Banco Interamericano de Desarrollo

Riesgo climático y definición de estrategias financieras para su mitigación en el sector agua y saneamiento en ALC

Escenarios climáticos: Efecto del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones

José Rafael Córdoba

División de Agua y Saneamiento

NOTA TÉCNICA Nº
IDB-TN-01902

Abril 2020

Riesgo climático y definición de estrategias financieras para su mitigación en el sector agua y saneamiento en ALC

Escenarios climáticos: Efecto del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones

José Rafael Córdoba

Abril 2020

BID
Banco Interamericano de Desarrollo

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo
Córdoba, José Rafael.
Riesgo climático y definición de estrategias financieras para su mitigación en el sector agua y saneamiento en ALC: escenarios climáticos: efecto del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones / José Rafael Córdoba; editores, Mauro Nalesso, Alejandro Liñayo.
p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1902)
Incluye referencias bibliográficas.
1. Water-supply-Environmental aspects-Latin America. 2. Water-supply-Environmental aspects-Caribbean Area. 3. Climatic changes-Risk management-Latin America. 4. Climatic changes-Risk management-Caribbean Area. 5. Flood damage prevention-Economic aspects-Latin America. 6. Flood damage prevention-Economic aspects-Caribbean Area. 7. Climate change mitigation-Economic aspects-Latin America. 8. Climate change mitigation-Economic aspects-Caribbean Area. I. Nalesso. Mauro, editor. II. Liñayo R., Alejandro, editor. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. IV. Título. V. Serie.
IDB-TN-1902
Códigos JEL: Q25, Q28, Q51, Q54.
Palabras clave: Riesgo climático, agua y saneamiento, escenarios climáticos, inundaciones.

Editores:
Mauro Nalesso
Alejandro Liñayo

http://www.iadb.org

Copyright © 2020 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Riesgo climático y estrategias financieras para su mitigación en el sector agua y saneamiento en ALC

Escenarios climáticos: Efecto del cambio climático sobre el riesgo de inundaciones

BID
Banco Interamericano de Desarrollo

TABLA DE CONTENIDO

I

Índice de figuras 4
Índice de tablas 4
Introducción 5

1

1. Identificación de variables climáticas susceptibles a modificar el riesgo a inundaciones y/o aludes torrenciales 7

2

2. Efecto del cambio climático sobre las variables que pudiesen modificar el riesgo asociado a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales 13

2.1 Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres, IPCC (2012) 14

2.1.1 Introducción 14

2.1.2 Análisis de las observaciones sobre exposición, vulnerabilidad fenómenos climáticos extremos, impactos y pérdidas causadas por desastres 15

2.1.3 Efecto de los escenarios de cambio climático, sobre las variables climáticas que pueden incrementar el riesgo de desastres asociados a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales 17

2.1.4 Efectos del cambio climático sobre la ocurrencia de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, en América Latina y El Caribe 18

2.2 Resumen de los resultados presentados en el quinto informe de evaluación del IPCC (ar5) (IPCC, 2014), relacionados con el efecto del cambio climático sobre las variables que pudiesen modificar el riesgo asociado a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales 22

2.2.1 Escenarios considerados en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) (IPCC, 2013) 22

2.3 Resumen de los resultados presentados en el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5) (IPCC, 2014) 24

TABLA DE CONTENIDO

3

3. Vulnerabilidad de la región Latinoamericana y caribeña ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos 28
3.1 Introducción 29
3.2 Resumen de las principales conclusiones descritas en el estudio de la CAF (2014) 29
3.3 Comparación de las proyecciones de amenazas climáticas extremas y los índices de vulnerabilidad en ALC 32

4

4. Incertidumbres asociadas a las proyecciones del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de eventos climáticos extremos, generadores de desastres de inundación y aludes torrenciales 35

5

5. La brecha entre la ciencia climática y los responsables de la toma de decisiones, respecto al diseño de obras civiles, tomando en consideración el efecto del cambio climático 40

6

6. Resumen de las recomendaciones descritas en la referencia IPCC (2015), para la elaboración del sexto informe de evaluación del panel intergubernamental sobre el cambio climático (AR6) 44

C

Conclusiones 47
Recomendaciones 51
Referencias bibliográficas 52
Anexo 1. Escenarios considerados en el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5) (IPCC, 2013) 56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1
Frecuencia de desastres generados por fenómenos naturales en ALC, 1970-2014 8

FIGURA 2
Identificación de las regiones consideradas en el análisis del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de eventos meteorológicos o climáticos extremos 19

FIGURA 3
Períodos de retorno proyectados de los valores máximos anuales de precipitación diaria, que de acuerdo con la información de finales del siglo xx (1981-2000) tenían un período de retorno de 20 años. Fuente: IPCC (2012) 21

FIGURA 4
Evolución temporal del forzamiento radiativo total (negativo) antropogénico (positivo) y antropogénico (negativo) relativo a la pre-industria (alrededor de 1765) entre 2000 y 2300 para escenarios RCP y sus extensiones (líneas continuas) y escenarios sres (líneas punteadas). Fuente: IPCC (2013) 23

FIGURA 5
Series temporales simuladas, basadas en modelos múltiples de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5), entre 1950 y 2100, correspondientes al cambio anual en la temperatura media global en superficie respecto de 1986-2005 (anomalías). Fuente: IPCC (2013) 24

FIGURA 6
Cambios proyectados, en el período 2081-2100, de la precipitación máxima anual, acumulada en cinco días. Escenario RCP8.5. Fuente: Collins et al (2013) 26

FIGURA 7
Cambio porcentual de la lámina de lluvia diaria máxima anual, en el período 2081-2100 que utilizando los valores observados durante el período1986-2005, se le había estimado un período de retorno de 20 años. Fuente: Collins et al., (2013) 27

FIGURA 8
Cambios proyectados, en el período 2081-2100. valor del período de retorno que tendría la lámina de lluvia diaria máxima anual, con 20 años de período de retorno según los datos de 1986-2005. Fuente: Collins et al., (2013) 27

FIGURA 9
Índice de vulnerabilidad al cambio climático 2014. Fuente: CAF (2014) 31

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1
Índice de vulnerabilidad al cambio climático, año 2014 30

INTRODUCCIÓN

La identificación de los impactos del cambio climático y su incorporación a los procesos de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura es un elemento clave para una mayor resiliencia (IADB, 2015). La evidencia indica que la consideración de los impactos del cambio climático en la construcción o reconstrucción de infraestructura reduce su vulnerabilidad e incrementa su vida útil, con costos adicionales que son generalmente inferiores a los costos necesarios para reparar o reconstruir (ADB, 2013a and 2013b).

Chisari and Galiani (2010) recomiendan medidas tipo costo-beneficio para reducir el riesgo climático en el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe (ALC), incluyendo sistemas de alerta temprana para eventos climáticos extremos, o normas para edificaciones e infraestructuras para mejorar la eficiencia en el uso de agua. Pero resaltan la falta de investigaciones sobre posibles acciones con suficiente información sobre los costos relacionados con las diferentes opciones de adaptación, considerando los diferentes niveles de riesgo y los beneficios para los individuos y para la sociedad.

Estimaciones generales del costo económico del cambio climáticos en ALC varían considerablemente. Algunos estudios estiman el daño o pérdida anual de infraestructura, tierra y ecosistemas en costo monetario total (Toba 2009, Curry et al. 2009), otros lo calculan en términos de pérdida de PIB (Dasgupta et al. 2007), y otros en términos de daño físico como km de vías perdidos, etc. (CEPAL 2011). Específicamente para estimar impacto del cambio climático y los costos relacionados para el sector de agua y saneamiento se tiene muy poca información disponible. Algunos operadores en ALC han desarrollado un esquema para inversiones relacionadas con protección climática (protección de fuentes de agua e infraestructura relacionada). Pero en líneas generales se ha prestado poca atención a sistematizar el análisis de las necesidades y del costo relacionado a la adaptación climática del sector.

El objetivo de este estudio fue, en primer lugar, el de definir el significado de riesgo climático y financiación climática para el sector de agua y saneamiento en ALC. Dicha definición se enfocó en 3 ámbitos: Agua y Saneamiento, desechos sólidos y aludes torrenciales e inundaciones.

El estudio se presenta en 3 componentes:

- Escenarios climáticos
- Análisis sectorial
- Metodológica para estimar los beneficios y costos económicos de adaptación y mitigación al cambio climático en el sector de agua y saneamiento; que permita priorizar y dimensionar las inversiones climáticas en estos sectores y orientar las NDCs

El análisis sectorial presenta los siguientes análisis:

- Visión general del sector en América Latina y El Caribe, ante el cambio climático
- Implicaciones de los acuerdos de Paris (NDC's) en la gestión integral del sector de agua y saneamiento, ante el cambio climático
- Aportes para la estimación de inversiones de adaptación en el sector de agua y saneamiento

El componente 1 se encuentra integrado por dos informes:

- Identificación de escenarios previstos de cambio climático en América Latina y El Caribe, recopilación de acuerdos para su mitigación y visión del sector de agua y saneamiento.
- Efecto del cambio climático sobre las variables que pueden modificar el riesgo de ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales

El componente 2 se encuentra integrado por tres informes:

- Agua y saneamiento
- Residuos sólidos
- Inundaciones y aludes torrenciales

El presente documento corresponde al Componente 1: Escenarios Climáticos y presenta el efecto del cambio climático sobre las variables que pueden modificar el riesgo de ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales, se procedió a realizar, en primer lugar, la identificación de las variables climáticas susceptibles a modificar este tipo de riesgo, tomando como base la caracterización realizada sobre este tipo de problemática a nivel de la región. Posteriormente, se realiza una evaluación del efecto que tendrán los escenarios de cambio climático sobre dichas variables, con la finalidad de identificar las regiones que tienen mayor probabilidad de un incremento importante del riesgo a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales. Esta descripción se lleva a cabo, principalmente, utilizando la información oficial generada por el IPCC, la cual se encuentra documentada en el cuarto y quinto informe de evaluación del cambio climático (IPCC, 2012; IPCC, 2014). Posteriormente, se analizan los índices de vulnerabilidad en Latinoamérica y el Caribe, utilizando los resultados obtenidos en un estudio realizado por el equipo técnico de la Corporación Andina de Fomento, CAF (2014), para contrastarlo con las proyecciones futuras de la ocurrencia de la amenaza climática extrema. En las últimas secciones de este capítulo, se analizan las fuentes de incertidumbres asociadas a las proyecciones descritas, la brecha que existe entre la información suministrada por los informes de evaluación del cambio climático y la requerida por los diseñadores de las medidas tanto estructurales como no estructurales, para la protección contra la ocurrencia de las inundaciones y/o aludes torrenciales, y, finalmente, se describen las recomendaciones establecidas en la referencia IPCC (2015), para la elaboración del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR6).

1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS SUSCEPTIBLES A MODIFICAR EL RIESGO A INUNDACIONES Y/O ALUDES TORRENCIALES

·Como ha sido referido en secciones anteriores, las inundaciones y los aludes torrenciales son causados por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos o climáticos extremos, pudiendo generar desastres generalizados, por los daños económicos y posibles pérdidas de vidas humanas, que pudiesen ocurrir.

En la Figura 1, que se incluye a continuación, se muestra la frecuencia de desastres generados por fenómenos naturales en ALC, durante el período 1970-2014 (FAO, 2017). Según esta figura, los desastres asociados a inundaciones, deslaves (aludes torrenciales) y tormentas, representan en su conjunto, el mayor número de desastres ocurridos durante el período bajo consideración, mientras que, el número de desastres causados, sólo por inundaciones, superan el número de cualquier otro tipo de desastre evaluado en forma individual.

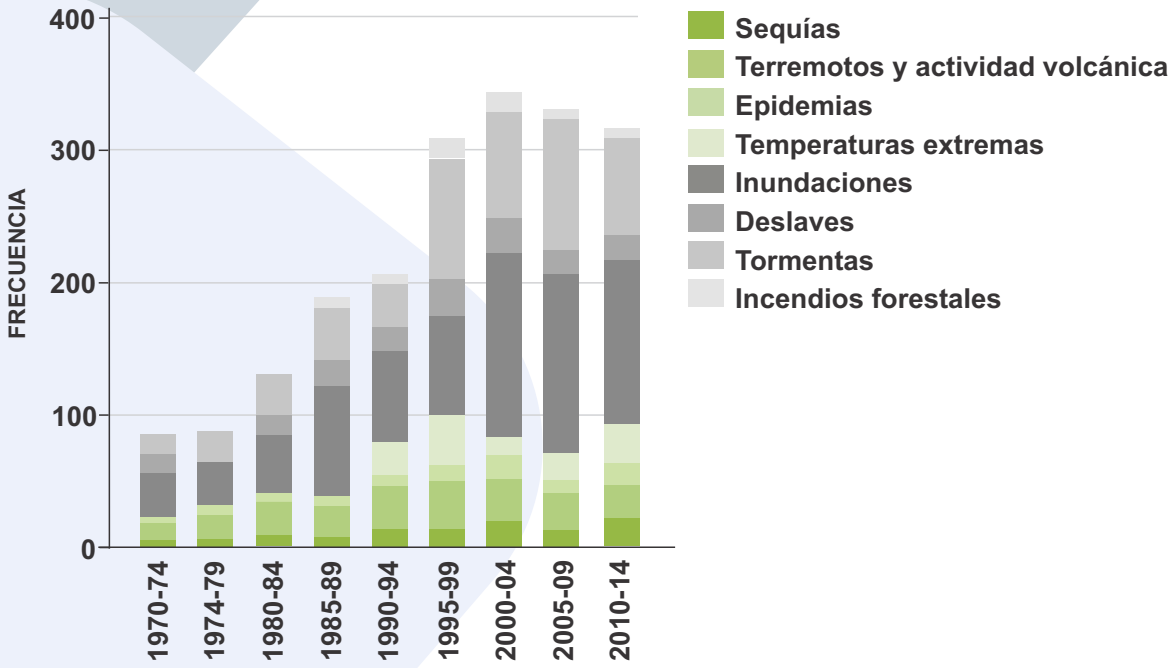

Figura 1. Frecuencia de desastres generados por fenómenos naturales en ALC, 1970-2014

Se considera importante destacar, que lo descrito en dicha figura como desastres asociados a tormentas, corresponden a los eventos extremos que ocurren en el trópico, como consecuencia de situaciones meteorológicas sinópticas, como las perturbaciones, tormentas y huracanes tropicales (y otras situaciones sinópticas tropicales como Ondas del Este, actividad convectiva intensa en la Zona de la Convergencia Intertropical, Vaguadas, etc.), que generan inundaciones conjuntamente con fuertes velocidades de viento sostenido y ráfagas, destruyendo infraestructuras en general (casas, edificios, vialidad, puentes, etc.), dañando zonas agrícolas (cultivos, infraestructura como silos, galpones, etc.), pérdidas de población animal (bovinos, equinos, caprinos, etc.), pérdidas de vidas humanas, etc. Es decir, estas tormentas también generan inundaciones, pero con el agravante del daño adicional que generan las altas velocidades de los vientos sostenidos y las ráfagas. Mientras que las inundaciones como tal, referidas en dicha figura, corresponden a las fluviales (desborde de ríos,

1uebradas, riachuelos, lagos, lagunas, rotura de presas, etc.) y pluviales (inundaciones urbanas producto del efecto directo de la tormenta). Adicionalmente, la mayoría de los deslaves o aludes torrenciales ocurren conjuntamente con inundaciones fluviales. Por lo tanto, se puede concluir que, en la Figura 1, la suma total de los desastres asociados a inundaciones, deslaves y tormentas, en general, está relacionada con la ocurrencia de inundaciones, las cuales representan los desastres naturales que ocurren con mayor frecuencia en toda la América Latina y el Caribe.

