

# LOS IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE AMÉRICA CENTRAL Y EL CARIBE



Una perspectiva regional



**CATHALAC**

Centro del Agua del Trópico Húmedo  
para América Latina y el Caribe



Este trabajo se llevó a cabo con la ayuda de una subvención del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC, Canadá). Las opiniones expresadas en esta publicación no reflejan necesariamente los puntos de vista del IDRC ni de su Consejo de Gobernadores.

Esta publicación puede ser reproducida en su totalidad o en parte y en cualquier forma para fines educativos o sin fines de lucro sin permiso especial del titular de los derechos de autor, siempre que se cite la fuente.

CATHALAC agradecería recibir una copia de cualquier publicación que utilice esta publicación como fuente. Ningún uso de esta publicación puede ser para su venta o para cualquier otro propósito comercial.

Copyright (derechos de autor) © 2015, CATHALAC e IDRC.

ISBN: 978-9962-674-04-7.

Citación:

Pérez, J., Cherrington, E. y Hernández, B. 2015. Los Impactos Potenciales del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de América Central y el Caribe. Proyecto Seguridad Hídrica y Cambio Climático en la Región de América Central y el Caribe (2012-2015). Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo de Canadá (IDRC) y Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC). Ciudad de Panamá, Panamá. 46 p.

Para más información:

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC).

111 Ciudad del Saber, Clayton Ciudad de Panamá, Panamá.

Tel: +507-317-3200.

Fax: +507-317-3299.

[www.cathalac.org](http://www.cathalac.org).

Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC).

[www.idrc.ca](http://www.idrc.ca).

Diseño y diagramación por Luis Armando Melillo.

Impreso por Monocolor Soluciones Gráficas.

# LOS IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

DE AMÉRICA CENTRAL Y EL CARIBE



Una perspectiva regional



## Sobre el contenido del documento

La información y resultados presentados en este documento se lograron a través del proyecto [Seguridad Hídrica y Cambio Climático en la Región de América Central y el Caribe](#) (2012-2015), implementado por CATHALAC con el apoyo financiero del Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IDRC, en inglés) de Canadá, en asociación conjunta con entidades nacionales clave para el cumplimiento de los objetivos.

## Créditos

Esta investigación se realizó gracias al apoyo del proyecto [Seguridad Hídrica y Cambio Climático en la Región de América Central y el Caribe](#) (2012-2015), implementado por CATHALAC con el apoyo financiero del Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IDRC, en inglés) de Canadá.

La ejecución de esta investigación, estuvo a cargo de Emil Cherrington y Betzy Hernández. La revisión fue realizada por Joel Pérez Fernández. Se reconocen los aportes de Freddy Picado, Matias Carrera, Marcelo Oyuela, Luis del Castillo, Miroslava Moran y Leyre Escalante.

Diseño: Daniel Durán y Luis Melillo, CATHALAC.

# Contenido

Resumen ejecutivo .....	7
1. Introducción .....	9
1.1. Antecedentes y generación de escenarios.....	9
Escenarios de Emisiones de CO2: .....	11
1.2. Perfil climático de la región de Mesoamérica y el Caribe.....	13
1.3. El cambio climático sobre los recursos hídricos en Mesoamérica y el Caribe .....	14
2. Objetivo del estudio .....	16
3. Datos y metodología utilizada.....	17
3.1 Datos utilizados.....	17
Datos de modelos de clima:.....	18
3.2 Metodología.....	19
Escorrentía y erosión del suelo: .....	22
Sedimentos:.....	23
4. Análisis de resultados .....	24
4.1. Cambios en la precipitación .....	24
4.1.1. Escenarios del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones.....	24
4.1.2. Escenarios de las trayectorias de concentración representativas .....	26
4.1.3. Comparaciones entre resultados de los escenarios del reporte especial de escenarios de emisiones vs. las trayectorias de concentración representativas .....	27
4.2. Cambio de uso del suelo .....	32
4.3. Cuencas hidrográficas susceptibles por cambios en la cantidad de precipitación .....	36
4.3. Resultados sobre la escorrentía y sedimentos .....	37
5. Conclusiones .....	41
6. Bibliografía.....	43

Río Yake del Sur, Rep. Dominicana



# Resumen ejecutivo

Como parte del proyecto Seguridad Hídrica y Cambio Climático en la Región de América Central y el Caribe se identificaron las vulnerabilidades presentes y futuras de la oferta del sector hídrico frente al cambio climático; para lo cual se evaluaron los impactos de cambio climático en la disponibilidad del agua superficial de las cuencas hidrográficas, con base en diferentes escenarios de crecimiento poblacional y cambios de uso del suelo y sobre todo, considerando el comportamiento de la vulnerabilidad de los recursos hídricos y las poblaciones humanas en la región de estudio.

Este documento muestra algunos de los resultados encontrados para la región, enfocándose en 1) cómo los patrones de lluvia van a cambiar según los diferentes escenarios de cambio climático, 2) identificar los cambios en los patrones de escorrentía superficial de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático, a nivel superficial, a través de la modelación hidrológica y la modelación espacial, 3) evaluar el cambio de comportamiento de la escorrentía como un componente del balance hídrico, a través de la modelación hidrológica y la modelación espacial, así como 4) identificar condiciones actuales y cambios en el proceso de erosión del suelo de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático, utilizando la modelación hidrológica y la modelación espacial.

El desarrollo del estudio implicó la modelación hidrológica en combinación con resultados de escenarios de cambio climático adecuados a la subregión de estudio. Específicamente, se evaluó cómo los futuros cambios en los patrones de lluvia podrían afectar la escorrentía y la erosión (sedimentación) del suelo. La escorrentía está determinada por la tasa de infiltración y depende básicamente de factores climáticos, geológicos e hidrológicos, esta es considerada como el principal factor en el proceso de erosión de los suelos por factores hídricos y que suelen impactar las economías locales y regionales del área de estudio. Para el caso de la sedimentación, el trabajo la considera como una de las principales causas de contaminación de los ríos, así también, de deterioro de ecosistemas acuáticos, y uno de los principales factores que favorecen las inundaciones.

La evaluación utilizó la herramienta N-SPECT para hacer la modelación de escorrentía y erosión actual y futura basándose en aspectos como la cobertura del suelo, elevación, precipitación y tipos de suelo. N-SPECT es desarrollado por la Administración Nacional de los Océanos y Atmósfera, NOAA, de los Estados Unidos para su uso en un ambiente de ArcGIS. La unidad de análisis del estudio fue al nivel de las cuencas hidrográficas superficiales.

El estudio considera la información de escenarios climáticos futuros del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), con el fin de proporcionar alternativas sobre lo que podría acontecer en un futuro cercano para sitios de interés o de estudio, siempre y cuando se continúe con las mismas prácticas en ámbitos demográficos, sociales, económicos y tecnológicos. Así, la información sobre los escenarios climáticos utilizada es parte tanto del Cuarto Informe de Evaluación (4AR, por sus siglas en inglés) como del Quinto Informe de Evaluación (5AR, por sus siglas en Inglés) del PICC. Para el caso del 4AR, se usaron los resultados del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES), tomando en cuenta periodos promedio de tiempo 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, refiriéndose a la climatología del 2020, 2050 y 2080, respectivamente. La información fue analizada en términos de escenarios de emisiones A2 (emisiones altas) y B2 (emisiones medias), más la línea base datada al 2010. Las salidas de datos utilizados fueron generadas a partir de Modelos Climáticos Globales (GCM por sus siglas en inglés) como el CGCM3T47 (referido como CCCMA), CSIRO Mk3 y HadCM3 de Centros Climáticos de Canadá, Australia e Inglaterra, respectivamente.

Los resultados de escenarios climáticos futuros utilizados del 5AR son de los llamados “Vías de Concentración Representativas” (RCP, por sus siglas en inglés) a valores de forzamiento radiativo de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m<sup>2</sup> de 6 modelos globales (CNRM-CM5 de Francia, GISS-E2-R de los Estados Unidos, HadGEM2-ES del Reino Unido, MIROC5 de Japón, MRI-CGCM3 de Japón, y NorESM1-M de Noruega). Los horizontes de tiempo contemplados para los RCP son 2050 y 2070. En todos los casos el procesamiento de datos incluyó una reducción de escala a 1 Km de resolución espacial (horizontal) para el ajuste de los datos climáticos anuales respecto a los datos de cobertura de la tierra y la topografía. También se destaca que este estudio permitió una comparación de resultados sobre los patrones anuales de precipitación en América Central y el Caribe de información de escenarios de RCP y SRES, respecti-

vamente, donde de acuerdo al PICC los escenarios RCP – en comparación con los escenarios SRES – contemplan políticas de mitigación, implicando muy preliminarmente para esta investigación que los escenarios RCP permiten observar un rango más amplio de potenciales impactos de cambio climático.

Bajo el escenario SRES B2, los resultados de CGCM3T47 y CSIRO Mk3 muestran una mayor coherencia en los resultados indicando el porcentaje (%) de cambios centrados alrededor de 0% y mayormente negativos para cualquier horizonte de tiempo de análisis. Sin embargo, el HadCM3, si bien muestra coherencia en los porcentaje de cambios hacia el 2020 y 2050, sus valores son mayormente tendencias negativas y con magnitudes considerablemente notorias; se destaca que el porcentaje de cambio en la precipitación anual media sobre la vertiente hacia el Pacífico muestra mayores valores positivos. Para el caso del escenario SRES A2, los resultados de CGCM3T47 y CSIRO Mk3 muestran una mayor coherencia en los resultados indicando porcentaje de cambios centrados alrededor del 0% y dentro del rango de entre -5% y 5% para cualquier horizonte de tiempo. No obstante, los porcentajes de cambios presentados por HadCM3 difieren con la tendencia del resto de los resultados, al presentar valores negativos e incluso notoriamente extremos para cualquier horizonte de tiempo. La vertiente hacia el Pacífico que presenta un porcentaje de cambio más amplio (negativo) en la precipitación anual.

Lo anterior, guarda coherencia con estudios que indican que para la región del Caribe, los valores de cambio en la precipitación tanto anuales como interanuales utilizando el HadCM3, tienden a ser tanto subestimados, como sobreestimados, argumentando así la poca habilidad del GCM para representar adecuadamente los mecanismos dinámicos de la atmósfera que ayudan a establecer el perfil climático regional.

Por otra parte, como un insumo adicional al análisis regional se consideró el cambio de uso del suelo en América Central y el Caribe, donde de acuerdo a un análisis tendencial de la cobertura vegetal, la deforestación entre el 2010 y el 2050 generará una pérdida de hasta un 43% de los bosques actuales. Además, entre el 2010 y hacia el 2070 podrá ocurrir una pérdida equivalente al 55% de los bosques actuales en toda la región de análisis. Se destaca que los cambios de cobertura del suelo podrán ocurrir principalmente por políticas o prácticas no planificadas que lleven a una sustitución de áreas boscosas por un aumento de áreas cultivadas y áreas de pastoreo.

Partiendo tan solo de los escenarios construidos a través del uso de los RCP's, en materia de escorrentía y sedi-

mentación hacia el 2050, al presentar disminuciones en el porcentaje de la precipitación anual –aunque con valores cercanos a la media histórica– y manteniendo un valor constante en la cobertura boscosa, es posible tener valores relativamente menores de escorrentía, significando muy probablemente cambios en el balance hídrico, indicativos de afectación en la disponibilidad de agua para consumo, afectando la vulnerabilidad de los sectores de desarrollo que dependen en gran medida del valor del recurso hídrico. Por el contrario, bajo un escenario agravado hacia el 2070, con aumentos en la precipitación anual en un 10% y una reducción sustancial de la cobertura boscosa, los resultados arrojados serían de una escorrentía aún más incrementada permitiendo inferir que, si bien podría indicarnos una mayor disponibilidad de agua para consumo, también podría relacionarse con mayores afectaciones por deslizamientos, deslaves y aumento en los caudales que facilitarían la erosión. Lo anterior, contrarresta con los altos valores de sedimentación estimados en la desembocadura de las cuencas analizadas en el área de estudio.

Con respecto al tipo de suelo en la región de estudio y de acuerdo a su tipo hidrológico, aproximadamente el 85% del área posee un potencial de escorrentía entre elevado y medio, y potencial de infiltración muy lento a lento en condiciones de humedad del suelo. Esto implica que cuando un bosque esta sobre un suelo con poca infiltración, el potencial para escorrentía es alto comparado con bosques sobre suelos con alta o moderada infiltración donde a pesar de estar cubiertos con bosque, el escurrimiento potencial del área es alto, y aún más alto el potencial de escurrimiento si se trata de áreas cultivadas. Por ello, se considera que los suelos en América Central y el Caribe son susceptibles para la sostenibilidad del agua subterránea, por su escasa capacidad de infiltración y su alto potencial de escurrimiento, así también su alto potencial de producción de sedimentos por erosión. Tanto el tipo de suelo como la pendiente no tienen mayores variaciones en el tiempo, sin embargo los factores que se consideran que van a variar de manera significativa en el futuro son la cobertura del suelo, y la precipitación.

Dado que el análisis hidrológico depende en gran medida de múltiples factores donde su relación con la información climática histórica, así como de los resultados generados por modelos climáticos globales resulta fundamentales para la reducción de la incertidumbre en la información generada, Los futuros trabajos sobre esta temática deberían considerar ampliar el conocimiento en términos de la habilidad de los modelos a utilizar con respecto a la representación de la climatología histórica, así como poder analizar la variabilidad interanual del clima, particularmente sobre las cuencas que drenan hacia el Caribe y el Pacífico a fin de conocer su régimen de lluvias durante periodos de estiaje o sequías relativas y periodos de lluvias máximas.



# 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes y generación de escenarios

Se entiende por clima el comportamiento medio observado a través de los años, de las variables meteorológicas que describen el estado del tiempo (IPCC, 1995). Cuando ese comportamiento cambia de manera permanente, se dice que ha ocurrido un cambio climático. El clima regula las actividades agropecuarias, la oferta hídrica, la cobertura vegetal, el hábitat de especies animales y vegetales, los hábitos de las personas, y en casos de cambio extremo, incrementa la vulnerabilidad por el aumento de sequías, inundaciones, incendios forestales, tormentas, heladas, y otros tantos relacionados con el estado del tiempo (Magaña, et al. 2004).

Conocer los probables efectos que el cambio climático puede tener a futuro sobre una región o una zona reviste gran importancia para la planeación de inversión de recursos en aquellos aspectos que tienen mayor vulnerabilidad al cambio y para la definición de planes de mitigación del riesgo y de las consecuencias que pueda traer consigo los cambios en el clima. El primer paso para este conocimiento de efectos de cambio del clima sobre un área determinada es la generación de escenarios de cambio climático regionales y locales, los cuales parten de información altamente elaborada a partir de modelos globales del clima. Los datos que un modelamiento del clima futuro ofrece, son el insumo principal para determinar vulnerabilidades en el recurso hídrico, en la salud, en la agricultura, en la infraestructura, entre otros (Torres, 2010).

Un escenario climático es una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos.

Las proyecciones climáticas sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (IPCC, 2001).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

(IPCC) define el cambio climático como una variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un periodo prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo). El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo, a cambios duraderos en la composición de la atmósfera o modificaciones en el uso del suelo, resultado de las actividades humanas.

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como el “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMNUCC hace pues una distinción entre “cambio climático”, atribuible a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera, y “variabilidad del clima”, atribuible a causas naturales (IPCC, 2013).

Las proyecciones del IPCC y otros grupos de científicos dedicados al análisis de los impactos del cambio climático sugieren que aun con aumentos pequeños de la temperatura, el cambio climático podría traducirse en impactos negativos serios sobre diversos sectores, principalmente aquellos relacionados con el recurso agua. Los escenarios de cambio climático son “una descripción coherente, internamente consistente y plausible de un posible estado futuro del mundo”. No son pronósticos, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro. Una proyección puede servir como material

fuerza para un escenario, pero los escenarios en general requieren de información adicional; por ejemplo, condiciones de emisiones de gases de efecto invernadero o de un escenario base. Un conjunto de escenarios se adopta para reflejar, de la mejor manera posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones (Magaña, 2004).

Los escenarios socioeconómicos pueden ser contruados como lo ha hecho el IPCC en el Informe Especial de Escenarios de Emisiones (Special Report on Emissions Scenarios o SRES). Estos escenarios se realizaron para explorar el desarrollo futuro del medio ambiente global, con especial énfasis en la producción de gases de efecto invernadero (PNUMA, 2012). La emisión de estos gases a la atmósfera depende en gran medida del nivel de desarrollo de los países a futuro, de su población y del uso de hidrocarburos como fuente principal de abastecimiento de energía.

Para poder hablar de escenarios, primero se debe conocer la terminología:

- ▶ **Línea evolutiva (Storyline):** descripción narrativa de un escenario (o familia de escenarios) que resalta sus principales características, las relaciones entre las fuerzas determinantes fundamentales y la dinámica de su evolución.
- ▶ **Escenario:** proyecciones de un futuro potencial, con base en una lógica clara y una línea evolutiva cuantificada.
- ▶ **Familia de escenarios:** escenarios que tienen una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas y de cambio tecnológico.

La serie de escenarios del SRES consta de cuatro familias: A1, A2, B1 y B2.

En el Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones se elaboraron cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2), donde se describen las fuerzas determinantes en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles (2), así como su evolución (1), gases cuya presencia en la atmósfera contribuye al efecto invernadero. El efecto invernadero tiene que ver con la capacidad de la atmósfera terrestre para retener las radiaciones emitidas por el Sol y ocurre en todos los planetas que tienen atmósfera.

Las cuatro familias de escenarios se muestran, de manera muy simplista, como ramas de un árbol bidimensional. En realidad, estas cuatro familias de escenarios comparten un

espacio dimensional mucho más amplio, dadas las numerosas suposiciones necesarias para definir cada escenario dentro de cada modelo. El diagrama esquemático ilustra las principales fuerzas motoras que rigen las emisiones de gases de efecto invernadero. Cada familia de escenarios se basa en especificaciones comunes de estas fuerzas motoras (Nakicenovic, 2003).

En términos simples, las cuatro líneas evolutivas combinan dos series de tendencias divergentes: una serie desarrolla las variaciones entre valores económicos y ambientales; la otra serie explora las variaciones entre mayor globalización y regionalización.

Estas líneas evolutivas pueden resumirse de la siguiente forma:

- ▶ **Línea evolutiva y familia de escenarios A1:** presenta un mundo futuro con crecimiento económico muy rápido; la población mundial llega a su punto máximo a mediados del siglo y decrece desde entonces. Se asume una rápida introducción de tecnología nueva y más eficiente.
- ▶ **Línea evolutiva y familia de escenarios A2:** supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el crecimiento económico orientado regionalmente; éste es más lento y fragmentado que en las otras líneas evolutivas. La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- ▶ **Línea evolutiva y familia de escenarios B1:** muestra un mundo convergente con los mismos patrones de población que la familia A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información. Esto supone una reducción en la intensidad del uso de materiales y la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso de recursos.
- ▶ **Línea evolutiva y familia de escenarios B2:** plantea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental. Asume una población en continuo creci-

miento (menor al de la familia A2) y un nivel de desarrollo económico intermedio. A partir de estas líneas evolutivas se desarrollaron cuarenta escenarios que caben dentro de cada una de las cuatro familias. Es importante recalcar que todos los escenarios se consideran como válidos y no tienen asignada una probabilidad de ocurrencia. La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional (IPCC, 2000).

De las cuatro familias se tomaron seis grupos de escenarios: uno para cada una de las familias A2, B1 y B2, y tres para la familia A1. Estos últimos caracterizan los desarrollos alternativos de tecnologías energéticas: A1F1 (uso intensivo de recursos fósiles), A1T (uso predominante de recursos alternativos a los fósiles) y A1B (asume un balance de las fuentes energéticas).

Se puede decir, en resumen, que **los escenarios del SRES consideran diferentes condiciones del desarrollo global para los próximos cien años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado, y crecimiento de la población y la economía.** Las dos grandes familias de escenarios conllevan a estimar las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Los escenarios "A" describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los "B" ese crecimiento es más moderado.

Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2 se considera que el desarrollo se dará más en un nivel regional. Estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población, tecnología, economía, uso del suelo, agricultura y energía) tanto en el ámbito global como regional.

