios, Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change. 72pp.
- Jones, J.A. and G.E. Grant, 1996. "Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon." *Water Resources Research* 32: 959-974.
- Kaspar, F., 2003. "Model Development and Uncertainty Analysis of a Global Hydrological Model." University of Kassel, Kassel, PhD thesis.
- Lehner, B., Verdin, K., and Jarvis A., 2008. "New global hydrography derived from spaceborn elevation data." *Eos, Transactions, AGU*, 89: 93-94.
- NOAA, 2005. "Land Cover Analysis – C-CAP Classification Scheme." NOAA Coastal Services Center. Disponible en línea: http://www.csc.noaa.gov/crs/lca/tech_cls.html
- NOAA, 2004. N-SPECT Technical Guide. Coastal Services Center. Disponible en línea: http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast/tools/nspect/_pdf/N-SPECT_TechnicalGuide.pdf.
- ORNL, 2000. "LandScan 2000 Global Population Database." Oakridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. Disponible en línea: <http://www.ornl.gov/gist/>
- Nair, U.S., Welch, R.M., Lawton, R.O., and R.A. Pielke, Sr., 2000. "Impact of land use on Costa Rican tropical montane cloud forests: Sensitivity of cumulus cloud field characteristics to lowland deforestation." *Journal of Geophysical Research* 108: 4206-4218.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and D.C. Yoder, 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United State Department of Agriculture, Agriculture Handbook 703, United State Government Printing Office, Washington, D.C.
- SERVIR, 2009. "Inundaciones y Deslizamientos en El Salvador, Nov. 2009." USAID / NASA / CATHALAC / SERVIR. Disponible en línea: http://www.servir.net/disasters_el_salvador_nov-2009
- SERVIR, 2010. "Floods in Lake Managua or Xolotlan, Nicaragua, Oct. 2010." USAID / NASA / CATHALAC / SERVIR. Disponible en línea: http://www.servir.net/en/floods_in_lake_managua_or_xolotlan_nicaragua_oct_2010
- USDA-NRCS, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55 (TR-55). Second edition. Washington, D.C.
- World Bank, 2009. "Latin America and Caribbean – Climate Change Aspects in Agriculture." Disponible en línea: <http://go.worldbank.org/Q1YTC1WII0>

APÉNDICE A

Preparación de cálculo de entrada de la escorrentía y erosión

Asignación de CN (número de curva) y C (factores de cobertura), utilizando C-PAC y los grupos de suelos hidrológicos

Valor C-CAP	Clase C-CAP	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	C
2	Desarrollado de Alta Densidad	89	92	94	95	0.000
3	Desarrollado de Baja Densidad	61	75	83	87	0.030
4	Tierra Cultivada	67	78	85	89	0.240
5	Pradera	39	61	74	80	0.050
6	Bosque Caducifolio	30	55	70	77	0.009
7	Bosque Siempreverde	30	55	70	77	0.004
8	Bosque Mixto	30	55	70	77	0.007
9	Arbustos	30	48	65	73	0.014
10	Palustres Forestal Humedales	0	0	0	0	0.003
11	Palustres Arbusto Humedales	0	0	0	0	0.000
12	Palustres Emergente Humedales	0	0	0	0	0.000
13	Estuarinos Forestal Humedales	0	0	0	0	0.003
14	Estuarinos Arbusto Humedales	0	0	0	0	0.000
15	Estuarinos Emergente Humedales	0	0	0	0	0.000
16	No Consolidados en Tierra	0	0	0	0	0.500
17	Tierra Desnuda	77	86	91	94	0.700
18	Agua	0	0	0	0	0.000
19	Palustres Cama Acuática	0	0	0	0	0.000
20	Estuarinos Cama Acuática	0	0	0	0	0.000

Fuente: USDA-NRCS, 1986

APÉNDICE B

Código Fortran 95 utilizado para el cálculo de Q, A, relación A: Q y las estadísticas básicas por cuenca