De acuerdo a la referencia Fernández y Buss (2016), ALC es considerada como la región más vulnerable a desastres naturales, presentando, según la base de datos EM-DAT (s/f), una mediana de daños económicos expresada como 0,18 % del PIB (por evento), que es considerada como la más alta del mundo. Estos daños causados por las inundaciones y deslaves, son generados por la ocurrencia de los fenómenos meteorológicos extremos sobre zonas o regiones que tienen una alta exposición y vulnerabilidad, debido al constante crecimiento tanto de la huella urbana como de la frontera agrícola, que generalmente producen deforestaciones y cambios en los patrones de uso de la tierra, aumentando el escurrimiento superficial y disminuyendo los tiempos de respuestas de las cuencas, lo que resulta en un aumento de los caudales máximos de los hidrogramas de crecidas extremas y de sus volúmenes de agua asociados. Por otra parte, otros aspectos que aumentan la vulnerabilidad, en la región latinoamericana y caribeña, corresponde al incremento de la pobreza y la disponibilidad limitada de recursos económicos, que, aunados a los problemas relacionados con la gobernanza, planificación y capacidad de gestión, disminuye la resiliencia de las zonas expuestas, generando una falta de capacidad de adaptación ante la ocurrencia de dichos eventos extremos.

Desde el punto de vista meteorológico, los desastres que producen tanto las inundaciones (pluviales y fluviales), tormentas con extremas velocidades vientos, así como los aludes torrenciales, los generan las ocurrencias de las tormentas de alta intensidad, amplia cobertura espacial y larga duración; por lo tanto, las variables climáticas susceptibles a modificar el riesgo a inundaciones y/o aludes torrenciales, son aquellas que caracterizan la ocurrencia de dichas tormentas extremas.

En general, la precipitación se produce por el ascenso de masas de aire húmedo y cálido, que conjuntamente con la reducción de la temperatura y la presencia de los núcleos de condensación en la atmósfera (aerosoles), hacen que parte de esa masa se condense formando las gotas que van incrementando su tamaño y que pasan a formar parte de las nubes; hasta un punto en el cual las gotas tienen un peso lo suficientemente grande para comenzar a caer, aumentando su tamaño debido a la agregación e impacto con otras gotas, comenzando el proceso de precipitación. Los diferentes mecanismos que generan este ascenso de las masas de aire definen los diferentes tipos de precipitación, clasificadas como convectivas, orográficas y frontales.

La precipitación convectiva se produce cuando el ascenso de la masa de aire se genera por el calentamiento local, que disminuye la densidad del aire el cual sube desplazando el aire más denso (más frío). Este tipo de lluvia ocurre en zonas planas o con pequeños cambios en relieve, donde se forman nubes del tipo cumulonimbos que, generalmente, producen lluvias intensas de corta duración. Las lluvias orográficas se producen cuando una masa de aire se encuentra con cadenas montañosas que obligan el ascenso de la misma, produciendo lluvias intensas que descargan la mayor parte del agua en el barlovento hasta alcanzar la cima de la montaña y pasar al sotavento, que generalmente es más seco. Las lluvias frontales se producen cuando masas de aire caliente ascienden al encontrarse con masas de aire frío (por la diferencia de densidades), generando lluvias que pueden tener larga duración.

El ciclón tropical representa un sistema giratorio, organizado por nubes y tormentas, sobre aguas tropicales, que caracterizan los eventos extremos que se forman en el Caribe, donde tienen una rotación en el sentido contrario a las manecillas del reloj. La intensidad de este tipo de lluvia ciclónica se clasifica en categorías, como una función de la velocidad de los vientos máximos sostenidos; definiendo la Depresión Tropical cuando la velocidad es igual o inferior a 38 millas por hora (mph), Tormenta Tropical para velocidades entre 39 y 73 mph, Huracán cuando dicha velocidad supera las 74 mph, mientras que un huracán intenso puede alcanzar velocidades de vientos sostenidos muy altas, dependiendo de la categoría que va desde 1 hasta 5, según la escala Saffir-Simpson (NOAA, 2013).

Es importante de señalar, que en muchos casos precipitaciones del tipo llovizna, registradas de manera continua aunado a la ocurrencia de una tormenta de alta intensidad, son los principales causantes de los mayores desastres asociados a aludes torrenciales, como fue el caso de lo ocurrido en la tragedia de Vargas, en el Litoral Central venezolano.

Adicionalmente, ALC es afectada por los efectos recurrentes de la variabilidad climática natural, generada por fenómenos climáticos como El Niño/La Niña, que tienen una influencia muy importante tanto en la intensidad y duración, como en la frecuencia de ocurrencia, de tormentas extremas.

Por otra parte, según se describe en la referencia Fernández y Buss (2016), casi un 80 % de las ciudades más densamente pobladas de ALC, se encuentran situadas cerca de la costa, razón por la cual, es muy importante evaluar el efecto que tendrá el cambio climático, sobre el aumento progresivo del nivel del mar. Además, dentro de este conjunto de ciudades, aquellas que se localizan en el Caribe, y que tienen zonas urbanas ubicadas a baja altura (cerca del nivel medio del mar) están expuestas a los grandes oleajes que se producen conjuntamente con la ocurrencia de huracanes.

A manera de resumen, las variables climáticas susceptibles a modificar el riesgo a inundaciones/aludes torrenciales, serían las siguientes:

Variables que caracterizan el grado de amenaza asociado a las tormentas extremas:

- Frecuencia de ocurrencia.
- Variación temporal de las intensidades.
- Intensidad máxima de la tormenta.
- Duración de las tormentas.
- Dinámica de la variación espacial.
- Ocurrencia secuencial de grupos de tormentas durante varios días.

Variables que caracterizan el grado de amenaza asociado a la ocurrencia de huracanes:

- Número de huracanes durante el año.
- Categoría del evento extremo.
- Variación espacial y temporal de las intensidades de las tormentas que se generan como parte de la ocurrencia del evento extremo.
- Velocidades máximas de vientos sostenidos y ráfagas.
- Trayectoria de los huracanes.
- Ocurrencia en forma secuencial sobre trayectorias similares (Ejemplo de este tipo de ocurrencia se presentó en la temporada del 2017, con los huracanes Irma y María).
- Ocurrencia de fenómenos meteorológicos tipo El Niño/La Niña.
- Frecuencia de ocurrencia.
- Intensidad del evento.
- Duración del evento.

Dinámica del aumento del nivel medio del mar, en las ciudades que se encuentran ubicadas en las costas de ALC.

Como se detalla en la sección que sigue a continuación, de todas las variables climáticas listadas anteriormente, los resultados que se presentan en los informes oficiales del IPCC, sobre el efecto de los escenarios de cambio climático debido a la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, sólo hacen referencia a:

- Láminas de lluvias diarias máximas anuales.
- Láminas de lluvias máximas anuales, acumuladas en cinco días.
- Frecuencia de ocurrencia e intensidad de los ciclones tropicales.
- Frecuencia de ocurrencia e intensidad del fenómeno El Niño /la Niña-Oscilación Sur (ENOS).
- Aumento de los niveles del mar.

La definición del efecto que tienen los escenarios climáticos sobre las lluvias diarias máximas anuales es muy importante, ya que esta información permite la estimación de los hietogramas de las tormentas, desagregando dicha lámina para diferentes intervalos de tiempo (inferiores a un día), utilizando técnicas como las basadas en la teoría de escalamiento (Pulgarín y Poveda, 2009; Yu, Yang y Lin, 2004). De esta forma se puede evaluar el efecto del cambio climático sobre los hidrogramas de crecidas extremas que pueden ocurrir en cuencas tanto rurales como urbanas.

La variable asociada a las lluvias máximas anuales acumuladas en cinco días, produce una información importante del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia secuencial de grupos de tormentas durante varios días, que es uno de los fenómenos climáticos extremos que pueden generar desastres asociados a flujos torrenciales y deslaves.

Por su parte, los ciclones tropicales generan tormentas de gran intensidad conjuntamente con altas velocidades de vientos sostenidos y ráfagas, y cualquier cambio en sus características también afectará las tormentas y vientos extremos asociados, que tanto afectan a la zona caribeña. Lo mismo sucede con el fenómeno climático El Niño/La Niña, que modula tanto la intensidad como la frecuencia y duración de las tormentas extremas en muchas zonas de ALC; incidiendo en la posición espacial de la zona de la Convergencia Intertropical, su actividad convectiva y vorticidad.

Finalmente, como se mencionó anteriormente, la mayoría de las ciudades que tienen una alta densidad poblacional se encuentran ubicadas en las costas de ALC, y pueden ser afectadas por el incremento del nivel medio del mar; siendo las más expuestas y vulnerables las que se ubican en las costas caribeñas pudiendo ser afectadas no sólo por el aumento del nivel sino también por los grandes oleajes que genera el paso de ciclones tropicales.

2. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS VARIABLES QUE PUDIESEN MODIFICAR EL RIESGO ASOCIADO A LA OCURRENCIA DE INUNDACIONES Y/O ALUDES TORRENCIALES.

El análisis del efecto del cambio climático sobre las variables que pudiesen modificar el riesgo asociado a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales, se llevó a cabo utilizando la información oficial publicada por el IPCC, descrita en los siguientes reportes:

- Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres, para mejorar la adaptación al cambio climático, el cual está basado en los escenarios de emisiones formulados en el Informe de Evaluación identificado como AR4. IPCC (2012).

- Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) (IPCC, 2014). El Informe de síntesis del AR5, se basa en los informes de los tres Grupos de Trabajo del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), incluidos, además, los Informes Especiales pertinentes.

- Cambio climático a largo plazo: Proyecciones, Compromisos e Irreversibilidad. En: Cambio climático 2013. Las bases de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Collins et al., 2013).

- Centro y Sudamérica. En: Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Parte B: Aspectos regionales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Magrin, et al., 2014).

- Taller sobre Proyecciones Climáticas Regionales y su Uso en Impactos y Estudios de Análisis de Riesgo. IPCC (2015).

2.1 INFORME ESPECIAL SOBRE LA GESTIÓN DE LOS RIESGOS DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS Y DESASTRES, IPCC (2012)

2.1.1 Introducción

Según lo reportado en IPCC (2012), el cambio climático representa un cambio en el estado del clima que se puede reflejar a través de cambios en los valores medios de las variables climáticas y/o en la varianza y/o en la forma de la distribución de probabilidades que las caracteriza (por ejemplo, cambios en la asimetría de la distribución), o en cambios en todos estos parámetros estadísticos a la vez, durante largos períodos de tiempo. Estos cambios pudiesen generar modificaciones en la frecuencia de ocurrencia, intensidad, duración, etc., de fenómenos meteorológicos o climáticos extremos, dentro de los cuales se encuentran los que generan las inundaciones y aludes torrenciales.

El cambio climático, se puede producir debido al efecto de procesos internos naturales, forzamientos externos y/o a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera y/o en los patrones de uso de la tierra.

Por otra parte, los impactos y pérdidas causadas por los desastres generados por la ocurrencia de los fenómenos climáticos extremos son una función, no sólo de la magnitud o intensidad de la amenaza (fenómeno climático extremo) sino también de la exposición y la vulnerabilidad del sistema afectado por dicha amenaza. Entendiéndose por exposición el número de personas, la

infraestructura, servicios, medios de subsistencia, recursos ambientales, o en general, activos económicos, sociales y culturales, etc., ubicados en localizaciones que pueden ser afectadas por la ocurrencia de este tipo de fenómenos; y por vulnerabilidad la propensión que tiene la población y recursos expuestos, a ser afectados negativamente.

Por lo tanto, se pueden producir impactos extremos cuando ocurren fenómenos climáticos que no son tan extremos, lo cual es altamente frecuente en ALC, en localidades que tienen una alta exposición y vulnerabilidad. Adicionalmente, también existe el efecto acumulativo de la ocurrencia secuencial de fenómenos climáticos extremos, lo cual ocurrió recientemente con el paso de los huracanes Irma y María sobre algunas de las islas que forman parte de la región caribea; en este caso, el paso del primer huracán afectó la vulnerabilidad de dichas islas modificando su resiliencia y la capacidad de adaptación al impacto de este tipo de evento climático extremo. Definiendo como resiliencia la habilidad que tienen los sistemas humanos y naturales, para recuperarse (adaptarse, absorber, etc.), en forma eficiente y oportuna, de los efectos negativos generados por la ocurrencia de estos fenómenos extremos; mientras que la adaptación corresponde al proceso de ajuste de estos sistemas, a los fines de moderar los posibles daos que pudiesen ocurrir.

En general, cambios en el estado del clima pudiesen afectar no sólo la magnitud e intensidad de los fenómenos climáticos extremos, sino también la frecuencia, la duración y su cobertura espacial, pudiéndose generar desastres sin precedentes, especialmente, si estos fenómenos ocurren en localizaciones con alta exposición y vulnerabilidad.

Existe un nivel de confianza alto entre los expertos que integran el IPCC, al afirmar que, tanto la exposición como la vulnerabilidad son procesos dinámicos, que están variando temporal y espacialmente, como una función del crecimiento demográfico que incrementa la huella urbana que conjuntamente con los cambios en las condiciones socio-económicas, sobre todo en las grandes ciudades ubicadas en países en desarrollo, han generado un aumento de zonas sumamente vulnerables debido al crecimiento de asentamientos informales con altos niveles de pobreza y a la falta de planes adecuados que apoyen un crecimiento urbano sostenible.

2.1.2 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES SOBRE EXPOSICIÓN, VULNERABILIDAD, FENÓMENOS CLIMÁTICOS EXTREMOS, IMPACTOS Y PÉRDIDAS CAUSADAS POR DESASTRES

Del análisis de las observaciones sobre exposición, vulnerabilidad, fenómenos climáticos extremos, impactos y pérdidas causadas por desastres, en el reporte del IPCC (2012) se llega a las siguientes conclusiones, relacionadas con fenómenos climáticos generadores de inundaciones y/o aludes torrenciales:

En general, los fenómenos climáticos extremos son poco frecuentes lo que determina que existen pocos datos para poder evaluar el cambio en su frecuencia e intensidad, especialmente, si se considera que en esta referencia se evalúan observaciones que comenzaron desde el año 1950. Por lo tanto, cuanto menos frecuente es el evento extremo, más importante es su capacidad para producir desastres, pero más difícil es evaluar los cambios a largo plazo.

Desde el punto de vista estadístico, se han observado tendencias significativas en el aumento del número de precipitaciones intensas, aunque existe una gran variación a nivel regional; concluyéndose, con un nivel medio de confianza, sobre la influencia antropogénica respecto a la intensificación de las precipitaciones extremas a nivel mundial.

Existe un nivel de confianza bajo sobre el aumento de la intensidad, frecuencia y duración de los ciclones tropicales. Se reconoce que existe un nivel bajo de conocimientos sobre los mecanismos físicos que pudiesen relacionar la afectación de las características de los ciclones tropicales (huracanes) con el cambio climático, por lo tanto, hay un nivel de confianza bajo en la evaluación que tiene la influencia antropogénica sobre estos fenómenos meteorológicos extremos.

En relación a los cambios en la magnitud y frecuencia de las inundaciones, a escala regional, se concluye que existe un nivel de evidencia que se clasifica entre limitado y medio, para poder evaluar dichos cambios. Especialmente, debido a que los registros en las estaciones hidrométricas son limitados en el tiempo y en el espacio, y, adicionalmente, es difícil poder separar el efecto que tiene, sobre las tendencias observadas, la dinámica de los cambios en los patrones de uso del suelo y la cobertura vegetal. Por lo tanto, entre los expertos existe un nivel de acuerdo bajo en referencia a la evidencia y un nivel de confianza bajo acerca del signo de estos cambios.

En referencia a las zonas costeras, es probable que se haya producido un aumento de las aguas altas extremas, debido al progresivo aumento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático; por lo que es probable la existencia de la influencia antropogénica sobre este aumento del nivel de aguas extremas en las zonas costeras.