Entre las suposiciones inherentes a los escenarios mencionados, se estima que las reservas petroleras y de carbono serán la fuente principal de energía por lo menos para los próximos cien años. El año 1990 se toma como marco de referencia para evaluar las condiciones futuras. Así, para ese año, la población mundial constaba de 5300 millones de habitantes, el producto interno bruto mundial era de 12

billones de dólares por año y la tasa del ingreso era de \$16.1 per cápita. La población mundial, según los escenarios A1 y B1, crecerá a 7 mil y 7 100 millones de habitantes, respectivamente; mientras que los escenarios A2 y B2 consideran que ésta aumentará a 15 100 y 10 400 millones, respectivamente. La tasa de ingreso personal será semejante en los escenarios A, mientras que en el escenario B2 aumentará a casi el doble. Por último, las emisiones de gases de efecto invernadero proyectadas por el IPCC, respecto a los escenarios elaborados, pueden resumirse de la siguiente manera: emisiones altas (A1B), emisiones media - alta (A2), emisiones media - baja (B2) y emisiones bajas (B1).

## Escenarios de Emisiones de CO<sub>2</sub>:

El grupo III de expertos del IPCC, dio a conocer los escenarios de emisiones de CO<sub>2</sub> que son la base para los actuales estudios de cambio climático, debido a que para establecer las condiciones climáticas del futuro se acude a la elaboración de escenarios de cambio climático y los denominó escenarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) (IPCC, 2000). Así, los modelos climáticos se han utilizado de acuerdo con las directrices dadas por el IPCC en el documento AR4 (IPCC, 2007) y han sido ejecutados teniendo en cuenta las posibles situaciones que se podrían presentar en el futuro de acuerdo con las cuatro familias básicas de escenarios de emisiones de gases efecto invernadero determinadas por las posibles futuras realidades en cuanto a carácter demográfico, económico, uso de energía, sostenibilidad al finalizar el presente siglo; todas ellas con el mismo grado de incertidumbre de ocurrencia, caracterizadas así:

- ▶ Familia A: Economía básicamente no influenciada por la sostenibilidad, es decir, por actividades antropogénicas alejadas de la filosofía de cuidado del medio ambiente y restricción en las emisiones de contaminantes al aire y al agua.
- ▶ Familia B: Economía que apunta a la sostenibilidad del medio ambiente.
- ▶ Familia 1: La población del mundo disminuye después de un máximo en 2050.
- ▶ Familia 2: La población del mundo continúa creciendo (en A2 más rápido que en B2).

Se tiene en cuenta el tipo de combustible predominante para definir escenarios con variaciones en este sentido así: combustibles renovables (T), combustibles basados en mezclas (B), combustibles fósiles (F1).

La región de Mesoamérica y el Caribe posee una topografía muy variada y compleja que va desde montañas escarpadas, hasta tierras costeras bajas, incluyendo islas.



## 1.2. Perfil climático de la región de Mesoamérica y el Caribe

La región de Mesoamérica y el Caribe posee una topografía muy variada y compleja que va desde montañas escarpadas, hasta tierras costeras bajas, incluyendo islas. Esta región se ve afectada principalmente por el desplazamiento estacional norte-sur de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), por el paso de huracanes y Ondas del Este como las precursoras de tormentas tropicales –que ocasionan grandes pérdidas de vidas humanas y daños en la infraestructura – de tal forma que el clima local se ve fuertemente afectado por la topografía y la proximidad de los océanos. Estas Ondas del Este son un mecanismo que contribuye a la generación de los Ciclones Tropicales en la zona ciclogénica del Caribe, al igual que el jet de bajos niveles del Caribe, según Amador (1998) y Wang (2007).

Tanto el Pacífico tropical como el Atlántico tropical y el Mar Caribe ejercen una gran influencia en el clima de la región, como de décadas en las dos cuencas oceánicas.

En términos de región climática, Mesoamérica exhibe un ciclo anual con más similitudes que diferencias respecto a la porción oeste de las Islas del Caribe. De acuerdo a Hastenrath (1967) en el hemisferio norte de las Américas se caracteriza por fluctuaciones menores en las temperaturas superficiales aunque con un patrón de lluvias bien definido que persiste entre los meses de abril-mayo hasta octubre-noviembre.

Tanto Mosiño y García (1966) como Coen (1973), establecen que la época de lluvias en la porción sureste de México, Centroamérica y el Caribe Hispano, muestra un comportamiento bimodal con valores máximos en junio y septiembre-octubre, así como valores mínimos relativos en julio-agosto. Hastenrath (1967), indica que a finales de julio ocurre un cambio abrupto en el clima regional

donde julio y agosto permanecen relativamente secos y menos nublados. Esta condición de mínimos relativos en las precipitaciones Magaña et al. (1999), le llama Sequía de Medio Verano o Canícula.

Para el caso de la región del Caribe, la precipitación es dominada por las escalas de la variabilidad interanual y multi-decadal. Por ejemplo, Spence et al. (2004) y Stephenson et al. (2007) asocian el comportamiento de la precipitación a las Temperaturas Superficiales del Mar (SST, por sus siglas en inglés) presentes al sur del Mar Caribe, mientras que Neelin et al. (2006) ha mostrado que interanualmente, el Caribe es más seco por alrededor de 1-12 mm/mes o de 5-30% en la variación de la lluvia por los últimos 100 años. También existen estudios estadísticos como el de Singh (1997) y Peterson et al. (2002) para algunos puntos del Caribe y quienes relacionan dichos decrementos en la precipitación con fenómenos climáticos interanuales como huracanes, sin embargo, aunque muestran pequeños aumentos en lluvias máximas, estadísticamente no muestran mayor significancia. El mismo análisis señala que los periodos de días secos consecutivos tienden a decrecer, coincidiendo con Neelin et al. (2006), quien muestra una tendencia a mayor sequía entre junio y agosto en el Caribe.

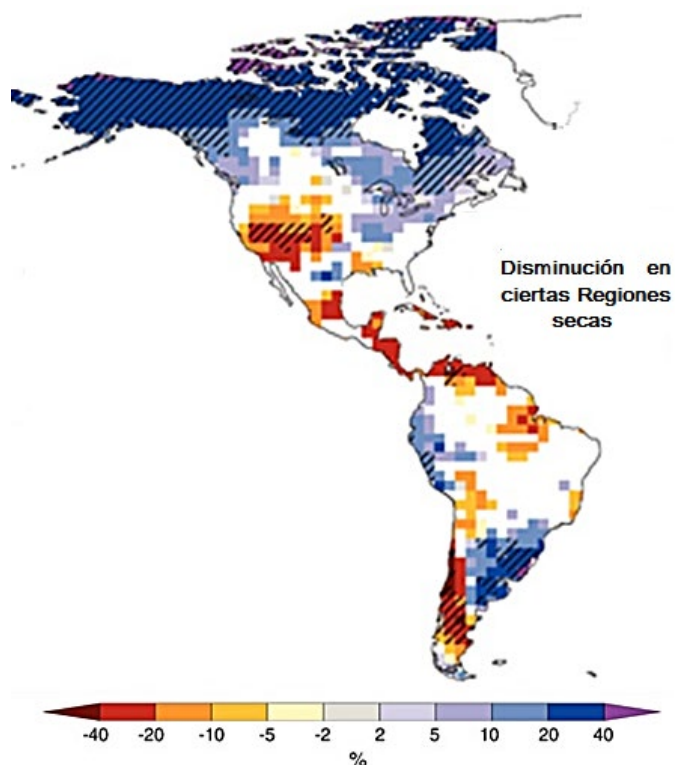
En general para la región de interés, los ciclones tropicales o huracanes ocurren desde principios de verano y hasta finales de otoño aunque a veces la temporada se prolonga. De acuerdo con Landsea (1993), más del 80% de los Ciclones que se forman en el Océano Atlántico son generados por perturbaciones u Ondas Africanas también conocidas como Ondas del Este.

Tanto en la agricultura como en la generación de electricidad por hidroeléctricas, muchas actividades económicas están estrechamente vinculadas al ciclo anual de la precipitación. Tan sólo el éxito o fracaso de la siembra de granos en la región depende por ejemplo de las características de la temporada de lluvias (inicio, duración y distribución espacial). Por ello, el conocimiento de los patrones de precipitación, sus anomalías y sus futuras variaciones asociadas al cambio climático son de gran relevancia para la Seguridad Hídrica.

## 1.3. El cambio climático sobre los recursos hídricos en Mesoamérica y el Caribe

Los impactos en el sector hídrico por cambios en el clima son uno de los temas más preocupantes para cualquier sector económico o región geográfica. Para muchas regiones como la de Mesoamérica y el Caribe, las condiciones de vulnerabilidad ante el cambio climático están estrechamente vinculadas a los impactos en la disponibilidad de agua y recursos hídricos en general. De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial al menos los países de Centroamérica poseen pocos problemas en términos de escasez del recurso, no obstante, tan solo la distribución irregular en los patrones de precipitación y las variaciones temporales ante cambios en el clima aún en sitios húmedos o tropicales han llegado a generar un estrés hídrico<sup>1</sup> y conflictos (GWP, 2011), particularmente en los periodos de sequía relativa.

<sup>1</sup> México presentó situaciones de sequía en el 2011 y 2012, con afectaciones al agro; En el 2010, La Prensa Nacional indicó que ante un periodo de sequía, Guatemala registró graves pérdidas de cultivos en grupos sociales de alta pobreza, originando casos de inanición y muertes; en Panamá, en el 2001, ante un periodo de sequía meteorológica se presentaron efectos negativos en sectores como la ganadería, agricultura y la generación eléctrica.



**Figura 1.** Cambios relativos de la escorrentía anual (disponibilidad de agua, en valores porcentuales) para el periodo 2090-2099, con respecto al periodo 1980-1999. IPCC (2007).

El informe de 2011 de la Alianza Global del Agua indica que dos terceras partes de la región Centroamericana está asentada en la vertiente del Pacífico donde por causa natural escurre el 30% de las aguas superficiales, mientras que la tercera parte restante de la población está ubicada en la vertiente del Mar Caribe, la cual genera el 70% de la riqueza hídrica regional. Es por ello que los impactos sobre

los recursos hídricos podrán acentuar una problemática cada vez más creciente sobre la demanda de agua ante una población dinámica en aumento y un ritmo de desarrollo no sostenible de las actividades consumidoras de agua. A medida que aumenta la demanda de agua por una variedad creciente de usos, también existe una marcada tendencia hacia la disminución de la oferta por la degradación de las fuentes existentes (calidad) y la reducción de su suministro (cantidad).

Diversas publicaciones (Trenberth, 2005; Wilby, 2005; Wilby y Harris, 2006) indican que estas tendencias globales sobre los recursos hídricos podrán agravarse ante los posibles cambios en los patrones climáticos (Fig. 1). De hecho, el 4AR indica que el estrés sobre los recursos hídricos está intensificándose al tener mayor presión de factores como la urbanización y el consecuente crecimiento poblacional, cambios en las economías y en los usos de la tierra.

De acuerdo al Informe de Síntesis del 4AR, los fenómenos meteorológicos extremos han cambiado de frecuencia y/o intensidad en los últimos cincuenta años y es muy probable que las olas de calor sean ahora más frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres y que también aumente la frecuencia de las precipitaciones intensas (o la proporción de precipitaciones intensas con respecto a la precipitación total). De hecho, Aguilar et al. (2005), indica que el promedio anual de precipitación entre 1961 y 2003 para Centroamérica y Sudamérica muestra cambios en incremento y una tendencia a más eventos extremos. Para las regiones tropicales es muy probable que aumente la intensidad de los Ciclones Tropicales pero para el 5AR no existe confianza suficiente en términos de que varíen en su ocurrencia.

Los valores representan la mediana de 12 modelos climáticos para el escenario A1B (este escenario se refiere a la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes). Las áreas en blanco denotan los lugares en que menos de un 66% de los doce modelos concuerdan en el signo del cambio, y las áreas estriadas, los lugares en que más de un 90% de los modelos coinciden en el signo del cambio. La calidad de la simulación de la escorrentía en gran escala observada durante el siglo XX se utiliza como punto de partida para seleccionar los doce modelos de la colección (Figura 1). El mapa mundial de la escorrentía anual es un ejemplo de aproximación en gran escala, y no implica conclusión alguna con respecto a escalas temporales y espaciales más reducidas. En las regiones en que la lluvia y la escorrentía son muy escasas (por ejemplo, las áreas desérticas), pequeños cambios de la escorrentía pueden arrojar grandes cambios porcentuales.

En algunas regiones, el signo de los cambios de escorrentía proyectados difiere de las tendencias recientemente observadas. En algunas áreas en que las proyecciones indican un aumento de la escorrentía se prevén efectos estacionales diversos, como un aumento de la escorrentía en las estaciones lluviosas o una disminución en las estaciones secas. Los estudios basados en un pequeño número de modelos climáticos pueden arrojar resultados muy diferentes de los aquí indicados. Fuente: Informe de Síntesis del Cuarto Informe de Evaluación (4AR), PICC, 2007 y adecuada por CATHALAC para la región de Latinoamérica.

En particular, los cambios en la precipitación y en la temperatura podrán inducir cambios de la escorrentía y por consecuencia, cambios en la disponibilidad de agua. En el 4AR se indica que con gran confianza la escorrentía aumentará hacia el 2050 entre un 10% y un 40%, tanto en latitudes superiores como en algunas áreas tropicales pluviales, mientras que disminuirá entre un 10% y un 30% en regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución de las lluvias y a tasas de evapotranspiración más altas.

Recientemente el 5AR establece que en términos del nivel del riesgo ante el cambio climático en sistemas físicos como ríos y lagos ante inundaciones y/o sequías en Centro y Sudamérica, es considerado como bajo en la actualidad, sin embargo, se indica que hacia el 2080 podrá aumentar a niveles alto o muy alto, limitando en gran medida las capacidades adicionales necesarias para que la adaptación logre reducir el riesgo. A pesar de que en las distintas regiones los cambios en la precipitación no serán uniformes, existe confianza de que hacia el 2080, bajo el escenario RCP 8.5 (que corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero), los valores anuales de precipitación tiendan a aumentar en muchas regiones húmedas de latitudes medias.

En particular para la región del Caribe, el aumento del nivel del mar resulta clave para su desarrollo. Acorde a Church et al. (2004) el aumento de nivel registrados en puntos de medición del Caribe es de alrededor de 1,5 a 3 mm por año para el periodo 1950-2000, el cual coincide con lo observado a nivel global y reportado en el AR4.

Si bien, hoy día se tiene conocimiento sobre las condiciones actuales de los recursos hídricos y su relación con la variabilidad climática, aún no es claro el panorama sobre sus impactos futuros en la disponibilidad del agua. Hoy en día y aún sin cambio climático, la región Centroamericana y el Caribe muestra algún grado de afectación ante las variaciones en los recursos hídricos.

Por ello, el identificar impactos sobre los recursos hídricos a partir de aspectos hidrológicos como la escorrentía y la erosión del suelo, permite brindar insumos clave para plantear estrategias de adaptación que reduzcan la vulnerabilidad frente a dichos impactos y provean medidas efectivas para un mejor desarrollo.

# 2. Objetivo del estudio

Este estudio tiene como objetivo evaluar los impactos potenciales del cambio climático en los recursos hídricos en América Central y el Caribe, desde una perspectiva de cuencas hidrográficas.

Los objetivos específicos planteados son:

1	Evaluar el cambio de los patrones de precipitación según los diferentes resultados de escenarios de cambio climático;
2	Identificar los cambios futuros en los patrones de escorrentía superficial;
3	Evaluar el cambio de la escorrentía como un componente del balance hídrico;
4	Identificar condiciones actuales y de cambios en el proceso de erosión del suelo.



# 3. Datos y metodología utilizada

## 3.1 Datos utilizados

Los datos utilizados (Tabla 1) son de diversas fuentes y forman parte de resultados de proyectos de agencias internacionales. Por ejemplo, los datos de cobertura del suelo incluyendo los datos resultantes de los escenarios al 2050 y 2070, provienen de la Agencia Espacial Europea (ESA) a través del proyecto GlobeCover. La resolución espacial de los datos es de 330m x 330m. Los datos de escenarios de cobertura del suelo consideran un proceso a través del Land Change Modeler (LCM) de IDRISI<sup>2</sup> que modela el cambio de uso del suelo en Mesoamérica y el Caribe insular para el periodo 2020-2100, en base de datos históricos.

Los datos de tipo de suelo (Tabla 1) provienen de las bases de datos globales de un esfuerzo liderado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) a través de la Base del Suelo y Terreno para América Latina y el Caribe (SOTERLAC) según Dijkshoorn (2005) y servida por la Información Mundial de Suelos (ISRIC, por sus siglas en inglés), en su versión 2.0. La resolución de los datos corresponde a 1000 m x 1000 m.

Para el caso de los datos de elevación, se utilizaron los datos de la Misión del Radar Transbordador (SRTM) de la Agencia Nacional de Administración del Espacio (NASA) de los Estados Unidos. Estos datos fueron procesados como de alta resolución a través de HYdroSHEDS y servidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. HYdroSHEDS fue desarrollado por el Programa de la Ciencia para la Conservación de la Fundación Mundial de Vida Silvestre (WWF) como un producto de mapeo de datos que provee información hidrológica para su aplicación a escala regional y global bajo un formato consistente de datos.

Los datos de precipitación utilizados, provienen del proyecto WorldClim<sup>3</sup> el cual es una base de datos de clima basada en estándares y formatos establecidos según Hijmans et al. (2005) para la modelación ecológica. Esta base de datos en su versión 1.0 cuenta con una serie de capas de información climática con resolución espacial de 1000 m x 1000 m los cuales pueden ser gestionados en plataformas SIG. La resolución espacial de los datos de WorldClim es mensual, sin embargo, para este análisis solo se contó con datos anuales promedio.

Tabla 1. Datos utilizados para la modelación hidrológica.

Variable	Fuente	Frecuencia / Periodo	Resolución espacial	Referencia
Cobertura / uso del suelo	GlobCover de la Agencia Espacial Europea (ESA), y escenarios de uso del suelo para el 2050 y 2070.	2001 - 2331	330 m x 330 m	
Elevación	Topografía de la Misión de Radar del Transbordador (SRTM) de la NASA, reprocesado por la iniciativa HydroSHEDS		90 m x 90 m	
Precipitación	Norma histórica, escenarios del IPCC-4, y escenarios del IPCC-5 / WorldClim		1000 m x 1000 m	
Tipos de suelo	Base de datos del suelo y terreno de América Latina y el Caribe (SOTERLAC) del FAO		1000 m x 1000 m	Dijkshoorn et al. (2005).

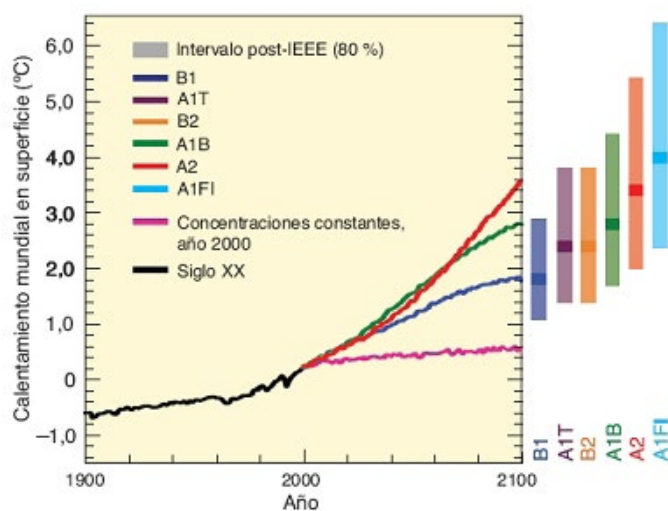
<sup>2</sup> Técnica integradora que permite un análisis científico en plataforma SIG desarrollado por la Universidad Clark en Atlanta, Georgia. Esta técnica facilita el análisis espacial a científicos e investigadores comprometidos con las áreas del sistema dinámico terrestre para la toma de decisiones en campos como la gestión ambiental y el desarrollo sostenible.

<sup>3</sup> Este proyecto fue desarrollado por investigadores del Museo de Zoología Vertebrada de la Universidad de California en Berkeley, en colaboración con el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Centro de Investigación y Cooperación para los Bosques Tropicales y su Gestión (Rainforest CRC).