Entradas requeridas en directorio "curve_inputs": LCClass.txt, landcover.asc, soils.asc, [precipitation_file].asc, k_factor.asc, ls_grid.asc, and basins.asc

```

character      a1*20,b*80,fname*80,KFile*80,LSFile*80,WatershedIDfile*80,LCFile*80,OutFile*80,comma*1
mma*1
real,allocatable :: Q(:,:),Rain(:,:),CN(:,:),K(:,:),LS(:,:),C(:,:),A(:,:)
real, allocatable:: AvgQ(:), MaxQ(:),AvgA(:),MaxA(:), AQRatio(:,:)
integer, allocatable:: Soil(:,:), LC(:,:),WSID(:,:),iWSSize(:)
integer, parameter :: k11=1,k22=2
real P, CN2, Ia, S
real*4 tarray(2),ttotal
logical FE

if(iargc().ne.2)then
    write(*,*)'2 Arguments needed. Provided ',iargc()
    write(*,*)'Syntax: CN_Grids_v2.exe PrecipFile LandCoverFile'
    stop
endif
call getarg(k11,fname)
call getarg(k22,LCFile)

!   fname='annual_prec.asc'
KFile='k_factor.asc'
LSFile='ls_grid.asc'
comma=', '
WatershedIDfile='basins.asc'
!   LCFile='landcover.asc'
OutFile=trim(fname(:len(trim(fname))-4))//'_ '//trim(LCFile(:len(trim(LCFile))-4))//'.asc'
inquire(file='curve_inputs\ '//trim(LCFile),exist=FE)
if(FE.eq. F)then
write(*,*)' '
    write(*,*)'Trouble opening landcover file'
    stop
endif

! Open LC Class file, read Curve numbers for each soil type
! Read the LC, soil and rain file
!
open(1,file='curve_inputs\LCClass.txt',status='old')
open(2,file='curve_inputs\ '//trim(LCFile),status='old')
open(3,file='curve_inputs\soils.asc',status='old')
open(4,file='curve_inputs\ '//trim(fname),status='old')
open(5,file='curve_inputs\Q_ '//trim(OutFile),status='unknown')
open(6,file='curve_inputs\ '//trim(KFile),status='old')
open(7,file='curve_inputs\ '//trim(LSFile),status='old')
open(9,file='curve_inputs\ '//trim(WatershedIDfile),status='old')
open(10,file='curve_inputs\WS_AvgMax_Q&A_ '//trim(OutFile(:len(trim(OutFile))-4))//'.
txt',status='unknown')
```

```

open(11,file='curve_inputs\A_'//trim(OutFile),status='unknown')
open(12,file='curve_inputs\A_Q_Ratio'//trim(OutFile),status='unknown')

read(1,*)a1
! allocate array memory
allocate(CN(100,4),C(100))

! read the data and assign to the CN matrix
do 1 i=1,1000
    read(1,*,end=1)ix1,iclass,ix2,CNA,CNB,CNC,CND,C1
    CN(iclass,1)=CNA*100
    CN(iclass,2)=CNB*100
    CN(iclass,3)=CNC*100
    CN(iclass,4)=CND*100
    C(iclass)=C1
1 continue

read(2,*)a1,ncols
read(2,*)a1,nrows
rewind(2)
allocate(Soil(nrows,ncols),LC(nrows,ncols),Q(nrows,ncols),Rain(nrows,ncols),AQRatio(nrows,nc
ols))
allocate(K(nrows,ncols),LS(nrows,ncols),A(nrows,ncols),WSID(nrows,ncols))
do i=1,6
    read(2,'(a80)')b
    write(5,'(a80)')b
    write(11,'(a80)')b
    write(12,'(a80)')b
    read(3,'(a80)')b
    read(4,'(a80)')b
    read(6,'(a80)')b
    read(7,'(a80)')b
    read(9,'(a80)')b
enddo

! For each grid cell, read the LC, soil and rainfall data
do irow=1,nrows
    read(2,*)(LC(irow,j),j=1,ncols)
    read(3,*)(Soil(irow,j),j=1,ncols)
    read(4,*)(Rain(irow,j),j=1,ncols)
    read(6,*)(K(irow,j),j=1,ncols)
    read(7,*)(LS(irow,j),j=1,ncols)
    read(9,*)(WSID(irow,j),j=1,ncols)
    do icol=i,ncols
        if(WSID(irow,icol).ge.0)WSID(irow,icol)=WSID(irow,icol)+1
    enddo
enddo
total1=dtime(tarray)

```

```

imaxID=0
do 2 i=1,nrows
do 2 j=1,ncols
    if(WSID(i,j).gt.imaxID)imaxID=WSID(i,j)
2    continue

allocate(AvgQ(imaxID), MaxQ(imaxID),AvgA(imaxID),MaxA(imaxID),iWSSize(imaxID))

! Calculate Q based on data for each pixel

do irow=1,nrows
!   write(*,*)irow

do icol=1,ncols
    CN2=0.
    C2=0.
    if(LC(irow,icol).gt.0.and.Soil(irow,icol).gt.0) then
        CN2=CN(LC(irow,icol),Soil(irow,icol))
        C2 = C(LC(irow,icol))
    endif
    P=Rain(irow,icol)
! calculate Q only for CN > 0, non water pixels
    if(CN2.gt.0) then
        S=(1000/CN2) - 10.
        Ia=0.2*S
        Q(irow,icol)=(P-Ia)**2/((P-Ia) + S)
! if the rainfall is less than initial abstraction, set Q to zero
        if((P-Ia).le.0) Q(irow,icol)=0.

! Compute the erosion
        A(irow,icol)=K(irow,icol)*C2*LS(irow,icol)*P

! Compute AQ ratio
        AQRatio(irow,icol)=A(irow,icol)/Q(irow,icol)
! attach the Q and A values to the avg and max stats
        if(Q(irow,icol).ge.0.and.A(irow,icol).ge.0)then
            AvgQ(WSID(irow,icol))= AvgQ(WSID(irow,icol))+Q(irow,icol)
            if(Q(irow,icol).gt.MaxQ(WSID(irow,icol)))MaxQ(WSID(irow,icol))=Q(irow,i
col)

            AvgA(WSID(irow,icol))= AvgA(WSID(irow,icol))+A(irow,icol)
            if(A(irow,icol).gt.MaxA(WSID(irow,icol)))MaxA(WSID(irow,icol))=A(irow,i
col)

            iWSSize(WSID(irow,icol))=iWSSize(WSID(irow,icol))+1
        endif

! endif for CN>0
    endif

! enddo for icol loop
enddo