Existe un nivel de confianza alto, sobre el aumento de las pérdidas económicas relacionadas con la ocurrencia de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, aunque se reconoce la gran variabilidad tanto espacial como temporal. Adicionalmente, se considera que las estimaciones de estas pérdidas representan un límite inferior de las mismas, debido a lo difícil que es valorar y traducir a términos monetarios impactos relacionados con pérdidas de vidas humanas, afectaciones a ecosistemas y del patrimonio cultural; por otra parte, existen pérdidas no documentadas como las que se producen en la economía informal, así como efectos indirectos sobre algunos sectores económicos que son muy difíciles de evaluar.

La causa principal del incremento, a largo plazo, de las pérdidas económicas asociadas a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, corresponde al aumento de la exposición de las personas y sus bienes económicos. A este respecto, existe un nivel de confianza alto.

Las mayores pérdidas económicas, relacionadas con desastres debido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, se han producido en países desarrollados; sin embargo, cuando estas pérdidas se expresan como un porcentaje del PIB, se concluye que, en términos relativos, las pérdidas han sido mayores en los países en desarrollo.

2.1.3 EFECTO DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO, SOBRE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE PUEDEN INCREMENTAR EL RIESGO DE DESASTRES ASOCIADOS A LA OCURRENCIA DE INUNDACIONES Y/O ALUDES TORRENCIALES

A los fines de determinar, para cada región en que se subdivide el área de estudio, ante cuales señales de los escenarios de cambio climático previstos, pudiera incrementarse el riesgo de desastre asociados a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales, es necesario analizar los comentarios que se establecen en el reporte del IPCC (2012), en referencia a los futuros fenómenos climáticos extremos, impactos y pérdidas causadas por desastres.

Cambios futuros tanto en los fenómenos climáticos extremos, como en la exposición y la vulnerabilidad, producto del efecto combinado del desarrollo socio-económico de la región, de la variabilidad natural del clima y del cambio climático antropogénico, pudiesen alterar los impactos de dichos fenómenos meteorológicos extremos sobre los sistemas humanos y naturales, pudiendo generar la ocurrencia de grandes desastres.

La confiabilidad en las proyecciones que se hacen sobre el sentido y la magnitud de los cambios de los fenómenos climáticos, considerando los diferentes escenarios de cambio climático, depende mucho del nivel de conocimientos y comprensión de los procesos físicos que generan dichos cambios, así como la capacidad que tienen los modelos de simulación en representar dichos procesos. Sin embargo, a pesar de que se le asigne un nivel de confianza bajo a cualquier tipo de proyección asociada a estos eventos extremos, no significa que se elimina la posibilidad de ocurrencia de este tipo de cambio. Adicionalmente, la confiabilidad en estas proyecciones también depende del tipo de fenómeno y la región asociada a dicha proyección, así como de la calidad y cantidad de la información histórica disponible para caracterizar dichos fenómenos climáticos extremos.

Tomando en consideración los resultados obtenidos con la aplicación de los modelos climáticos, los expertos del IPCC establecen las siguientes conclusiones.

Se considera como prácticamente cierto que, a finales del Siglo XXI, las temperaturas máximas aumentarán tanto su magnitud como su frecuencia, mientras que es muy probable que tanto la intensidad como la duración y frecuencia de los períodos cálidos aumenten.

Según la Figura RRP.4A, de la referencia IPCC (2012), tomando en consideración los escenarios de emisiones A1B y A2 (más desfavorables), del AR4, es probable que la temperatura diaria máxima anual, asociada a un período de retorno de 20 años, a finales del Siglo XX (1981-2000), dicho período se reducirá a valores que oscilan entre 2 a 5 años, es decir, aumentará, en forma considerable, la frecuencia de ocurrencia de dicho evento extremo. Adicionalmente, el nuevo valor de temperaturas máximas asociado a un período de retorno de 20 años, a finales del Siglo XXI aumentará entre 2° C y 5° C sobre el valor actual.

Es probable que durante el presente siglo (XXI), la frecuencia de las precipitaciones extremas o la proporción de lluvias totales derivadas de ellas aumente en la mayoría de las regiones del mundo.

Es probable que el aumento de las temperaturas afecte los océanos, incrementando la intensidad de las lluvias que se generan por la ocurrencia de los ciclones tropicales.

Existe un nivel de confianza medio en que, en aquellas regiones donde las proyecciones correspondan a una disminución de la precipitación anual, aumente la intensidad de las precipitaciones extremas.

Se considera como probable, considerando los escenarios de emisiones B1, A1B y A2, del AR4, que la lámina de precipitación diaria máxima anual asociada a un período de retorno de 20 años, a finales del Siglo XXI tenga un período de retorno que variará entre 5 y 15 años, en la mayoría de las regiones del mundo.

Es probable que la frecuencia de ocurrencia de ciclones tropicales disminuya o permanezca más o menos igual, sin cambios importantes. Adicionalmente, es probable que la velocidad máxima media del viento, que generan estos extremos meteorológicos, aumente en algunos de los océanos.

Aunque se prevé la posibilidad de aumentos tanto en la temperatura como en las precipitaciones extremas en la mayoría de las regiones del mundo, existe un nivel de confianza bajo sobre las proyecciones asociadas a inundaciones fluviales. Sin embargo, existe un nivel de confianza medio sobre la influencia del aumento de la intensidad de las precipitaciones extremas sobre el aumento de las inundaciones locales, probablemente asociadas a inundaciones pluviales a nivel de zonas urbanas.

Es muy probable que el aumento del nivel medio del mar conjuntamente con el aumento de las velocidades máximas de los vientos asociadas a la ocurrencia de ciclones tropicales, contribuyan con el aumento de los niveles de aguas máximas en las zonas costeras, especialmente, en regiones insulares en el trópico.

Hay un nivel de confianza bajo en las proyecciones que reflejan los resultados de los modelos sobre cambios en la variabilidad del fenómeno El Niño/ la Oscilación Sur (ENSO) y en la frecuencia de ocurrencia de eventos tipo Niño, dado que los resultados obtenidos no son coherentes.

2.1.4 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA OCURRENCIA DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS EXTREMOS, EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

A los fines de presentar los efectos del cambio climático sobre la ocurrencia de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, en la referencia IPCC (2012), se subdivide el mundo en diferentes regiones, consideradas como homogéneas. En la Figura 2, que se incluye a continuación se muestran las regiones utilizadas en el análisis, donde se observa que las identificadas como 6, 7, 8, 9 y 10, corresponden a América Latina.

A continuación, se incluye el conjunto de países que integra cada región:

Región 6. México y América Central.
Región 7. Zona amazónica.
Región 8. Noreste brasileño.
Región 9. Costa occidental de Suramérica.
Región 10. Sureste suramericano.

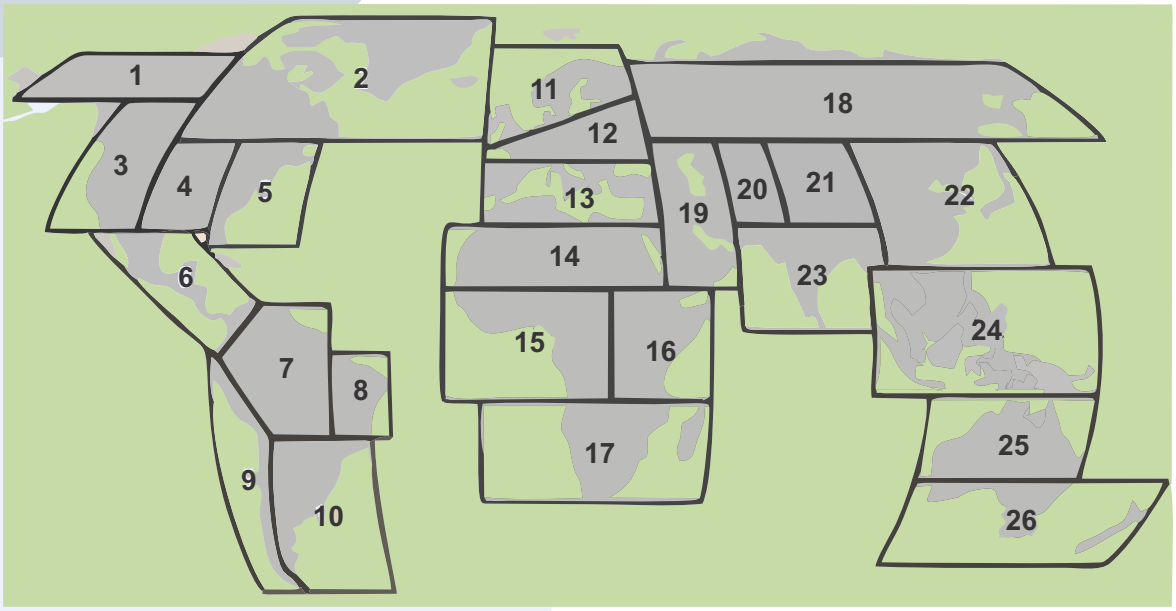

Figura 2. Identificación de las regiones consideradas en el análisis del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de eventos meteorológicos o climáticos extremos.

En el análisis de los cambios observados en los valores de precipitación extrema, durante los últimos años del Siglo XX, se utiliza como índice aquellos valores que corresponden al percentil 90; obteniéndose como resultado que en la mayor parte de ALC se han observado tendencias al aumento de las precipitaciones diarias máximas anuales, correspondientes al percentil 90-ésimo, umbral por encima del cual se ubica el 10 % de las observaciones de valores extremos.

El análisis de los cambios proyectados, a nivel regional para ALC, para finales del Siglo XXI, tomando en consideración las observaciones registradas a finales del Siglo XX, se realiza utilizando los siguientes indicadores:

- Láminas de precipitación diaria iguales o superiores al percentil 95-ésimo.
- Porcentaje de días con precipitación mayor a 10 mm.
- Cambios proyectados, para finales del Siglo XXI, del período de retorno del valor de la lámina diaria máxima anual que, utilizando la información observada a finales del Siglo XX (1981-2000), se le asignó un período de retorno de 20 años.

El último de estos índices se considera como el más importante, desde el punto de vista de los riesgos asociados a inundaciones y/o aludes torrenciales, ya que, una disminución del período de retorno implica la ocurrencia de episodios de precipitaciones extremas más frecuentes, es decir, en promedio, se tendrá menos tiempo entre las ocurrencias de este tipo de eventos extremos. Adicionalmente, esto se puede interpretar como un aumento, respecto a las observaciones realizadas a finales del Siglo XX, de los valores proyectados de lluvias diarias máximas anuales que ocurrirán a finales del Siglo XXI, lo que implica un aumento en la intensidad de los eventos de precipitaciones extremas.

A manera ilustrativa, en la Figura 3, se presentan los períodos de retorno proyectados de los valores máximos anuales de precipitación diaria, que de acuerdo a la información de finales del Siglo XX (1981-2000) tenían un período de retorno de 20 años. Estas proyecciones se realizan para dos horizontes de tiempo, 2046 a 2065 y 2081 a 2100, y para tres escenarios de emisiones B1, A1B y A2. Los resultados de estas proyecciones se basan en la información generada por catorce (14) modelos de circulación global, que forman parte de la tercera fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP3). La variabilidad de los resultados obtenidos con la información generada por los modelos se presenta a través de diagramas de cajas (segmentos y cajas), donde las longitudes de los segmentos muestran el rango de variación de los resultados entre las proyecciones máximas y mínimas que generan dichos modelos, mientras que las longitudes de las cajas representan la variación de los resultados que generan el 50 % de los modelos, alrededor de los valores de las medianas de dichos resultados.

Según estos resultados, entre finales del siglo XX y finales del siglo XXI, las respuestas proyectadas de precipitación extrema, debido a los futuros escenarios de emisiones, muestran un aumento de las tasas de precipitación y, por lo tanto, disminuciones en los períodos de retorno en todas las regiones que integran ALC, que son consistentes con los cambios proyectados en varios índices relacionados con las precipitaciones extremas (Tebaldi et al., 2006).

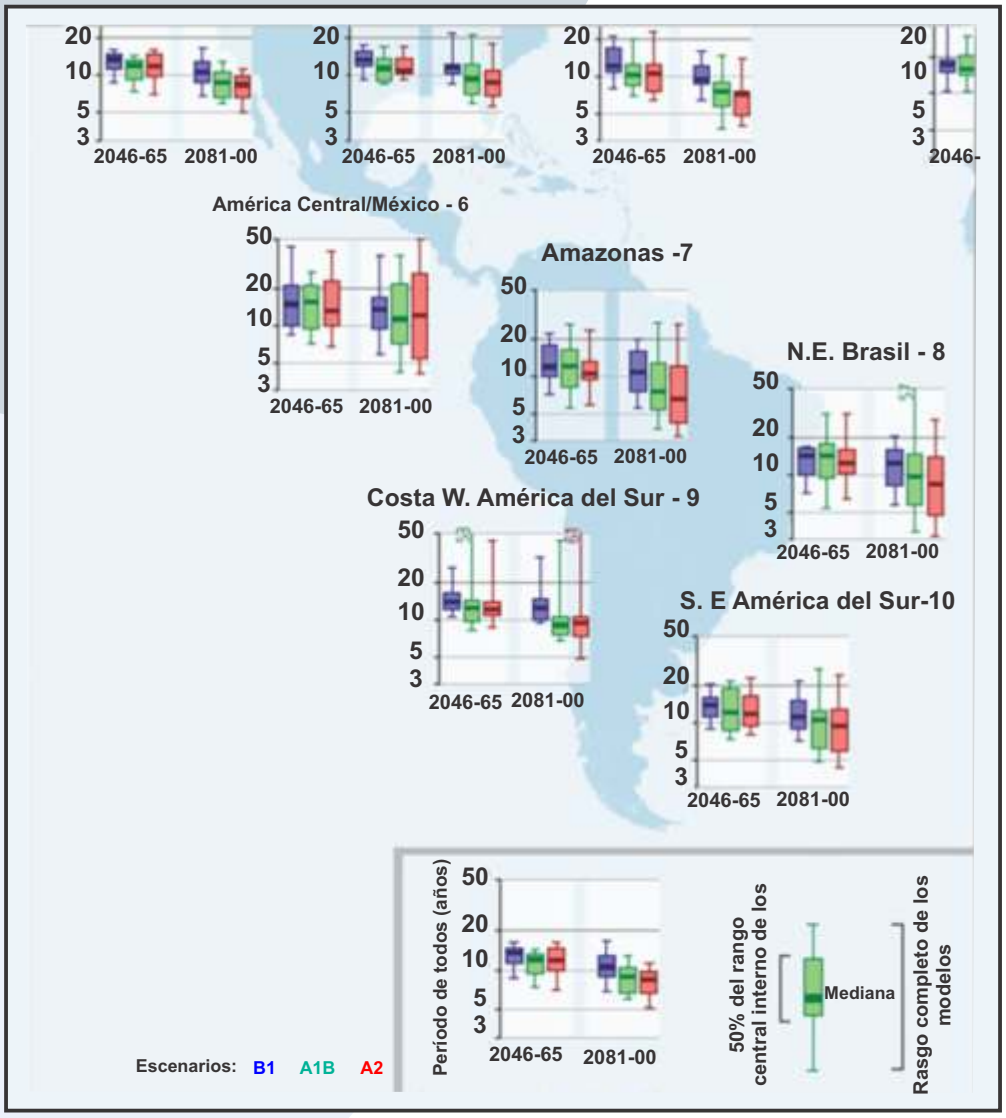

Figura 3. Períodos de retorno proyectados de los valores máximos anuales de precipitación diaria, que de acuerdo con la información de finales del Siglo XX (1981 - 2000 tenían un período de retorno de 20 años. Fuente IPCC (2012)

Los escenarios de emisiones de CO_2, más fuertes (A1B y A2), conducen a mayores disminuciones proyectadas en el período de retorno. Tomando como referencia el período 2081-2100, el escenario de emisiones A2 y los valores de las medianas de los resultados mostrados en la Figura 3, se concluye que las mayores disminuciones en los períodos de retorno se observan en la Región 7 que corresponde a la Amazonia, mientras que las menores disminuciones del período de retorno se observan en la Región 6, que corresponde a México y Centro América.

