

### 3.1. MODELACIÓN DEL CLIMA

Es reconocido que los Modelos de Circulación General Acoplados de la Atmósfera y el Océano (MCGAO) constituyen la herramienta básica para simular el cambio climático bajo la influencia del incremento del forzamiento de los Gases de Efecto de Invernadero (GEI). Los más avanzados incluyen varios componentes totalmente acoplados (atmósfera, océano, hielos marinos, vegetación terrestre e hidrología); otros también representan los efectos de los aerosoles atmosféricos, en particular los sulfatos y carbonatados; mientras que un conjunto menor incluyen explícitamente el ciclo del carbono y las retroalimentaciones sobre los GEI atmosféricos (Friedlingstein *et al.*, 2006). En realidad, durante los últimos 10 a 15 años, la comunidad de modelación internacional se ha movido con rapidez hacia el desarrollo de modelos del sistema terrestre, que incluyen además: las interacciones de la biosfera, la biogeoquímica y la química de los componentes atmosféricos (Giorgi y Diffenbaugh, 2008).

Existen retos grandes y parcialmente conflictivos para la modelación del cambio climático (Räisänen *et al.*, 2004). Por una parte, se requiere de información a escalas espaciales relativamente pequeñas, obligando al empleo de técnicas conocidas como reducción de escala\*, debido a que la resolución espacial de los modelos globales (del orden de cientos de kilómetros), es insuficiente para muchos estudios de evaluación de impactos. Por otra parte, también es necesario que los estudios de impacto consideren la llamada incertidumbre de escenarios (Jenkins and Lowe, 2003) y la denominada incertidumbre de modelación (Murphy *et al.*, 2004). La primera está asociada con las futuras emisiones de gases de efecto invernadero, la política económica y ambiental, así como el crecimiento poblacional; mientras que la segunda se vincula a las incertidumbres de los procesos de modelación del clima, las cuales provocan que diferentes modelos produzcan diferentes resultados (incluyendo el signo de los cambios esperados) en regiones particulares (Rivington *et al.*, 2008, Murphy *et al.*, 2004). Los retos y conflictos se relacionan entonces con las posibilidades reales de generar proyecciones espacialmente detalladas incorporando las incertidumbres mencionadas. Esto solo puede lograrse realizando un conjunto de múltiples simulaciones de largo período, las cuales solo se han desarrollado en pocas regiones, ubicadas mayoritariamente en el Hemisferio Norte, mediante la realización coordinada de proyectos como el proyecto europeo PRUDENCE (Christensen *et al.*, 2006) o el de América del Norte NARCCAP (Mears, 2004).

Los primeros escenarios de cambio climático elaborados en muchos países del Caribe (Centella *et al.*, 1999) se desarrollaron sobre la base de un modelo climático simple de balance de energía/difusión a floramiento, denominado como MAGICC (Wigley y Raper, 1992). MAGICC fue combinado con la base de escenarios climáticos SCENGEN, que en ese momento conformaban la versión 2.4 de la herramienta

---

\* El término proviene del inglés *Downscaling*. En la literatura internacional se puede encontrar también asociado con el término regionalización. Sin embargo, los autores prefieren utilizar el término "reducción de escala" para dar una idea más precisa de esa técnica y su finalidad.

MAGICC/SCENGEN (Hulme *et al.*, 2000). La posibilidad de utilizar MAGICC/SCENGEN en sus diferentes versiones facilitó el análisis de proyecciones futuras sobre un espectro amplio de forzamientos radiativos, al considerar varios escenarios de emisiones, y de patrones climáticos de respuesta, al tomar en cuenta varios modelos climáticos (incertidumbres de escenarios y modelos, respectivamente). A pesar de esos rasgos positivos y útiles, la baja resolución espacial de los resultados se convirtió en una limitante importante para la realización de evaluaciones de impactos espacialmente detalladas y por lo tanto, redujo la posibilidad de considerar o identificar impactos y medidas de adaptación que tomen en cuenta las características particulares de las localidades y provincias. Se limitó, por tanto, el necesario enfoque local de la adaptación al cambio climático.

En atención a las limitaciones anteriores, diferentes países de la región se unieron en una especie de marco de cooperación para enfrentar el tema de la reducción de escala por medios dinámicos, sobre la base de la asimilación y empleo del modelo climático regional HadRM3P encapsulado dentro del sistema de modelado regional PRECIS\* (Jones *et al.*, 2004). Conceptualmente, la reducción de escala se asocia a las técnicas de generar información en una resolución espacial más baja que la ofrecida por los modelos globales y requieren del uso de métodos dinámicos o estadísticos (Mears *et al.*, 2003 y Wilby *et al.*, 2004, respectivamente). El hecho de que los Modelos Climáticos Regionales (MCR) dejen de ser un “*juguete*” utilizado por los países desarrollados y se hayan desarrollado con la flexibilidad de ser empleados con mayor facilidad por centros de investigación en países menos desarrollados, es una indudable coyuntura favorable al nacimiento y desarrollo de la iniciativa caribeña (Taylor *et al.*, 2007).

En este acápite se documenta brevemente los escenarios climáticos que serán utilizados en la evaluación de impactos y adaptación, en el marco del proyecto de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. Las proyecciones climáticas futuras, referidas básicamente para el período 2071-2099, fueron obtenidas a partir de la ejecución del Proyecto de Investigación “Simulación Numérica de Escenarios Climáticos para los Mares Interamericanos y Territorios Adyacentes”.

### 3.2. EL SISTEMA DE MODELADO PRECIS

PRECIS es un sistema de modelación climática regional desarrollado por el Centro Hadley del Reino Unido, que puede ser ejecutado en computadoras personales. El sistema está compuesto por: a) un modelo atmosférico y de la superficie terrestre (HadRM3P), que puede ser aplicado a cualquier área del globo terrestre para generar proyecciones detalladas del cambio climático; b) una interfase simple para fijar los parámetros y ejecutar el modelo; y c) un paquete de visualización y procesamiento de datos que permite mostrar y manipular los resultados del MCR. (Jones *et al.*, 2004). El modelo HadRM3P encapsulado dentro de PRECIS tiene 19 niveles en la vertical y permite escoger entre dos resoluciones espaciales: 50 km, como se utiliza en esta investigación y es el estándar para grandes áreas (Marengo *et al.*, 2009) y 25 km para áreas más pequeñas donde la mayor resolución es particularmente importante.