```

```

! write the Q data out to ascii file
write(5, '(10000(f7.3,1x))') (Q(irow,icol),icol=1,ncols)
write(11, '(10000(f7.3,1x))') (A(irow,icol),icol=1,ncols)
write(12, '(10000(f7.3,1x))') (AQRatio(irow,icol),icol=1,ncols)

! enddo for irow loop
enddo

write(10,*) 'WatershedID, AverageQ, MaxQ, AverageA, MaxA'
do i=1,iMaxID
    if(iWSSize(i).gt.0) then
        AvgQ(i)=AvgQ(i)/iWSSize(i)
        AvgA(i)=AvgA(i)/iWSSize(i)
        write(10, '(i7.7, a1, f12.2, a1, f12.2, a1, f12.2, a1, f12.2)')
i,comma,AvgQ(i),comma,MaxQ(i),&
        comma,AvgA(i),comma,MaxA(i)
    endif
enddo

ttotal = etime(tarray)
write(*,'(a19,f5.2,a4)') 'Total time spent = ',ttotal,' sec'
write(*,*) ' of which ',total1,' seconds spent on I/O'
end

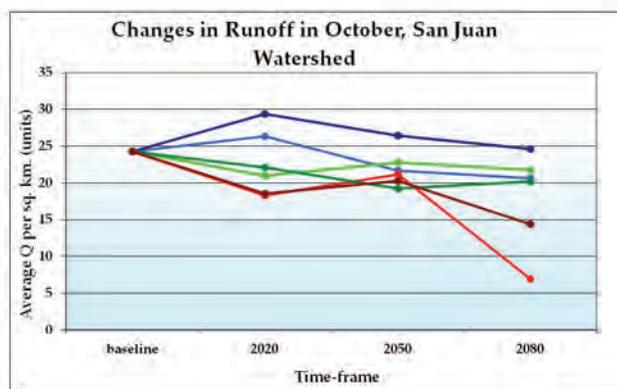
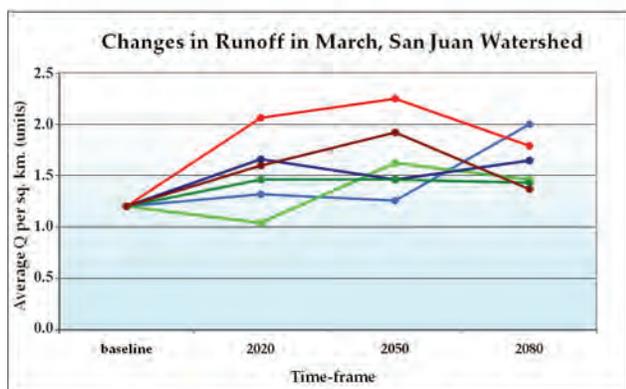
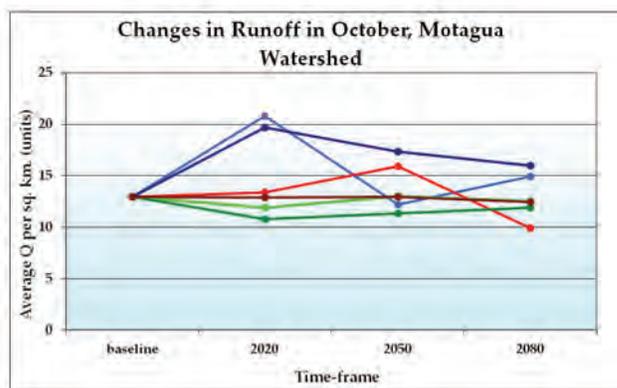
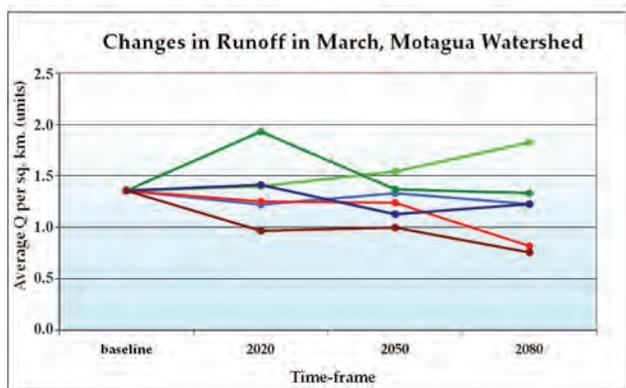
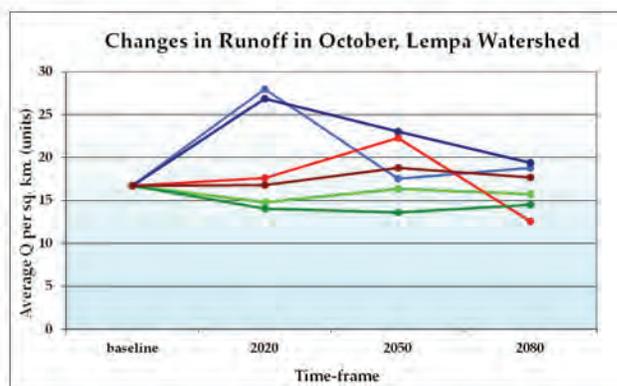
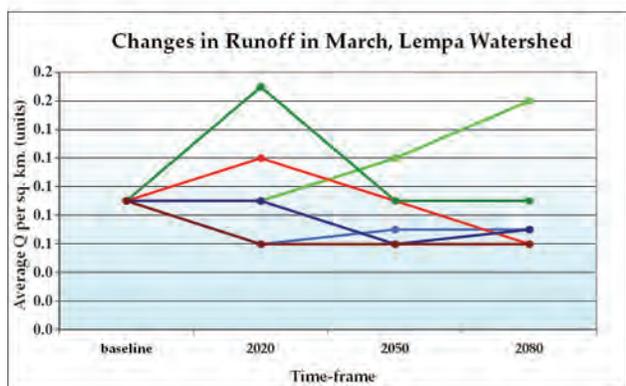
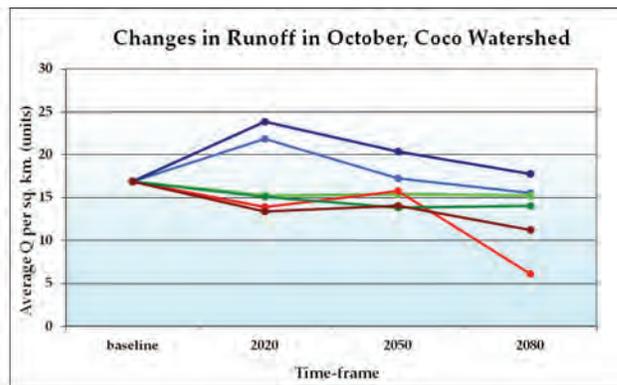
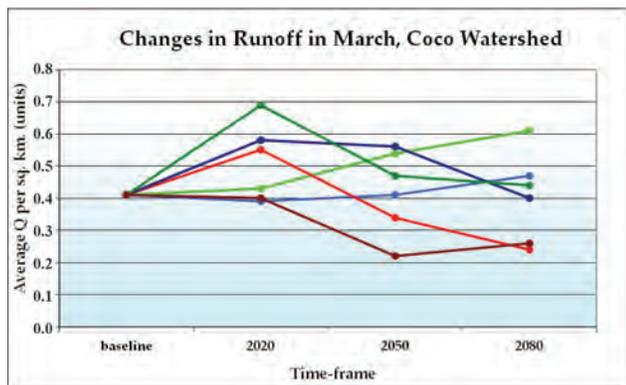
```