Es interesante observar que en algunas regiones donde se proyectan disminuciones en la precipitación total anual, se concluye que las intensidades de las precipitaciones extremas aumentarán debido al efecto del cambio climático (Christensen et al., 2007).

Según el IPCC (2012), la alta resolución espacial es importante para los estudios de precipitación extrema, ya que los procesos físicos responsables de la ocurrencia de estos valores extremos, requieren una resolución espacial alta para resolverlos (Kim et al., 2010). Estudios realizados después de la publicación del AR4, han utilizado nuevos enfoques para obtener una resolución espacial alta, a los fines de proyectar valores extremos de precipitación, como son los modelos de circulación global (GCM) de alta resolución y reducción de escala dinámica usando modelos regionales (RCM). A manera de ejemplo, basado en los resultados obtenidos por el Instituto de Investigación Meteorológica y la Agencia Meteorológica de Japón, utilizando modelos de circulación global (GCM) de 20 km de la grilla horizontal, se pronosticó que las precipitaciones extremas aumentarán, sustancialmente, en la Amazonia. Adicionalmente, en otros estudios se proyectan aumentos en la intensidad de los eventos de precipitación extrema en la mayor parte del sudeste de América del Sur y el oeste de la Amazonia, para el período 2071-2100.

2.2 RESUMEN DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN EL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (AR5) (IPCC, 2014), RELACIONADOS CON EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS VARIABLES QUE PUDIESEN MODIFICAR EL RIESGO ASOCIADO A LA OCURRENCIA DE INUNDACIONES Y/O ALUDES TORRENCIALES

En esta sección se presentan los principales resultados descritos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014), conocido como AR5, relacionados con el efecto del cambio climático sobre las variables que pudiesen modificar el riesgo asociado a la ocurrencia de inundaciones y/o aludes torrenciales. Las principales contribuciones descritas en este informe de evaluación corresponden a las obtenidas por tres grupos de trabajos, relacionados con: i) La Base de la Ciencia Física, ii) Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad, y iii) Mitigación del Cambio Climático; adicionalmente, en dicha evaluación se incluyen los resultados obtenidos en dos informes especiales sobre “Fuentes Renovables y Mitigación del Cambio Climático” IPCC (2011), y “Gestión de los Riesgos de Fenómenos Meteorológicos Extremos y Desastres” IPCC(2012). Los resultados asociados a este último informe especial fueron descritos en el aparte 3.1 del presente documento.

2.2.1 ESCENARIOS CONSIDERADOS EN EL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (AR5) (IPCC, 2013)

Para la definición de estos escenarios fueron considerados los impulsores del cambio climático, estableciendo los llamados forzamientos radiativos, los cuales se describen en el Anexo 1 de este documento. Utilizando estos conceptos sobre forzamientos radiativos, en la referencia IPCC (2013) se procedió a la definición de cuatro nuevos escenarios identificados como

Trayectorias de Concentración Representativa (RCP en inglés, *Representative Concentration Pathways*). El forzamiento radiativo se expresa en unidades de W/m2, es decir, vatios (Watts) por metro cuadrado de superficie. En el Anexo 1 se incluye la descripción de cada uno de estos escenarios, según se detalla en la referencia IPCC (2013).

En la Figura 12.3 (a), de la citada referencia, que en el presente documento se incluye como Figura 4, se presenta la evolución temporal del forzamiento radiativo total, relativo a la pre-industria (alrededor del año 1765), entre los años 2000 y 2300, para escenarios RCP en líneas continuas (AR5), y para los escenarios SRES en líneas punteadas (AR4), calculadas utilizando los Modelos de Evaluación Integrada (IAM) usados para desarrollar dichos escenarios. Esta figura permite establecer las similitudes entre los escenarios considerados en los informes de evaluación AR4 (SRES) y AR5 (RCP).

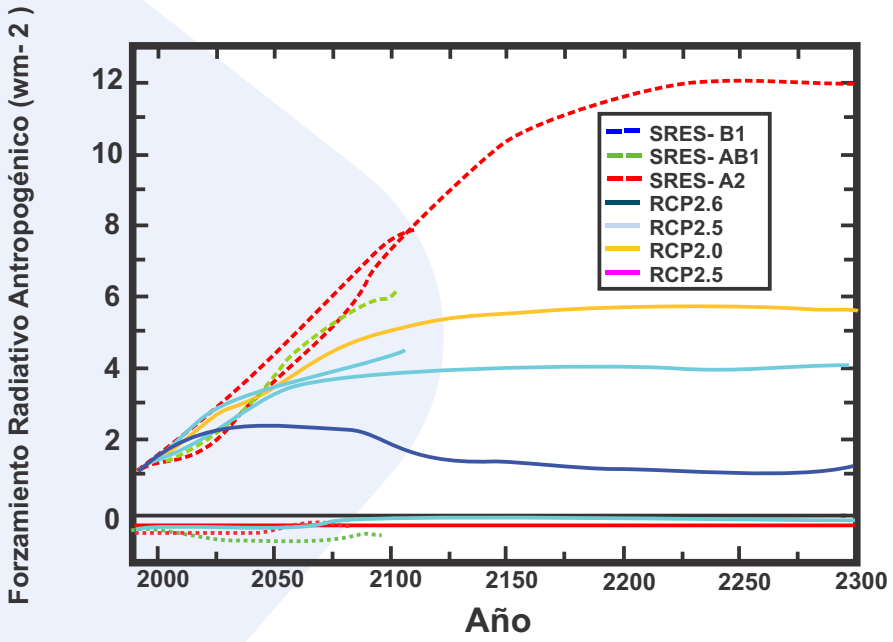

Figura 4. Evolución temporal del forzamiento radiativo total (negativo) antropogénico (positivo) y antropogénico (negativo) relativo a la pre-industria (alrededor de 1765) entre 2000 y 2300 para escenarios RCP y sus extensiones (líneas continuas) y escenarios SRES (líneas punteadas). Fuente: IPCC (2013)

En la Figura 5, que corresponde a la Figura RRP.7 de la referencia IPCC (2013), se muestran las series temporales simuladas, basadas en modelos múltiples de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5), entre los años 1950 y 2100, correspondientes al cambio anual en la temperatura media global en superficie, respecto a la media estimada durante el período 1986-2005 (anomalías); donde se puede observar el efecto esperado de cada uno de los escenarios RCP considerados en el análisis. Las series temporales de las

proyecciones y la medición de la incertidumbre (sombreado) se muestran en relación con los escenarios RCP2,6 (azul) y RCP8,5 (rojo). El color negro (sombreado gris) representa la evolución histórica en los modelos, utilizando forzamientos históricos reconstruidos. Las incertidumbres medias y asociadas, promediadas entre 2081 y 2100, figuran en todos los escenarios de RCP indicadas con barras verticales de colores. Se indica asimismo el número de modelos de la CMIP5, utilizados para calcular la media de los modelos múltiples

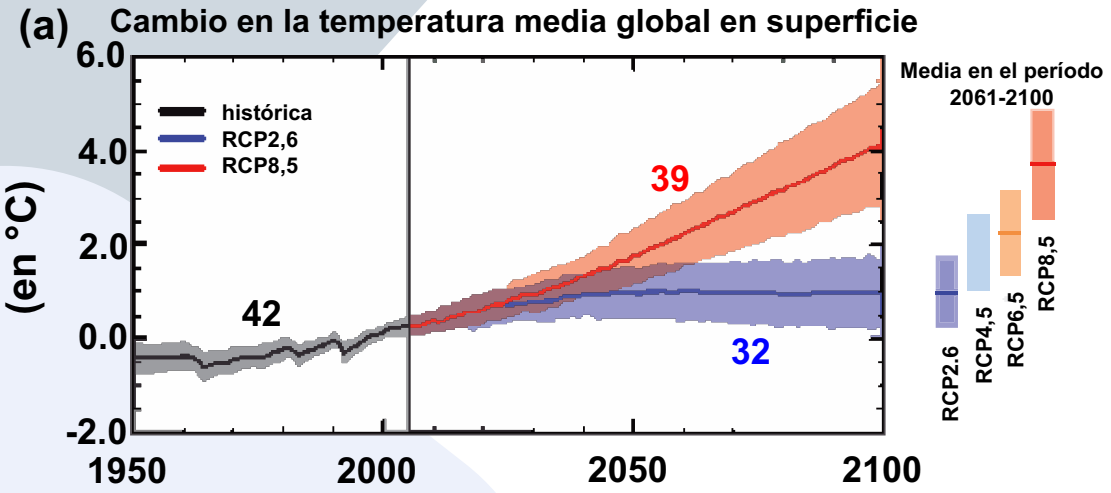

Figura 5. Series temporales simuladas, basadas en modelos múltiples de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5), entre 1950 y 2100, correspondientes al cambio anual en l a temperatura media global en superficie respecto de 1986-2005 (anomalías). Fuente: IPCC (2013)

2.3 RESUMEN DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN EL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (AR5) (IPCC, 2014)

A continuación, se describen las conclusiones sobre extremos climáticos, contenidas en el Resumen Técnico de las contribuciones del Grupo I (Las bases de la ciencia física) (Stocker et al., 2013), publicado como parte del Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

Desde la finalización del AR4, incluyendo la evaluación exhaustiva de extremos realizada en el Informe Especial del IPCC sobre el Manejo del Riesgo de Eventos y Desastres Extremos (IPCC, 2012), se ha avanzado mucho en la evaluación del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de extremos climáticos, debido a la nueva evidencia disponible y mejoras en la comprensión y en la capacidad de los modelos para simular eventos extremos.

Sin embargo, la mayoría de los modelos no estiman en forma adecuada la sensibilidad que tienen los cambios de eventos extremos de precipitación a los cambios o tendencias de la temperatura, lo cual ocurre, principalmente, en los trópicos, subestimando el aumento que las precipitaciones extremas pueden tener en el futuro. A pesar de estas limitaciones, existe un

nivel de confianza alto en que, a medida que aumenta el calentamiento, las precipitaciones extremas diarias aumentarán a una tasa superior al aumento de los valores medios. Hay un nivel de confianza medio que el aumento de estos extremos diarios estará entre 5 a 10 %, por cada grado centígrado de aumento de la temperatura local. En general los resultados obtenidos con el AR5 siguen las mismas tendencias de los obtenidos en el AR4, pero con variaciones importantes a nivel regional.

En referencia al nivel medio del mar, en el 94 % de los mareógrafos se han observado aumentos en los niveles extremos que están en el orden de los 5 mm o menos, por año; concluyéndose que en el futuro es muy probable que se produzca un aumento significativo en la ocurrencia de estos valores extremos.

Respecto a los ciclones tropicales, se concluye lo siguiente:

El nivel de confianza es bajo, sobre la ocurrencia de cambios futuros en la actividad ciclónica.

Las proyecciones obtenidas indican que es probable que la frecuencia de los ciclones tropicales disminuya o permanezca sin cambios.

Es probable que aumenten los valores máximos de velocidades de vientos e intensidades de tormentas, asociados a ciclones tropicales. Aunque en el caso de las intensidades de las tormentas, resultados obtenidos con modelos de mejor resolución y con la aplicación de mejoras en las técnicas de reducción de escala "*Downscaling*", muestran que no es probable que ocurra un aumento significativo de la frecuencia de tormentas con mayor intensidad.

En referencia al fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS), se concluye lo siguiente:

Este fenómeno climático seguirá dominando la variabilidad climática natural con influencias globales.

Las variaciones naturales tanto de la amplitud como de los patrones espaciales del ENOS, son tan grandes, que el nivel de confianza en cualquier proyección de cambio durante el Siglo XXI, permanece bajo.

Las proyecciones obtenidas, modelando los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, sobre el cambio en la amplitud de El Niño, es pequeña, en comparación con la gran amplitud que presentan los resultados de los diferentes modelos utilizados en las estimaciones de dichas proyecciones.

Por lo tanto, el nivel de confianza es bajo, sobre las proyecciones de los posibles cambios en los impactos que tiene este fenómeno, en el clima de regiones como las que integran a ALC.

En el capítulo correspondiente al *Cambio Climático a Largo Plazo: Proyecciones, Compromisos e Irreversibilidad,* del Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, descrito en Collins et al. (2013), se presentan las figuras 12.26 b y 12.27 a y b, que en el presente documento se identifican como Figuras 6, 7 y 8, respectivamente. Estas figuras muestran un resumen de los resultados obtenidos, tanto en magnitud como en la variación espacial, de dos índices utilizados para caracterizar eventos extremos, como son las precipitaciones máximas anuales acumuladas en cinco días y la precipitación diaria máxima anual.

En la Figura 6 (Figura 12.26 b, en Collins et al., 2013), se presentan los cambios proyectados, en el período 2081-2100, de la precipitación máxima anual acumulada en cinco días, correspondiente al escenario más extremo del AR5, RCP8,5. El promedio global sobre todo el globo terráqueo es de un incremento del orden del 20 %, a finales del Siglo XXI, del citado índice. Sin embargo, a nivel regional existen zonas donde se produce una disminución de dicho índice.

A nivel de ALC, se observa que los mayores valores de este aumento se presentan en la Costa Noroccidental de Sur América, la Amazonia, el Noreste de Brasil y Sureste de Sur América; mientras que, en algunas islas del caribe, en el norte de Venezuela y la costa norte de Chile, estos valores tienden a disminuir respecto a la condición actual.

En la Figura 7 (Figura 12.27 a, en Collins et al., 2013), se evalúa el cambio porcentual de la lámina de lluvia diaria máxima anual, que utilizando los valores observados durante el período 1986-2005, se le había estimado un período de retorno de 20 años; este cambio porcentual es por cada grado centígrado de incremento de la temperatura media local, debido al efecto del cambio climático. Por otra parte, en la Figura 8 (Figura 12.27 b, en Collins et al., 2013) se expresan estos cambios en términos del valor que tendría el período de retorno de la citada lámina de lluvia (con 20 años de período de retorno según los datos de 1986-2005), utilizando la información proyectada correspondiente al período 2081-2100 para un grado centígrado de incremento de la temperatura media local. Los cambios que se incluyen en ambas figuras se obtuvieron utilizando la mediana de los resultados correspondientes a las aplicaciones de los modelos que forman parte del conjunto de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5).

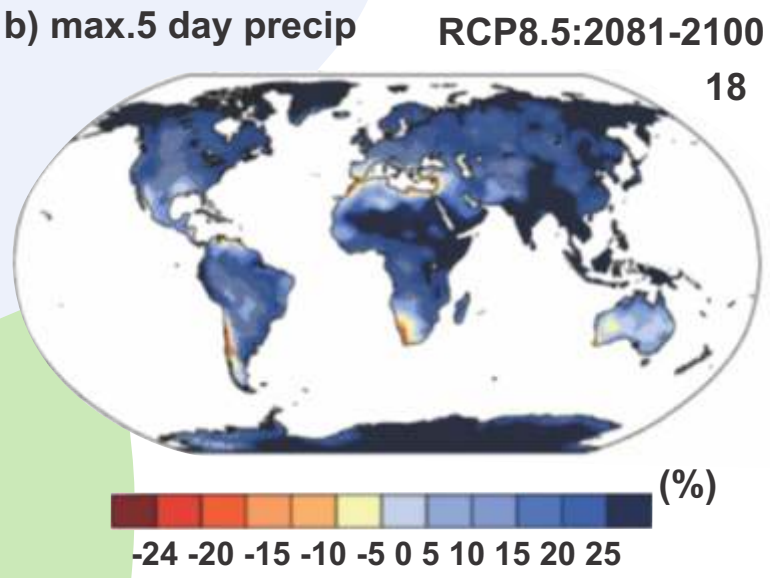

Figura 6. Cambios proyectados, en el período 2081-2100, de la precipitación máxima anual, acumulada en cinco días. Escenario RCP8.5. Fuente: Collins et al (2013)

A nivel de ALC, los cambios que se observan en las Figuras 7 y 8, tienen una distribución espacial similar a la observada en la Figura 6. Los mayores valores de la lámina diaria máxima anual y, por lo tanto, las mayores disminuciones del período de retorno asociado a la lámina de lluvia diaria, que durante el período 1986-2005 tenía un período de retorno de 20 años, se presentan en: la Costa Noroccidental de Sur América, la Amazonia, el Noreste de Brasil, la Costa Sureste de Sur América (la costa a nivel de Uruguay y costa norte de Argentina); mientras que efectos contrarios se observan en algunas islas del caribe, en algunos países de Centroamérica, en el norte de Venezuela y la costa norte de Chile.