---

\* Del Inglés *Providing Regional Climates for Impacts Study*.

Como puede suceder con otros MCR, el diseño de los experimentos en PRECIS consideró diferentes aspectos que pueden ser resumidos en los tres elementos siguientes: a) el dominio o región geográfica sobre la cual el MCR es corrido; b) la fuente de donde provienen los datos de las condiciones de contorno; y c) los datos sobre las emisiones/concentraciones de gases de efecto invernadero.

### 3.2.1. EL DOMINIO

El dominio para el cual se desarrollaron los experimentos realizados con PRECIS puede apreciarse en la figura 3.1. Este dominio fue el resultado de análisis y discusiones sostenidas en un taller de expertos realizado en el año 2003 y fue diseñado como un dominio preliminarmente óptimo, considerando que el mismo era lo suficientemente reducido como para poder realizar los diferentes experimentos con los recursos computacionales disponibles, y lo suficientemente grande como captar la influencia de las señales extratropicales, así como la que proviene de las regiones atlántica y pacífica, la cual tiene un impacto reconocido en el comportamiento de las variables y procesos meteorológicos de la región interna del dominio.



**Figura 3.1.** Dominio del modelo PRECIS fijado para la realización de los experimentos. El área comprendida entre el límite exterior e interior del dominio se corresponde con la zona "buffer", cuyos datos no son considerados

### 3.2.2. CONDICIONES DE CONTORNO Y EMISIONES

Las condiciones de contorno utilizadas y los datos asociados sobre las emisiones de GEI, aparecen descritas en Centella *et al.*, (2009). Aquí se mencionaran únicamente las que se consideran necesarias para la adecuada interpretación de los escenarios futuros y no aquellas que esos autores emplearon en el análisis de la evaluación de PRECIS. Por condiciones de contorno debe entenderse aquella información que alimenta al modelo en sus fronteras, para que el mismo pueda generar información en su interior. En sentido general, esas condiciones pueden provenir de datos observados (reanálisis globales) o de simulaciones con modelos globales (pueden ser simulaciones del clima actual o del clima futuro). La información que sirva de "alimento" al Modelo Regional, dependerán los resultados que el mismo produzca.

**Experimentos de “rebanadas temporales” (time slices) del modelo atmosférico HadAM3P:** agrupan dos tipos de las condiciones de contorno; una para el período 1961-1990 y otra para el 2071-2100. Sin embargo, por simplicidad, se describirán bajo este mismo marco. Ambos tipos de condiciones de contorno se basan en los datos proporcionados por las salidas del modelo HadAM3P, el cual es una versión mejorada del modelo atmosférico de alta resolución (150 km) HadAM3H, derivado de la componente atmosférica del modelo completamente acoplado océano-atmósfera HadCM3 (Gordon *et al.*, 2000), el cual posee una resolución horizontal de 3,75 de latitud por 2,5 de longitud. En este caso, las salidas de PRECIS se asocian a un calendario idealizado de 360 días.

- a) 1960-1990: estas condiciones de contorno consideran tres integraciones de 31 años del modelo HadAM3P. Cada una es inicializada bajo diferentes condiciones iniciales (las tres integraciones\* forman un conjunto o “ensemble”), pero en los tres casos se utilizan las series observadas de los campos de temperatura superficial del mar y fracción de hielo-mar provenientes de la base de datos HadISST1 (Rayner *et al.*, 2002). La información sobre la composición de la atmósfera proviene de la evolución observada de las concentraciones de GEI en este período.
- b) 2070-2100: las condiciones de contorno disponibles para forzar al PRECIS están conformadas por cuatro integraciones de 31 años del modelo atmosférico HadAM3P. Tres de esas integraciones representan un conjunto de simulaciones diferentes del período 2070-2100, basadas en el escenario de emisiones SRESA2 y una integración considerando en escenario SRESB2 (Nakicenovic *et al.*, 2000, para una explicación de los escenarios de emisiones SRES). En este caso, las condiciones de borde asociadas a la temperatura superficial del mar y los hielos marinos son representadas por la combinación de las anomalías obtenidas en las integraciones del modelo acoplado océano atmósfera HadCM3 (utilizando los mismos escenarios de emisiones y condiciones iniciales que se emplean en el HadAM3P) con las observadas durante el período 1960-1990, obtenidas de la base de datos HadISST1. La evolución de las concentraciones de GEI prescrita en PRECIS para este período de tiempo (calculada fuera del modelo según los datos de los escenarios de emisiones SRES) es la misma que en el correspondiente experimento del HadCM3. De forma similar al período 1960-1990 los resultados analizados en esta investigación se refieren solamente a una de las tres integraciones bajo el SRESA2 y la otra asociada al SRESB2.

**Experimentos de clima transitorio para el período 1960-2100, a partir del modelo acoplado ECHAM4:** con estas condiciones se desarrollaron integraciones continuas con el PRECIS para un largo período de tiempo. Así fue posible obtener resultados para períodos intermedios como el 2050, sin la necesidad de utilizar otros artificios como el escalamiento de patrones (Mitchell, 2003), lo cual es necesario en el caso de los asociados al HadAM3P. Aquí, las condiciones de contorno provienen de las salidas de dos integraciones de 141 años del modelo de circulación general acoplado océano atmósfera ECHAM4, del Instituto Max Plank, mientras que las relativas a la superficie del mar se toman directamente del modelo OPYC3, que es el componente oceánico del modelo ECHAM4. Cada una de las dos integraciones se corresponde con los escenarios SRESA2 y SRESB2, respectivamente y antes de 1991 ambas son idénticas.

---

\* Los resultados objeto de atención en este informe solo se refieren a una de las tres integraciones mencionadas.