APÉNDICE C

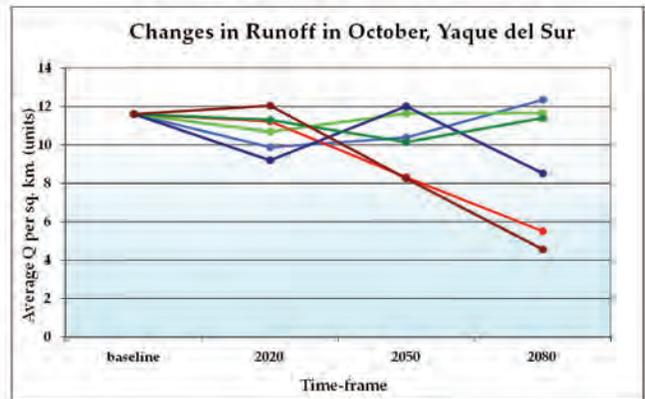
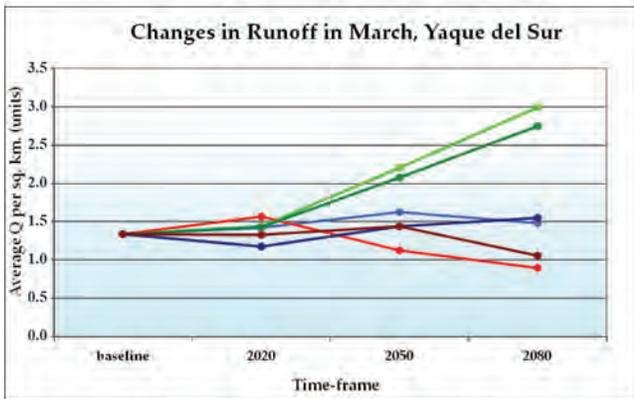
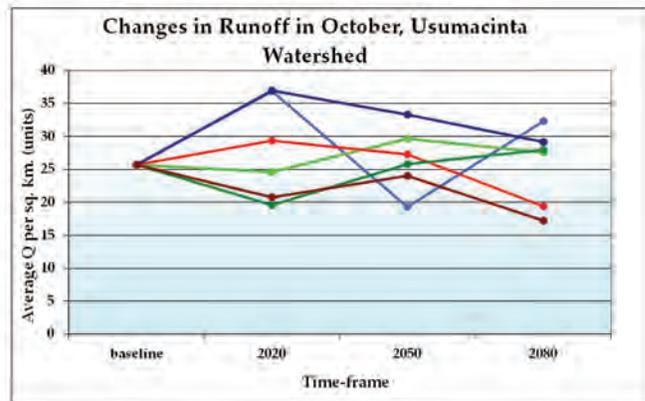
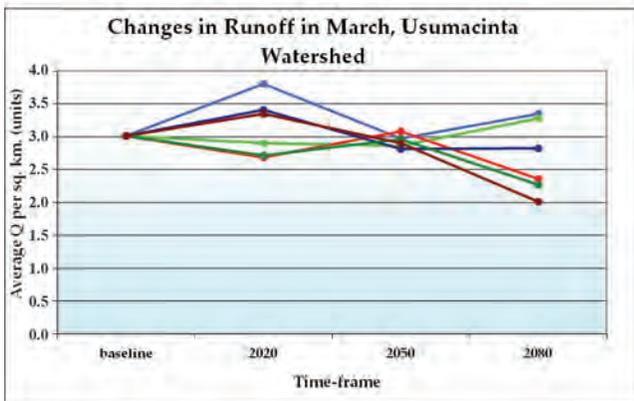
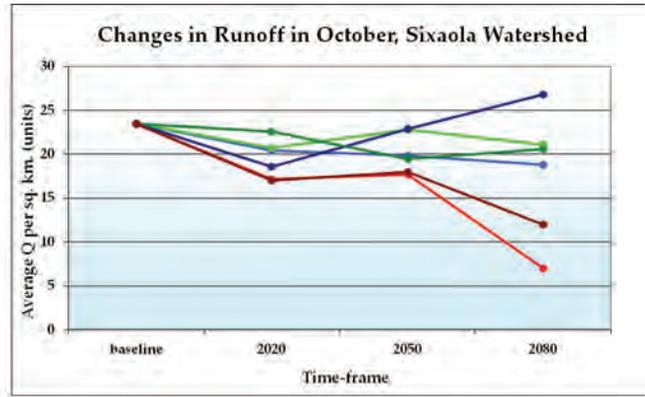
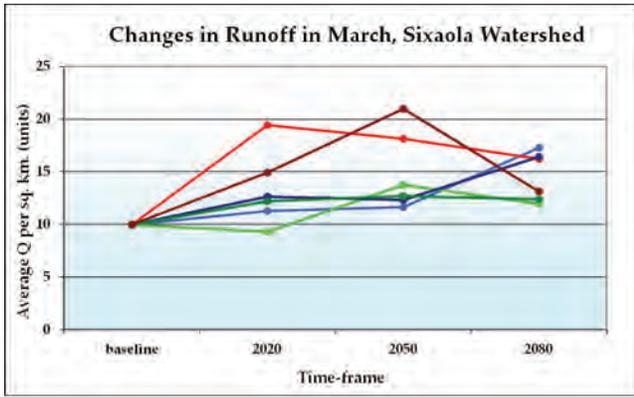
Cuencas prioritarias seleccionadas