La resolución espacial (horizontal) de la modelación fue de un kilómetro, debido a que los datos climáticos tenían una escala menor que el resto de los insumos, se realizó la 'reducción de escala' a un kilómetro en los datos de cobertura de la tierra y topografía (modelo de elevación digital).

## Datos de modelos de clima:

Los datos utilizados y referidos como escenarios de cambio climático, es información de acceso público de los sitios del PICC y son el resultado de simulaciones numéricas con Modelos de Circulación General (GCM's por sus siglas en inglés). Esta información de GCM's ha sido reportada tanto en el Cuarto (4AR), como en el Quinto (5AR) Informe de Evaluación del PICC. Para el primer caso, la información del 4AR se utilizó los datos del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés) que globalmente proyectan aumento de las emisiones mundiales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y su relación con el aumento en la temperatura superficial a nivel global (Fig. 2), bajo la suposición de que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo.



**Figura 2.** Calentamiento de la temperatura superficial proyectada por seis escenarios SRES (B1, A1T, B2, A1B, A2, A1FI) <líneas de colores> más recientes publicados posteriormente al Informe Especial. Estos escenarios, están basados en la continuidad de las simulaciones del siglo XX. Las proyecciones reflejan las emisiones de los gases de efecto invernadero y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino una simulación de un Modelo de Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO) en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea continua dentro de cada barra) y el intervalo evaluado para cada escenario en el periodo 2090-2099. Todas las temperaturas al periodo 1980-1999. Fuente: IPCC (2007).

Los periodos u horizontes de tiempo considerados son 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, refiriéndose como

la climatología del 2020, 2050 y 2080, respectivamente. La información fue analizada en términos de escenarios de emisiones A2 y B2 (valorándolos como pesimista y optimista) más la línea base fechada al 2010. Las salidas de datos utilizados fueron generadas a partir de Modelos Climáticos Globales (GCM por sus siglas en inglés) como el CGCM3T47 (referido como CCCMA), CSIRO Mk3 y HadCM3 de Centros Climáticos de Canadá, Australia e Inglaterra, respectivamente. Esta información y la escogencia de los escenarios se apegaron a la disponibilidad de la información y posibilidades para el procesamiento de la información. Además, de acuerdo a Mitchell, (2003) los patrones espaciales de respuesta de variables clave como temperatura y precipitación son muy similares para cualquier escenario sobre la región de interés de este estudio, pero con diferencias significativas sólo en su magnitud.

Para el caso de la información utilizada y proveniente del 5AR son de los llamados "Vías de Concentración Representativas" (Fig. 3) (RCP, por sus siglas en inglés). Los RCP's describen líneas de concentración de gases de efecto invernadero y concentraciones de aerosoles que junto con el cambio en el uso del suelo, son consistentes con un set de salidas o resultados climáticos utilizados por la comunidad de modeladores climáticos. Estas líneas de concentración son caracterizadas por el forzamiento radiactivo producido hacia finales del siglo XXI. El forzamiento radiactivo es el calor extra de la baja atmosfera que se retendrá como resultado de los gases de efecto invernadero adicionales. Este forzamiento radiactivo es medido en unidades de energía por cantidad de área, es decir, W/m<sup>2</sup>.

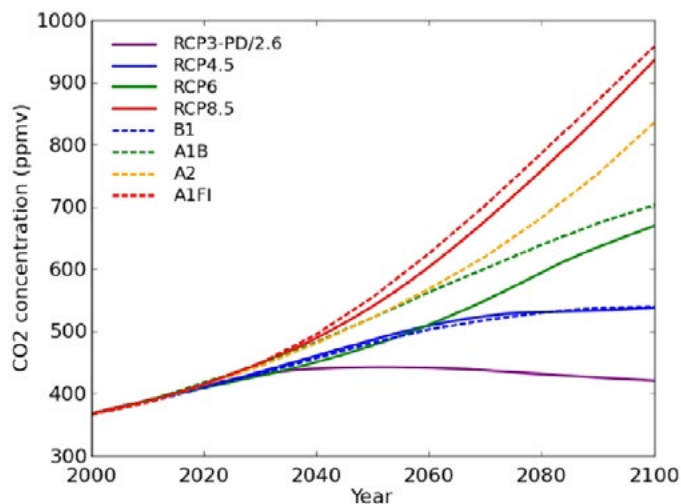
Los escenarios considerados en el análisis son de valores de forzamiento radiactivo de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m<sup>2</sup> utilizando los resultados de 6 GCM's, esto es, (CNRM-CM5 de Francia, GISS-E2-R de los Estados Unidos, HadGEM2-ES del Reino Unido, MIROC5 de Japón, MRI-CGCM3 de Japón, y NorESM1-M de Noruega). Los horizontes de tiempo contemplados para los RCP son 2050 y 2070.

En comparación con los SRES, los RCP's abarcan una gama más amplia de posibilidades y menos incertidumbre. Por ejemplo, son iniciados a partir de concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero en vez de ser iniciados por procesos socioeconómicos. Esto es importante dado que en todos los pasos en la modelación desde los escenarios socioeconómicos hasta los impactos del cambio climático se añade incertidumbre. También como un aspecto físico y de consistencia, los RCP's no están "empaquetados" con proyecciones socioeconómicas, de emisiones y de proyecciones climáticas. Por el contrario, son internamente consistentes con un grupo de proyec-

ciones de forzamiento radiativo que son utilizados en fases subsecuentes para la modelación climática. Finalmente, en contraste con los SRES, algunos de los RCP's ya incluyen políticas de adaptación y mitigación.

Para este análisis, se consideraron los datos de RCP's en

promedios de bloques por años, es decir, no están disponibles para años individuales. Es importante recordar que 2050 se refiere al promedio del periodo del 2041 al 2060; mientras que para 2070 se refiere al promedio del periodo del 2061 al 2080.



**Figura 3.** Comparación de RCP's y SRES sobre las Concentraciones de Dióxido de Carbono para el siglo 21. El más cercano a RCP 8.5 es A1FI; para RCP 6 es A1B; para RCP 4.5 es B1 y el RCP 2.6, es el más bajo en comparación con cualquier escenario de SRES (Izquierda). Aproximación entre concentraciones de Dioxido de Carbono equivalente (ppm) al 2100. Estas concentraciones incluyen aerosoles y otros gases de efecto invernadero (Derecha). Fuente: Imogen Jubb, Pep Canadell and Martin Dix (2013), Representative Concentration Pathways (RCPs), An Information Paper, CSIRO Australian Climate Change Science Program. Australia.

SRES	RCP	Aproximación de las concentraciones de CO <sub>2</sub> equivalente para el año 2100 (ppm)
A1FI		1550
	8.5	>1370
A1B		850
	6	850
B2		800
	4.5	650
B1		600
	2.6	490

## 3.2 Metodología

En total se realizaron 61 corridas: una con la línea base lo cual pertenece aproximadamente al año 2010; 30 corridas (Fig. 4) donde se asume que no hay cambios en el uso del suelo; y 30 corridas más asumiendo los cambios tendenciales de cobertura y uso del suelo. Los análisis solo fueron anuales; no se hicieron cálculos mensuales.

La resolución espacial (horizontal) de la modelación fue de un kilómetro, debido a que los datos climáticos tienen un arreglo espacial con una escala menor que el resto de los insumos. Por ello se realizó una “reducción de escala” a un kilómetro en los datos de cobertura de la tierra y topografía correspondientes al Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en Inglés).

La modelación hidrológica se enfocó en las cuencas hidrográficas (Fig. 5) de los siete países en América Central, y las 13 naciones independientes en el Caribe insular.

Como las cuencas hidrográficas no coinciden con los límites nacionales, el dominio geográfico de la modelación incluyó partes del territorio de México y Colombia (por ejemplo en el primer caso, incluyendo la cuenca del Río Usumacinta). En total, el dominio geográfico del proyecto se suma aproximadamente 848,000 km<sup>2</sup>. De toda el área de estudio, 19.1% (aprox. 161,860 km<sup>2</sup>) drena hacia el Océano Pacífico, 64.2% drena hacia el Océano Atlántico (aprox. 544,729 km<sup>2</sup>), y 16.7% drena hacia el Golfo de México (aprox. 141,252 km<sup>2</sup>). En el área de estudio existen aproximadamente 2,948 subcuencas y microcuencas hidrográficas mayores a 150 hectáreas (1.5km<sup>2</sup>), siendo de estas aproximadamente 900 cuencas hidrográficas y más que 2.000 sub-cuencas y micro cuencas con las vertientes de drenaje y su porcentaje de área variados (Tabla 2).

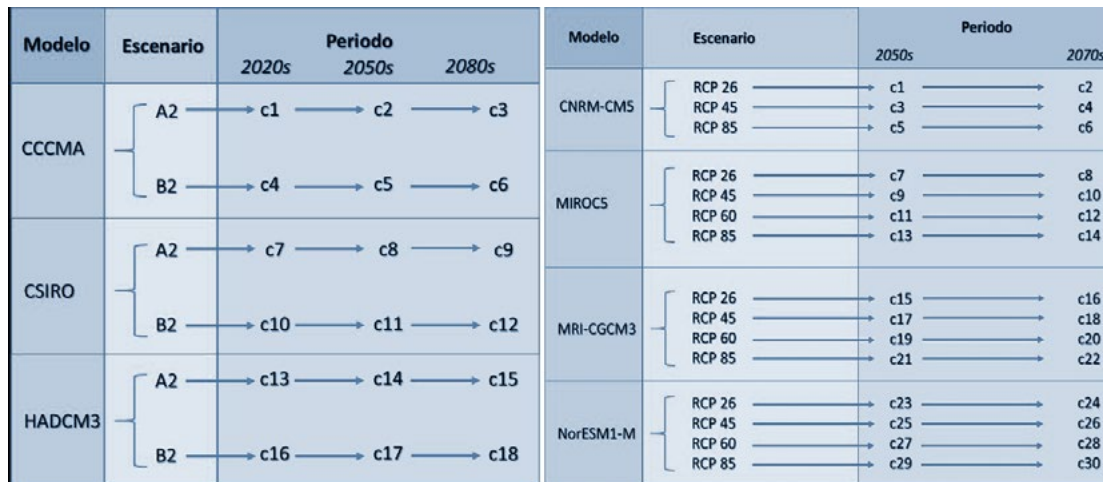


Figura 4. Esquemización de los modelos de clima global utilizados y el tipo de escenario.

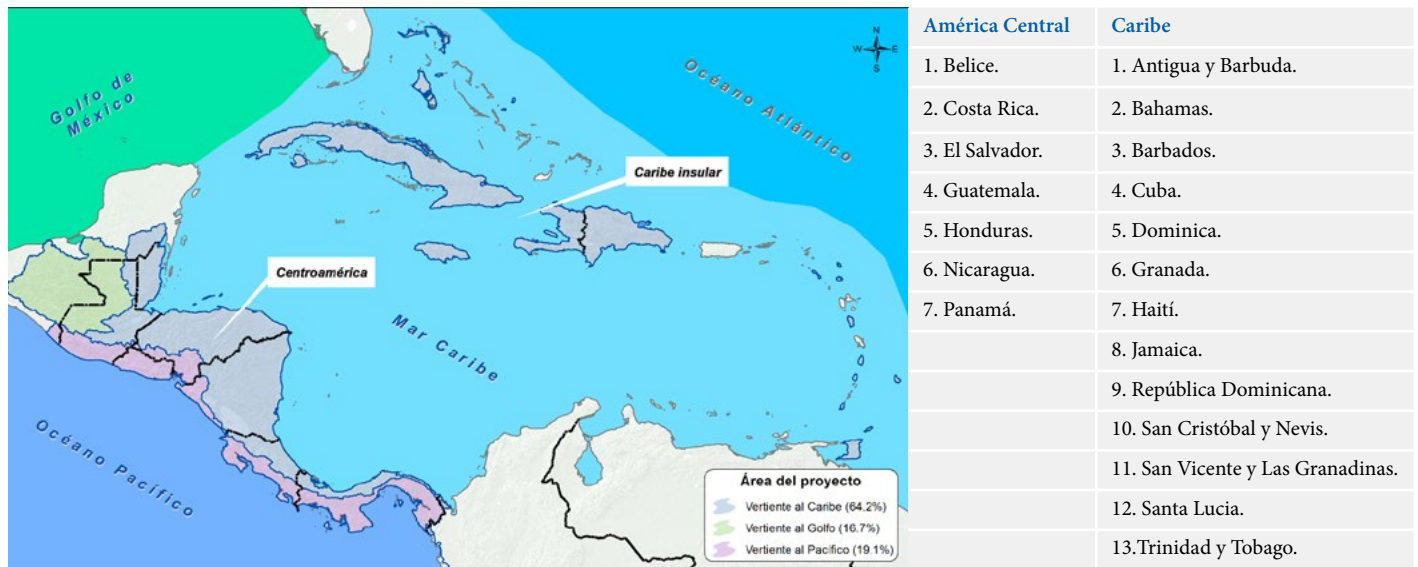


Figura 5. Vertientes de drenaje de las cuencas hidrográficas del dominio geográfico del proyecto donde el 64.2% son vertientes al Mar Caribe, 19.1% vertientes al Océano Pacífico, y el 16.7% vertientes al Golfo de México.

Tabla 2. Vertientes de drenaje en el dominio geográfico del proyecto.

N°	Región	Vertiente	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje Área
1	Antillas	Mar Caribe	216.204	25.5%
2	América Central	Golfo de México	312.373	36.8%
3	América Central	Océano Atlántico	50.598	6.0%
4	América Central	Océano Pacífico	157.760	18.6%
5	Áreas transfronterizas	Golfo de México	90.655	10.7%
6	Áreas transfronterizas	Océano Atlántico	16.152	1.9%
7	Áreas transfronterizas	Océano Pacífico	4.100	0.5%
<b>TOTAL</b>			<b>847.841</b>	<b>100%</b>

Nota: Áreas transfronterizas se refieren principalmente a territorio mexicano o colombiano donde hay cuencas compartidas con América Central.

Para la modelación hidrológica se utilizó la herramienta N-SPECT en un ambiente computacional del ArcGIS de ESRI, para realizar las 61 corridas indicadas anteriormente. N-SPECT es una herramienta de código abierto generado por el Servicio Costero de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos. Mediante esta herramienta es posible saber variables como la dirección del flujo, pendiente, características del suelo, cubierta y la determinación de la escorrentía así como la sedimentación a través de la determinación de coeficientes.

Para este análisis, la escorrentía se estima en base del método de Números de Curva (CN, en inglés) por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, en inglés). Los Números de Curva representan la capacidad de infiltración del suelo y se encuentran en un rango de 0 a 100: 0 representa 0% de escorrentía y 100% de infiltración, 100 indica 0% de infiltración y 100% de escorrentía (USDA-NCRS, 1986). Los CN varían dependiendo de la cobertura o uso del suelo y corresponden a cuatro tipos hidrológicos del suelo (Tabla 3).

**Tabla 3.** Grupos hidrológicos de suelos y su potencial de escorrentía e infiltración. Fuente: Adaptada de Ongley, E. (1996).

Grupo Hidrológico	Potencial de escorrentía	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Suelos Típicos
A	Bajo	Alta	Arenas y grava excesivamente drenadas.
B	Moderado	Moderada	Textura medias.
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo.
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactadas o suelos poco profundos sobre capas impermeables.

Para efectuar los cálculos, N-SPECT utiliza como insumos datos de precipitación, de cobertura del suelo, de tipos de suelo (clasificación de grupos hidrológicos y factor K) y datos de elevación (modelos de elevación digital). N-SPECT utiliza el modelo de elevación digital para estimar parámetros como dirección de flujo y acumulación de flujo para efectos de cálculo de transporte de escorrentía. La ecuación utilizada en N-SPECT para el cálculo de escorrentía, es la siguiente:

$$Q = (P - I_a) / [(P - I_a) + S]$$

$$I_a = 0.2 \times S$$

$$S = (1000 / CN) - 10$$

donde:

- Q = escorrentía
- P = precipitación
- S = potencial de retención máxima después que la escorrentía empiece
- Ia = abstracción inicial
- CN = número de curva de escorrentía

Para la estimación de la erosión, N-SPECT utiliza la ecuación de RUSLE, que corresponde a la ecuación universal revisada de pérdida de suelos, desarrollado por la Universidad de Michigan en los Estados Unidos. Esta ecuación de acuerdo a NOAA (2008) se expresa como:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

donde: **A** significa la cantidad total de sedimentos que se acumulan en un año, y es el producto de la multiplicación de la erosividad de la precipitación; **factor R** es la erosividad del suelo, **factor K** es la longitud y la pendiente de la cuenca es **factor LS**; la cobertura del suelo es representada por **factor C**, mientras que la gestión de la cobertura por **factor P**.

En el caso de los factores indicados (**C, K, LS, P, R**), estos se derivaron de los datos insumos. Por ejemplo, los datos de cobertura se reclasificaron para estimar el **factor C**, los tipos de suelos fueron convertidos al factor K en base de factores defecto, el DEM fue transformada al **factor LS** y el **factor R** fue estimada en base a la ecuación de Costa Rica presentada en Mikhailova et al. (1997).

## Escorrentía y erosión del suelo:

Escorrentía se entiende como el agua que fluye sobre la superficie del terreno hasta el cauce más cercano y sólo se produce en los eventos de lluvia. La escorrentía es considerada como el principal factor en el proceso de la erosión de los suelos (Martínez, 2006). Es por eso que la erosión hídrica del suelo es un tema de gran importancia debido a que muchas economías regionales dependen en gran parte no solo de la calidad y conservación de los suelos sino también de la disponibilidad de agua para su correcta utilización.

La escorrentía está determinada por la tasa de infiltración y depende básicamente de factores climáticos, geológicos e hidrológicos. Los factores más determinantes son la precipitación, la permeabilidad del suelo, cobertura y la pendiente. De acuerdo a investigaciones previas se ha demostrado que en cuencas con suelos muy permeables, de cobertura densa y de poca pendiente, el escurrimiento es muy bajo, por el contrario, en suelos arcillosos y con poca cobertura el escurrimiento es mucho mayor (Rojas, 2009). De darse un aumento de escorrentía podría implicar así también un aumento de erosión del suelo, comprometiéndose de esta manera la calidad de los recursos hídricos.

Entendiendo el papel que juega la cobertura del suelo, por ejemplo, los suelos con cobertura boscosa la infiltración del agua es mucho mayor y veloz (Martínez, 2006), esto se debe al elevado contenido de materia orgánica de los suelos y la acción de las raíces creando innumerables canalillos hasta el subsuelo, aumentando la posibilidad de infiltración, así también la hojarasca tiene una función de protección del suelo, a diferencia con los suelos con pastoreo y áreas urbanas (suelos impermeabilizados) la infiltración es mucho menor, y más lenta.

Otros aspectos que determinan la escorrentía es la permeabilidad de los suelos y la pendiente, para este estudio, la permeabilidad está determinada por el Número de Curva (CN) y el grado de pendiente. Como lo cita Martínez (2006), a mayor pendiente se puede esperar mayor escorrentía, debido a que se acumula más agua en terrenos tendidos que en terrenos empinados.

Para el cálculo de la escorrentía, N-SPECT también utiliza el modelo de elevación digital para estimar parámetros como dirección de flujo, acumulación de flujo y para efectuar el cálculo del transporte de los sedimentos, generando un producto denominado 'sedimentos acumulados' donde cada pixel indica la cantidad de sedimentos que es generado en la cuenca. Los detalles sobre los cálculos de

escorrentía y erosión están indicados en la guía técnica de N-SPECT para ArcGIS, cuya última versión fue elaborado por la NOAA en el 2008.

Todos los datos resultados de la modelación hidrológica en la desembocadura de más de 700 cuencas hidrográficas evaluadas en toda el área de estudio representarán las posibles tendencias de los cambios que se podrían esperar en cuanto a precipitación, escorrentía y sedimentos.