Tabla 3.1. Resumen descriptivo de los experimentos realizados con PRECIS

NÚMERO Y NOMBRE DEL EXPERIMENTO	CONDICIÓN DE BORDE		PERÍODO
	EMISIONES GEI	DATOS	
3HCT	Observado	HadAM3P	1961-1990
4HA2	SRES A2	HadAM3P	2071-2100
5HB2	SRES B2	HadAM3P	2071-2100
6ECT/EA2	Obs/SRES A2	ECHAM4	1961-2100
7ECT/EB2	Obs/SRES B2	ECHAM4	1961-2100

Según señalan Centella *et al.*, (2009), al momento de iniciar las corridas de los experimentos anteriormente descritos, existían importantes limitaciones tecnológicas asociadas a la velocidad de procesamiento y a la capacidad de almacenamiento de los resultados. Estas limitaciones obligaron a desarrollar una estrategia de simulación que permitiera la obtención de resultados válidos y útiles en un tiempo prudencial. Por este motivo se decidió:

1. Archivar la información para plazos diarios (medias o valores absolutos) y superiores, sin tomar en consideración los plazos horarios.
2. Generar resultados solo para superficie y los niveles correspondientes a 850, 700, 500, 250 y 50 hPa, en lugar de los 17 niveles posibles.
3. Fijar la resolución espacial a 50 x 50 km con la finalidad de poder utilizar el dominio antes prefijado (simulaciones a 25 km con el mismo dominio son prácticamente imposibles, aun con los recursos disponibles actualmente).
4. Realizar solamente simulaciones incluyendo el ciclo del azufre, a pesar de que existía la posibilidad de realizar experimentos sin incluir este efecto y explorar el la influencia de los patrones regionales de los aerosoles de sulfato.

Si bien la estrategia adoptada resultaba adecuada a priori, las decisiones tomadas podrían tener un impacto en el análisis de los resultados alcanzados, limitando la posibilidad de obtener conclusiones más "sólidas" como resultado de análisis más completos.

### 3.2.3. SIMULACIÓN DE PATRONES CLIMÁTICOS OBSERVADOS

Centella *et al.*, (2009), demuestran que las simulaciones con PRECIS reflejan la existencia de sesgos asociados principalmente al campo de las precipitaciones, con una tendencia a reflejar menos precipitaciones que las observadas. Los errores tienden a ser mayores sobre América Central. Estos autores demuestran, sin embargo, que el Modelo Climático Regional capta más detalles del clima de la región a la misma vez que es capaz de reproducir con mejor habilidad (menor error) el comportamiento de la temperatura y la precipitación, tanto en la meso escala como a gran escala. Debe notarse, que existen varios aspectos que complican el proceso de evaluación de la habilidad de los modelos. La identificación de errores en los modelos es un proceso difícil, debido a la compleja, y a veces poco comprendida, naturaleza del clima (asociada al complejo funcionamiento del sistema climático), razón por la que es difícil definir cuál de los muchos elementos del clima es más importante para concluir que se tiene una buena simulación. Uno de los aspectos que hace complejo este ejercicio,

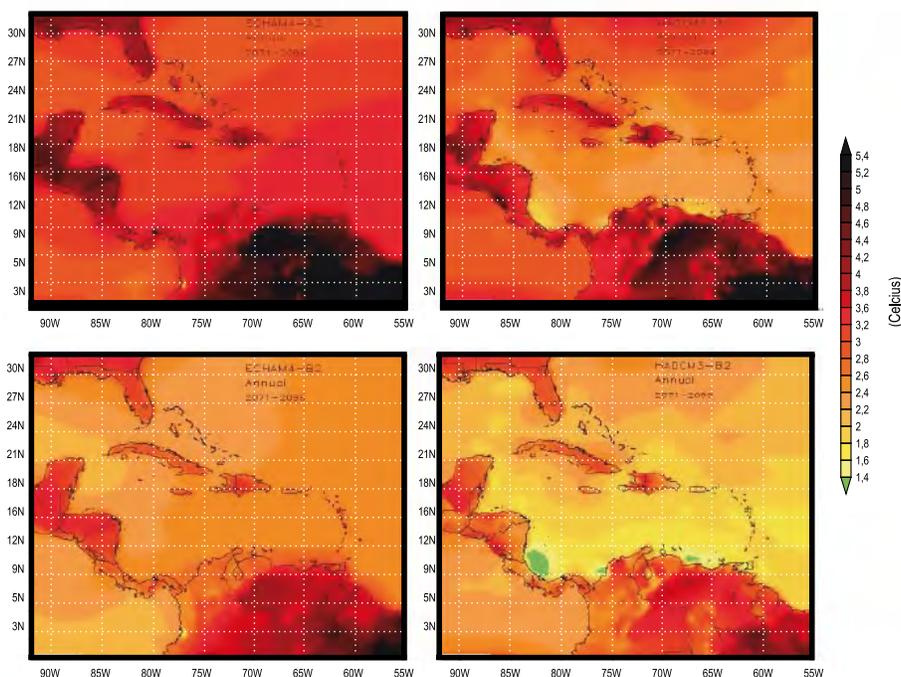
se relaciona con el hecho de que los resultados de los modelos climáticos deben ser comparados con observaciones presentes o pasadas. Pero, las observaciones presentes no constituyen en sí mismas una muestra independiente, dado que ellas son utilizadas en el desarrollo propio de los modelos y en la afinación de los mismos.

Otro elemento importante es la necesaria existencia de datos observados fiables y consistentes del clima actual, los cuales deben ser utilizados como patrón de comparación. En tal sentido, a veces las diferencias entre las bases de datos observados son notables y reflejan la existencia de significativas incertidumbres en el clima observado, que en ocasiones son superiores a los sesgos de los resultados de los modelos. En este contexto es importante resaltar que la evaluación de un buen desempeño para las condiciones actuales no garantiza una realización de una predicción adecuada para el futuro.