HydroSHEDS Cuenca ID	Nombre	Países	Area	Volumen basal precipitación/año
46660	Usumacinta	Guatemala, Mexico, Belize	123,566 km ²	356 km³/año
49783	Yaqué del Sur	República Dominicana	5,201 km ²	6.53 km³/año
59101	Motagua	Guatemala, Honduras	16,372 km ²	39.5 km³/año
60156	Coco	Honduras, Nicaragua	24,563 km ²	61.9 km³/año
61541	Lempa	El Salvador, Honduras, Guatemala	18,042 km ²	52.5 km³/año
63729	San Juan	Nicaragua, Costa Rica	41,228 km ²	117 km³/año
65048	Sixaola	Costa Rica, Panamá	2,845 km ²	8.36 km³/año

APÉNDICE D



- CGCM3T47, B2 CSIRO Mk3, B2 HadCM3, B2
- CGCM3T47, A2 CSIRO Mk3, A2 HadCM3, A2



- CGCM3T47, B2
- CGCM3T47, A2
- CSIRO Mk3, B2
- CSIROMk3, A2
- HadCM3, B2
- HadCM3, A2

APÉNDICE E

Anomalías de precipitación mensual de acuerdo a los modelos considerados en este estudio (reproducido de Anderson et al. 2008a).

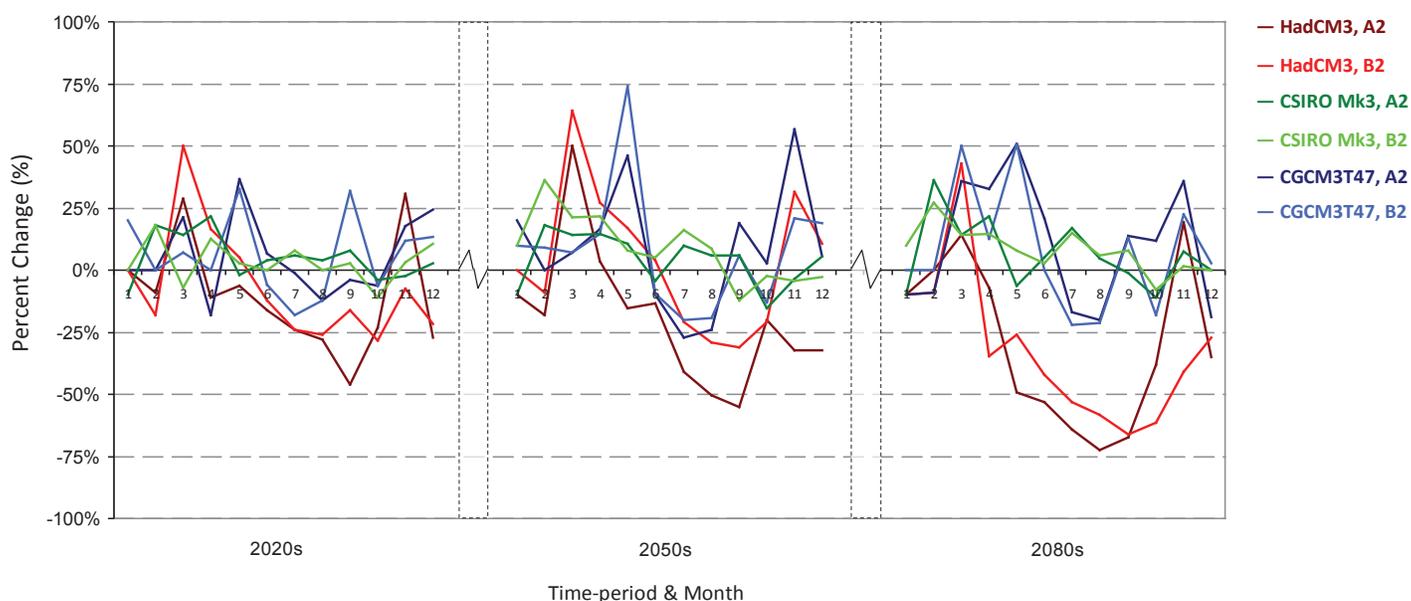
A fin de presentar la amplia gama de proyecciones de precipitación, para las ciudades capitales las anomalías de precipitación se presentan basadas en los datos proporcionados por WorldClim (Hijmans et al. 2005). Estos gráficos muestran las similitudes y diferencias entre los distintos escenarios de cambio climático y modelos climáticos globales para un punto particular en cada país del CAFTA-DR.