Para el conocimiento de la respuesta y relación entre los sistemas hidrológicos, los diferentes escenarios de cambio climático, y los componentes que intervienen en el sistema (cobertura y uso de la tierra), las modelaciones hidrológicas consideraron primordialmente dos condiciones:

- ▶ **Primera condición:** Vegetación sin cambio. Se asume que la vegetación en los periodos del 2050 y 2070 no variaría y se mantendrá la cantidad de cobertura boscosa en el transcurso del tiempo (56% de cobertura boscosa); y
- ▶ **Segunda condición:** Vegetación con cambio constante. Se asume que la cobertura de bosque disminuirá, tomando en cuenta la dinámica tendencia de pérdida de bosque para la región y asumiendo que la tasa de deforestación será constante. Se considerarán los resultados de la modelación de cobertura, para el periodo del 2050 y se contará con el 32% de cobertura boscosa para toda el área de estudio y para el 2070 se contará solamente con el 25% de cobertura boscosa.

La relación entre la precipitación y la escorrentía considero el coeficiente de escorrentía<sup>4</sup>, para conocer qué proporción de la precipitación se escurrirá y qué tanto corresponde a evaporación, evapotranspiración y filtración. Se destaca que la modelación no especifica el % correspondiente a la evapotranspiración, ni a la infiltración. El coeficiente de escorrentía depende de varios factores que intervienen en los sistemas hidrológicos, sin embargo, para este análisis se evaluó cómo la disminución de la cobertura boscosa influirá en los procesos de escorrentía y erosión.

Los resultados de las modelaciones serán analizados y comparados en base a los datos de la norma histórica tanto de la precipitación, como de la escorrentía y sedimentos.

<sup>4</sup> Según Martínez (2006) el coeficiente de escurrimiento, se calcula:  $C = E/P$ , donde C = coeficiente de escorrentía, E = escorrentía, P = precipitación.

## Sedimentos:

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, en inglés), la contaminación provocada por sedimentos alteran los cuerpos de agua de manera física y química (Ongley, 1996). Aunque a veces no se considera la sedimentación de los ríos como una forma de contaminación, Ongley nota que:

Los altos niveles de sedimentos en los ríos dan lugar a perturbaciones físicas de las características hidráulicas del cauce, favoreciendo las inundaciones, por la reducción de la capacidad del flujo de agua en la cuenca de drenaje. La parte de los sedimentos constituida por limo y arcilla (< 63µm) es trasmisora primaria de productos químicos adsorbidos, especialmente fósforo, plaguicidas clorados y la mayor parte de los metales, que son transportados por los sedimentos al sistema acuático. Así también la contaminación del agua por sedimentos, tiene impactos en todos los ecosistemas acuáticos debido a la destrucción de los hábitats, en América Central se ha comprobado que los sedimentos son la causa principal del deterioro de los arrecifes de coral. Los sedimentos son producidos en gran parte por las actividades agrícolas y como consecuencia de la erosión de las tierras deforestadas.

Por lo anterior se asume que los sedimentos son una de las principales formas de contaminación de los ríos, así también de deterioro de ecosistemas acuáticos, y uno de los principales factores que favorecen las inundaciones. Es por estas razones que los impactos por sedimentos en la región de América Central y el Caribe tiene un importante énfasis a la hora de considerar los posibles impactos que serán provocados por el cambio climático.

Con los resultados de las corridas con N-SPECT de escorrentía y sedimentos, se hicieron análisis comparativos entre los resultados obtenidos con la norma histórica y los resultados obtenidos con los escenarios de los cuatro modelos de escenarios futuros. Así también se generó una capa de puntos donde se ubicaron las áreas de desembocadura de las cuencas pero no incluye sub-cuencas, ni micro cuencas, ya que los resultados de escorrentía y erosión de la cuenca son valores acumulados, mientras que los datos totales generados en el periodo evaluado en las cuencas se obtienen en el área de desembocadura. Con ello, los resul-

tados obtenidos en la desembocadura se estimaron algunos valores como la precipitación total por cuenca, concentraciones de sedimentos, sedimentos totales por superficie de área, porcentaje de cambios de sedimentos, coeficientes de escorrentía y porcentaje de cambios en escorrentía. Dichos valores se estimaron para cada escenario futuro de los modelos climáticos considerados y para cada horizonte de tiempo establecido.

Con las capas de escorrentía también se realizaron procesamiento de datos para identificar geográficamente áreas de aumento y disminución de escorrentía, y porcentaje de cambios para cada periodo evaluado. Con las capas de sedimentos se hicieron procesamiento de datos para identificar geográficamente las áreas de mayor aporte de sedimentos a partir del cálculo de concentraciones de sedimentos.

Es necesario mencionar que existen varias maneras de evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, y aun en el área hidrológica, existen varias herramientas para efectuar la modelación. Sin embargo, la herramienta N-SPECT lo cual fue desarrollada por la Administración Nacional de los Océanos y Atmosfera de los Estados Unidos (NOAA, en inglés) fue seleccionada por su agilidad en poder hacer modelación de varios parámetros, y con miles de cuencas hidrográficas, mientras maximizando el uso de los recursos computacionales.

Mientras que se evaluó que la herramienta N-SPECT podría hacer cálculos sobre el transporte de agua, sedimentos, y contaminantes para una gran área geográfica conteniendo miles de cuencas, hay que reconocer que N-SPECT simplifica su cálculo del balance hídrico, limitando la cantidad de información a generarse. Tan sólo por ejemplo, N-SPECT no hace cálculos sofisticados del transporte subterráneo de agua, tal como se puede realizar con herramientas como la herramienta para la evaluación de suelos y agua (SWAT).

Sin embargo, para este estudio se consideró que la información sobre la escorrentía y la erosión / sedimentación a nivel macro utilizando la herramienta N-SPECT, podría proporcionar mucha información sobre el futuro comportamiento de los recursos hídricos, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada en la información.

# 4. Análisis de resultados

## 4.1. Cambios en la precipitación

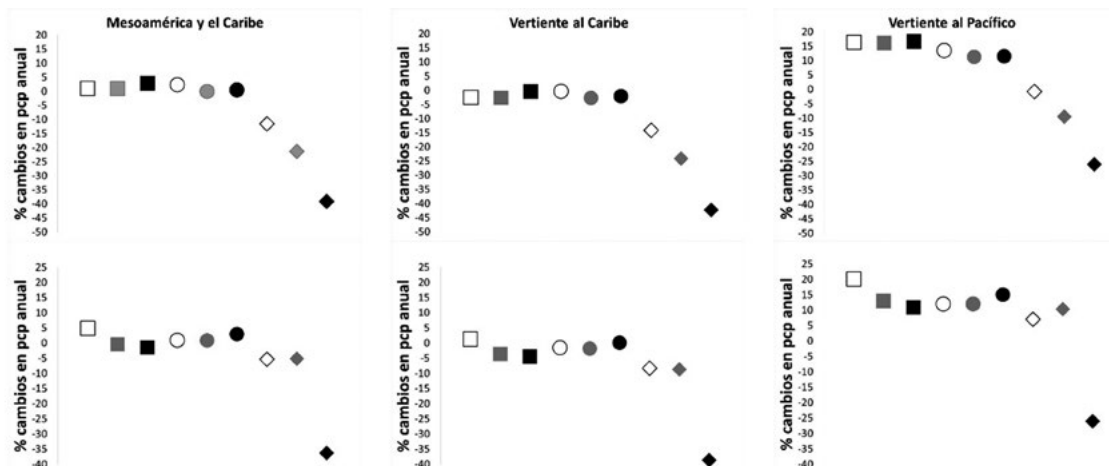
### 4.1.1. Escenarios del Reporte Especial de Escenarios de Emisiones

Los análisis sobre la precipitación son mostrados de manera tabular y clasificándolos por tipo de modelo, escenario (tanto escenarios de emisiones como de forzamiento radiativo), y el valor de referencia de precipitación para la subregión de análisis considerando el área total, la porción de las cuencas que vierten o drenan hacia el Caribe y las que drenan hacia el océano Pacífico, respectivamente. Se ha hecho una diferencia entre los porcentajes de cambios positivos (azules) y porcentajes negativos (rojos) respecto de la lluvia promedio (mm/año).

De esta manera para el escenario SRES B2, sobre la región de Mesoamérica y el Caribe así como la subregión vertiente hacia el Caribe y para los casos de CGCM3T47, CSIROMk3 y HadCM3 sus tendencias (mayormente positivas) son coherentes al horizonte de 2020 y 2050 con cambios acotados en el rango de -5% a 10%, aunque dicha coherencia disminuye relativamente hacia el 2080 donde CSIROMk3 muestra cambios (positivos) más notorios, mientras que el HadCM3 sus cambios (negativos) son muy notorios o extremos acotados en -40% con respecto del resto de los resultados. Para la vertiente del Pacífico el porcentaje de cambios en la mayoría de los resultados es más pronunciado (positivo) al acotarse mayormente entre 10% y 25%, destacándose que hacia el 2080 el

HadCM3 continua mostrando un porcentaje de cambio notorio aunque menos intenso acotado a -30%. Es decir, para cualquier horizonte de tiempo, bajo el escenario B2 el porcentaje de cambios de la mayoría de los GCM muestran coincidencia tanto para la región de estudio como para las vertientes hacia el Caribe y Pacífico y donde en esta última los porcentaje de cambio (positivos) son aún mayor. En el caso del modelo HadCM3 sus resultados son coincidentes y dentro del rango de cambios hacia los horizontes de 2020 y 2050, mientras que hacia el 2080 sus tendencias (negativas) son notoriamente extremas respecto a los cambios mostrados por los otros modelos.

Para el caso del escenario SRES A2 en la región de Mesoamérica y el Caribe así como la vertiente hacia el Caribe existe una coherencia relativa en términos de los resultados de los GCM. Los resultados de CGCM3T47 y CSIROMk3 coinciden en sus tendencias (mayormente positivas) para cualquiera de los horizontes de tiempo acotados en el rango de cambio de -5% y 5% (Fig. 6). Para el caso de la vertiente hacia el Pacífico el rango de porcentaje de cambios (positivos) está acotado entre 10% y 20% para cualquier horizonte de tiempo. No obstante, el modelo HadCM3 en cualquier región de análisis refleja cambios (negativos) notorios en comparación con los anteriores, acotándose el porcentaje de cambio entre -3 a -10% (2020), -10 a -20% y de -35% a -45% (2080).



**Figura 6.** Porcentaje de cambios en la precipitación anual bajo escenarios SRES A2 (arriba) y B2 (abajo) para Mesoamérica y el Caribe (izq.), Vertiente al Caribe (centro) y Vertiente al Pacífico (der) en horizontes de tiempo 2020 (blanco), 2050 (gris) y 2080 (negro) para los modelos CGCM3T47 (cuadrado), CSIROMk3 (circulo) y HadCM3 (rombos).



Estos resultados utilizando el HadCM3 como referencia resultan similares a los cambios presentados en diversos trabajos (CATHALAC, 2007 y Centella et al. 2012), para los mismos horizontes. Sin embargo, trabajos como el de Centella (2012) indican una débil habilidad para capturar los patrones medios climáticos utilizando los resultados del HadCM3, inclusive a través de downscaling utilizando PRECIS para la Región del Caribe donde las tendencias de temperatura y precipitación no guardan similitud en comparación con otros modelos. Centella (2008) que la poca representación de los patrones regionales atmosféricos en el Caribe, incide en la confianza sobre los resultados de las proyecciones de cambio climático. Los futuros trabajos sobre esta temática deberían considerar ampliar el conocimiento de estos parámetros descritos como parte de la variabilidad interanual del clima, particularmente sobre las cuencas que drenan hacia el Caribe y Pacífico a fin de conocer su régimen de lluvias, así como su periodo de estiaje o relativas, y periodos de lluvias máximas. Lo anterior dará mayores elementos para la evaluación y obtención de grados de confianza a los escenarios de clima ante cualquier tipo de escenario de emisiones.

### Modelo CCCMA, escenario A2 y B2:

Las anomalías de precipitación muestran un patrón tanto con aumentos como con déficit en el porcentaje de precipitación anual. Los valores negativos (disminución) de la precipitación en América Central tienden a localizarse principalmente en la vertiente del Caribe, mientras que podrá aumentar en la vertiente del Pacífico. Sobre las Antillas muestra una disminución de la precipitación en toda el área, con excepción de Cuba, que muestra un aumento de precipitación para el periodo de 2050 y 2080.

Bajo el SRES B2, las anomalías de precipitación anual muestran de igual manera un comportamiento bimodal con valores positivos (aumentos) y negativos (disminución). Hacia el periodo del 2020 los resultados indican un aumento de precipitación de hasta de un 25%, para aproximadamente el 80% de la superficie incluyendo América Central y las Antillas. Hacia el 2050 y 2080 los resultados muestran una disminución de la precipitación en América Central principalmente hacia la vertiente del Caribe y un aumento en la vertiente del Pacífico. Sobre las Antillas tanto hacia el 2050 y 2080 se podría esperar un aumento de precipitación principalmente para las Antillas Mayores, mientras que, podría presentarse una disminución en las Antillas Menores.

### Modelo CSIRO Mk3, escenario A2 y B2:

Los resultados del modelo muestran un rango de cambio en el porcentaje de precipitación de entre -25% y 25%. Hacia el 2020 podrían presentarse aumentos de precipitación principalmente hasta 12%, para aproximadamente el 88% de la superficie tanto en América Central como en las Antillas. Para los periodos del 2050 y 2080 se observa disminución de la precipitación en América Central principalmente en Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador y Nicaragua y aumento en el Este de Nicaragua, Costa Rica y Panamá. En las Antillas hacia el 2050 y 2080 los resultados indican un aumento de la precipitación de hasta un 12%. Bajo el SRES B2 las anomalías de precipitación indican que hacia el 2020 habría cambios positivos (aumento) de precipitación principalmente hasta un 12% para aproximadamente el 69% de la superficie tanto en Centroamérica, como las Antillas, y un área de valores negativos (disminuciones) centrados en el Pacífico hacia Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua. Hacia el 2050 los resultados indican cambios negativos (disminución) de la precipitación en América Central principalmente en Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador y la parte Oeste de Nicaragua mientras que podrán presentarse cambios positivos (aumentos) en la parte Este de Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Hacia el 2080 se podrán presentar regiones con valores negativos (disminución) sobre Guatemala, Honduras, El Salvador y la parte Oeste de Nicaragua así como valores positivos (aumento) en la parte Norte de Guatemala, Belice, el Este de Nicaragua, Costa Rica y Panamá. En las Antillas tanto hacia los horizontes de 2050 y 2080 presentarían aumentos de precipitación principalmente hasta 12%.

### Modelo HadCM3, escenario A2 y B2:

De acuerdo a las anomalías de precipitación de este GCM, sus resultados tienden a ser los más extremos en términos de cambios. Por ejemplo, su rango de cambio en las anomalías va de un -50% a un 12% para los periodos de 2020 y 2050, y para el periodo 2080, las anomalías oscilan entre -75% y -12% principalmente. Hacia el 2020 la disminución se acentuaría en más del 90% de la superficie tanto en América Central como en las Antillas, con un mayor porcentaje de déficit en Nicaragua, y solamente en la parte Oeste de Cuba se prevé un leve aumento. Para el periodo del 2050 se espera una disminución de la precipitación hasta -50%, para aproximadamente el 99% de América Central y las Antillas, con un menor porcentaje de déficit en Cuba y la parte Central y Sur de Guatemala. Para el SRES B2 hacia el 2080 podría presentarse valores negativos (disminución) de la precipitación con valores de hasta -75% para aproximadamente para el 99% de América Central y las

Antillas, con un déficit en el porcentaje de precipitación anual mayor a 40% principalmente para Belice, Nicaragua, el Norte de Guatemala, el Este de Honduras, Noreste de Costa Rica, la parte Central de Panamá, y en las Antillas, República Dominicana, Haití y todas las Antillas Menores, con un menor porcentaje de déficit en Cuba y la parte Sur de Guatemala..

#### 4.1.2. Escenarios de las trayectorias de concentración representativas

Sobre las tendencias en el porcentaje de cambio de la precipitación anual utilizando RCP se puede visualizar que la dispersión de los valores es mayor con una tendencia hacia valores alrededor de 0% aunque mayormente negativos (Fig. 7). Por ejemplo, para la región de Mesoamérica

y el Caribe así como la subregión vertiente al Caribe, los resultados de los GCM son muy similares en magnitud y signo del porcentaje cambio. También los valores muestran una consistencia de los resultados de los GCM alrededor de -15% y 10% ante cualquier escenario RCP, así como también una tendencia a que la mayoría de los resultados sean de mayor magnitud hacia el 2080. Particularmente, existe coincidencia entre los modelos MIROC5 y MRI-CGCM3 al mostrar resultados (positivos) hacia el horizonte del 2080, así como también resultan notorios los resultados del modelo NorESM1-M donde consistentemente sus resultados son negativos y acotados en el rango de -5% hasta -35%, siendo los de mayor magnitud hacia el 2070. También se destaca que los modelos GISS-E2-R y HadGEM2-ES son los que muestran sus resultados más conservadores, manteniéndose en un rango de menor magnitud entre valores de -5% y 10%.

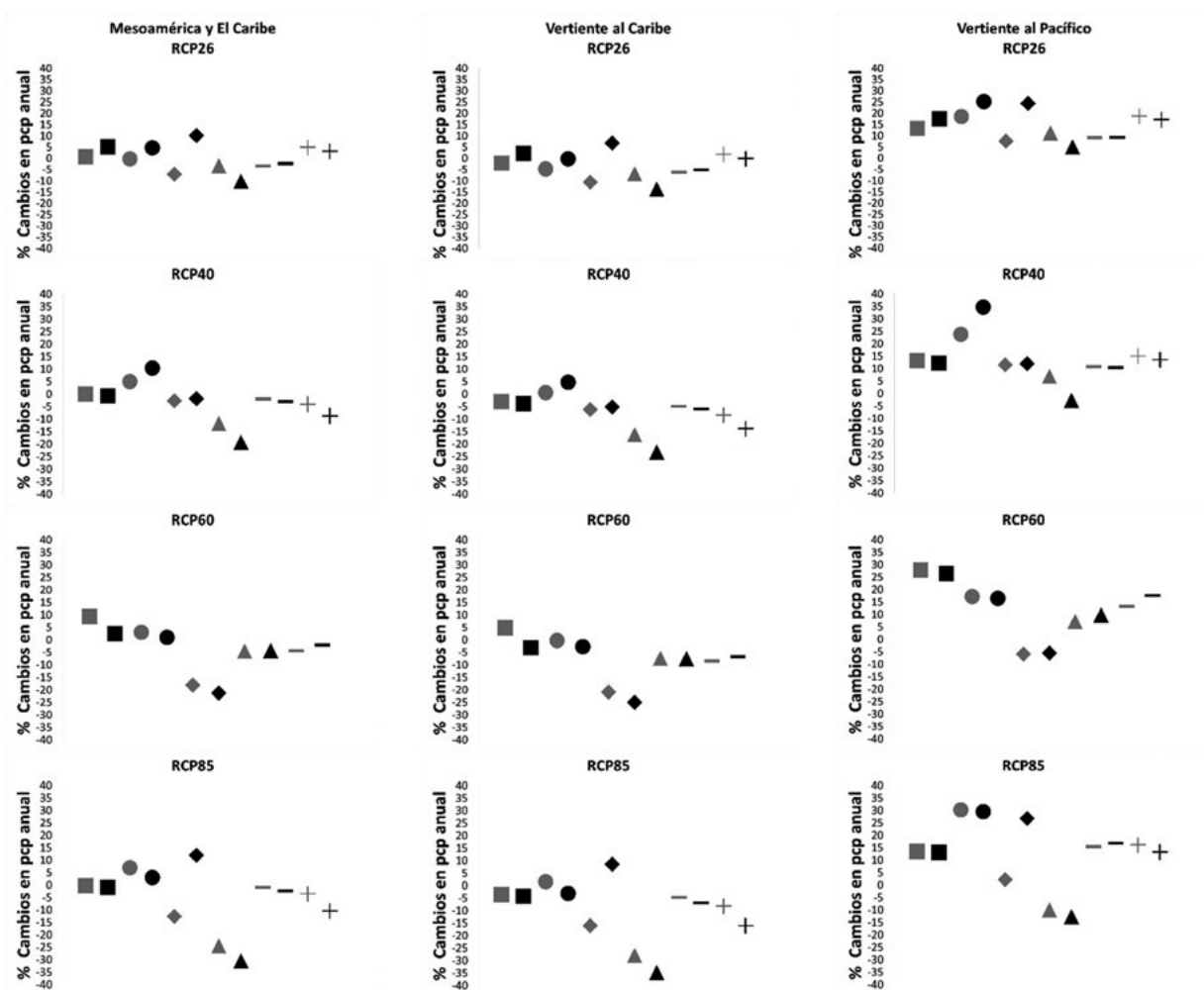


Figura 7. Porcentajes de Cambios en la precipitación anual utilizando escenarios RCP 2.6, RCP 4.0, RCP 6.0 y RCP 8.5 para Mesoamérica y el Caribe (izquierda), Vertiente al Caribe (centro) y Vertiente al Pacífico (derecha) en los horizontes de tiempo 2050 (gris) y 2070 (negro) para los modelos CNRM-CM5 (cuadrado), MIROC5 (circulo), MRI-CGCM3 (rombo), NorESM1-M (triángulo), GISS-E2-R (raya vertical) y HadGEM2-ES (cruz).