### 3.3. PRECIS: PATRONES CLIMÁTICOS FUTUROS

#### 3.3.1. REGIÓN DEL CARIBE

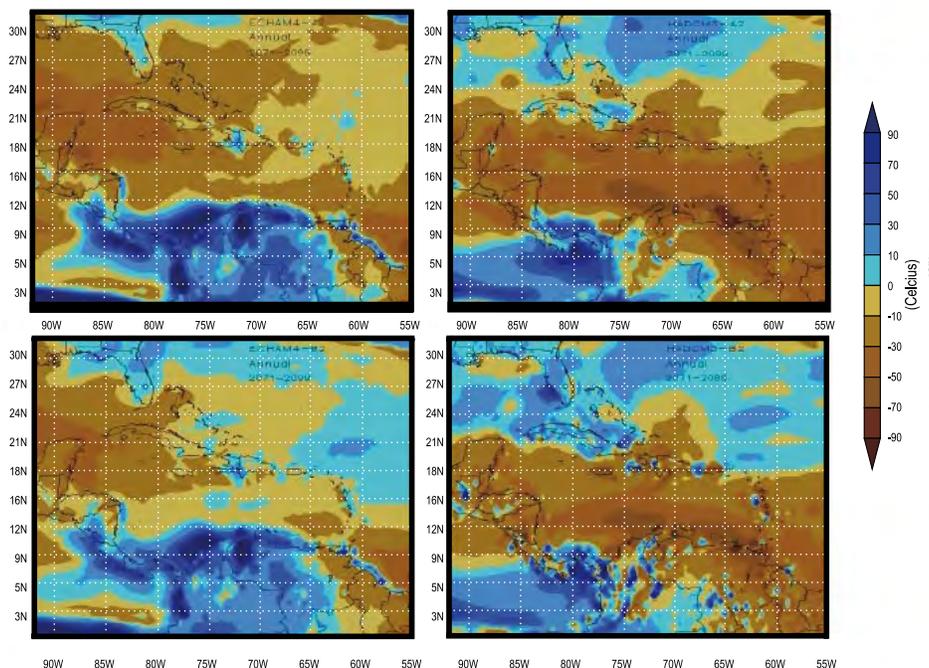
La figura 3.2 muestra el patrón de cambio de la temperatura anual para el período 2071-2099, de acuerdo con los experimentos perturbados, según los escenarios de emisiones A2 y B2. Se aprecia un sustancial calentamiento en toda la región de estudio, con incrementos de temperatura superiores sobre zonas terrestres respecto a los mares adyacentes. Ese incremento es el resultado de una menor pérdida de calor por evaporación sobre tierra, así como a la mayor inercia térmica del océano (IPCC 2001). El calentamiento observado sobre áreas terrestres es del orden de 4,5 °C para el escenario A2 y 2,8 °C para el B2.



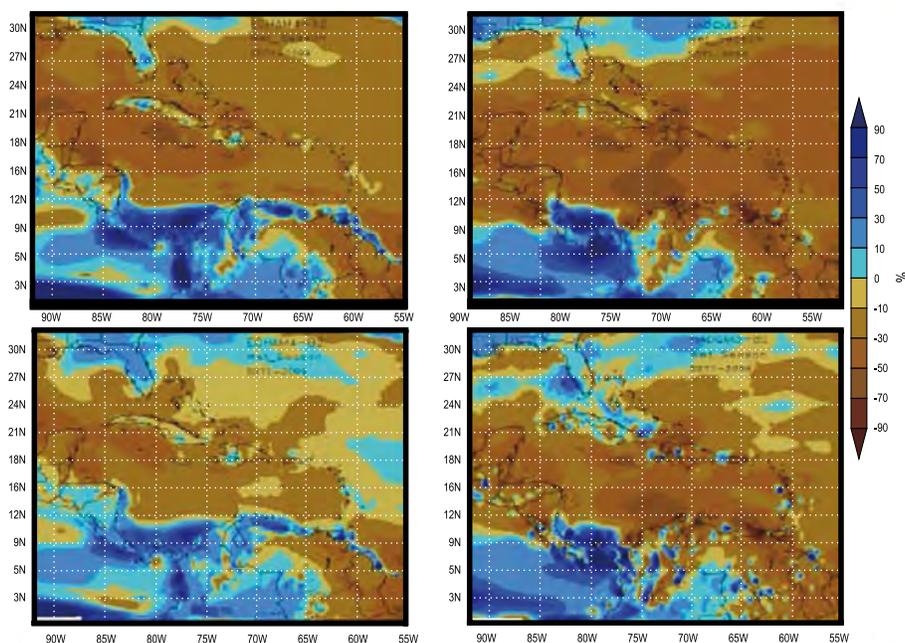
**Figura 3.2.** Patrones de cambio de la temperatura media anual para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. EA2 y EB2 se corresponden con los paneles izquierdos (superior e inferior, respectivamente), mientras que HA2 y HB2 se asocian con los de la derecha

El calentamiento es sustancialmente superior en los resultados asociados al forzamiento del MCG ECHAM4, principalmente sobre áreas de América Central y América del Sur. También se puede apreciar con bastante claridad que la respuesta del patrón de temperatura parece tener una relación lineal con respecto al escenario de emisiones. En buena medida, esta relación casi lineal ha servido de fundamento en el desarrollo de la técnica de escalamiento de patrones propuesta por Santer (1990) y explicada por Mitchell (2003). La distribución de los gradientes de temperatura entre una y otra simulación, también resulta diferente y mientras las simulaciones HA2 y HB2 presentan un gradiente norte-sur, los resultados asociados con el modelo ECHAM4 reflejan un gradiente este-oeste en la distribución de las anomalías.

Los patrones de cambio de las precipitaciones (figura 3.3) muestran un futuro más seco en varias áreas del Caribe, con una significativa reducción de las precipitaciones en la banda latitudinal (entre el 10 y 50%), que comprende el Mar Caribe, Centro América y el noroeste de América del Sur. Las simulaciones asociadas al MCG HadA presentan zonas de incremento de las lluvias en el área que se encuentra por encima de los 24°N (10% y 30%), así como sobre Costa Rica, Panamá y partes de Colombia (10% y 70%). En el período lluvioso las áreas de reducción de las precipitaciones aparecen más expandidas (figura 3.4), tanto en espacio como en magnitud.



**Figura 3.3.** Patrones de cambio de la precipitación anual (%) para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. EA2 y EB2 se corresponden con los paneles izquierdos (superior e inferior, respectivamente), mientras que HA2 y HB2 se asocian con los de la derecha



**Figura 3.4.** Patrones de cambio de la precipitación (%) en el período lluvioso (mayo-octubre) para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. EA2 y EB2 se corresponden con los paneles izquierdos (superior e inferior, respectivamente), mientras que HA2 y HB2 se asocian con los de la derecha

### 3.3.2. CUBA

Sobre Cuba la temperatura superficial del aire para el período 2071-2099 tendrá una tasa de incremento superior en los meses de verano (período lluvioso), en comparación con la del período poco lluvioso (figura 3.5). En el primer caso, los mayores incrementos se asocian a las estimaciones con el forzamiento del modelo ECHAM4, mientras que en el segundo se vinculan con las del HadAM3P. Se observa también la clara coincidencia en la señal de incremento de la temperatura en todas las zonas y la respuesta directa de la misma al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero que reflejan ambos escenarios.

En términos generales, durante el período seco, los incrementos de temperatura sobre la región del sur de La Habana oscilarán entre 2,6 °C y 3,6 °C, siendo relativamente menores para EB2. Para los meses de mayo a octubre los incrementos de temperatura proyectados son superiores llegando a alcanzar magnitudes de 4,2 °C (en la simulación EA2).