Cabe señalar que, dado los escenarios de emisiones suministrados por el IPCC, la temperatura proyectada es casi siempre menor en el escenario B2 que en el escenario A2. En términos de temperatura, no hay gran variación o desacuerdo entre los modelos, pero la precipitación es mucho más difícil de mode-

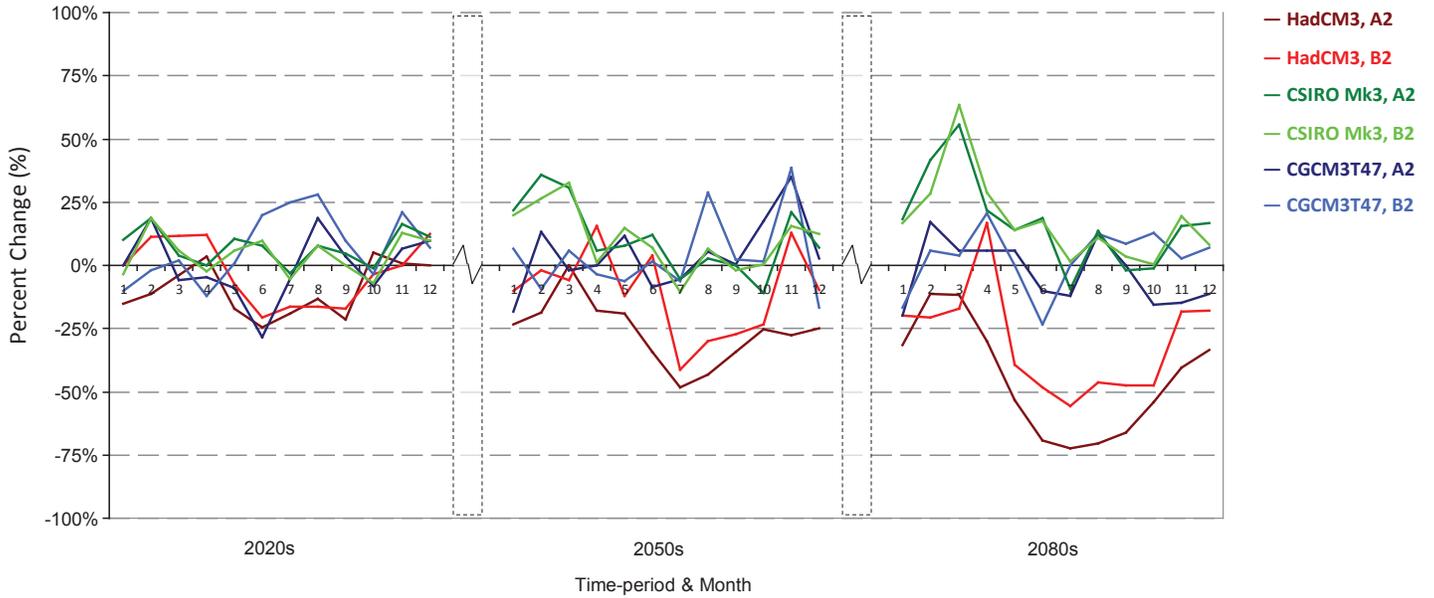
lar que la temperatura. Los diferentes modelos comienzan a desviarse de cada uno más en el futuro. Las proyecciones de precipitación varían ampliamente, tanto en la próxima década como en las proyecciones más lejanas en el tiempo. Si bien una tendencia general evidente en los análisis de Mesoamérica realizados aquí es la proyección de temporadas de lluvias más secas, no hay suficientes puntos de muestreo en el Caribe para hacer una generalización de este tipo.

Las seis líneas representan corridas del escenario A2 y B2 del Modelo Acoplado del Centro Hadley del Reino Unido, versión 3 (HADCM3), el Modelo Climático Global Acoplado (CGCM3T47) del Centro Canadiense de Modelado y Análisis del Clima, y el modelo acoplado de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad de Australia (CSIRO Mk3).