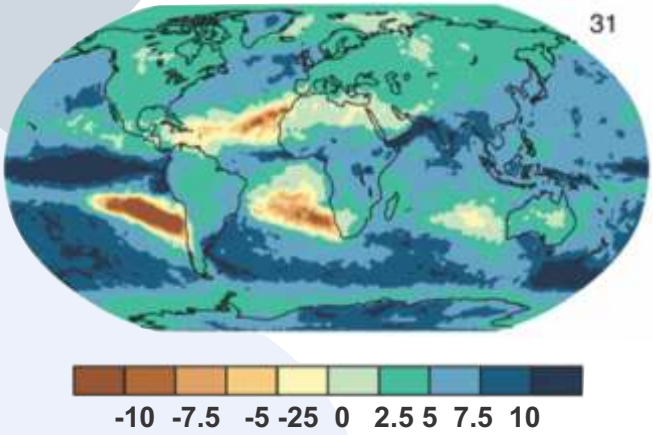

Figura 7. Cambio porcentual de la lámina de lluvia diaria máxima anual, en el período 2081-2100 que utilizando los valores observados durante el período 1986-2005, se le había estimado un período de retorno de 20 años. Fuente: Collins et al., (2013).

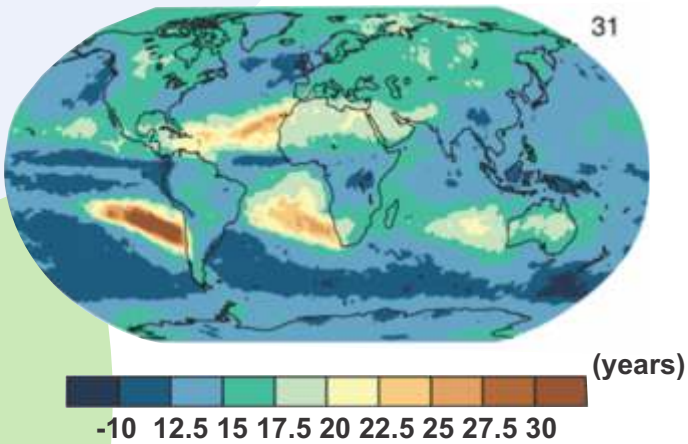

Figura 8. Cambios proyectados, en el período 2081-2100. Valor del período de retorno que tendría la lámina de lluvia diaria máxima anual, con 20 años de período de retorno según los datos de 1986-2005. Fuente: Collins et al., (2013).

3. VULNERABILIDAD DE LA REGIÓN LATINOAMERICANA Y CARIBEÑA ANTE LA OCURRENCIA DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Los impactos y pérdidas causadas por los desastres generados por la ocurrencia de los fenómenos climáticos extremos, son una función, tanto de la magnitud o intensidad de la amenaza (fenómeno climático extremo) como de la vulnerabilidad del sistema afectado por dicha amenaza, donde la vulnerabilidad se puede considerar como multidimensional, ya que la misma es una función de la exposición que tiene la región a las variaciones climáticas, la sensibilidad de su población y la capacidad institucional que tienen los países para adoptar medidas efectivas de adaptación. Por lo tanto, como fue referido anteriormente, se pueden producir impactos extremos cuando ocurren fenómenos climáticos que no son tan extremos, sobre una región que tiene una alta exposición y vulnerabilidad.

En el año 2014, la Corporación Andina de Fomento, publicó el trabajo titulado *Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe*, el cual es considerado como uno de los trabajos más completos y actualizados, sobre el tema analizado. Por este motivo, se ha considerado conveniente realizar un resumen tanto de la metodología utilizada como de los resultados obtenidos en dicho estudio, a los fines de compararlos con los resultados mostrados en las Figuras 6, 7 y 8, donde se presentan índices que permiten evaluar el grado de amenaza climática, proyectada para finales del Siglo XXI.

Según la metodología utilizada en el estudio de la CAF (2014), el índice de vulnerabilidad fue estimado, para cada uno de los países que integran la región de ALC, tomando en consideración tres tipos de índices: el índice de exposición con un peso del 50 %, el índice de sensibilidad de la población con un peso del 25 %, y el índice de la capacidad adaptativa de cada país cuyo peso se estableció en 25 %.

En la Tabla 1 y Figura 9, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los países que integran la región Latinoamericana y el Caribe. En la referida figura se utiliza una escala de colores donde se clasifican las zonas de cada país en cuatro categorías de niveles de riesgo, definidas como: bajo (verde), medio (amarillo), alto (naranja) y extremo (rojo).

3.2 RESUMEN DE LAS PRINCIPALES CONCLUSIONES DESCRITAS EN EL ESTUDIO DE LA CAF (2014)

A continuación, se incluye un resumen de las conclusiones más importantes del estudio realizado por la CAF (2017).

Conclusiones generales:

Más del 50 % de la población de la región ALC, se encuentra en países cuyos riesgos han sido clasificados como altos o extremos. El conjunto de países que se ubica en las categorías de riesgos altos y extremos, generan cerca del 50 % del PIB de toda la región. 48 % de las capitales de los países que integran ALC, se encuentran categorizadas con índices de riesgos altos o extremos. Muchas de las zonas, donde viven los sectores más pobres de la población, están

ubicadas en laderas inestables con prospección al deslizamiento o en llanuras aluviales sujetas a inundaciones periódicas. Lo que define la capacidad adaptativa de los países son factores estructurales como la economía y la gobernanza, pero también la disponibilidad de recursos naturales. **Cerca de 75% de la población de ALC se concentra en zona urbanas.**

Tabla 1. índice de vulnerabilidad al cambio climático (año 2014)

País	Riesgo	País	Riesgo
Haití	extremo	Perú	alto
Guatemala	extremo	Panamá	medio
El Salvador	extremo	Antigua y Barbuda	medio
Honduras	extremo	Brasil	medio
República Dominicana	extremo	Surinam	medio
Nicaragua	extremo	San Kitts y Nevis	medio
Jamaica	extremo	Argentina	medio
Paraguay	extremo	Trinidad y Tobago	medio
Belice	extremo	Costa Rica	bajo
Bolivia	extremo	Santa Lucía	bajo
Venezuela	alto	Uruguay	bajo
Ecuador	alto	Bahamas	bajo
Dominica	alto	Chile	bajo
Cuba	alto	Granada	bajo
Guyana	alto	San Vicente y Las Granadinas	bajo
Colombia	alto	Barbados	Bajo
México	alto		

Fuente: CAF (2014)

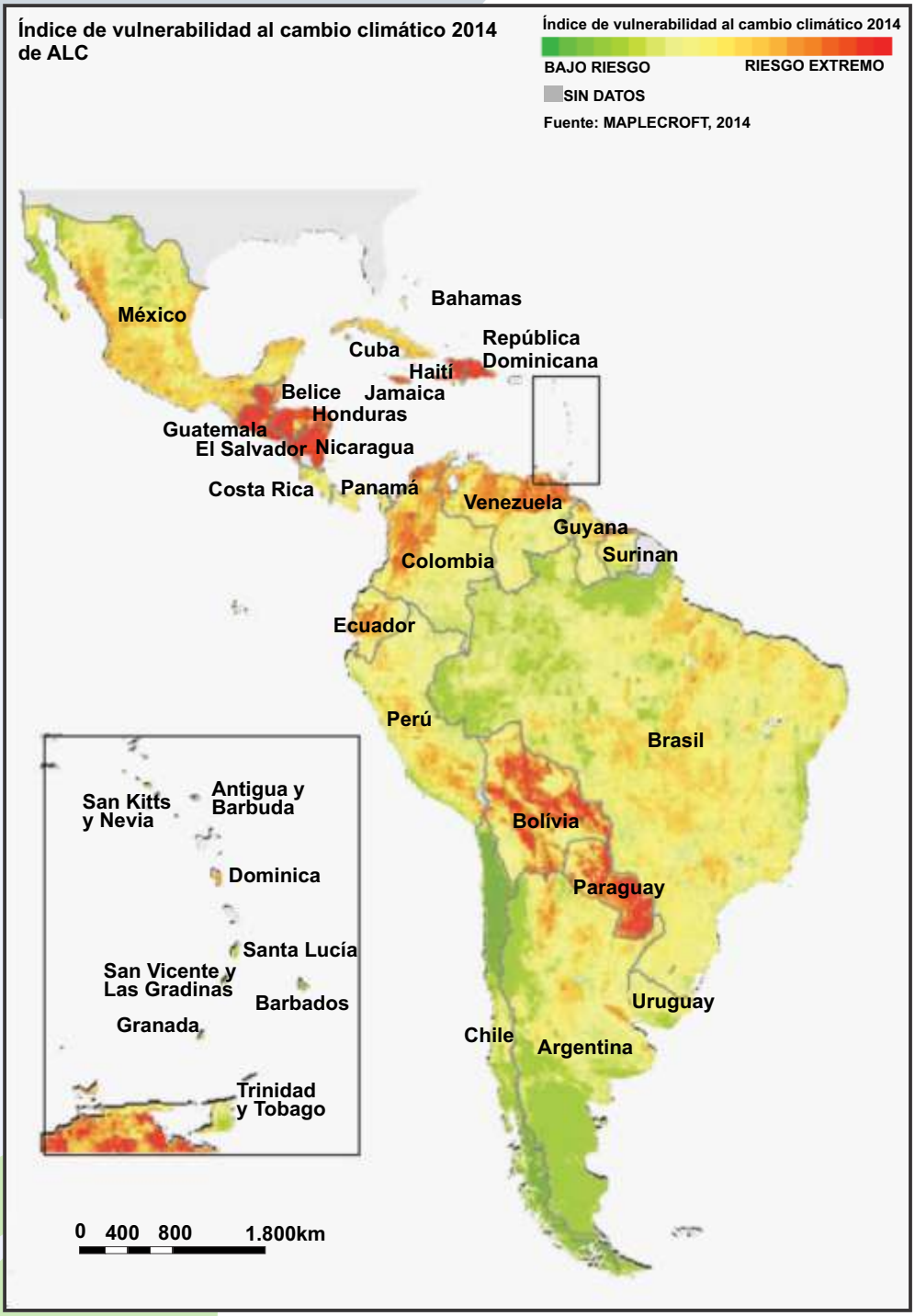

Figura 9. Índice de vulnerabilidad al cambio climático 2014. Fuente: CAF (2014)

Centroamérica:

Los países de Mesoamérica, presentan los niveles de vulnerabilidad más extremos, siendo Guatemala el país con mayor vulnerabilidad en Mesoamérica.

Las zonas urbanas con riesgos de vulnerabilidad extrema se localizan en pequeños países centroamericanos.

Las principales zonas urbanas que se ubican en países como El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua, se clasifican como de riesgos altos o extremos.

El 75 % de los países centroamericanos tienen niveles de riesgos altos.

Países desarrollados como México, tienen economías más diversas y mejores capacidades técnicas para la adaptación.

El Caribe:

Las grandes naciones del Caribe presentan los niveles de vulnerabilidad más extremos. Haití es el país más vulnerable de toda la América Latina y el Caribe.

Las zonas urbanas con riesgos de vulnerabilidad extrema se localizan en Haití y República Dominicana.

Los índices asociados a todas las zonas urbanas ubicadas en el Caribe se clasifican como de riesgos altos o extremos.

Más de la mitad de los países del Caribe tienen riesgos clasificados como extremos asociados a la exposición.

En el Caribe, existen países cuya economía depende, principalmente, de la actividad turística, lo cual determina que tengan un alto riesgo de exposición al cambio climático, dado que la ocurrencia de eventos extremos como huracanes y tormentas tropicales pueden producir erosión de las playas, así como destrucción de la infraestructura turística.

Suramérica:

En Suramérica los países con mayor vulnerabilidad son Paraguay y Bolivia.

Las principales zonas urbanas que se ubican en países como Bolivia, Surinam y Venezuela, se clasifican como de riesgos altos o extremos.

Suramérica es la región menos expuesta y en el caso de países desarrollados como Chile, Uruguay y Brasil, tienen economías más diversas y mejores capacidades técnicas para la adaptación.

3.3 COMPARACIÓN DE LAS PROYECCIONES DE AMENAZAS CLIMÁTICAS EXTREMAS Y LOS ÍNDICES DE VULNERABILIDAD EN ALC

Las conclusiones obtenidas por el equipo de trabajo de la CAF, sobre la vulnerabilidad de los países que integran la región latinoamericana y caribeña, ante la ocurrencia de amenazas climáticas, están basadas en los valores de un índice calculado para cada país, que fue estimado utilizando la información disponible hasta el año de la publicación del estudio, es decir, 2014; mientras que el índice que permite la caracterización de las amenazas climáticas (Figuras 6, 7 y 8), ha sido estimado para finales del Siglo XXI.

Por lo tanto, la comparación de los resultados obtenidos con ambos índices se puede hacer en forma relativa, suponiendo que las diferencias relativas entre las vulnerabilidades de los países que integran la región se mantendrán similares para finales del siglo XXI.

De acuerdo a los resultados mostrados en las Figuras 6, 7 y 8, donde se presentan los índices de extremos climáticos, los mayores aumentos de las láminas de precipitación generadas por tormentas extremas se proyectan para las zonas que se ubican en: La Costa Noroccidental de Sur América, la Amazonia, el Noreste de Brasil, La Costa Sureste de Sur América (la costa a nivel de Uruguay y costa norte de Argentina); mientras que los efectos contrarios se observan en algunas islas del caribe, en algunos países de Centroamérica, en el norte de Venezuela y la Costa Norte de Chile.

Comparando ambas fuentes de información (vulnerabilidad y extremos climáticos) se llega a las siguientes conclusiones:

En la zona de la Costa Noroccidental de Sur América, donde se ubican los países de Colombia, Ecuador y Perú, tienen valores altos tanto de los índices de vulnerabilidad, como de extremos climáticos.

La Amazonia que es ocupada, principalmente, por Brasil, y unida a la zona del Noreste de Brasil, presentan índices tanto de vulnerabilidad como de extremos climáticos clasificados como medios.

En la costa de los países Uruguay y Argentina (costa norte), se presentan valores altos del incremento del índice de proyección de intensidad de las tormentas extremas (índice de extremos climáticos); sin embargo, el índice de vulnerabilidad para Uruguay se clasifica como bajo, mientras que el de Argentina se clasifica como medio. El valor del índice de vulnerabilidad en la zona sur de Argentina, es clasificado como bajo.

En el caso de Paraguay y Bolivia, las amenazas climáticas tienen un índice que puede ser clasificado como medio, mientras que los índices de vulnerabilidad de ambos países se clasifican como extremos.

Chile tiene un índice de vulnerabilidad considerado como bajo, y en referencia a los valores del índice de extremos climáticos, en la parte sur del país tiene un valor medio, mientras que en la parte norte el valor de dicho índice es negativo, es decir, se espera que, en esta parte del país, el

grado de la amenaza climática disminuya en el futuro.