A diferencia de la elevada coherencia que existe entre las estimaciones futuras de la temperatura del aire, los resultados de la precipitación muestran una mayor dispersión de valores tanto en magnitud como en signo (figura 3.6). Esto se aprecia principalmente, en los estimados correspondientes al período poco lluvioso sobre la región occidental. Considerando las cuatro simulaciones, los valores oscilan entre el -30% y 30% sobre el sur de La Habana y las mayores diferencias se aprecian entre los modelos y no entre los escenarios de emisiones. Para el período lluvioso, el nivel de coincidencia es mayor sobre casi todo el país y los resultados indican que sobre la región del estudio de caso, la precipitación podrá disminuir entre un 10 y un 20%, y solo en una proyección se estiman incrementos marginales del 10%, muy cerca de la costa sur de la llanura Habana-Matanzas.

El incremento de la temperatura y la reducción predominante de la precipitación en el período lluvioso sobre la región de La Habana, son coherentes con la disminución de la humedad relativa del aire. Este hecho parece indicar que como en otras regiones del país, la región de las provincias Mayabeque y Artemisa, presentará condiciones más secas que las actuales y que el efecto combinado del intenso calentamiento futuro y la reducción de las precipitaciones, principalmente durante el período lluvioso, producirá una merma de los recursos hídricos disponibles. Este hecho debe ser comprobado y cuantificado a partir de las estimaciones de otras variables como el viento y la radiación solar, para poder evaluar adecuadamente sus implicaciones. En el caso de la velocidad del viento puede mencionarse que sus magnitudes no presentarán variaciones sustanciales, aunque en términos generales sus valores indican una ligera reducción en el futuro.

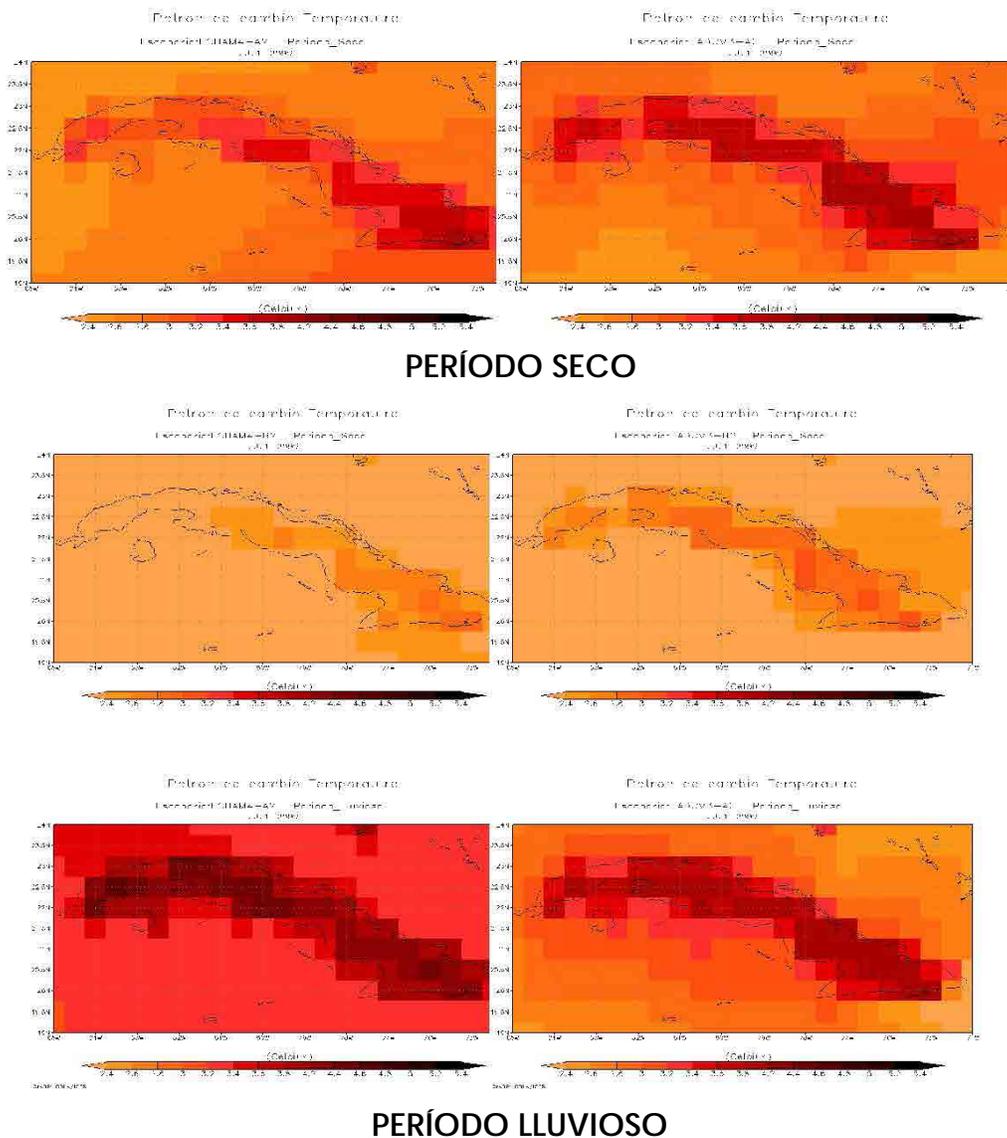


Figura 3.5. Patrones de cambio de la temperatura media estacional para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. Las columnas izquierda y derecha se asocian con las simulaciones ECHAM4 y HadAM3P

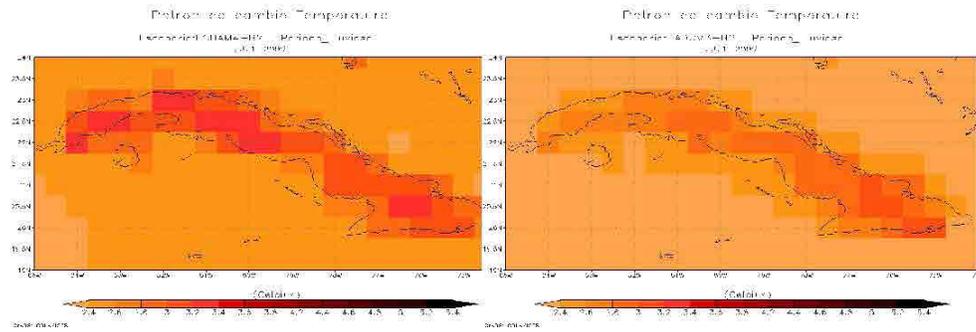


Figura 3.5. Patrones de cambio de la temperatura media estacional para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. Las columnas izquierda y derecha se asocian con las simulaciones ECHAM4 y HadAM3P