Es de mencionarse que aunque no es tan clara la relación, las tendencias de cambio en el porcentaje de precipitación en la mayoría de los resultados hacia el horizonte de 2070 son mayores tanto en magnitud como en su dispersión, particularmente en los RCP 40 y RCP 8.5 donde este último escenario es considerado por el PICC de mayores cambios en las fuerzas de cambio que gobiernan en las condiciones iniciales de los GCM utilizados. Además, de acuerdo al PICC hacia el horizonte del 2070 es cuando las estimaciones sobre la emisión global de los Gases de Efecto Invernadero en la atmósfera podrían presentar los valores de emisión más altos, debido principalmente a su periodo de vida media de permanencia en la atmósfera y su composición química.

Para el caso de la subregión vertiente hacia el Pacífico existe un mayor predominio en las tendencias positivas de porcentaje de cambio en la precipitación e inclusive de mayor magnitud. Con excepción del RCP 85, existe una coherencia en las tendencias de los resultados mayormente positivos y acotándose entre -5% y 35%. Un comportamiento similar en el modelo MIROC5 y MRI-CGCM3 se observa al reflejar el porcentaje de cambio de mayor magnitud y positivos hacia el horizonte del 2080, mientras que los resultados del modelo NorESM1-M mayormente son negativos y acotados en el rango de 5% hasta -15%.

Para la subregión vertiente hacia el Pacífico, el porcentaje de cambio está mayormente centrado en valores positivos entre -10% y 35% para RCP 26, RCP 40 y RCP 60. Este rango de valores se torna de mayor magnitud conforme se incrementa el forzamiento radiativo en los RCP. Para el caso de RCP 8.5 es donde se presentan los valores mayores en magnitud, acotados entre -20% y 30%. En términos de comparación de modelos, es el MIROC5 quien presenta sus resultados mayormente hacia el 2080 con valores más grandes en magnitud y con signo positivo. Por el contrario, el MRI-CGCM3 y el NorESM1-M quienes muestran sus valores de cambios positivos de menor magnitud y con mayor tendencia a ser valores negativos hacia el 2080. Los resultados de los modelos GISS-E2-R y HadGEM2-ES generalmente están centrados entre 0% y 15% mostrando una mínima variabilidad en sus resultados para los distintos escenarios de forzamiento radiativo.

### 4.1.3. Comparaciones entre resultados de los escenarios del reporte especial de escenarios de emisiones vs. las trayectorias de concentración representativas

Las diferencias existentes entre los resultados de los escenarios SRES y RCP son aspectos a considerar ante cualquier análisis. Primero, con los escenarios RCP, se identifican por el forzamiento radioactivo (FR) total para el 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m<sup>2</sup>, representado en cuatro nuevos escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5, estos escenarios contemplan los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI, en comparación con los SRES está subdivididos en los escenarios A1, A2, B1 y B2, estos últimos no contemplan los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendientes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socio-económicas sin restricciones en las emisiones (Fundación Biodiversidad 2013).

También los RCP, según la Fundación Biodiversidad (2013), tienen asociada una base de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes, de concentraciones de gases de efecto invernadero y de uso del suelo hasta el año 2100.

Otra diferencia entre ambos modelos, son los periodos disponibles <sup>5</sup>, para los SRES están disponibles los periodos 2020, 2050 y 2080, y para los RCP los periodos disponibles son del 2050 y 2070, a pesar que corresponden a diferentes periodos se observan ciertas similitudes entre ambos.

En términos generales, se observa un rango de variaciones con respecto al aumento o disminución de la precipitación en todo el área de estudio (es decir, América Central y el Caribe). Por ejemplo, 10 de los 18 escenarios de SRES (55.6%) indican un aumento en la precipitación, mientras que para los RCP 14 de 30 escenarios (46.7%) indican un aumento. De los escenarios de SRES, el 44.4% indican una disminución en la precipitación para las cuencas que drenan hacia el Atlántico, y de los escenarios de RCP el 66.7% indican una disminución para esa misma área. Para las cuencas de América Central que drenan hacia el Océano Pacífico, con los SRES 50% de los escenarios indican un aumento de precipitación, y el 63.3% de los escenarios de RCP.

<sup>5</sup> Por ejemplo, como esta explicado en la sección de la Metodología, para los escenarios SRES, el periodo 2050 implica 2040-2069 (30 años), mientras para los escenarios RCP, el periodo 2050 implica 2041-2060 (20 años).

Se observan similitudes de las anomalías de precipitación entre los modelos NorESM1-M de los RCP, con los modelos HadCM3 de los SRES, en el sentido de que los dos muestran una mayor superficie de área con disminución de precipitación para toda el área de estudio. También se observan similitudes entre los modelos CSIRO-Mk3 que en general muestran aumentos en la precipitación para la mayoría del área de estudio (con excepciones en el escenario A2 para el Pacífico), con el modelo MIROC5 que en general también muestra aumentos en la precipitación para la mayoría del área de estudio (con algunas excepciones).

Es de mencionarse que si bien estos primeros resultados mantienen su importancia relativa, aun es necesario conocer la física de cada uno de los GCM utilizado así como sus habilidades en representar los patrones climáticos regionales característicos para una mayor justificación en sus resultados. En la medida en que se profundicen los estudios mediante el uso de los RCP en la región y se debata sobre las tendencias climáticas futuras regionales, será como se adquirirá mayor confianza en su información y sus aplicaciones en un esquema de decisiones.

### Modelo CNRM-CM5:

El CNRM-CM5 presenta tanto aumento como disminución de la precipitación, pero centrado alrededor del porcentaje de cambio mínimo. Por ejemplo, a nivel de toda el área de estudio, el modelo muestra aumento en la precipitación con los escenarios RCP 2.6 del 2050 y el 2070, y el escenario RCP 4.5 del 2050 (fig.8). Y disminución con los escenarios RCP 4.5 del 2070, y el RCP 8.5 del 2050 y 2070. Solo presentan aumento de precipitación en las cuencas con drenaje hacia el Atlántico el escenario RCP 2.6, a diferencia de los RCP 4.5 y 8.5 muestran principalmente disminución. Para las cuencas con drenaje hacia el Pacífico, todos los RCP, muestra aumentos en la precipitación. También, en general se puede considerar que las anomalías del modelo CNRM-CM5 son mínimas en comparación con la norma histórica (en general menos o alrededor de 1% de diferencia).

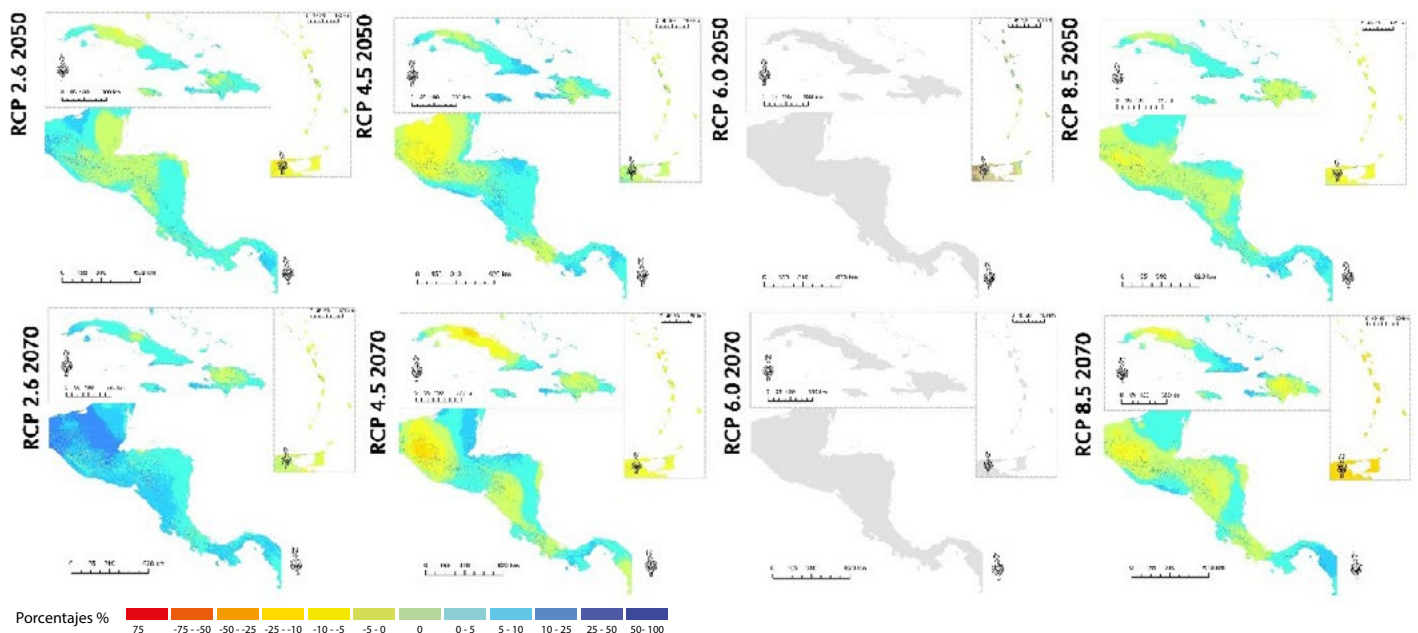


Figura 8. Anomalías de precipitación, en base del modelo CNRM-CM5.

## Modelo MIROC5:

Los resultados del modelo MIROC5 indican mayormente porcentaje de cambios positivos para los horizontes 2050 y 2070. Geográficamente, los porcentaje de cambio muestran una bimodalidad relativamente marcada donde los mayores (aumentos) se distribuyen hacia la parte Sur de América Central, siendo Panamá y Costa Rica las magnitudes más grandes, mientras que el área de disminución estaría hacia los países en la parte Norte donde Guatemala

y Honduras podrían ser los afectados (disminuciones) (Fig. 9). Llama la atención el comportamiento bimodal en La Hispanola donde los posibles aumentos estén en Haití y las disminuciones hacia la República Dominicana. Este comportamiento parece agravarse hacia una mayor intensificación del forzamiento radiativo aunque no es tan claro para el RCP 8.5. El resto de las Islas del Caribe no refleja cambios distintos a disminuciones, al menos a escala regional.

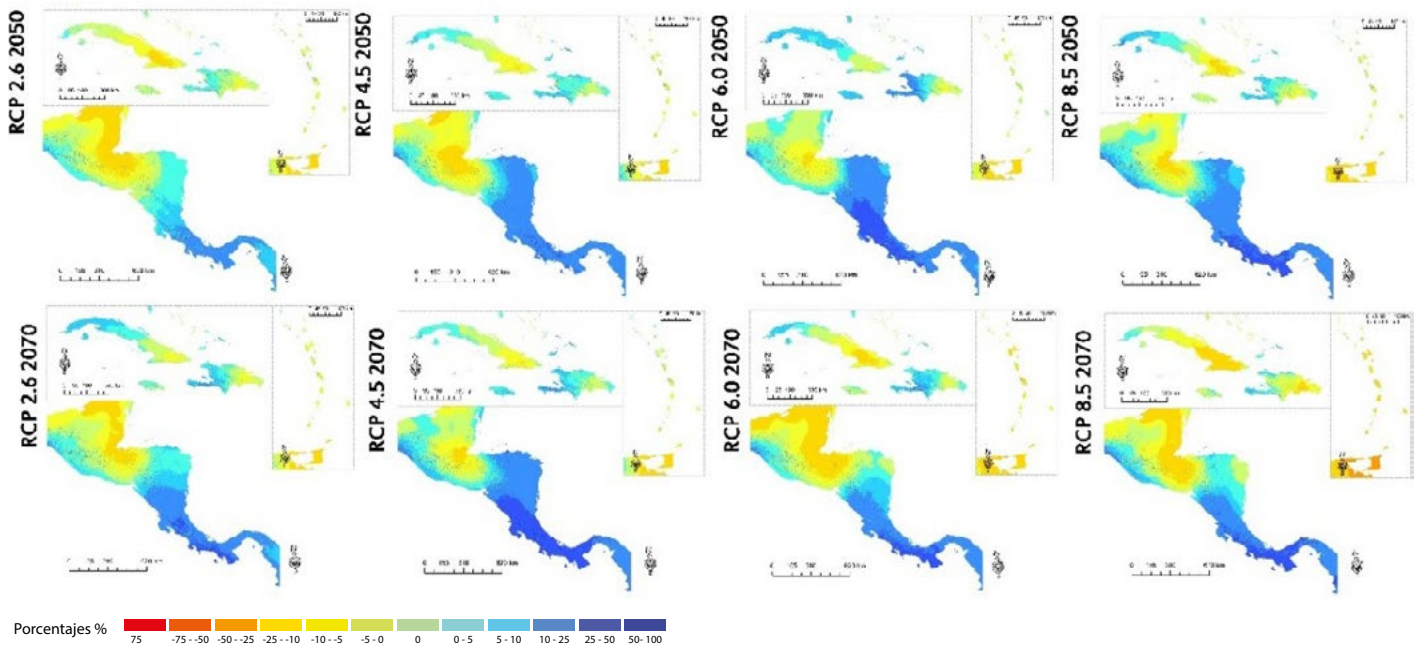


Figura 9. Anomalías de precipitación, en base del modelo MIROC5.

## Modelo MRI-CGCM3:

Similar al Modelo Climático Global CNRM-CM5, el MRI-CGCM3 muestra un comportamiento geográfico no definido con disminuciones y aumentos en el porcentaje de precipitación (Fig. 10). Para los 2050, 3 de los 4 modelos RCP (RCP 2.6, RCP 4.5, y RCP 8.5), MRI-CGCM3 presentan disminución en la precipitación para la mayoría

del área de estudio, mientras que hacia el 2070, los modelos RCP 2.6, 6.0, y 8.5, muestran aumentos en la precipitación para la mayoría del área de estudio. Se destaca que solamente el RCP 4.5, muestra disminución hacia el 2050 y hacia el 2070 sólo para las cuencas con drenaje al Atlántico. En general, Las cuencas con drenaje hacia el Pacífico, muestran una predominancia a aumentos en el porcentaje de precipitación anual.

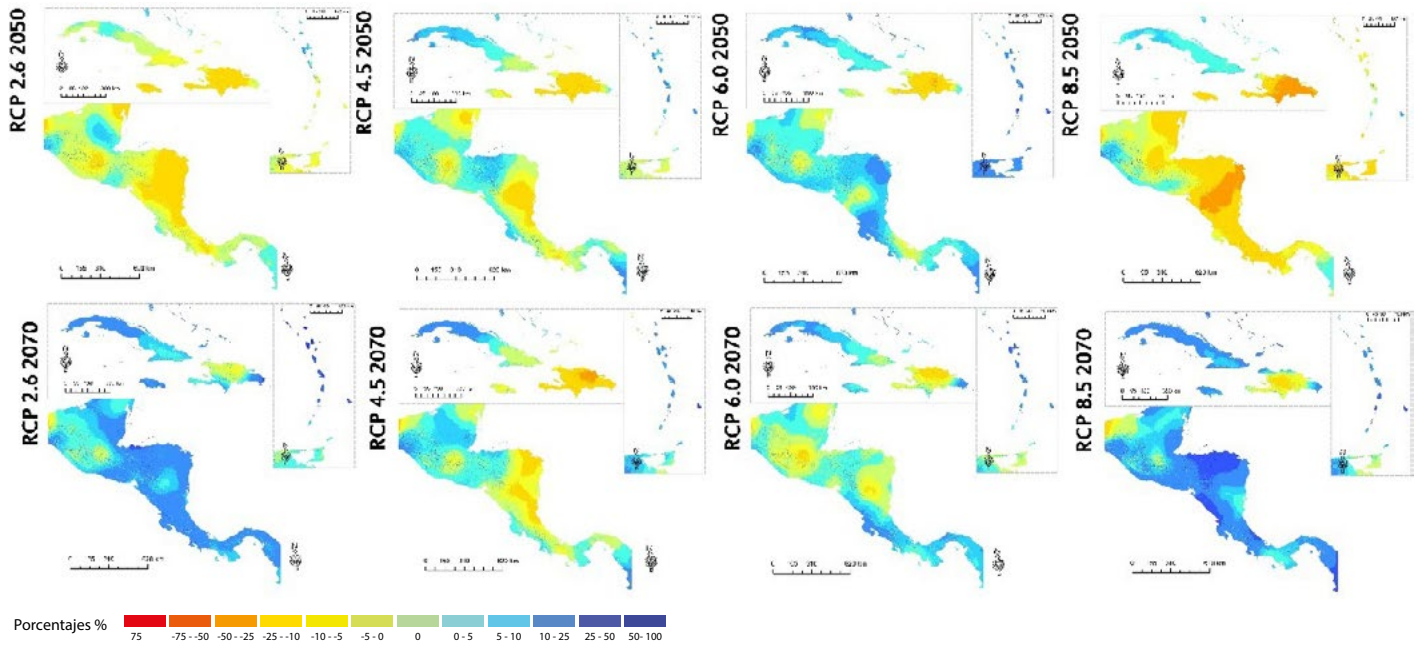


Figura 10. Anomalías de precipitación, en base del modelo MRI-CGCM3.

### Modelo NorESM1-M:

Los resultados generados con el modelo NorESM1-M, muestran una tendencia marcada hacia cambios negativos (disminución) de la precipitación en la mayoría del área de estudio (Fig. 11). Esta tendencia parece agudizarse conforme se intensifica el forzamiento radiativo y hacia el horizonte de tiempo de 2070. Geográficamente las anoma-

lías menos intensas se localizan mayormente hacia la península de Yucatán en México y Panamá, mientras que las magnitudes más amplias están distribuidas en el resto de los territorios. Para el Caso del Caribe, las anomalías parecen mantenerse en valores con magnitudes pequeñas, con excepción del RCP 8.0 donde las condiciones parecen agudizarse de acuerdo a los resultados.

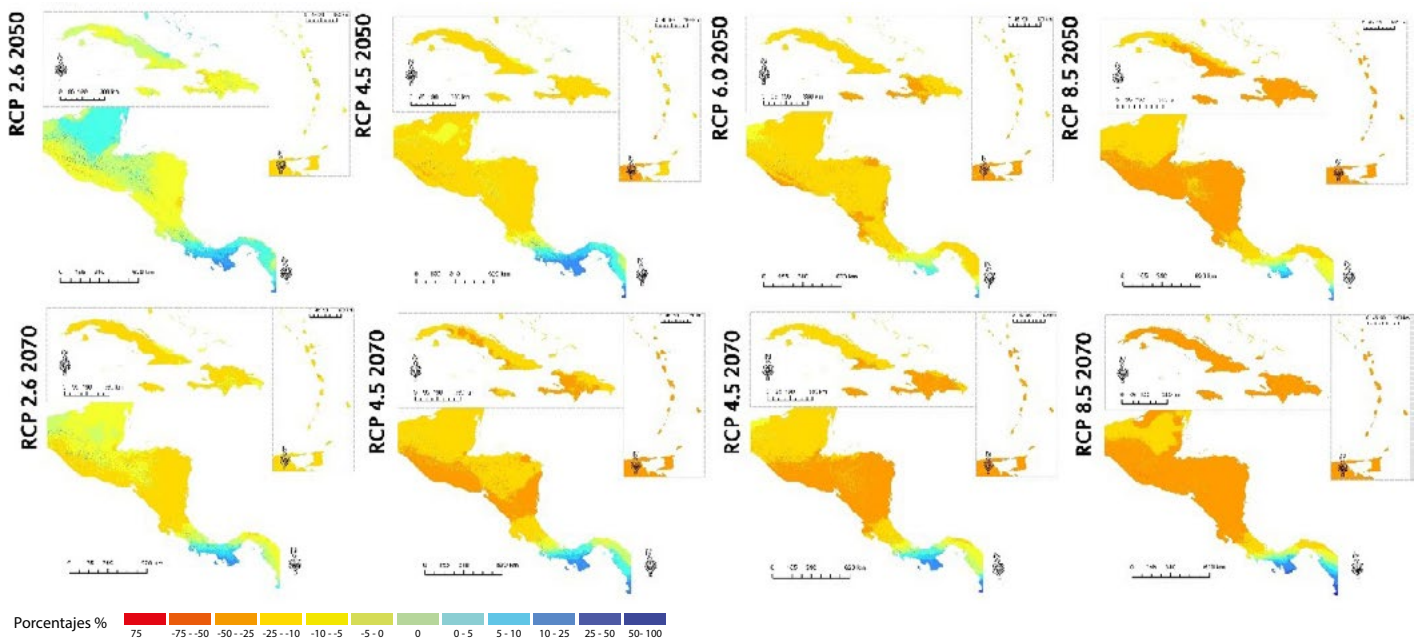


Figura 11. Anomalías de precipitación, en base del modelo NorESM1-M.