En la parte norte de Venezuela, el valor del índice de amenaza climática es negativo, pero el índice de vulnerabilidad es alto.

Países centroamericanos como Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Belice, presentan índices de vulnerabilidad considerados como extremos (muy altos), sin embargo, los valores de los índices asociados al incremento de las intensidades de las tormentas extremas en el clima futuro tienden a disminuir. Algo similar sucede con países caribeños como Haití, República Dominicana, y Jamaica. Es decir, en estos casos los países tienen una vulnerabilidad muy alta, pero se espera que el grado de la amenaza climática disminuya en el futuro. De todas formas, la vulnerabilidad asociada a estos países es tan alta, que los extremos climáticos que ocurren en la actualidad ya tienen la capacidad de generar grandes desastres.

El resto de los países centroamericanos presentan índices de vulnerabilidad y extremos climáticos, clasificados con valores que van desde medios hasta bajos.

México presenta un índice alto de vulnerabilidad y medio de extremos climáticos.

4. INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LAS PROYECCIONES DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA OCURRENCIA DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS, GENERADORES DE DESASTRES DE INUNDACIÓN Y ALUDES TORRENCIALES.

Según el IPCC (2012), los modelos climáticos simulan relativamente bien los cambios observados en las temperaturas extremas, pero la frecuencia, la distribución y la intensidad de las fuertes precipitaciones todavía no son simuladas en forma adecuada (Randall et al., 2007), ya que no pueden reproducir bien los cambios observados en las precipitaciones intensas (Alexander y Arblaster, 2009). Además, las proyecciones de los cambios en las temperaturas extremas tienden a ser más consistentes en los modelos climáticos (en términos de signo) que en los extremos de precipitación (Tebaldi et al., 2006; Orlowsky y Seneviratne, 2011).

En general, uno de los problemas asociados a la evaluación de los cambios, tanto en frecuencia como en intensidad, de los fenómenos climáticos extremos, corresponde a la falta de información adecuada, ya que la poca frecuencia de ocurrencia de este tipo de eventos determina que la cantidad de datos disponibles es pequeña, y a veces, inexistente. Mientras menos frecuente es la ocurrencia del evento extremo mayor será su intensidad y, por lo tanto, su capacidad para generar desastres, pero menor será la disponibilidad de registros históricos.

En el caso de los ciclones tropicales, las diferencias de los resultados obtenidos con los diferentes modelos, sobre las proyecciones del efecto del cambio climático a escala regional, no permiten realizar una estimación confiable de los posibles cambios en la actividad ciclónica tropical (Knutson et al., 2010). Existe un bajo nivel de conocimientos respecto a los mecanismos físicos que pudiesen relacionar el efecto del cambio climático sobre las características de los huracanes o ciclones tropicales, motivo por el cual, los expertos del IPCC muestran un nivel de confianza bajo respecto a la existencia de una posible influencia antropogénica sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos meteorológicos.

En referencia a la ocurrencia e intensidad del fenómeno El Niño/ la Oscilación Sur (ENSO), como fue referido en secciones anteriores, las proyecciones obtenidas simulando los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, han determinado pequeños cambios en la amplitud del fenómeno El Niño, en comparación con la gran amplitud que presentan los resultados de los diferentes modelos utilizados en las estimaciones de dichas proyecciones. Por lo tanto, existe un nivel de confianza bajo en las proyecciones obtenidas con los diferentes modelos sobre los posibles cambios en la variabilidad del fenómeno El Niño/ la Oscilación Sur (ENSO) y en la frecuencia de ocurrencia de eventos de este tipo, debido a la falta de coherencia reflejada en los resultados obtenidos.

En resumen, la confianza en las proyecciones del cambio climático depende de la escala y variable (temporal y espacial) que se está considerando y de si se están proyectando valores extremos o cantidades medias, ya que la confianza en las proyecciones para los extremos es, generalmente, más incierta que para las proyecciones de promedios a largo plazo.

Un ejemplo de la incertidumbre asociada a la estimación de eventos climáticos extremos se observa en la variabilidad de los resultados que se incluyen en la Figuran 3, donde los segmentos muestran la variación que existe entre los valores de los períodos de retorno, máximos y mínimos, asociados a cada región, a escenarios de emisiones y al período de proyección. Por ejemplo, en la Región 8 (Noreste brasilero), período 2081-2100 y escenario de

emisiones A1B, los valores de los períodos de retorno varían entre un valor cerca de 3 años y 57 años, mientras que los resultados correspondientes al 50 % de los modelos utilizados, muestran valores se ubican entre 6 años y 16 años (aproximadamente), con una mediana cercana a los 10 años.

Como fue descrito en secciones anteriores, de acuerdo a lo reportado en la referencia Stocker et al., 2013 (publicación que forma parte del Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático), desde la publicación del Informe Especial del IPCC sobre el Manejo del Riesgo de Eventos y Desastres Extremos (IPCC, 2012), se ha avanzado mucho en la evaluación del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de extremos climáticos, debido a las mejoras en las capacidades de los modelos para simular dichos eventos, mejoras en la comprensión de la ocurrencia y las características de estos eventos y a la nueva evidencia que se ha podido recopilar. Sin embargo, a pesar de estos avances, todavía la mayoría de los modelos no estiman adecuadamente el efecto de los cambios o tendencias de la temperatura sobre los cambios de los eventos extremos de precipitación. Esto ocurre, principalmente en las zonas tropicales, donde se proyectan cambios que subestiman el aumento de las precipitaciones extremas.

Por otra parte, la validación de los resultados que se obtienen con la aplicación de los modelos climáticos, generalmente, se lleva a cabo evaluando en qué medida se aproximan dichos resultados a las observaciones históricas realizadas, en referencia a una variable climática específica (Acevedo y Poveda, 2011). En el caso de extremos de precipitación, un ejemplo de este tipo de variable, pudiese ser las láminas de lluvias diarias máximas anuales.

A este respecto, se consideran muy importantes los comentarios expresados en la referencia Camilloni (2015) ("Proyecciones climáticas regionales, cambios en la precipitación e inundaciones. La Conexión entre ciencia y práctica"; que forma parte de la referencia IPCC, 2015), donde se establece lo siguiente:

¨...las evaluaciones de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos requieren que se consideren las fuentes y la magnitud relativa de las incertidumbres conexas, como las provenientes de modelos climáticos e hidrológicos y de las técnicas de reducción de escala. Por ejemplo, los Modelos Climáticos Globales (GMC por sus siglas en inglés) proporcionan estimaciones creíbles del cambio climático a escala continental y a mayor escala, pero tienen errores significativos a escalas más pequeñas y en la simulación de algunas características de escala mayor. Una importante fuente de error es la parametrización de los procesos a escala de subred. Debido a estas deficiencias de los modelos, las proyecciones de los GCM pueden tener sesgos significativos y, en general, no pueden aplicarse directamente para simular impactos.

La corrección del sesgo estadístico de los errores sistemáticos de los modelos climáticos produce series temporales a largo plazo con una distribución estadística cercana a la de las observaciones, lo que las hace aplicables como insumo para los modelos hidrológicos (por ejemplo, Piani et al., 2010; Hagemann et al., 2011; Teutschbein y Seibert, 2012; Chen et al., 2013). Tanto la reducción de escala como la corrección estadística requieren datos históricos a escalas espaciales apropiadas para la entrada en los modelos de impacto y son procedimientos clave

cuando se consideran los extremos. En particular, la evaluación de los efectos del cambio climático en la frecuencia y la duración de las inundaciones debido a los cambios previstos en las precipitaciones extremas requiere una metodología que considere un enfoque de base física que incorpore información meteorológica corregida por sesgo derivada de modelos climáticos y un modelo hidrológico".

Estos comentarios reflejan el tipo de errores que se obtienen cuando se evalúan las bondades de los modelos climáticos a nivel regional (que es lo que se requiere en la evaluación de impactos), utilizando información histórica observada en dicha región, concluyéndose que las proyecciones de GCM pudiesen tener sesgos significativos y no pueden, en general, aplicarse directamente para la evaluación de impactos. Por este motivo, es necesario realizar la corrección del sesgo estadístico de los errores sistemáticos de los modelos climáticos, a los fines de producir series temporales, a largo plazo, con una distribución estadística cercana a la de las observaciones, para que se puedan utilizar como insumo en la aplicación de los modelos hidrológicos. Tanto las técnicas de reducción de escala ("*Downscaling*"), como la corrección estadística, requieren de datos históricos a escalas espaciales apropiadas, para ser usados como entrada a los modelos que evalúan los impactos del cambio climático. Estos son procedimientos que se deben aplicar, especialmente, cuando se consideran los extremos. En particular, la evaluación del impacto del cambio climático en la frecuencia y duración de las inundaciones, debido a los cambios proyectados en las precipitaciones extremas, requiere de una metodología que considere un enfoque basado en la física de dicho proceso, incorporando la información meteorológica, corregida por el sesgo que pudiesen generar los modelos climáticos.

Un ejemplo de la evaluación de este tipo de sesgo se describe en la referencia Castellano y DeGaetano (2014), sobre "*Downscaled Projections of Extreme Rainfall in New York State*", donde se muestra una comparación de los resultados obtenidos a través de la aplicación de diferentes métodos de reducción de escala ("*Downscaling*"), a los fines de evaluar el rendimiento de modelos climáticos globales (GCM), en crear proyecciones de precipitación extrema para el estado de Nueva York. Este trabajo fue auspiciado por el Centro Regional del Clima del Nordeste (NRCC) y la Autoridad de Investigación y Desarrollo Energético del Estado de Nueva York (NYSERDA).

Los principales objetivos de dicha investigación correspondieron a la evaluación de la capacidad de los modelos climáticos y los métodos de reducción de escala, para replicar extremos históricos de precipitación, el uso de esta metodología en la proyección de extremos de precipitación para períodos futuros, y la cuantificación de las incertidumbres asociadas a los resultados generados por dichas metodologías. Los resultados finales del trabajo incluyeron: 1) Precipitación histórica y futura, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, y para duraciones de 1, 2, 3, 6, 12, 18 y 24 horas, y 2) Curvas históricas y futuras de intensidad-duración-frecuencia (IDF). Es importante destacar que estos son los tipos de resultados que se requieren para llevar a cabo evaluaciones de riesgos de desastres asociados a inundaciones, tanto urbanas como rurales.

Unos de los productos más importantes que se obtuvieron, como parte de este estudio,

corresponde a mapas del estado de Nueva York, que contienen celdas, de 0,5 x 0,5 grados, que muestran la variación espacial del sesgo que tiene el conjunto de resultados generados por la combinación modelo climático – método de reducción de escala, respecto a la información estimada utilizando los datos históricos. Para la elaboración de estos mapas se utilizó la información histórica registrada en 157 estaciones (representativas de la variación espacial en el estado), durante el período 1970-1999. Los resultados de los modelos climáticos se obtuvieron de dos fuentes: 1) La coordinación de experimentos regionales sobre métodos de reducción de escala (CORDEX) y 2) De la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5). Los sesgos de la combinación de modelos climáticos y método de reducción de escala, se estimaron comparando, a nivel de cada celda, las láminas de lluvias diarias máximas anuales, asociadas a períodos de retorno de 5 y 100 años, que fueron estimadas utilizando los resultados de las combinaciones de modelos climáticos y de dos métodos de reducción de escala, respecto a la estimadas utilizando la información histórica; en ambos casos se utilizó la información correspondiente al período 1970-1999. Los resultados correspondientes al primer método de reducción de escala arrojaron una sobrestimación de los valores en la mayor parte del estado de NY, alcanzando sobrestimaciones máximas del orden del 30 %; mientras que los resultados asociados al segundo método de reducción de escala reflejan una subestimación de estos valores en la mayor parte del estado, alcanzando subestimaciones máximas del orden de -30%. Estas grandes diferencias son un reflejo de la gran incertidumbre asociada a dichas estimaciones. Adicionalmente, en ambos casos se obtuvo una gran variabilidad espacial de dichos sesgos.

Adicionalmente, es importante comentar que, para el proyecto de obras de protección contra inundaciones, tanto rurales como urbanas, se requiere de la definición de las tormentas de diseño, incluyendo su variación temporal y espacial, y asociadas a un determinado período de retorno. Posteriormente, las características de estas tormentas se utilizan como datos de entrada en modelos hidrológicos de simulación de eventos extremos, que producen una transformación no lineal de los hietogramas de dichas tormentas, a los fines de generar los hidrogramas de las crecidas de diseño, de las obras civiles de protección contra inundaciones. Esta no linealidad que caracterizan a los modelos hidrológicos, amplifica los errores que se producen a nivel de las estimaciones de las láminas de precipitación, bien sea por sobrestimación o subestimación, es decir, si el error a nivel de la estimación de la tormenta de diseño es del orden del 30 %, a nivel de los caudales máximos de los hidrogramas de crecidas, dicho error será mucho mayor.

5. LA BRECHA ENTRE LA CIENCIA CLIMÁTICA Y LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES, RESPECTO AL DISEÑO DE OBRAS CIVILES, TOMANDO EN CONSIDERACIÓN EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

Recientemente, en el mes de mayo de 2017, se celebró un taller de trabajo auspiciado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), relacionado con métodos de ingeniería para estimar la precipitación de diseño bajo un clima cambiante, debido al efecto del cambio climático.

Como parte de este taller, los autores Sreetharan y Giovannettone (2017), presentaron un trabajo sobre el ejercicio de la ingeniería y el problema del cambio climático, debido a la necesidad de incluir dentro de los parámetros de diseño de las obras de ingeniería, el efecto que tendrá dicho cambio.

Esto es especialmente cierto en el diseño de las obras hidráulicas que se utilizan para controlar los desastres que causan las tormentas extremas que generan inundaciones y/o aludes torrenciales. Obras como canalizaciones, diques marginales, puentes, embalses y lagunas, presas para la retención de sedimentos, etc.; requieren de la definición de las tormentas de diseño, a través de la estimación de la variación tanto temporal como espacial de estos eventos, asociadas a un determinado período de retorno o probabilidad de excedencia de dicho evento. Las metodologías estándar que se usan para realizar dichas estimaciones consideran que el clima es estacionario, es decir, que los parámetros de las distribuciones probabilísticas que se le ajustan a los registros históricos de dichos eventos permanecen constantes en el tiempo. Bajo la condición de un clima cambiante (no estacionario), la consideración de clima estacionario generaría subestimaciones en el diseño de estas obras.

Por otra parte, analizando algunas de las conclusiones que se dan en los informes de evaluación del cambio climático, se observa que se usa mucho una terminología cualitativa para definir el comportamiento futuro de estos eventos extremos (Por ejemplo, en el caso de precipitación se utilizan términos en inglés como “heavy”, “very heavy” y “extreme”); mientras que para el diseño de obras se requiere de una información cuantitativa. Es importante reconocer que en estos últimos informes de evaluación del efecto del cambio climático (AR4 y AR5), ya se están produciendo avances en este sentido (cuantitativo), al incluir el efecto de los escenarios de cambio climático en los valores de variables como la precipitación máxima anual acumulada en cinco días y la precipitación diaria máxima anual (ver Figuras 6, 7 y 8).

Las principales conclusiones del trabajo de Sreetharan y Giovannettone (2017), se pueden resumir de la siguiente forma:

Para considerar la influencia de las tendencias climáticas en el diseño de obras civiles, los ingenieros han tenido que salir de su zona de confort, relacionada con la implementación de estándares de diseño aceptados a nivel de cada país, a los fines de desarrollar otros tipos de metodologías que incluyan el efecto del cambio climático.

La estacionalidad climática es la piedra angular de todos los estándares de diseño de recursos hídricos.

Por lo tanto, a nivel del país (refiriéndose a Estados Unidos de América, pero aplicable a cualquier país), se identifican dos necesidades apremiantes: primero, un estudio a escala nacional para evaluar la evidencia de la no estacionalidad climática en los registros de

precipitación y, segundo, evaluar si dicha no estacionalidad impactará las normas y prácticas actuales de diseño.