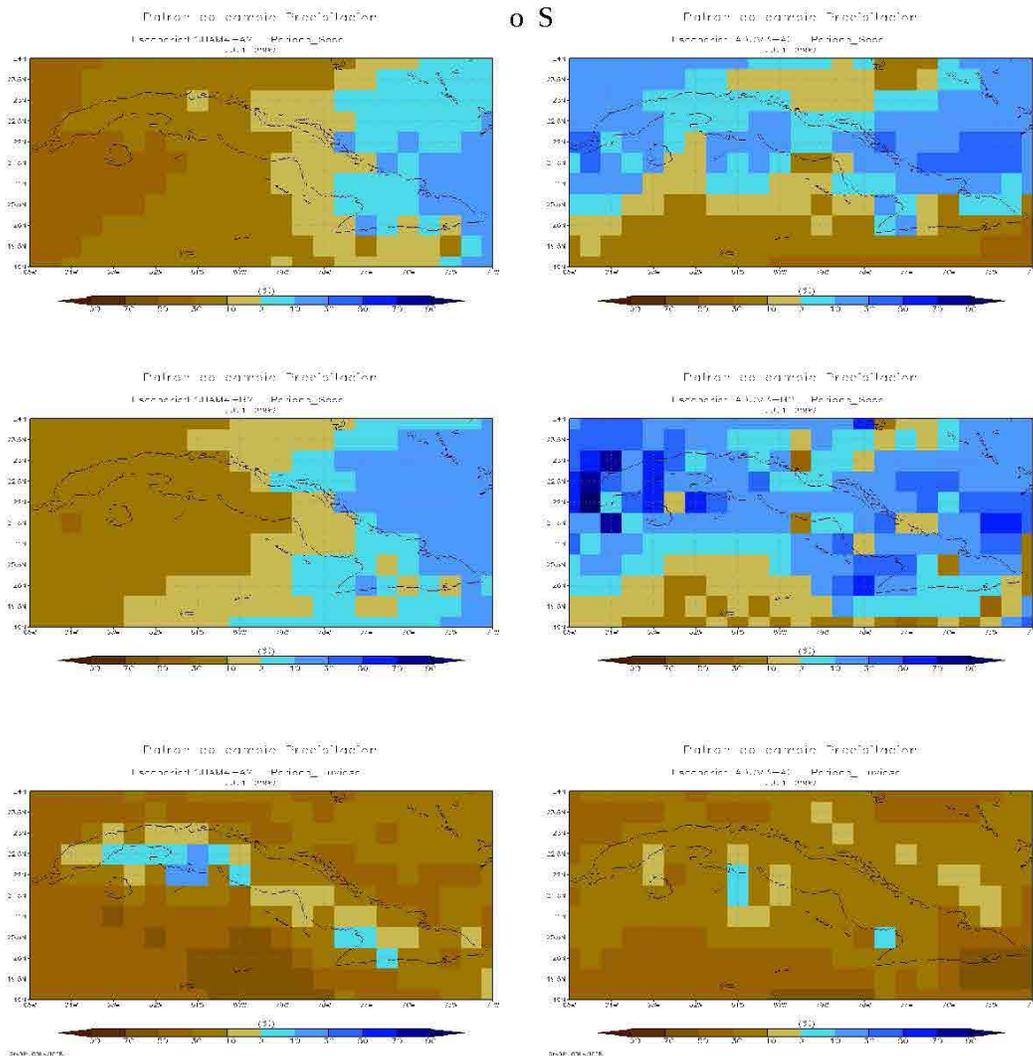
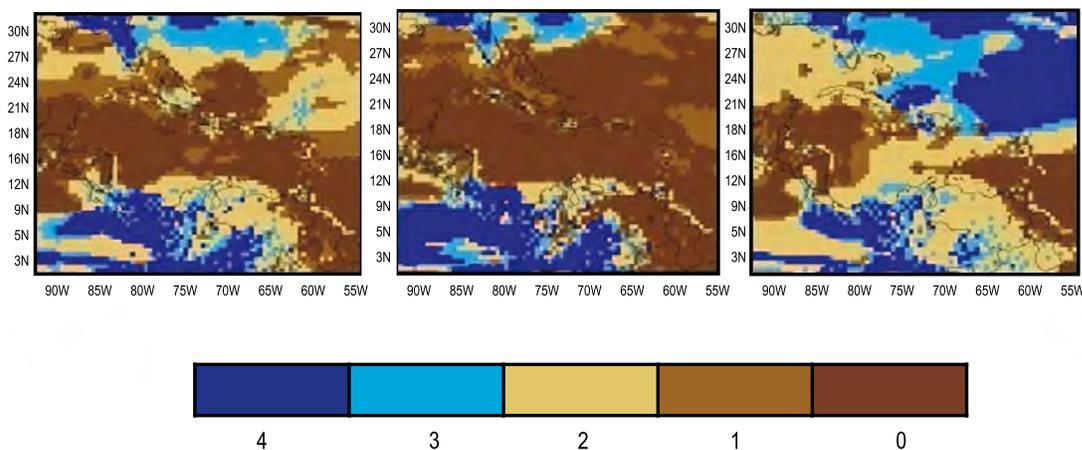


Figura 3.6. Patrones de cambio de la precipitación estacional para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. Las columnas izquierda y derecha se asocian con las simulaciones ECHAM4 y HadAM3P