## Modelo HAdGEM2-ES:

Los resultados del modelo HAdGEM2-ES muestran en general un patrón de incremento en las anomalías (negativas) conforme se acentúa los valores de forzamiento radiativo (Fig. 12). Para la mayoría de Centro América y el Caribe, mientras que hacia el 2050 bajo RCP 2.6 presenta cambios positivos, las magnitudes hacia el 2070 tienden a disminuir e inclusive luciendo áreas con tendencias negativas, particularmente sobre Honduras, Belice y la Península de Yucatán en México. Este patrón y distribución espacial se agudiza bajo el RCP 8.5 donde se presenta

un incremento en las anomalías (negativas) tanto en las magnitudes como en su distribución espacial, donde sólo panamá y parte de Costa Rica continúan presentando una tendencia al aumento en el porcentaje de precipitación. Particularmente con la excepción del RCP 2.6, el modelo HAdGEM2-ES indica disminución de precipitación en las cuencas con drenaje hacia el Caribe, con un rango de cambios de -4.18% al -13.61%. En todos los RCP del modelo, indica un aumento de precipitación en las cuencas con drenaje hacia el Pacífico, de un rango entre 1.47% al 6.32%.

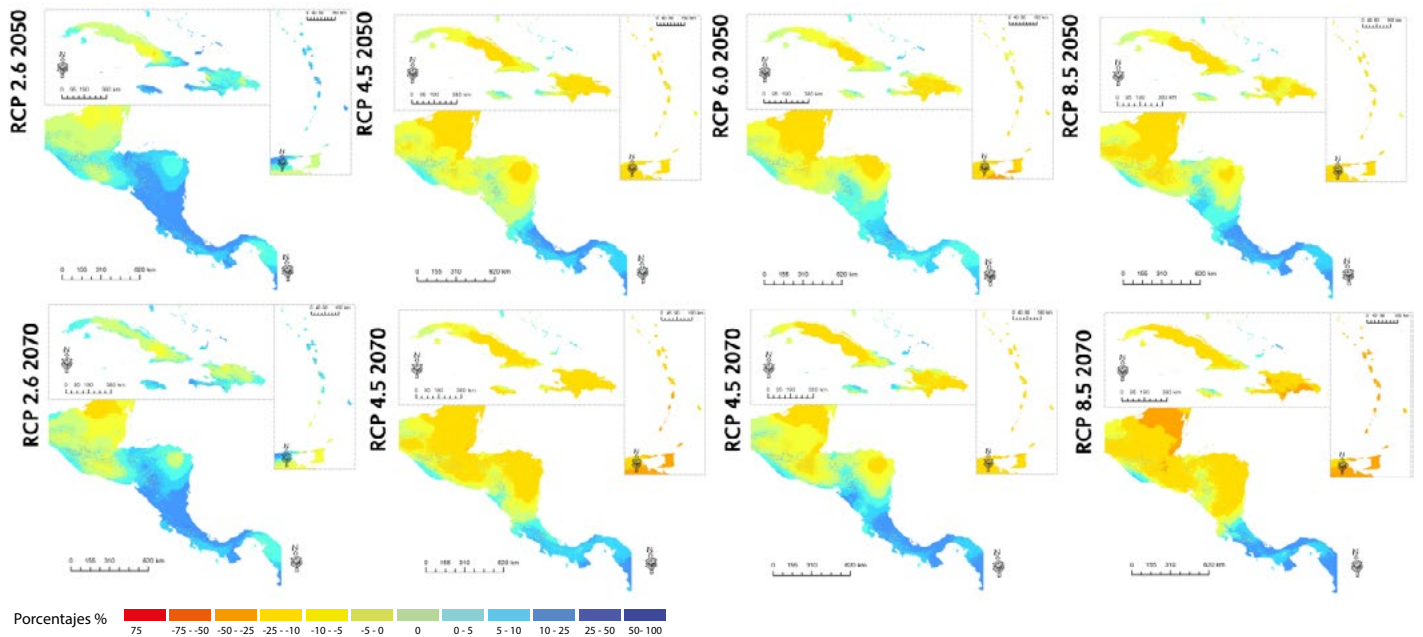


Figura 12. Anomalías de precipitación, en base del modelo HAdGEM2-ES.

## Modelo GISS-E2-R:

Los resultados del modelo GISS-E2-R muestran un patrón bimodal sobre el dominio de estudio, el cual parece acentuarse conforme avanza el horizonte de tiempo y se intensifica el forzamiento radiativo (Fig. 13). Los valores (negativos) están orientados hacia el centro y norte de Centroamérica, acentuándose la anomalía de porcentaje de precipitación sobre El Salvador, Guatemala y parte de Honduras, mientras que para Costa Rica y Panamá tienden

a concentrarse las anomalías con los valores positivos (aumento). Belice también tiende a mostrar mayoritariamente cambios (positivos). Para el Caribe, mientras que bajo el RCP 2.6 muestran valores positivos (aumenta) de porcentaje de cambio en la precipitación, bajo el RCP 8.5 y hacia el 2070 las condiciones mayoritariamente se agravan con valores negativos (disminución). En particular, las cuencas con drenaje hacia el Caribe tienden a variar de -2% hasta -5%, mientras que las cuencas con drenaje hacia el Pacífico varían en menor medida.

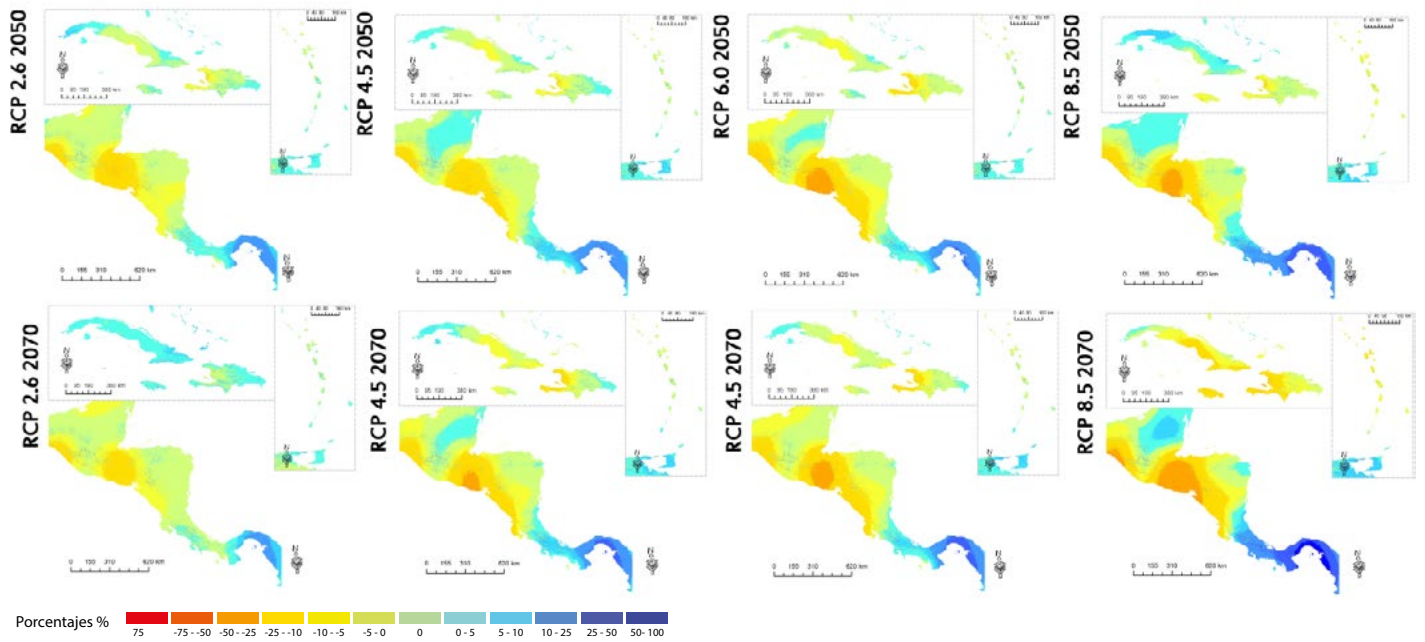


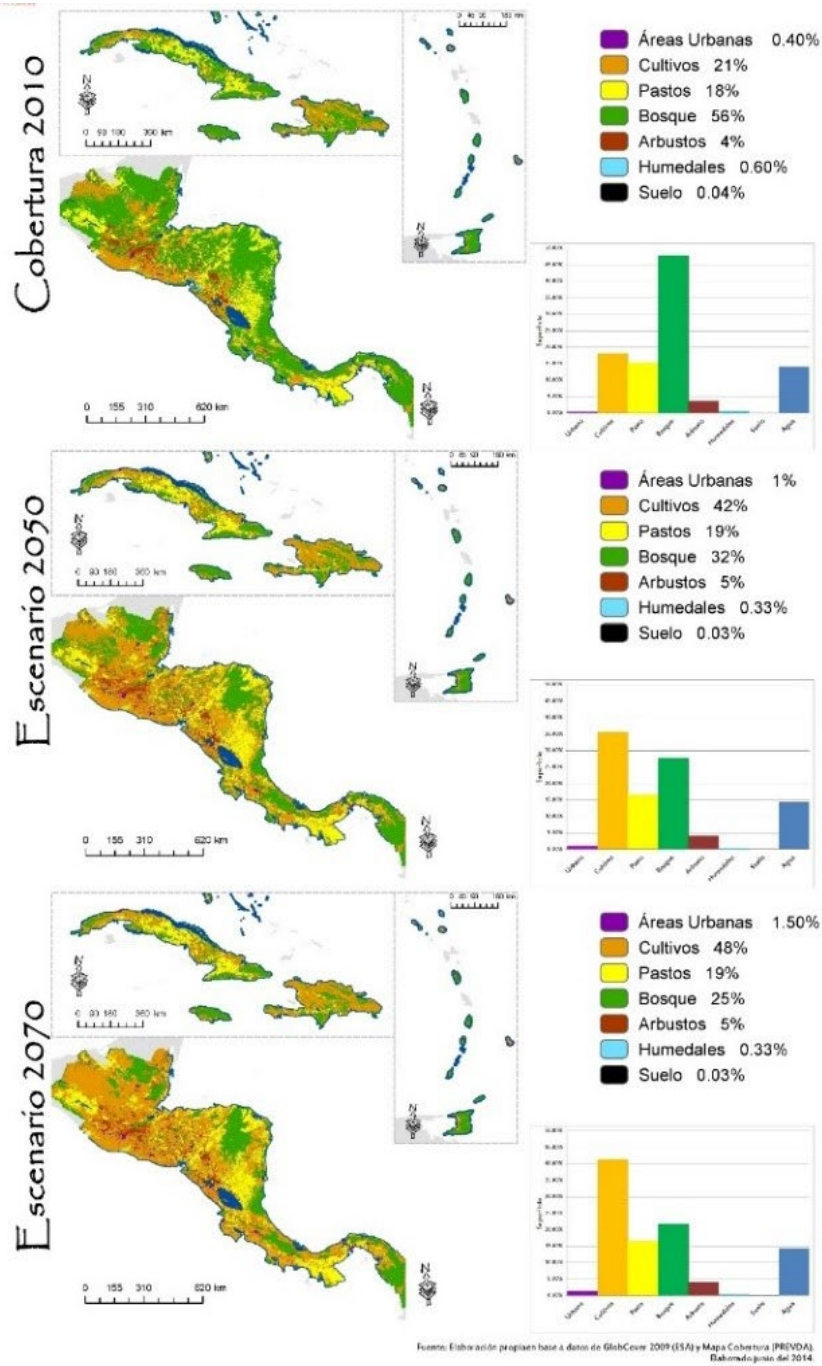
Figura 13. Anomalías de precipitación, en base del modelo GISS-E2-R

## 4.2. Cambio de uso del suelo

La evaluación de los impactos en los sedimentos y escurrimiento por deforestación, consideraron una modelación de escenarios de cambios de uso del suelo, tomando criterios tendenciales de cambios de cobertura y las tasas de deforestación actual. Partiendo de que cada país cuenta con diferentes condiciones y con diferentes tasas de deforestación, así como no considerando la superficie respecto a aguas superficiales, los resultados indican un porcentaje de cambio de un 56% al 2010, 32% al 2050, y hasta un 25% hacia el 2070 (Fig. 14). De acuerdo a estos datos la deforestación entre el 2010 y el 2050 podrá ocurrir una pérdida hasta un 43% de los bosques actuales. Además, entre el 2010 y hacia el 2070 podrá ocurrir una pérdida equivalente al 55% de los bosques actuales en toda la región de análisis. Se destaca que los cambios de cobertura del suelo podrán ocurrir principalmente por políticas o prácticas no planificadas que lleven a una sustitución de áreas boscosas por un aumento de áreas cultivadas y áreas de pastoreo.

Los resultados anteriores permiten inferir que de presentarse esas condiciones tendenciales sobre el cambio de cobertura y uso de la tierra, implicaría modificaciones significativas en los sistemas hidrológicos actuales de la región. Ya que se aumentarían las superficies de áreas impermeables, y con esto, se aumenta el potencial de escurrimiento y disminuye el potencial de infiltración. Sumado a esto, de no tomarse en cuenta las medidas de conservación de suelos, podría implicar un aumento en la erosión de los suelos, aumentando de esta manera la concentración de sedimentos en los recursos hídricos.





**Figura 14.** Escenario tendencial de cobertura vegetal al a) 2010, b) 2050 y c) 2070, a partir del cambio de uso del suelo en América Central y el Caribe.

Con los resultados ya presentados, así como los cambios probables por ocurrir en materia de cambio del uso del suelo es muy probable que las condiciones presentes puedan cambiar significativamente. Aparte de los cambios en el porcentaje de la precipitación anual, los elementos como los tipos de suelo, pendientes y cobertura del suelo, son factores fundamentales que determinan la cantidad de escorrentía y sedimentos.

De acuerdo a Ongley (1996), los datos de suelos de SOTERLAC (FAO) el área de estudio (Tabla 4), predomina los tipos de suelo del grupo hidrológico D, con un 53% de superficie, y del grupo hidrológico C, con un 32%. En menor porcentaje están los suelos del grupo hidrológico B, con un 14% de superficie, y grupo hidrológico A con 2%.

**Tabla 4.** Tipos de suelos clasificados por los grupos hidrológicos, y por superficie de área que cubren en América Central y el Caribe. Fuente: Adaptado de Ongley, E. (1996) y a partir de datos de suelos de SOTERLAC (FAO).

Grupo Hidrológico	Potencial de escorrentía	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Suelos Típicos	Porcentaje Área de estudio
A	Bajo	Alta	Arenas y grava excesivamente drenadas.	2.09%
B	Moderado	Moderada	Textura medias.	13.76%
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo.	31.37%
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactadas o suelos poco profundos sobre capas impermeables.	52.78%

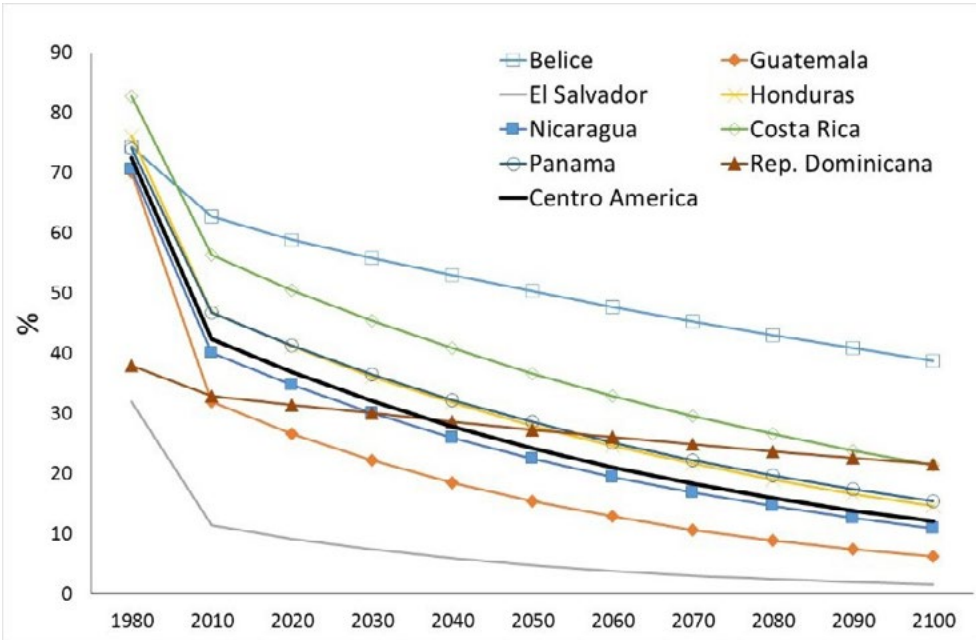
Esto implica que aproximadamente el 85% del área de estudio posee un potencial de escorrentía entre elevado y medio, y un potencial de infiltración de muy lento a lento en condiciones de humedad del suelo. De esta manera, cuando un bosque esta sobre un suelo con poca infiltración (es decir, con un grupo hidrológico como C o D), el potencial para escorrentía es alto comparado con bosques sobre suelos con alta o moderada infiltración (grupos hidrológicos A y B), donde a pesar de estar cubiertos con bosque el escurrimiento potencial del área es alto, y aún más alto el potencial de escurrimiento si se trata de áreas cultivadas. Entonces, en general, los suelos en América Central y el Caribe, son susceptibles en la sostenibilidad del agua subterránea, por su escasa capacidad de infiltración y su alto potencial de escurrimiento, así también su alto potencial a producción de sedimentos por erosión. Tanto el tipo de suelo como la pendiente no tienen mayores variaciones en el tiempo, sin embargo los factores que se consideran que van a variar de manera significativa en el futuro son la cobertura del suelo y la precipitación.

Con respecto a la cobertura del suelo (Tabla 5), para este estudio solo se tomó en cuenta una condición base para los tres periodos evaluados 2020, 2050 y 2080, para identificar las implicaciones de las variaciones climáticas por la precipitación en la cantidad de producción de escorrentía y sedimentos.

De acuerdo a la información geográfica de GlobCover (2009), se estima que tanto en América Central como en las Antillas el bosque un 42% del total de la superficie, seguido de áreas cultivadas con 27%, 21% con pastos, 5% con arbustos, 3% con cuerpos de agua, 1% con humedales, y menos del 1% en áreas urbanas o suelo descubierto (0.04%). De esta manera, de acuerdo a esta evaluación de escenario tendencial, América Central podría quedar con solo 12.1% de cobertura boscosa al final de este siglo (Fig. 15).

**Tabla 5.** Distribución de cobertura de suelo (%) y curva número (CN) por grupo para toda el área de América Central y el Caribe. El gráfico (barra en gris) de la izquierda es indicativo del porcentaje de cobertura total. Fuente: Adaptada de NOAA (2008).