En septiembre de 2016, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano (USACE, 2016), emitió un boletín identificado como 2016-25, sobre Ingeniería y Construcción, donde se establecen unas guías para incorporar el efecto del impacto del cambio climático en los estudios hidrológicos requeridos para el diseño de obras civiles. Recientemente, en enero del 2017, el USACE publicó el manual de usuario de una herramienta para detectar la no estacionalidad en series de tiempo hidrológicas (USACE, 2017). Ambas publicaciones muestran la importancia que le asigna la USACE a la consideración de estos efectos en el diseño de las obras requeridas para controlar inundaciones y aludes torrenciales.

Debido a la necesidad que tienen los ingenieros relacionada con la toma de decisiones sobre los criterios a utilizar para el diseño de obras civiles bajo un clima cambiante, se están realizando evaluaciones, como las descritas en USACE (2017), a los fines de probar la existencia de la no estacionalidad de las series climáticas e hidrológicas; como es el caso del trabajo descrito en la referencia Bonnin, Kazungu and Yekta (2011). En dicha referencia se analizan las tendencias que presentan las lluvias extremas observadas en algunas zonas de USA, encontrándose tendencias positivas en algunas zonas y negativas en otras, pero al analizar las magnitudes de dichas tendencias se encontró que las mismas eran inferiores a las incertidumbres asociadas a los resultados obtenidos mediante la aplicación de diferentes métodos de estimación de la frecuencia de ocurrencia de estos eventos extremos. Otro trabajo reciente, que se considera muy importante, sobre análisis de tendencias de registros históricos de eventos extremos, es el descrito en la referencia Barros, et al., (2014), relacionado con los caudales máximos anuales registrados en un gran número de estaciones hidrométricas (seleccionadas analizando la información de más de 10.000 estaciones, donde 47 de ellas disponen de más de 100 años de registros) ubicadas en las regiones del sureste y atlántico medio norteamericano, encontrándose que en más del 80 % de las estaciones no se observó una tendencia estadísticamente significativa (sin tendencia), en más del 11 % la tendencia fue negativa (estaciones ubicadas aguas abajo de embalses o en zonas kársticas) y sólo en menos de un 7 % la tendencia fue positiva (generalmente en áreas urbanas); sin embargo, al observar la distribución espacial de las tendencias positivas, en mapas de estas regiones, se encontró que las mismas estaban mezcladas con estaciones que en su mayoría no presentaban tendencia alguna. Adicionalmente, en la referencia Archfield (2017), se presenta un análisis de los cambios en frecuencia, duración, magnitud y volumen de los hidrogramas de crecidas extremas, en todo el territorio norteamericano, en los últimos 70 años; concluyendo que no se encontraron tendencias consistentes sobre los cambios en las propiedades de estos hidrogramas, con la excepción de algunas pocas regiones en U.S.A., que presentaron tendencias a cambios en la frecuencia o duración, pero no en la magnitud de los caudales máximos (caudales picos de las crecidas).

En referencia a la consideración de la no estacionalidad en la estimación de los períodos de retorno, para seleccionar los parámetros de diseño de estructuras hidráulicas, ya existen trabajos como el descrito en la referencia Salas y Obeysekera (2014), donde se realiza una

revisión de los conceptos de período de retorno y riesgo, que se deben tomar en cuenta cuando se analizan eventos hidrológicos extremos no estacionarios. Por otra parte, en la referencia Gilroy and McCuen (2012), se describe una metodología para la realización de análisis de frecuencias de inundaciones, utilizando la no estacionalidad que introduce, no sólo el clima cambiante (cambio climático), sino también el crecimiento futuro de la huella urbana. Según lo establecen sus autores, el método desarrollado pretende iniciar una discusión entre ingenieros, científicos y los que toman decisiones políticas, en lo que respecta a la incorporación de la no estacionalidad, debido a múltiples factores, en los diseños de obras civiles.

Como se puede observar en párrafos anteriores, se están realizando investigaciones y análisis metodológicos a los fines de incorporar dentro de los criterios de diseño de obras de protección contra los desastres causados por las inundaciones y/ o aludes torrenciales, el efecto del cambio climático, a los fines de evitar un diseño inadecuado de dichas obras.

Lo descrito en los apartes anteriores refleja la importancia que le están dando los tomadores de decisiones, a la evaluación de las tendencias que presentan los registros históricos de variables climáticas e hidrológicas.

Finalmente, como se describe en detalle en la próxima sección, en una reunión de expertos del IPCC, se establecieron una serie de recomendaciones para que sean tomadas en cuenta en la elaboración del próximo informe de evaluación, identificado como AR6. Dentro de este conjunto de recomendaciones, una de las más importante, corresponde a la necesidad de realizar un diálogo entre los integrantes de los grupos de trabajo del AR6, con los responsables de la toma de decisiones, que serán los usuarios de las proyecciones del efecto de los cambios climáticos sobre la ocurrencia de los eventos extremos, a los fines de definir las características que debe tener la información que les será suministrada. Es decir, este diálogo será (o debería ser) entre los científicos relacionados con las áreas de modelación climática a nivel regional, técnicas de reducción de escala, impactos climáticos y análisis de riesgo; con los hidrólogos, ingenieros hidráulicos, ambientalistas evaluadores de impactos ambientales, expertos en la evaluación de riesgos asociados a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, etc.; a los fines de definir el tipo de información que requiere cada uno de estos grupos, para poder incorporar, en forma adecuada, el efecto del cambio climático sobre cada una de las actividades que desarrollan dichos grupos.

6. RESUMEN DE LAS RECOMENDACIONES DESCRITAS EN LA REFERENCIA IPCC (2015), PARA LA ELABORACIÓN DEL SEXTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (AR6)

En septiembre del año 2015, se llevó a cabo en Brasil un taller de trabajo auspiciado por el IPCC, sobre proyecciones climáticas a nivel regional y su uso en la evaluación de impactos y análisis de riesgo, donde participaron 110 expertos representando a 52 países. Este grupo de expertos estuvo conformado por integrantes de los grupos de trabajo I y II, del IPCC, así como grupos de científicos relacionados con las áreas de modelación climática a nivel regional, técnicas de reducción de escala, impactos climáticos y análisis de riesgo.

Como parte del taller se conformaron tres grupos de trabajos. El primero de ellos correspondió a las evaluaciones, nacionales y regionales, de las proyecciones sobre impactos y modelación de riesgos. Uno de los productos de dicho grupo fue el relacionado con una serie de recomendaciones importantes, que convendría ser tomadas en cuenta, en la elaboración del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR6).

Dentro de este conjunto de recomendaciones, es conveniente comentar el contenido de una de ellas, que se considera importante desde el punto de vista de las proyecciones sobre la ocurrencia de eventos climáticos extremos y el cambio climático, la cual corresponde al establecimiento de índices de riesgo y vulnerabilidad. Según esta recomendación, en el AR6, estos índices deberían abarcar una gama que incluya procesos físicos, impactos y los sectores socioeconómicos; razón por la cual, se recomienda la estimación de índices integrados que incluyan tanto variables físicas como las que describen las amenazas naturales (ocurrencia de eventos climáticos extremos), así como variables que describan tanto la exposición como la vulnerabilidad (factores socioeconómicos, biodiversidad, distribución demográfica, infraestructuras, etc.).

Otro grupo de trabajo analizó el tema relacionado con eventos extremos de alto riesgo y baja probabilidad de ocurrencia, cuyo principal objetivo estuvo orientado hacia la comprensión, cuantificación y predicción de eventos extremos, climáticos y meteorológicos, de alto impacto, a los fines de tomar decisiones sobre el análisis de riesgo asociado a desastres naturales. Como parte de los resultados obtenidos, por este grupo de expertos, se establecieron las siguientes recomendaciones, consideradas como claves:

En referencia a la investigación, se considera que mejoras en el conocimiento y la comprensión de las causas de la ocurrencia de estos eventos extremos, permitirá realizar una mejor cuantificación tanto de la frecuencia, intensidad y duración, como de la cobertura espacial de dichos eventos, para las condiciones climáticas actuales, a los fines de poder realizar proyecciones futuras más confiables. Por lo tanto, se consideró recomendable que el IPCC le asigne una mayor prioridad a la investigación relacionada con la ocurrencia de este tipo de eventos extremos.

La segunda recomendación está relacionada con la necesidad de establecer el trabajo conjunto de los grupos I (Las bases de las ciencias físicas) y II (Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad), a los fines de evaluar registros históricos sobre las dimensiones físicas de estos eventos extremos y sus impactos sobre los sistemas naturales y humanos. Adicionalmente, se consideró recomendable el diálogo entre los integrantes de los grupos de trabajo del IPCC, con los responsables de la toma de decisiones, que serán los usuarios de las proyecciones del

efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de los eventos extremos, a los fines de definir las características que debe tener la información que será suministrada como producto del AR6, para poder satisfacer los requerimientos de los diferentes grupos que conforman los tomadores de decisiones.

La tercera recomendación está relacionada con los talleres e informes especiales. El informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres, para mejorar la adaptación al cambio climático, descrito en la referencia IPCC (2012), y analizado en la sección 3.1 del presente documento, es considerado como un recurso muy útil para lograr la integración futura de los grupos de trabajo I y II, con el propósito de realizar una actualización y extensión de dicho informe, en forma coordinada con otros informes especiales. Adicionalmente se consideró conveniente la elaboración de guías sobre las técnicas que se deben llevar a cabo para la reducción de los sesgos que se pudiesen presentar en las proyecciones futuras de la ocurrencia de eventos climáticos extremos.

Además de este conjunto de recomendaciones consideradas como claves, también se incluyen requerimientos asociados a problemas específicos y, las recomendaciones correspondientes, para poder satisfacer dichos requerimientos.

Entre este conjunto de problemas se plantea de nuevo la falta de comprensión, de las causas y la magnitud, de los eventos de baja probabilidad (extremos) y alto impacto, incluso desde una perspectiva de ciencia puramente física; adicionalmente, se considera que no hay suficiente conocimiento sobre qué tipos de eventos extremos se pueden representar, usando el conjunto de modelos disponibles; y se reitera el desajuste que existe entre la información que proveen los científicos del clima y las necesidades de los tomadores de decisiones, razón por la cual, se consideró conveniente que los científicos del clima reduzcan la brecha que existe entre la ciencia climática y las necesidades de información que tienen los usuarios de la misma.

CONCLUSIONES

Consideraciones generales

La mayoría de los modelos no estiman en forma adecuada la sensibilidad que tienen los cambios de eventos extremos de precipitación a los cambios o tendencias de la temperatura, lo cual ocurre, principalmente, en los trópicos, subestimando el aumento que las precipitaciones extremas pueden tener en el futuro.

Hay un nivel de confianza medio que el aumento de estos extremos diarios estará entre 5 a 10 %, por cada grado centígrado de aumento de la temperatura local.

En referencia al nivel medio del mar, en el 94 % de los mareógrafos se han observado aumentos en los niveles extremos, concluyéndose que en el futuro es muy probable que se produzca un aumento significativo en la ocurrencia de estos valores.

En general los resultados descritos en el AR5 siguen las mismas tendencias de los obtenidos en el AR4, pero con variaciones importantes a nivel regional.

Respecto a los ciclones tropicales, se concluye lo siguiente:

El nivel de confianza es bajo, sobre la ocurrencia de cambios futuros en la actividad ciclónica.

Las proyecciones obtenidas indican que es probable que la frecuencia de los ciclones tropicales disminuya o permanezca sin cambios.

Es probable que aumenten los valores máximos de velocidades de vientos, pero no es probable que ocurra un aumento significativo de la frecuencia de tormentas con mayor intensidad.

En referencia al fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS), se concluye:

Este fenómeno climático seguirá dominando la variabilidad climática natural con influencias globales.

Las proyecciones obtenidas, modelando los escenarios RCP4,5 y RCP8,5, sobre el cambio en la amplitud de El Niño, es pequeña, en comparación con la gran amplitud que presentan los resultados de los diferentes modelos utilizados en las estimaciones de dichas proyecciones. Por lo tanto, el nivel de confianza es bajo, sobre las proyecciones de los posibles cambios en los impactos que tiene este fenómeno, en el clima de regiones como las que integran a ALC.

Consideraciones específicas

Los cambios proyectados de la precipitación máxima anual acumulada en cinco días, para el período 2081-2100 y correspondiente al escenario más extremo del AR5, RCP8,5, muestran que el promedio global sobre todo el globo terráqueo es de un incremento del orden del 20 %, a finales del Siglo XXI, aunque, a nivel regional existen zonas donde se produce una disminución de dicho índice.

A nivel de ALC, se observa que los mayores valores de este aumento (precipitación máxima

anual acumulada en cinco días) se presentan en la Costa Noroccidental de Sur América, la Amazonia, el Noreste de Brasil y la Costa Sureste de Sur América; mientras que, en algunas islas del caribe, en el norte de Venezuela y la costa norte de Chile, estos valores tienden a disminuir respecto a la condición actual.

El cambio porcentual, por cada grado centígrado de incremento de la temperatura media local, de la lámina de lluvia diaria máxima anual, que utilizando los valores observados durante el período 1986-2005, se le había estimado un período de retorno de 20 años, arroja los mayores valores en la Costa Noroccidental de Sur América, la Amazonia, el Noreste de Brasil, la Costa Sureste de Sur América (que incluye la costa a nivel de Uruguay y costa norte de Argentina); mientras que efectos contrarios (disminuciones) se observan en algunas islas del caribe, en algunos países de Centroamérica, en el norte de Venezuela y la costa norte de Chile.

En la mayoría de los países que integran ALC, se proyectan incrementos en ambos índices, precipitación máxima anual acumulada en cinco días y lámina de precipitación diaria máxima anual.

Resultados de la comparación de las proyecciones de amenazas climáticas extremas con los índices de vulnerabilidad (estimados por la CAF, 2014) en ALC.

En la zona de la Costa Noroccidental de Sur América, donde se ubican los países de Colombia, Ecuador y Perú, tienen valores altos tanto de los índices de vulnerabilidad, como de extremos climáticos.

La Amazonia que es ocupada, principalmente, por Brasil, y unida a la zona del Noreste de Brasil, presentan índices tanto de vulnerabilidad como de extremos climáticos clasificados como medios.

En la costa de los países Uruguay y Argentina (costa norte), se presentan valores altos del incremento del índice de proyección de intensidad de las tormentas extremas (índice de extremos climáticos); sin embargo, el índice de vulnerabilidad para Uruguay se clasifica como bajo, mientras que el de Argentina se clasifica como medio. El valor del índice de vulnerabilidad en la zona sur de Argentina es clasificado como bajo.

En el caso de Paraguay y Bolivia, las amenazas climáticas tienen un índice que puede ser clasificado como medio, mientras que los índices de vulnerabilidad de ambos países se clasifican como extremos.

Chile tiene un índice de vulnerabilidad considerado como bajo, y en referencia a los valores del índice de extremos climáticos, en la parte sur del país tiene un valor medio, mientras que en la parte norte el valor de dicho índice es negativo, es decir, se espera que, en esta parte del país, el grado de la amenaza climática disminuya en el futuro.

En la parte norte de Venezuela, el valor del índice de amenaza climática es negativo, pero el índice de vulnerabilidad es alto.

Países centroamericanos como Guatemala, El Salvador, Honduras, Belice y Nicaragua, presentan índices de vulnerabilidad considerados como extremos (muy altos), sin embargo, los

valores de los índices asociados al incremento de las intensidades de las tormentas extremas en el clima futuro tienden a disminuir. Algo similar sucede con países caribeños como Haití, República Dominicana, y Jamaica. Es decir, en estos casos los países tienen una vulnerabilidad muy alta, pero se espera que el grado de la amenaza climática disminuya en el futuro. De todas formas, la vulnerabilidad asociada a estos países es tan alta, que los extremos climáticos que ocurren en la actualidad ya tienen la capacidad de generar grandes desastres.