### 3.3.3. ANÁLISIS DE LAS INCERTIDUMBRES

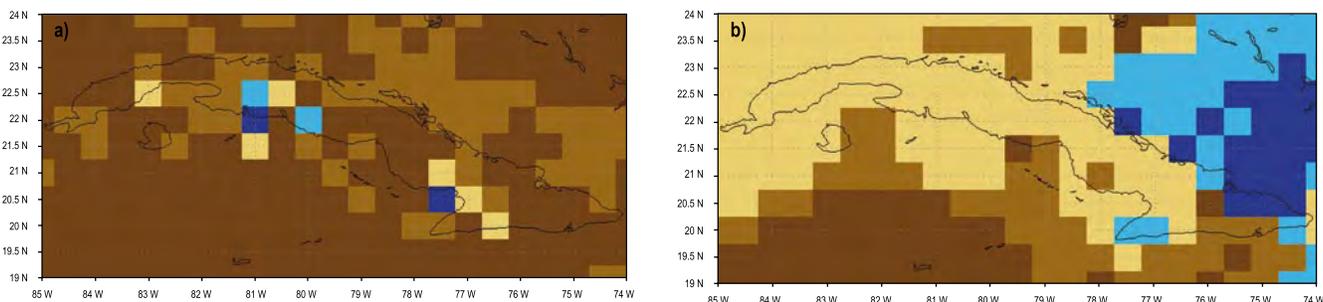
Las predicciones realizadas presentan rasgos comunes en dependencia de la zona geográfica que se considere. Este nivel de coincidencia, que es alto en el caso de la temperatura, donde todas las estimaciones indican un calentamiento notable, no es tan claro para la precipitación. En la figura 3.7 se puede apreciar que existen grandes zonas del Mar Caribe donde la señal de reducción de las precipitaciones es bastante clara y el nivel de incertidumbre es relativamente bajo. Lo mismo sucede en otras zonas donde el incremento de las precipitaciones tiene una alta coincidencia en los resultados. No obstante, hay otras regiones donde la incertidumbre es alta, pues unos experimentos indican incrementos, mientras que otros producen reducciones en las precipitaciones para el período 2071-2099.



**Figura 3.7.** Número de simulaciones que proyectan un incremento de las precipitaciones para el período 2071-2099. Las zonas en carmelita indican una elevada coincidencia en la reducción de las lluvias

Sobre Cuba se aprecian zonas donde la incertidumbre no parece mostrar los rasgos generales que caracterizan la zona del Mar Caribe. Por esa razón, en la figura 3.8 se ofrece una visión más detallada de esta evaluación sobre Cuba, donde es posible apreciar que la reducción de las precipitaciones tiene una baja incertidumbre en el período donde una reducción de las lluvias tiene un peso e importancia mayor. En el período poco lluvioso la incertidumbre es mayor, pudiéndose interpretar que el cambio proyectado entre -30 y 30% es altamente incierto.

Como es conocido, los resultados que ofrecen los Modelos Climáticos Regionales (MCR), dependen en gran medida de las condiciones de contorno con los que son forzados, por esa razón un mismo modelo puede brindar proyecciones distintas si es alimentado con las salidas de diferentes modelos globales. En este caso, PRECIS fue forzado únicamente por dos modelos globales (ECHAM4 y HadAM3P) y por ende, la posibilidad de abarcar un amplio rango de la incertidumbre asociada a la modelación regional es relativamente reducida. Para abarcar un mayor rango de esa incertidumbre sería necesario realizar las correspondientes simulaciones con PRECIS alimentadas con otros Modelos Climáticos Globales (MCG). Al margen de que esa es una aspiración



**Figura 3.8.** Similar a la figura 3.7, pero con mayor detalle sobre Cuba y considerando solo los períodos lluvioso (a) y seco (b)

dentro del desarrollo futuro, existen limitaciones tecnológicas actuales que impiden su realización. Por demás, las condiciones de frontera necesarias para tal ejercicio no están disponibles.

Una manera de reflejar cuán diferentes pueden ser las estimaciones realizadas con PRECIS, de aquellas que podrían desarrollarse con otros MCG, es poner los resultados del primero en el contexto de los segundos. Para esto, los datos del MCR fueron agregados a la rejilla de los MCG, para permitir su comparación. El marco de comparación de los MCG fue creado a partir de las salidas de varios MCG, empleando el sistema MAGICC/SCENGEN 3.1 (Wigley, 2004). Esta herramienta combina los resultados de un modelo climático simple con las salidas de los MCG, mediante la técnica de escalamiento de patrones (Santer, 1990), con la finalidad de poner las salidas de estos últimos en función de una variada diversidad de parámetros diferentes, como pueden ser: la sensibilidad climática, los escenarios de emisiones, el forzamiento de los aerosoles, el ciclo del carbono (Hulme *et al.*, 2000). MAGICC/SCENGEN fue la herramienta utilizada para generar los primeros escenarios de cambio climático sobre Cuba (Centella *et al.*, 1999), aunque en una versión más antigua.

En este trabajo se procedió de la manera siguiente:

Primero, se seleccionó el conjunto de MCG con mejor desempeño en la simulación del clima del área de estudio, utilizando los criterios de habilidad y convergencia propuestos por Giorgi y Mears (2002). En síntesis, el criterio de habilidad se basa en el desempeño que los MCG muestran en simular el clima actual, mientras que la convergencia se relaciona con el grado de coincidencia en representar el clima futuro. Para ello se utilizan diferentes estadígrafos, que incluyen: la correlación espacial, el error medio cuadrático, el sesgo y el error medio cuadrático con el sesgo removido (Wigley, 2004), así como el índice desarrollado por Reichler y Kim (2008), que considera el desempeño de los MCG en la representación del comportamiento de varias variables meteorológicas, en una dirección similar al Índice de Predictabilidad Climática desarrollado por Murphy *et al.*, (2004). Todos estos indicadores son calculados explícitamente por MAGICC/SCENGEN.

Segundo, se utilizaron los valores de los diferentes estadígrafos para ordenar los modelos (18 de los modelos considerados en el Cuarto Informe de Evaluación Científica del IPCC, IPCC (2007), siguiendo un sistema semi cuantitativo que se

basó en premiar a los modelos con mejor desempeño y penalizar a los peores. Las estadísticas utilizadas consideran el desempeño de los modelos a nivel global y sobre Cuba. El mayor puntaje lo alcanzan aquellos modelos con mejor desempeño a nivel global/regional (en función del valor de los estadígrafos). Como los estadígrafos utilizados son cinco y cada uno se evalúa a nivel global y regional, el máximo de puntos que puede obtener un modelo es 10 y el más bajo es -10.