Clases CCAP	Grupo A		Grupo B		Grupo C		Grupo D		% de Cobertura				
	%	CN	%	CN	%	CN	%	CN	0	10	20	30	40
Áreas urbanas	0.01	61	0.13	75	0.07	83	0.22	87	[Barra de cobertura total]				
Áreas cultivadas	0.87	67	3.43	78	7.79	85	14.62	89	[Barra de cobertura total]				
Pastos	0.20	30	2.70	61	7.08	71	10.72	78	[Barra de cobertura total]				
Bosque	0.83	30	5.02	55	14.29	70	22.31	77	[Barra de cobertura total]				
Arbustos	0.07	30	1.53	48	1.31	65	2.35	73	[Barra de cobertura total]				
Humedales	0.06	0	0.27	0	0.24	0	0.40	0	[Barra de cobertura total]				
Suelo	0.00	77	0.02	86	0.01	91	0.01	94	[Barra de cobertura total]				
Agua	0.04	0	0.67	0	0.58	0	2.14	0	[Barra de cobertura total]				
<b>Total de Área</b>	<b>2.00</b>		<b>14.00</b>		<b>31.00</b>		<b>53.00</b>		[Barra de cobertura total]				



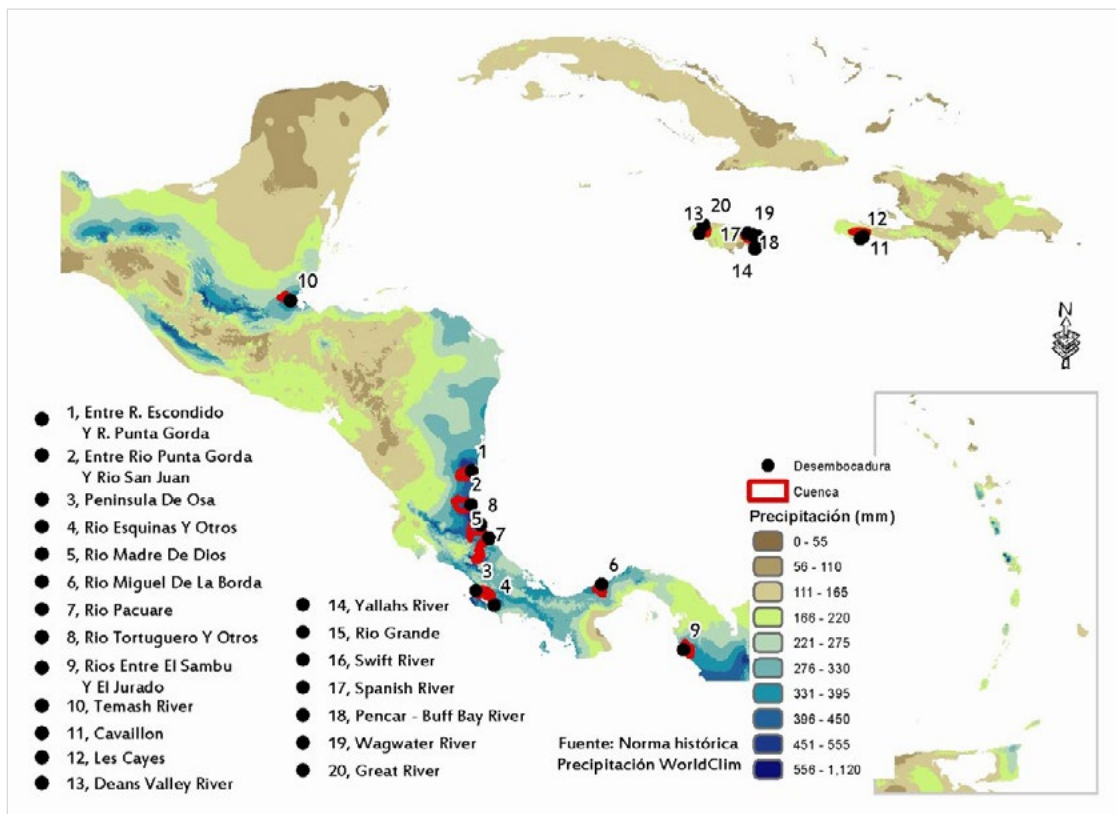
**Figura 15.** Tendencia de cambios en la cobertura boscosa (%) en Centro América y la República Dominicana. Periodo: 1980-2100.

### 4.3. Cuencas hidrográficas susceptibles por cambios en la cantidad de precipitación

Las cuencas hidrográficas para la región del Caribe y las Antillas que superan los 2,000 milímetros anuales y que poseen mayor densidad poblacional, son las de mayor interés para el presente estudio. Así, en el dominio de interés se identificaron tres cuencas que cuentan con una mayor densidad de población mayor a 100 habitantes por kilómetro cuadrado, siendo Pencar-BuffBay River (Jamaica) con 100 hab/km<sup>2</sup>, Cavaillon (Haití) con 206 hab/km<sup>2</sup> y Les Cayes (Haití) con 447 hab/km<sup>2</sup> (Fig. 16).

Ampliando el rango a diez cuencas, de acuerdo a los escenarios A2 y B2 para el 2020, 2050 y 2080, los resultados

indicarían aumentos en los porcentajes de precipitación principalmente con los modelos CSIRO y CCCMA, solamente en 2020 el escenario A2 de CCCMA muestra disminución para la mayoría de las cuencas hasta un -7%. A diferencia de los escenarios A2 y B2 del modelo climático HadCM3, para los periodos 2020, 2050 y 2080 los resultados indican una disminución en los porcentajes de precipitación para la mayoría de las cuencas. Hacia el 2020 podrían presentarse un déficit de hasta un -8%, así como hacia el 2050 un déficit de hasta un -20% y hacia el 2080 un mayor déficit hasta un -41%, situación muy agudizada respecto a otros resultados de distintos GCM.



**Figura 16.** Ubicación de las cuencas hidrográficas que presentan la mayor cantidad de precipitación (> a 2000 mm/año) y aquellas que tienen una gran densidad poblacional (> a 100 hab/Km<sup>2</sup>) en comparación con los datos de la norma histórica.

Para la región de Centro América, en la mayoría de las cuencas hidrográficas se supera los 3,500 milímetros anuales. Considerando aquellas que inclusive sobrepasan los 3500 mm/año así como una densidad poblacional mayor de 50 hab/km<sup>2</sup>, son las cuencas del río Pacuare (Costa Rica) con 57 hab/km<sup>2</sup>, río Tortuguero (Costa Rica) con 62 hab/km<sup>2</sup> y río Esquinas (Costa Rica) con 67 hab/km<sup>2</sup>.

Para el resto de las cuencas de mayor ocurrencia de lluvias, de acuerdo a los escenarios A2 y B2 y hacia los horizontes de 2020, 2050 y 2080 los resultados indican aumentos en los porcentajes de precipitación principalmente con los modelos CSIRO y CCCMA. A diferencia de los escenarios A2 y B2 del modelo climático HadCM3, para los periodos 2020, 2050 y 2080 se prevé disminución en los porcentajes de precipitación para la mayoría de las cuencas, para el 2020 déficit de hasta un -20%, para el 2050 un déficit hasta un -36% y para el 2080 déficit hasta un -50%. De acuerdo a los resultados de este último modelo climático en comparación con las Antillas, se prevé un mayor porcentaje de

déficit en precipitación para América Central que para las Antillas.

Los ejemplos anteriores muestran la magnitud de los cambios que se podrían esperar en términos de precipitación, según los escenarios SRES. Mientras algunas cuencas, como la cuenca del río Tortuguero, río Esquinas, o la Península de Osa (tres cuencas en Costa Rica) tienen poblaciones relativamente altas, otras cuencas como la cuenca del río Temash entre Belice y Guatemala, o la cuenca entre Coclé del Norte y Miguel de la Borda en Panamá, no tienen mucha población. De esa manera, se puede considerar que hay gran variación en términos de los potenciales impactos en las poblaciones (y capacidad adaptativa de la población de esas cuencas). Además se menciona que algunas cuencas como la de Río Tortuguero pueden anticipar una disminución de entre 35% y 40% en precipitación hasta el final del siglo, y eso podría tener el potencial de fuertes impactos en las comunidades viviendo dentro de estas cuencas así como en todo su entorno, servicios y sectores en desarrollo.

### 4.3. Resultados sobre la escorrentía y sedimentos

Los análisis sobre la información para escorrentía y sedimentos tomaron principalmente en consideración dos condiciones respecto a la cobertura boscosa: la primera condición (sin vegetación), la cantidad de cobertura boscosa en el transcurso del tiempo sería de alrededor del 56%; para la segunda condición se partió de tomar en cuenta la dinámica tendencia de pérdida de bosque para la región y asumiendo que la tasa de deforestación será constante. En base a los resultados de la modelación de cobertura, para el periodo del 2050 se contará con el 32% de cobertura boscosa para toda el área de estudio y para el 2070 se contará con solamente con el 25% de cobertura boscosa.

Los resultados de las modelaciones fueron analizados y comparados en base a los datos de la norma histórica, tanto de precipitación, como de la escorrentía y los sedimentos. La norma anual de precipitación promedio para toda el área de estudio es de aproximadamente 19,572 metros cúbicos por hectárea (1.96 metros cúbicos por metro cuadrado), la escorrentía promedio anual es de 4,444 metros cúbicos por hectárea (0.44 metros cúbicos por metro cuadrado), y el coeficiente de escorrentía promedio de 23% (del 100% de precipitación, el 23% es escorrentía superficial) anual. Y de acuerdo a los resultados de la modelación con datos de la norma histórica, la cantidad de sedimentos promedio para toda el área de estudio es de 1,361 metros cúbicos por

hectárea (0.14 metros cúbicos por metro cuadrado).

En cuanto a la proporción de escorrentía y sedimentos, de acuerdo a los datos con la norma histórica hay una relación de 1:0.31, es decir por cada metro cubico de escorrentía hay 0.31 metros cúbicos de sedimentos, por metro cuadrado, anualmente.

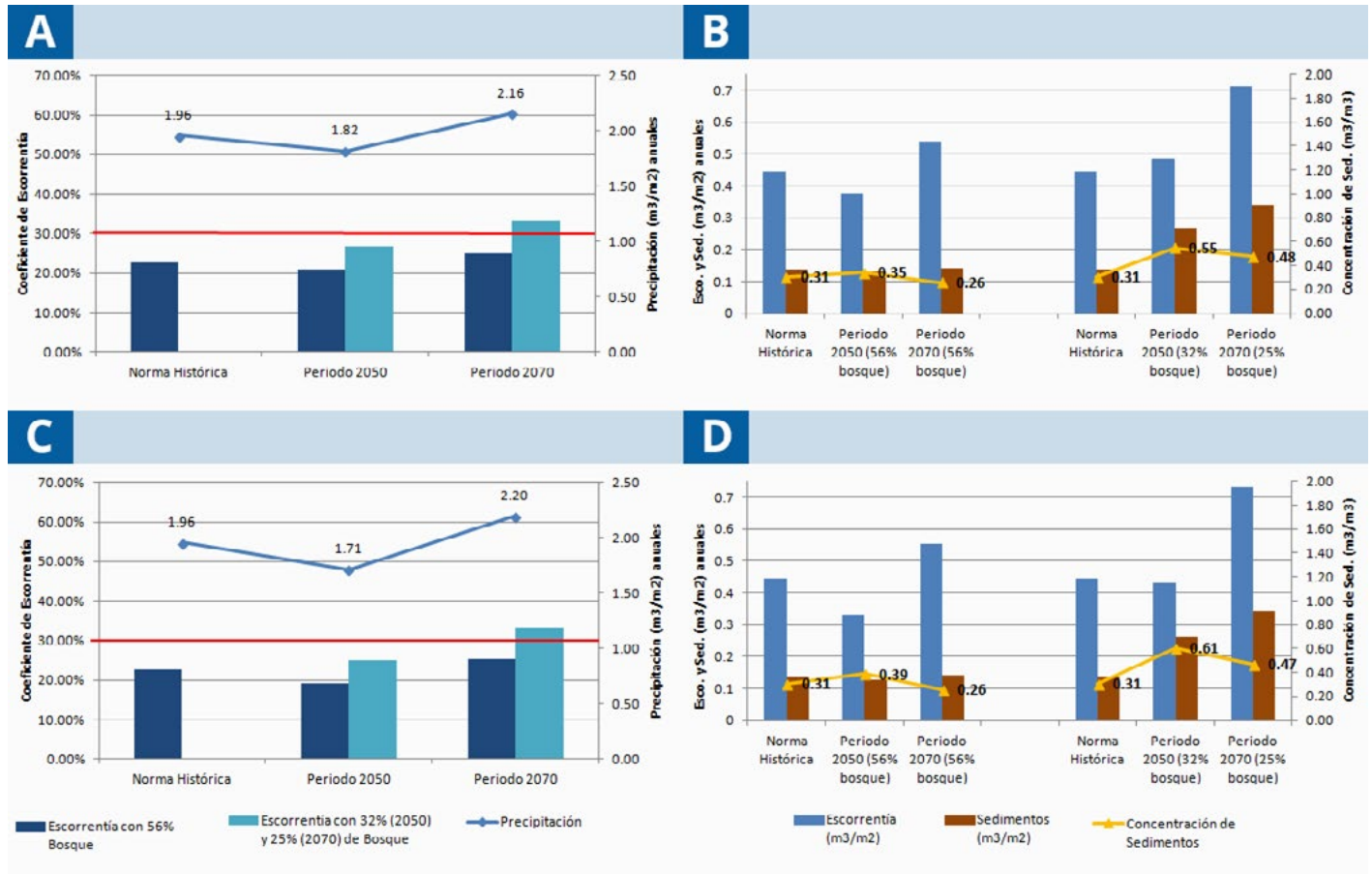
Considerando los resultados mostrados por el GCM MRI-CGCM3 sobre el porcentaje de cambios en la precipitación anual bajo un escenario de RCP 2.6, donde las anomalías de precipitación anual hacia el 2050 se han estimado en 1.82 m3/m2 equivalentes a una disminución del -6.95%; y hacia el 2070 un aumento de 10.2%, por lo que los resultados obtenidos (Fig. 17) se muestran como:

Para RCP 2.6 con el 56% de cobertura boscosa, la cantidad de escorrentía en comparación con la escorrentía de la norma histórica, y coeficiente de escorrentía correspondiente a cada periodo y escenario, hacia el 2050 se presentaría un -15% (disminución) en la escorrentía, con un coeficiente de escorrentía de 21% y una disminución de -4% de sedimentos; hacia el 2070, los resultados indican un 22% (aumento) en la escorrentía, con un coeficiente de escorrentía de 25% y un 4% de sedimentos. Esto es, en términos de la proporción entre escorrentía y sedimentos, los resultados indican que hacia el 2050, por cada m3 de

escorrentía implica 0.35m<sup>3</sup> de sedimento, mientras que hacia el 2070, por cada m<sup>3</sup> de escorrentía, 0.26 m<sup>3</sup> de sedimentos.

Del mismo modo, considerando el segundo escenario indicativo de 32% (2050) y 25% (2070) de cobertura boscosa, hacia el 2050 los resultados indican un 9% (aumento) en la escorrentía, con un coeficiente de escorrentía de 27% y un

aumento sustancial de 96% de sedimentos, mientras que para el 2070 se podría presentar un aumento en la escorrentía de hasta un 60%, con un coeficiente de escorrentía de 33% con un aumento de hasta 150% en los sedimentos. En términos de la proporción entre escorrentía y sedimentos hacia el 2050 por cada m<sup>3</sup> de escorrentía implica 0.55 m<sup>3</sup> de sedimento, mientras que hacia el 2070, por cada m<sup>3</sup> de escorrentía, 0.48 m<sup>3</sup> de sedimentos.



**Figura 17.** Comparación (gráficas a y c) entre la precipitación (línea azul) y escorrentía en la región de Mesoamérica y el Caribe hacia 2050 (barra en azul oscuro, bajo el escenario sin cambio en la vegetación) y hacia el 2070 (barra en azul claro, bajo el escenario de cambios constantes en la vegetación); y (b y d) comparación entre la escorrentía (barra azul) y sedimentos (barra marrón). Estas comparaciones utilizaron los resultados de la precipitación anual del MRI-CGCM3 bajo el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5.

Para RCP 8.5 se parte hacia el 2050, donde la precipitación sería de 1.71 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, que equivale a una disminución de -12% y cambios de cobertura boscosa del 56%, los resultados indican que habría cambios en la escorrentía en un -26% (disminución) presentándose un coeficiente de escorrentía de 19% y disminuciones de -6% en sedimentos; mientras que hacia el 2070, se presentarían cambios de 25%, con un coeficiente de escorrentía de 25% con disminuciones de 5% en sedimentos.

En la condición del segundo escenario indicativo de 32% (2050) y 25% (2070) de cobertura boscosa, hacia el 2050 los resultados indicarían un -3% (disminución) en la escorrentía con un coeficiente de 25% más un aumento de 92% de sedimentos, mientras que hacia el 2070 ambos valores se presentarían como 65% (aumento) y 33%, respectivamente con un aumento significativo de 153% de sedimentos.

Es de mencionar que de acuerdo a lo establecido por el grupo de trabajo sobre impactos y adaptación al cambio climático del PICC en el 4AR (PICC, 2007) “en las extensiones en que disminuya la escorrentía podría disminuir el valor de los servicios proporcionados por los recursos hídricos, con un grado de confianza muy alto”.

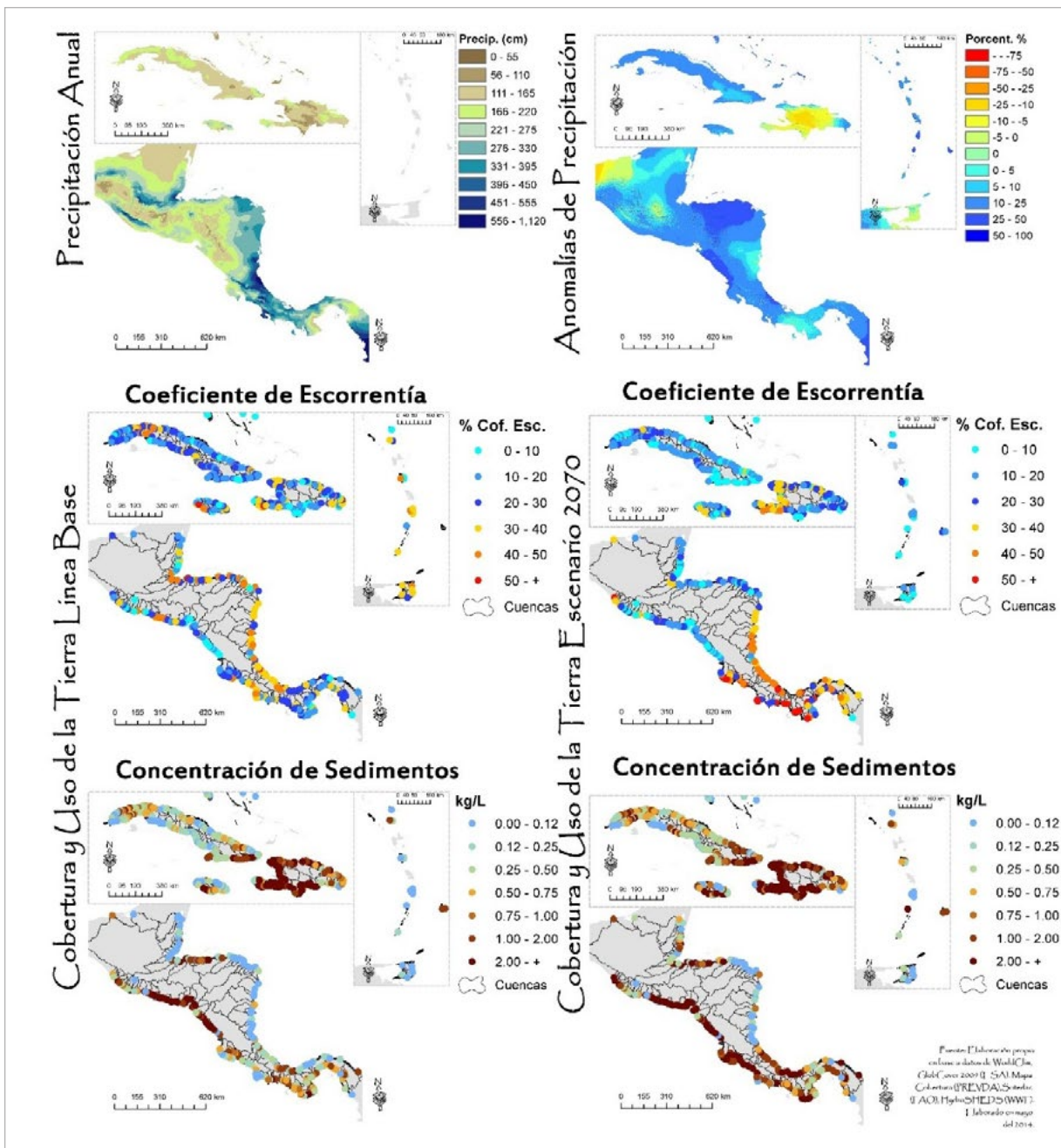
En este análisis, hacia el 2050 al presentar disminuciones en el porcentaje de la precipitación anual –aunque con valores cercanos a la media histórica- y manteniendo un valor constante en la cobertura boscosa, es posible tener valores relativamente menores en escorrentía, significando muy probablemente cambios en el balance hídrico indicativos de afectación en la disponibilidad de agua para su consumo, afectando la vulnerabilidad de los sectores de desarrollo que dependen en gran medida del valor del recurso hídrico. Por el contrario, bajo un escenario agravado hacia el 2070, con aumentos en la precipitación anual en un 10% y una reducción sustancial de la cobertura boscosa, los resultados arrojados serían de una escorrentía aún más incrementada permitiendo inferir que, si bien podría indicarnos una mayor disponibilidad de agua para consumo, también podría relacionarse con mayores afectaciones por deslizamientos, deslaves y aumento en los caudales que facilitarían la erosión. Lo anterior, contrasta con los altos valores de sedimentación estimados en la desembocadura de las cuencas analizadas en el área de estudio.