El resto de los países centroamericanos presentan índices de vulnerabilidad y extremos climáticos, clasificados con valores que van desde medios hasta bajos. México presenta un índice alto de vulnerabilidad y medio de extremos climáticos.

Fuentes de incertidumbres asociadas a las proyecciones del efecto del cambio climático sobre la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos. Según el IPCC (2012), los modelos climáticos simulan relativamente bien los cambios observados en las temperaturas extremas, pero la frecuencia, la distribución y la intensidad de las fuertes precipitaciones todavía no son simuladas en forma adecuada (Randall et al., 2007).

Falta de información adecuada, ya que la poca frecuencia de ocurrencia de este tipo de eventos determina que la cantidad de datos disponibles es pequeña; mientras menos frecuente es la ocurrencia del evento extremo mayor será su intensidad y, por lo tanto, su capacidad para generar desastres, pero menor será la disponibilidad de registros históricos. Esta falta de información limita la adecuada evaluación de los cambios.

En el caso de los ciclones tropicales, se reconoce que existe un bajo nivel de conocimientos respecto a los mecanismos físicos que pudiesen relacionar el efecto del cambio climático sobre las características de los huracanes o ciclones tropicales.

Existe un nivel de confianza bajo en las proyecciones obtenidas con los diferentes modelos sobre los posibles cambios en la variabilidad del fenómeno El Niño/ la Oscilación Sur (ENSO) y en la frecuencia de ocurrencia de eventos de este tipo, debido a la falta de coherencia reflejada en los resultados obtenidos.

Un ejemplo de la incertidumbre asociada a la estimación de eventos climáticos extremos se observa en la variabilidad de los resultados que se incluyen en la Figura 3, donde los segmentos muestran la variación que existe entre los valores de los períodos de retorno, máximos y mínimos, asociados a cada región, a escenarios de emisiones y al período de proyección. Observando la Región 8 (Noreste brasilero), período 2081-2100 y escenario de emisiones A1B, los valores de los períodos de retorno varían entre un valor cerca de 3 años y 57 años, mientras que los resultados correspondientes al 50 % de los modelos utilizados, muestran valores se ubican entre 6 años y 16 años (aproximadamente), con una mediana cercana a los 10 años.

La brecha entre la ciencia climática y los responsables de la toma de decisiones, respecto al diseño de obras civiles, tomando en consideración el efecto del cambio climático.

En mayo de 2017, se llevó a cabo un taller de trabajo auspiciado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), sobre Métodos de ingeniería para estimar la precipitación de diseño bajo un clima cambiante, debido al efecto del cambio climático. Durante este evento los

autores Sreetharan y Giovannettone (2017), presentaron un trabajo sobre el ejercicio de la ingeniería y el problema del cambio climático, con las siguientes conclusiones:

Para considerar la influencia de las tendencias climáticas en el diseño de obras civiles, los ingenieros han tenido que salir de su zona de confort, relacionada con la implementación de estándares de diseño aceptados a nivel de cada país, a los fines de desarrollar otros tipos de metodologías que incluyan el efecto del cambio climático.

La estacionalidad climática es la piedra angular de todos los estándares de diseño de recursos hídricos.

Por lo tanto, a nivel del país (refiriéndose a Estados Unidos de América, pero aplicable a cualquier país), se identifican dos necesidades apremiantes: primero, un estudio a escala nacional para evaluar la evidencia de la no estacionalidad climática en los registros de precipitación y, segundo, evaluar si dicha no estacionalidad impactará las normas y prácticas actuales de diseño.

En septiembre de 2016, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano (USACE, 2016), emitió un boletín identificado como 2016-25, sobre Ingeniería y Construcción, donde se establecen unas guías para incorporar el efecto del impacto del cambio climático en los estudios hidrológicos requeridos para el diseño de obras civiles.

Recientemente, en enero del 2017, el USACE publicó el manual de usuario de una herramienta para detectar la no estacionalidad en series de tiempo hidrológicas (USACE, 2017).

Para la consideración de la no estacionalidad en la estimación de los períodos de retorno, para seleccionar los parámetros de diseño de estructuras hidráulicas, ya existen trabajos como los descritos en las referencias: Salas y Obeysekera (2014), donde se realiza una revisión de los conceptos de período de retorno y riesgo, que se deben tomar en cuenta cuando se analizan eventos hidrológicos extremos no estacionarios. Gilroy and McCuen (2012), se describe una metodología para la realización de análisis de frecuencias de inundaciones, utilizando la no estacionaridad que introduce, no sólo el clima cambiante (cambio climático), sino también el crecimiento futuro de la huella urbana.

Lo descrito en los apartes anteriores refleja la importancia que le están dando los tomadores de decisiones, a la evaluación de las tendencias que presentan los registros históricos de variables climáticas e hidrológicas.

RECOMENDACIONES

En base a la información recopilada y a las recomendaciones descritas en la referencia IPCC (2015), para la elaboración del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (AR6) este informe desea recalcar la importancia de las siguientes acciones:

Se deber dar prioridad a la investigación relacionada con la ocurrencia de eventos extremos, para mejorar el conocimiento y la comprensión de las causas que generan dichos eventos, y poder realizar proyecciones futuras más confiables.

Se deben desarrollar índices integrados de riesgo y vulnerabilidad que incluyan tanto variables físicas, como las amenazas naturales (ocurrencia de eventos climáticos extremos), así como variables que describan tanto la exposición como la vulnerabilidad (factores socioeconómicos, biodiversidad, distribución demográfica, infraestructuras, etc.).

Se debe fomentar el diálogo entre los integrantes de los grupos de trabajo del IPCC, con los responsables de la toma de decisiones, a los fines de definir las características que debe tener la información que será suministrada como producto del AR6, para poder satisfacer los requerimientos de los diferentes grupos que conforman los tomadores de decisiones.

Se deben elaborar guías sobre las técnicas que se deben llevar a cabo para la reducción de los sesgos que se pudiesen presentar en las proyecciones futuras de la ocurrencia de eventos climáticos extremos.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Acevedo, L. y G. Poveda. 2011. Construcción y análisis de curvas intensidad-frecuencia-duración (IDF), bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Revista Colombia Amazónica. Medellín, Colombia.

Alexander, L.V. and J.M. Arblaster, 2009: Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections. International Journal of Climatology, 29(3), 417-435.

Archfield S.A. (2017). Changes in frequency, duration, magnitude and volume of flood events across the United States over the past 70 years. National Research Program, U.S. Geological Survey. Taller sobre métodos de ingeniería para estimar la precipitación de diseño bajo un clima cambiante, debido al efecto del cambio climático. Auspiciado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Virginia, USA.

Barros, A.P., Duan Y., Brun J., and M. Medina. 2014. Flood Nonstationarity in the Southeast and Mid-Atlantic Regions of the United States. J. Hydrol. Eng., 2014, 19(10).

Bonnin, Geoffrey M., Kazungu Maitaria, and Michael Yekta, 2011. Trends in Rainfall Exceedances in the Observed Record in Selected Areas of the United States. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 46(2): 344–353.

CAF. 2014. Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe. Elaborado por el Equipo Técnico de la Corporación Andina de Fomento, CAF. ISBN: 978-980-7644-61-7.

Camilloni, I. 2015. Regional Climate Projections, Precipitation Changes and Flooding: The Connection Between Science and Practice. In: IPCC, 2015: Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, and M. Tignor (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 171.

Castellano C. and A.T. DeGaetano. 2014. Downscaled Projections of Extreme Rainfall in New York State. Northeast Regional Climate Center, Cornell University, Ithaca, NY. 26th Conference on Climate Variability and Change. Sponsored by the American Meteorological Society. The Georgia World Congress Center. Atlanta, USA.
https://ams.confex.com/ams/94Annual/webprogram/Session35319.html

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gau, I. Held, R. Jones, R. Kolli, W. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, and P. Whetton, 2007: Regional climate projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 847-940.

Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Com and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

FAO. 2017. Lineamientos y recomendaciones para la implementación del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres en el Sector Agrícola y Seguridad Alimentaria y Nutricional América Latina y el Caribe. Estudio realizado por la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, con la colaboración técnica de UNISDR, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgos de Desastres. http://www.unisdr.org/files/50526_lineaminetos061016.pdf

Fernádez C. y S. Buss. 2016. Ocurrencia y gestión de inundaciones en América Latina y el Caribe – Factores claves y experiencia adquirida. Nota técnica N° IDG-TN-924. División de Agua y Saneamiento. Banco Interamericano de Desarrollo.

Gilroy K. and R McCuen. 2012. A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future clime change an urbanization. Journal of Hydrology. 414-415 (2012) 40-48.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC, 2013: Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2015: Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, and M. Tignor (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 171.

Kim, S., E. Nakakita, Y. Tachikawa, and K. Takara, 2010: Precipitation changes in Japan under the A1B climate change scenario. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 54, 127-132.

Knutson, T.R., J.L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J.P. Kossin, A.K. Srivastava, and M. Sugi, 2010: Tropical cyclones and climate change. Nature Geoscience, 3(3), 157-163

Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña, 2014: Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White
(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.

NOAA. 2013. "Ciclones tropicales". Guía de preparación. Departamento de Comercio de los EE.UU. Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera Servicio Nacional de Meteorología. USA.

Orlowsky, B. and S.I. Seneviratne, 2011: Global changes in extremes events: Regional and seasonal dimension. Climatic Change, doi:10.1007/s10584-011-0122-9.

Pulgarín E.G. y G. Poveda. 2009. Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana). Tesis de Maestría. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi, and K.E. Taylor, 2007: Climate models and their evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, pp. 589-662.

Salas J and J. Obeysekera. Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. Journal of hydrologic engineering, ASCE. 2014.19:554-568.

Sreetharan M. and J. Giovannettone, (2017). Los ingenieros en ejercicio y la cuestión del cambio climático. Taller sobre métodos de ingeniería para estimar la precipitación de diseño bajo un clima cambiante, debido al efecto del cambio climático. Auspiciado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Virginia, USA.

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan and S.-P. Xie, 2013: Technical Sum-mary. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working

Group I to the Fifth Assesst Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tebaldi, C., K. Hayhoe, J.M. Arblaster, and G.A. Meehl, 2006: Going to the extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. Climatic Change, 79(3-4), 185-211.

USACE. 2016. Guidance for Incorporating Climate Change Impacts to Inland Hydrology in Civil Works Studies, Designs, and Projects. Engineering and Construction Bulletin No. 2016-25. Issuing Office: CECW-CE Issued: 16 Sep 2016.

USACE. 2017. Nonstationarity Detection Tool. User Guide. Version 1.1. U.S. Army Corps of Engineers. Climate Preparedness and Resilience Community of Practice. Washington, DC, USA.

Yu, P., Yang, T., Lin, C. 2004. Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. Journal of Hydrology. 295(2004), 108-123.

ANEXO 1. ESCENARIOS CONSIDERADOS EN EL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (AR5) (IPCC, 2013)

En la formulación de estos escenarios se consideran los impulsores del cambio climático, cuya definición se incluye a continuación, como una copia textual de lo contenidos en la referencia IPCC (2013).

"Las sustancias y los procesos naturales y antropógenos que alteran el balance energético de la Tierra son impulsores del cambio climático. El forzamiento radiativo permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía provocados por los cambios producidos en estos impulsores en 2011, en relación con 1750, a menos que se indique otra cosa. Cuando el forzamiento radiativo es positivo, se produce un calentamiento en superficie, y cuando es negativo, un enfriamiento. El forzamiento radiativo se calcula a partir de observaciones obtenidas in situ y por teledetección de las propiedades de los gases de efecto invernadero y los aerosoles y de estimaciones que utilizan modelos numéricos para representar los procesos observados. Algunos de los compuestos emitidos afectan a la concentración atmosférica de otras sustancias. El forzamiento radiativo puede señalarse mediante cambios en la concentración de cada sustancia, o también puede señalarse por la emisión de un componente, lo que ofrece una relación más directa con la actividad humana. Este incluye las contribuciones de todas las sustancias afectadas por esa emisión. El forzamiento radiativo antropógeno total de los dos métodos es idéntico cuando se consideran todos los impulsores. Aunque en este Resumen para responsables de políticas se utilizan ambos métodos, se tiene en cuenta principalmente el forzamiento radiativo basado en las emisiones."

Haciendo uso de estos conceptos sobre forzamientos radiativos, en la referencia IPCC (2013) se lleva a cabo la definición de cuatro nuevos escenarios identificados como Trayectorias de Concentración Representativa (RCP en inglés, *Representative Concentration Pathways*). A continuación, se copia en forma textual la descripción de cada uno de estos escenarios, la cual forma parte de la referencia IPCC (2013).

"Los escenarios utilizados en el Grupo de trabajo I se han centrado en las emisiones antropógenas y no incluyen cambios en impulsores naturales, como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales, por ejemplo, de CH4 y N2O. Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés, véase el glosario), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750, esto es, 2,6 W/m2, en el caso del escenario RCP2,6; 4,5 W/m2, en el caso del escenario RCP4,5; 6,0 W/m2, en el caso del escenario RCP6,0, y 8,5 W/ m2, en el caso del escenario RCP8,5. En relación con los resultados de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) (Programa Mundial de Investigaciones Climáticas), los valores indicados deben entenderse únicamente a título indicativo, ya que el forzamiento climático resultante de todos los impulsores varía entre los distintos modelos, debido a las características propias del modelo

y al modo específico en que se consideran los elementos de forzamiento climático de corta vida. Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2,6); dos escenarios de estabilización (RCP4,5 y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5). Por consiguiente, los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los Escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones (IE-EE), que no contemplaban políticas climáticas, utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación. En los escenarios RCP6,0 y RCP8,5, en 2100 el forzamiento radiativo no llegará a su máximo; en el RCP2,6, llega al máximo y disminuye; y en el RCP4,5 está estabilizado. Los cuatro escenarios ofrecen conjuntos de datos de resolución espacial del cambio de uso del suelo y de emisiones sectoriales de contaminantes atmosféricos, y especifican cuáles serán las concentraciones de gases de efecto invernadero y las emisiones antropógenas anuales hasta 2100. Los escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono. Si bien los escenarios de RCP abarcan una amplia gama de valores de forzamiento total, en ellos no se considera todo el abanico de emisiones definidos en la bibliografía, especialmente los aerosoles. La mayoría de las simulaciones de la CMIP5 y de los modelos del sistema Tierra se han llevado a cabo con concentraciones definidas de CO2 que, en el año 2100, alcanzarán 421 ppm (RCP2,6), 538 ppm (RCP4,5), 670 ppm (RCP6,0) y 936 ppm (RCP8,5). Teniendo también en cuenta las concentraciones definidas de CH4 y N2O, las concentraciones de CO2 equivalente combinadas corresponden a 475 ppm (RCP2,6), 630 ppm (RCP4,5), 800 ppm (RCP6,0) y 1 313 ppm (RCP8,5). Por lo que respecta al escenario RCP8,5, se han llevado a cabo simulaciones adicionales, integrando la CMIP5 y modelos del sistema Tierra con las emisiones definidas de CO2 proporcionadas por los modelos de evaluación integrados. Para todos los escenarios de RCP, se han realizado cálculos adicionales con datos y modelos actualizados de la química de la atmósfera (en particular de la química de la atmósfera y el componente climático de la CMIP5), utilizando las emisiones definidas para los escenarios de RCP de los gases químicamente reactivos (CH4, N2O, HFC, NOx, CO, COVNM). Esas simulaciones permiten llevar a cabo investigaciones de incertidumbres en relación con las retroalimentaciones del ciclo del carbono y con la química de la atmósfera."

BID

Banco Interamericano
de Desarrollo