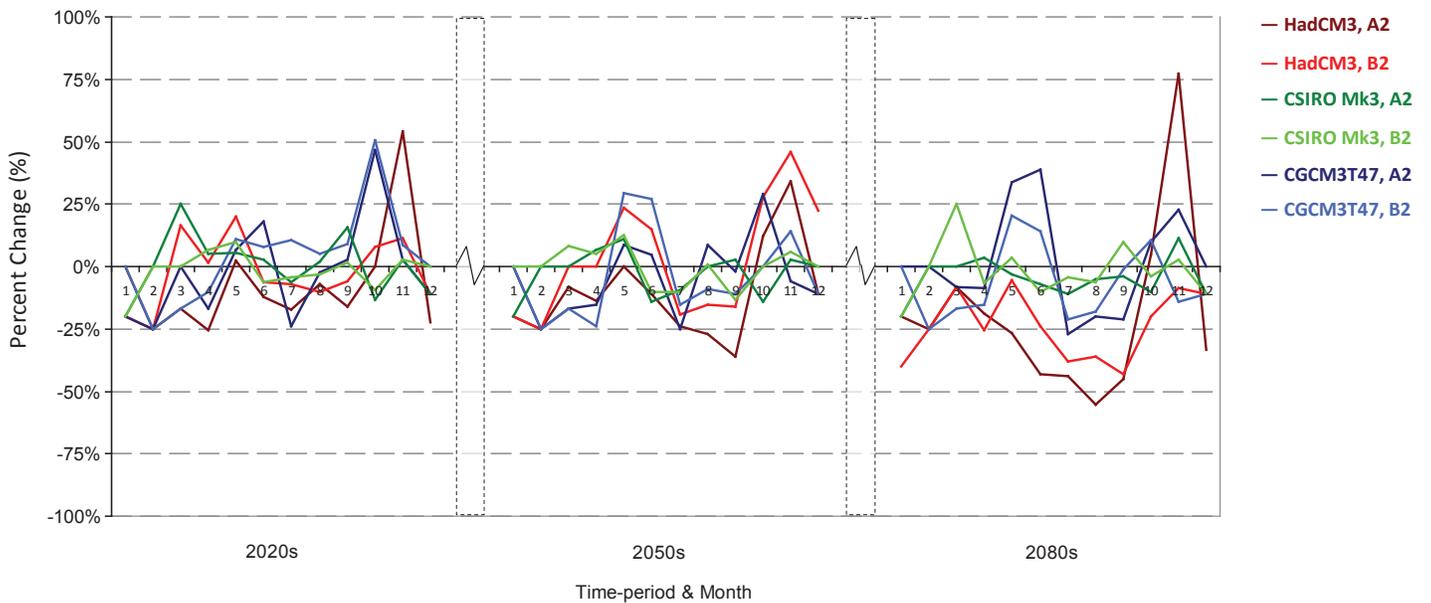
Precipitation Anomalies in San Jose, Costa Rica



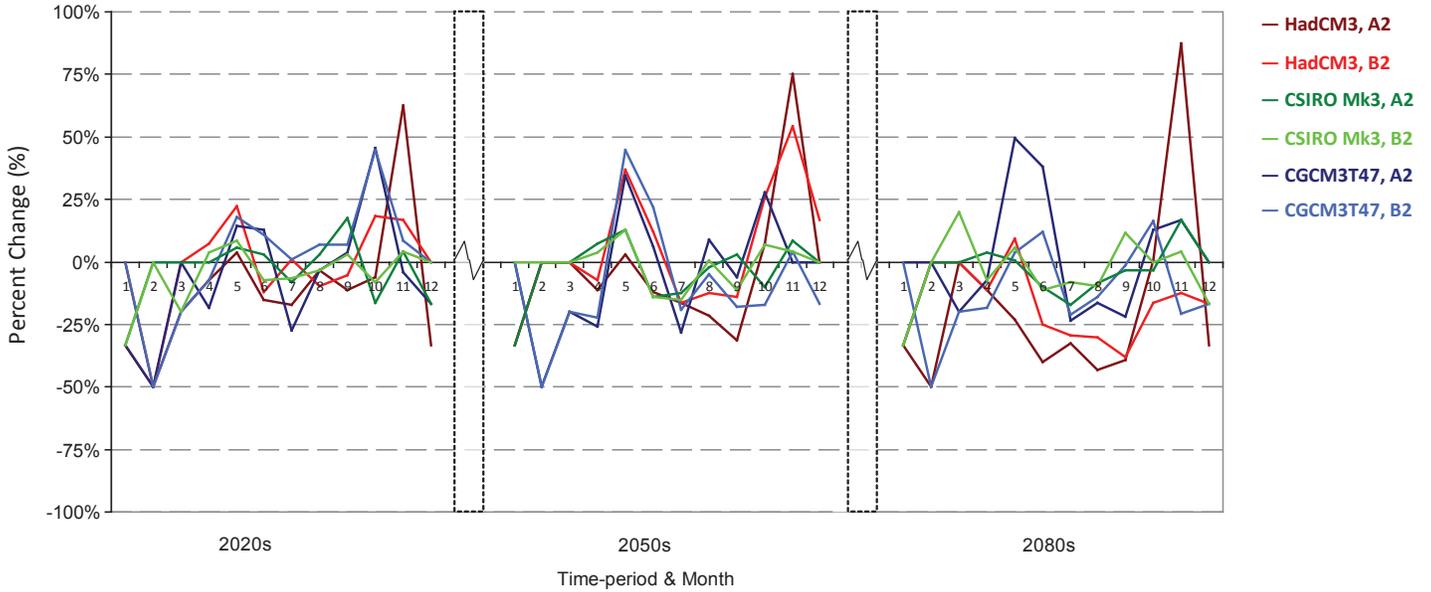
Precipitation Anomalies in Santo Domingo, Dominican Republic