Es de notar que también el informe del PICC, (2007) indica que en ciertas áreas, los impactos benéficos de una abundante escorrentía anual estarían probablemente atenuados por los efectos negativos tales como: una mayor variabilidad de las precipitaciones, una alteración estacional de la escorrentía sobre el abastecimiento y calidad del agua así como por un mayor riesgo de crecidas.

En términos de la distribución de los cambios en la escorrentía (Fig. 18) es de mencionarse aquellas cuencas hidrográficas más afectada por aumentos o disminuciones en precipitación con base de los escenarios más drásticos. Por ejemplo, [considerando los 10 casos más extremos de disminución/aumento de la precipitación y basados solo en los resultados del GCM MRI-CGCM3 bajo RCP 8.5 para la vertiente del Caribe, con un potencial aumento en la precipitación anual podrá generar una gran concentración de sedimentación principalmente en 6 cuencas de Jamaica y 4 en la República Dominicana y Haití. Estos resultados podrían asociarse a un aumento en las actividades de tormentas y huracanes que tenderían a aumentar las probabilidades de lluvias e inclusive mayores eventos hidrometeorológicos extremos.](#)

Por el contrario, aquellas cuencas que podrían presentar disminuciones drásticas en el porcentaje de la precipitación anual, 7 de las 10 cuencas estarían en Jamaica, y las restantes en Haití y la República Dominicana. Aunque no es claro, este resultado podría relacionarse con una mayor variabilidad climática en la región de las Antillas, particularmente el comportamiento de la ocurrencia de tormentas y huracanes y su aporte a la disponibilidad de agua para su consumo. Futuros estudios podrán apuntar hacia la respuesta de dicho planteamiento.

Para el caso de América Central, las cuencas que muestran una mayor tendencia al aumento en la concentración de sedimentos corresponde en general a las áreas de aumento de precipitación localizándose: tres en Panamá, dos en Belice, dos en Costa Rica, dos en Nicaragua, y una en El Salvador, mientras que disminución en la precipitación y concentración de sedimentos, de acuerdo al escenario RCP 8.5 del modelo NorESM1-M, 5 las cuencas más afectadas están ubicados en Belice, mientras cuatro están en Nicaragua, y una en Honduras.



**Figura 18.** Escorrentía y concentración de sedimentos considerando los resultados de cambios en la precipitación del GCM MRI-CGCM3 bajo RCP 8.5 hacia 2070 del modelo.



## 5. Conclusiones

Este informe se ha enfocado en los potenciales cambios en los recursos hídricos en América Central y el Caribe insular, debido a la perspectiva del cambio climático según los escenarios conocidos como SRES y RCP utilizados ampliamente para los informes de evaluación del IPCC. Contemplando una gran cantidad de cuencas hidrográficas en Centroamérica y el Caribe, el informe se enfoca en potenciales cambios en tres parámetros relacionados con el ciclo hidrológico: la lluvia, la escorrentía, y los sedimentos (erosión) para brindar un panorama hidrológico general de sus condiciones a partir de los escenarios de clima futuro. Después de las distintas aproximaciones metodológicas utilizadas así como de la consideración de resultados de estudios complementarios, las conclusiones de este trabajo son:

Los resultados de los Modelos SRES muestran coherencia en los resultados sobre la precipitación, aunque con valores sesgados hacia condiciones extremas: basados en los resultados de los experimentos con SRES bajo el escenario A2 y B2, los resultados de CGCM3T47 y CSIROmk3 muestran una mayor coherencia en los resultados indicando porcentaje de cambios centrados alrededor de 0% de cambios y mayormente negativos para cualquier horizonte de tiempo de análisis. Sin embargo, el HadCM3, muestra poca coherencia en sus resultados donde sus valores son mayormente tendencias negativas y con magnitudes considerablemente notorias. Lo anterior es coherente con los hallazgos de trabajos similares que también indican poca habilidad del GCM para representar adecuadamente los mecanismos dinámicos de la atmósfera que ayudan a establecer el perfil climático regional.

Existe una tendencia mayoritaria en los resultados de Modelos de Circulación Global bajo RCP que indican cambios negativos futuros en el porcentaje de precipitación promedio anual: De acuerdo a los resultados de los Modelos Globales RCP bajo distintos escenarios, la mayoría de los cambios en toda la región de Centroamérica y el Caribe indican valores negativos hacia el 2050, en un rango de cambios de entre -15% a -20%, mientras que hacia el 2070 el rango de valores parece incrementarse.

Las cuencas hidrográficas que vierten hacia el Caribe podrán experimentar cambios positivos cercanos a la media histórica aunque mayormente negativos en un rango de valores de entre -15% y 15%, e inclusive llegando a valores de cambios negativos tan extremos como -40% en la precipitación anual. Para las cuencas hidrográficas vertientes hacia el Pacífico, los cambios en la precipitación

mayormente indican valores cercanos a la media histórica o valores positivos en un rango de entre -10 a 20%.

Las variaciones en la precipitación anual y los posibles cambios del uso de suelo a nivel regional podrán afectar los procesos de escorrentía y erosión. Con base en la información generada de los RCP y sus anomalías de precipitación bajo un cambio climático, así como con el escenario tendencial de cobertura boscosa que parte de un 56% en el 2010; un decremento del 32% hacia el 2050, y un 25% hacia el 2070, se indican impactos de consideración sobre los recursos hídricos donde aumentos de 11% en la precipitación anual hacia el 2070 en combinación con el cambio de uso del suelo representarían aumentos de entre aproximadamente 23% al 34% en la escorrentía. En contraste, una disminución de precipitación de hasta un 31% aproximadamente, podría significar un cambio negativo de tan sólo 0.3% en la escorrentía. Lo anterior, es posible asociarlo a la pérdida potencial en capacidad de infiltración del suelo para ese horizonte de tiempo, donde basados en las tendencias actuales podría estar relacionado a la deforestación.

Con respecto a la erosión, Las variaciones negativas de la precipitación anual en los horizontes de tiempo analizados indican que las cuencas más afectadas podrán estar centradas en Jamaica, Haití, y la República Dominicana, mientras que América Central, estarían en Belice y Nicaragua, principalmente. En contraste, aumentos en el porcentaje de la precipitación anual muestran afectación en las cuencas de Belice, Costa Rica, El Salvador, y Nicaragua, donde la concentración de sedimentos podría aumentar hasta un 1000%.

Es de mencionarse que aun sin considerar los posibles cambios futuros en el porcentaje de la precipitación anual, muy probablemente los impactos negativos podrán ser mayores si se continúa observando las tendencias sobre la deforestación en toda la región. Con los resultados sobre valores altos de concentración de sedimentos, no solo implicaría una menor calidad y cantidad del agua, sino también un aumento en las condiciones propicias para la ocurrencia de deslizamientos e inundaciones. A pesar de obtener menos escorrentía con mayor cantidad de área con cobertura boscosa, se obtendrán mayor cantidad de escorrentía sin sedimentos. También el aumento en la escorrentía podría tener implicaciones significativas en los balances hidrológicos (con relación a la recarga del agua subterránea), así también propiciaría una mayor susceptibilidad a la erosión del suelo.

Finalmente, es de notar que no solo el factor climático es el agente causante y más preponderante en los cambios en la escorrentía y erosión. La situación visualizada en los sitios de estudio y particularmente aquellos mayormente afectada está relacionada con los tipos de suelo y con el uso del suelo. Los países más afectados como Haití y Guatemala son los que reportan más porcentaje de deforestación en sus respectivas sub-regiones. En otras palabras, la presencia de bosques sirve para regular el ciclo hidrológico, y en general para disminuir la escorrentía y la erosión. Adicional a esto, Haití y Guatemala tienen altas tasas de crecimiento poblacional, por lo que al combinarse la problemática de menor cobertura boscosa con cambios en el régimen pluviométrico y sus consecuencias en la escorrentía y erosión, se podrían esperar condiciones de mayor vulnerabilidad.

## 6. Bibliografía

- AMADOR J. A. 1998. A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Top Meteor Oceanogr* 5(2):1-13.
- Aguilar, E., Peterson, T.C., Obando, P.R., Frutos, R., Retana, J.A., Solera, M., Soley, J., García, I.G., Araujo, R.M., Santos, A.R, Valle, V.E., Brunet, M., Aguilar, L., Álvarez, L., Bautista, M., Castañón, C., Herrera, L., Ruano, E., Sinay, J.J., Sánchez, E., Oviedo, G.I.H., Obed, F., Salgado, J.E., Vázquez, J.L., Baca, M., Gutiérrez, M., Centella, C., Espinosa, J., Martínez, D., Olmedo, B., Espinoza, C.E.O., Núñez, R., Haylock, M., Benavides, H. y Mayorga, R. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research* 110. issn: 0148-0227.
- CATHALAC, 2009. Perez, J.B., Cherrington, E.A., Anderson, E.R., Moran, M., Flores, A.I., Trejos, N., y E. Sempris. 2009. The Experience of the Mesoamerican Region in Climate Change Adaptation. in: Sepulveda, C.J. & M. Ibrahim (Eds.) "Policies and Incentive Systems for the Growth and Adoption of Agricultural Practices: A Measure of Climate Change Adaptation in Central America." CATIE / UNEP / CATHALAC / UNCCD. CATIE Technical Series No. 377. Turrialba, Costa Rica. ISBN 978-9977-57-485-1. 272 pp.
- Centella A, A. Bezanilla y K. Leslie, 2008. A Study of the Uncertainty in Future Caribbean Climate Using the PRECIS Regional Climate Model. Technical Report, Community Caribbean Climate Change Center, Belmopan, 16pp
- COEN, E., 1973. El Folklore costarricense relativo al clima. *Rev. Univ. Costa Rica*, 35, 135-145.
- CHURCH J. A., N. WHITE, R. COLEMAN, K. LAMBECK AND J. MITROVICA, 2004. Estimates of regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period. *Journal of Climatology*. 17, 2609-2625.
- DIJKSHOORN JA, HUTING JRM y TEMPEL P., 2005. Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version 2.0). Report 2005/01, ISRIC - World Soil Information, Wageningen.
- GRAIZBORD, V. M. SF. Capitulo 6. Escenarios de cambio climático para México. En V. M. Rueda, Escenarios de cambio climático y tendencias en la zona del Golfo de México (págs. 571-673). México.
- GWP, 2011. Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica, Hacia una Gestión Integrada, con el apoyo del Programa de Desarrollo de Zonas Fronterizas en América Central (ZONAF), de la Unión Europea (UE) y el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), Tegucigalpa, Honduras.
- HASTENRATH, S., 1967. Rainfall distribution and regime in Central America. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol.*, 15B, 201-241.
- IPCC. 1995. IPCC Second Assessment Climate Change. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Obtenido de IPCC Second Assessment Climate Change. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.: <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>.
- IPCC. 2000. Emissions Scenarios. (U. Cambridge University Press, Ed.) Obtenido de Emissions Scenarios: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions\\_scenarios.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions_scenarios.pdf).

- IPCC. 2001. Glosario de términos del IPCC. Obtenido de Glosario de términos del IPCC: <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>.
- IPCC. 2007. Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis. Obtenido de Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf).
- IPCC, 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp Mitchell, (2003).
- IPCC. 2013. Glosario. Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I. Obtenido de Glosario. Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf). IPCC. SF. Glosario de términos del IPCC. Obtenido de Glosario de términos del IPCC: <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>.
- LANDSEA C.W. 1993. A Climatology of Intense (Major) Atlantic Hurricanes, *Mon. Wea. Review*, Vol. 12, pags. 1703-1713.
- MAGAÑA V., AMADOR JA, MEDINA S., 1999. The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climatology*, 12:1577–1588.
- MAGAÑA, V. 2004. Capítulo 6. Escenarios de cambio climático para México. En V. M. Rueda, Escenarios de cambio climático y tendencias en la zona del Golfo de México (págs. 571-673). México.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA P., A. 2006. Particularización al método de los coeficientes de escorrentía. Empresa Oasificación. Valladolid, España. 26 pp.
- MIKHAILOVA E.A., BRYANT, R.B., SCHWAGER, S.J., SMITH, S.D., 1997. Predicting Rainfall Erosivity in Honduras. *Soil Science Society of American Journal*, Vol 61, pag 273-279.
- MOSIÑO, A. P., y E. GARCÍA, 1966. Evaluación de la Sequía Intraestival en la República Mexicana. Conferencia Regional Latinoamericana, Unión Geofísica Internacional, 3 pp500 – 516, 9-15 agosto. México.
- NAKICENOVIC, N. 2003. IPCC SRES REVISITED: A RESPONSE1. Laxenburg, Austria: Energy & Environment. Obtenido de [http://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF\\_Papers/ipcc-sres-revisited.pdf](http://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/ipcc-sres-revisited.pdf).
- NAKICENOVIC, N. 2003. IPCC SRES REVISITED: A RESPONSE1. Laxenburg, Austria: Energy & Environment. Obtenido de [http://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF\\_Papers/ipcc-sres-revisited.pdf](http://stephenschneider.stanford.edu/Publications/PDF_Papers/ipcc-sres-revisited.pdf).
- NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). 2008. Nonpoint-Source Pollution & Erosion Comparison Tool (N-SPECT): Technical Guide, version 1.5. NOAA/CSC/RPT 08-05. NOAA Coastal Service Center, Charleston, South Carolina. 60 pp.
- NEELIN, J. D., M. MUNNICH, H. SU, J. E. MEYERSON, y D C. E. HOLLOWAY, 2006: Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 103, 6110-6115.
- ONGLEY, E. 1996. Control of water pollution from agriculture FAO irrigation and drainage. Paper 55. Food & Agriculture Organization. Rome. 101 pp.
- PETERSON T. C., M. A. TAYLOR, R. DEMERITTE, D. L. DUNCOMBE, S. BURTON, F. THOMPSON, A. PORTER, M. MEJIA, E. VILLEGAS, R. SEMEXANT FILS, A. KLEIN TANK, A. MARTIS, R. WARNER, A. JOYETTE, W. MILLS, L. ALEXANDER AND B. GLEASON, 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *J. Geophys. Res.*, 107, 4601, doi:10.1029/2002JD002251.

- PNUMA. 2012. Geo 5. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Medio ambiente para el futuro que queremos. Panamá: Novo Art, S.A. Obtenido de [http://www.unep.org/geo/pdfs/geo5/GEO5\\_report\\_full\\_es.pdf](http://www.unep.org/geo/pdfs/geo5/GEO5_report_full_es.pdf).
- ROJAS, R. 2009. Hidrología aplicada al manejo de cuencas. Edición provisional. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 211 pp.
- SINGH B. 1997. Climate changes in the greater and southern Caribbean, *International Journal of Climatology* 17: 10936-1114.
- SPENCE J. M., M. A. TAYLOR AND A. A. CHEN, 2004. The effect of concurrent sea surface temperature anomalies in the tropical Pacific and Atlantic on Caribbean rainfall. *Journal of Climatology*. 24, 1531-1541, doi:10.1002/joc.1068.
- STEPHENSON T. S., A. A. CHEN AND M. A. TAYLOR, 2007. Toward the development of prediction models for the primary Caribbean dry season. *Theor. Appl. Climatol.* 92, 87-101, doi:10.1007/s00704-007-0308-2.
- TAYLOR, M.A., CENTELLA, A., CHARLERY, J., BORRAJERO, I., BENZANILLA, A., CAMPBELL, J., RIVERO, R., STEPHENSON, T.S., WHYTE, F., AND R. WATSON. 2007. Glimpses of the Future: A Briefing from the PRECIS Caribbean Climate Change Project. Caribbean Community Climate Change Centre, Belmopan, Belize. ISBN 978-976-41-0212-2. 24 pp.
- TRENBERTH, K. E., AND D. J. SHEA., 2006. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophys. Research*, Vol. 33, L12704.
- TORRES, B. E. 2010. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALES Y LOCALES A PARTIR DE MODELOS GLOBALES - GUÍA PARA TOMADORES DE DECISIONES. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+para+Tomadores+de+Decisiones.pdf/fa7abe38-43cc-49c8-96a3-f2b5c24ecce3>.
- TORRES, B. E. 2010. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALES Y LOCALES A PARTIR DE MODELOS GLOBALES - GUÍA PARA TOMADORES DE DECISIONES. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+para+Tomadores+de+Decisiones.pdf/fa7abe38-43cc-49c8-96a3-f2b5c24ecce3>.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, SOIL CONSERVATION SERVICE (USDA-NCRS). 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release No. 55. Second Edition. Washington, D.C.
- WANG, C. 2007. Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate, *Clim Dyn.*, 29:411-422
- WILBY, R. L. 2005. Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment, *Hydrol. Processes*, 19, 3201-3219.
- WILBY, R. L., AND I. HARRIS, 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK, *Water Resour. Res.*, 42, W02419.

Como parte del proyecto Seguridad Hídrica y Cambio Climático en la Región de América Central y el Caribe se identificaron las vulnerabilidades presentes y futuras de la oferta del sector hídrico frente al cambio climático; para lo cual se evaluaron los impactos de cambio climático en la disponibilidad del agua superficial de las cuencas hidrográficas, con base en diferentes escenarios de crecimiento poblacional y cambios de uso del suelo y sobre todo, considerando el comportamiento de la vulnerabilidad de los recursos hídricos y las poblaciones humanas en la región de estudio.

Este documento muestra algunos de los resultados encontrados para la región, enfocándose en 1) cómo los patrones de lluvia van a cambiar según los diferentes escenarios de cambio climático, 2) identificar los cambios en los patrones de escorrentía superficial de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático, a nivel superficial, a través de la modelación hidrológica y la modelación espacial, 3) evaluar el cambio de comportamiento de la escorrentía como un componente del balance hídrico, a través de la modelación hidrológica y la modelación espacial, así como 4) identificar condiciones actuales y cambios en el proceso de erosión del suelo de acuerdo a los diferentes escenarios de cambio climático, utilizando la modelación hidrológica y la modelación espacial.

El desarrollo del estudio implicó la modelación hidrológica en combinación con resultados de escenarios de cambio climático adecuados a la subregión de estudio.

**LOS IMPACTOS POTENCIALES  
DEL CAMBIO CLIMÁTICO  
EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE  
AMÉRICA CENTRAL Y EL CARIBE**



**CATHALAC**  
Centro del Agua del Trópico Húmedo  
para América Latina y el Caribe

111 Ciudad del Saber, Clayton  
Ciudad de Panamá, Panamá  
Tel: +507-317-3200  
Fax: +507-317-3299  
[www.cathalac.org](http://www.cathalac.org)