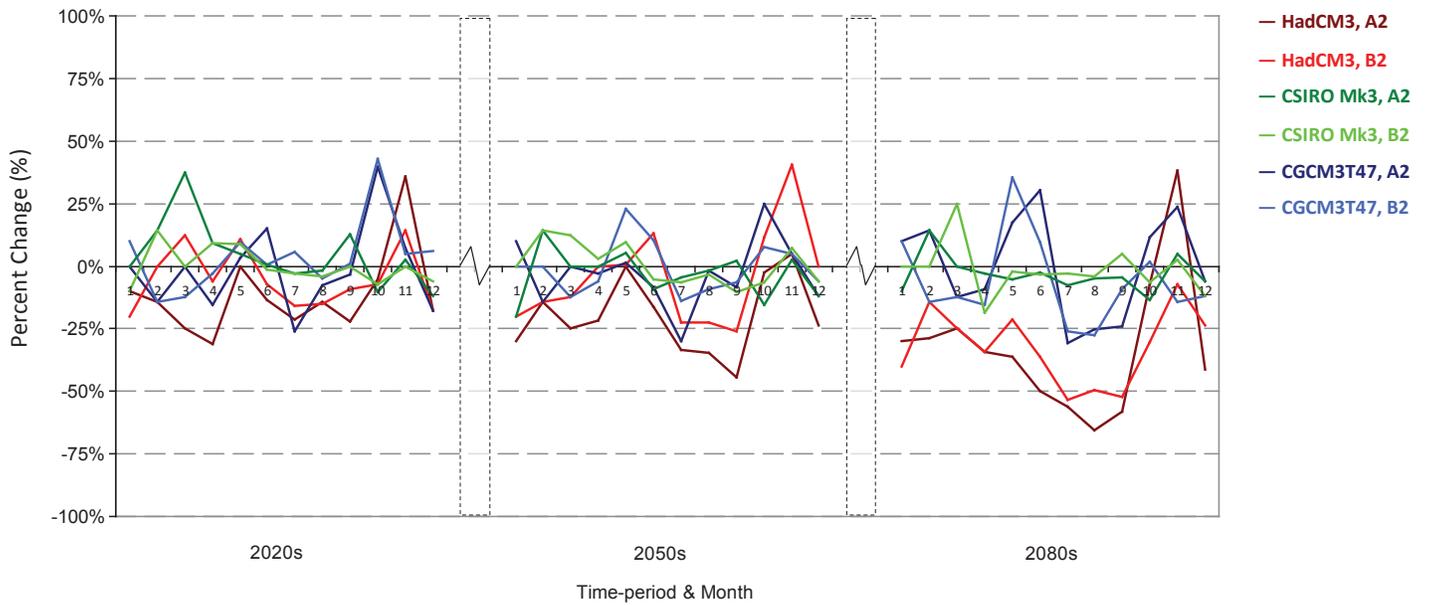
Precipitation Anomalies in San Salvador, El Salvador



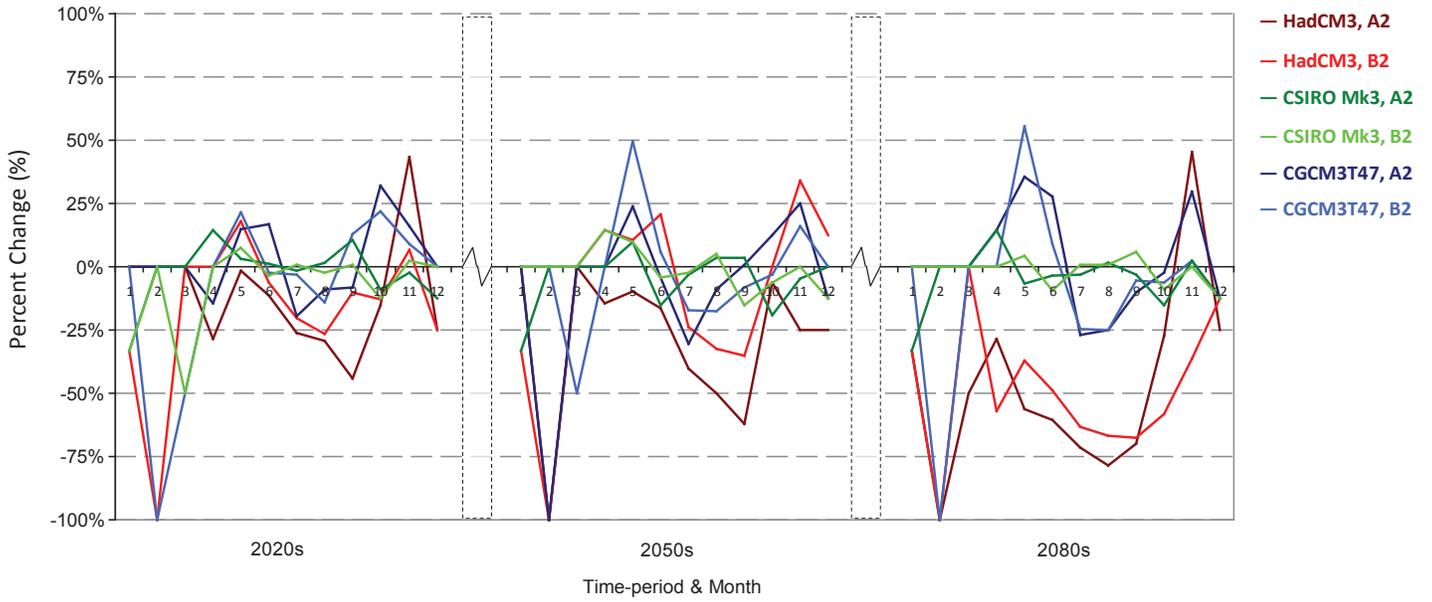
Precipitation Anomalies in Guatemala City, Guatemala



Precipitation Anomalies in Tegucigalpa, Honduras



Precipitation Anomalies in Managua, Nicaragua



Reproducido de Anderson et al. 2008a



CATHALAC
111 City of Knowledge
Clayton, Panama
Tel: +507-317-3200
Fax: +507-317-3299
servir@cathalac.org
www.cathalac.org