La tabla 3.2 muestra los resultados de la evaluación realizada. Aquí se consideran los mejores 14 modelos, desechando los cuatro que mostraron un peor desempeño. La comparación de los resultados del subconjunto de estos 14 modelos (se realizan solo para la precipitación), con los obtenidos con PRECIS (figura 3.9), puede brindar una idea sobre el nivel de coincidencia entre las estimaciones futuras del MCR y un conjunto amplio de MCG. Ese acuerdo puede permitir la obtención de conclusiones más o menos robustas en relación con las estimaciones realizadas del futuro comportamiento de las precipitaciones en Cuba.

Para hacer viables las comparaciones, las proyecciones generadas con MAGICC/SCENGEN se realizaron considerando el período de 30 años centrado en el año 2085, el cual se corresponde con el utilizado en PRECIS. De igual forma se usó el escenario de emisiones SRESA2 y se consideró el efecto de los aerosoles de sulfato como uno de los parámetros para la corrida del modelo simple.

Los resultados obtenidos con PRECIS y los que reflejan los MCG son consistentes en indicar un patrón de menos precipitaciones durante los meses más lluviosos en Cuba. La coincidencia mostrada entre las diferentes simulaciones brinda mayor robustez a la idea de que el patrón de precipitaciones futuro indica una reducción de las lluvias sobre la región del Caribe y, particularmente, sobre Cuba.

En el caso de la temperatura superficial del aire, las proyecciones del MCR tienden a reflejar incrementos bastante superiores a los que se derivan del conjunto de MCG. Los mayores incrementos se vinculan a los resultados de la simulación EA2. Las mayores discrepancias se producen en las cuadrículas ubicadas sobre las áreas terrestres, pudiendo indicar que el mayor calentamiento proyectado por el modelo regional se relaciona con la mejor representación de las áreas terrestres. La mayor resolución espacial de los modelos regionales permite representar mejor las zonas terrestres y reproducir mejor las diferencias que se producen en el calentamiento, debido a la menor pérdida de calor por evaporación sobre tierra y a la mayor inercia térmica del océano. Cuando el MCG reproduce un menor calentamiento de la superficie al considerarla mayormente como superficie oceánica, el MCR puede incorporar de forma más realista zonas terrestres y por ende, producir valores de temperatura superiores.

El patrón de lluvias proyectado por PRECIS puede estar conectado con cambios en el futuro comportamiento de los eventos de precipitaciones extremas. Por esta razón, se realiza un análisis relacionado con las modificaciones futuras en el comportamiento de tres indicadores asociados con la ocurrencia de eventos extremos de las precipitaciones. Estos indicadores se describen en la tabla 3.3, siguiendo las descripciones de Frich *et al.*, (2002).

**Tabla 3.2.** Estadísticas de validación utilizadas para ordenar/seleccionar los MCG utilizados en la comparación con las salidas de PRECIS

NO.	PTO.	A.F.	MODELO	r2 ESPACIAL		RMSE mm/día		SESGO mm/día		CORR. mm
1	10	SI	CCCMA-31	<b>0,89</b>	<b>0,85</b>	<b>0,95</b>	<b>0,72</b>	<b>- 0,01</b>	<b>0</b>	<b>0,95</b>
2	8	SI	MRI-232A	<b>0,89</b>	0,71	0,97	1,16	<b>- 0,08</b>	- 0,53	<b>0,96</b>
3	7		GFDLCM20	<b>0,87</b>	<b>0,76</b>	<b>1,10</b>	1,24	0,09	- 0,03	<b>1,10</b>
4	5	SI	ECHO-G	<b>0,91</b>	<b>0,74</b>	<b>0,86</b>	1,15	0,13	0,59	<b>0,85</b>
5	4		GFDLCM21	0,86	0,69	1,15	1,27	0,22	- 0,86	1,13
6	1		MPIECH-5	0,81	0,7	1,35	<b>0,95</b>	0,25	<b>-0,01</b>	1,33
7	1		UKHADGEM	0,80	<b>0,8</b>	<b>1,61</b>	1,10	<b>0,39</b>	<b>-0,19</b>	<b>1,57</b>
8	1		MIROCMED	0,83	0,64	1,16	1,88	<b>0,04</b>	<b>- 1,65</b>	1,16
9	0		UKHADCM3	0,86	0,55	1,26	1,29	0,23	- 0,55	1,24
10	- 1		GISS-EH	<b>0,73</b>	0,66	<b>1,51</b>	<b>0,88</b>	<b>0,34</b>	<b>0,21</b>	<b>1,47</b>
11	- 1		CNRM-CM3	<b>0,77</b>	0,62	1,44	<b>0,94</b>	<b>0,54</b>	0,25	1,33
12	- 2		BCCRBCM2	0,79	0,63	1,31	1,09	0,31	0,53	1,28
13	- 3		MIROC-HI	0,80	0,72	1,34	1,60	0,28	- 1,26	1,31
14	- 4		IPSL_CM4	0,81	0,48	1,27	<b>2,11</b>	<b>- 0,09</b>	<b>- 1,80</b>	1,27
15	- 4		CSIRO-30	0,81	<b>- 0,13</b>	1,21	<b>2,55</b>	- 0,16	<b>- 1,99</b>	1,20
16	- 6		CCSM-30	0,80	<b>0,06</b>	1,33	<b>2,32</b>	0,16	<b>- 1,56</b>	1,32
17	- 8		NCARPCM1	<b>0,67</b>	<b>0,28</b>	<b>1,72</b>	1,74	<b>0,34</b>	- 1,03	<b>1,68</b>
18	- 8	SI	INMCM-30	<b>0,70</b>	<b>0,08</b>	<b>1,61</b>	<b>1,96</b>	0,12	- 1,28	<b>1,60</b>
<b>PROMEDIO TODOS</b>				<b>0,810</b>	<b>0,546</b>	<b>1,285</b>	<b>1,441</b>	<b>0,171</b>	<b>-0,665</b>	<b>1,263</b>
<b>PROMEDIO 14 GCMS</b>				<b>0,829</b>	<b>0,681</b>	<b>1,234</b>	<b>1,240</b>	<b>0,187</b>	<b>-0,436</b>	<b>1,210</b>

Nota: para cada estadígrafo la primera columna refleja los resultados a nivel global, mientras que la segunda se relaciona con los estimados para la región del Caribe. La columna AF refleja aquellos modelos con ajuste de flujo, mientras que la Pto representa el puntaje de premiación/penalización obtenido a partir de los valores de los diferentes estadígrafos

**Tabla 3.3.** Descripción de los índices extremos de la precipitación

ÍNDICE	UNIDADES	DEFINICIÓN
CW D	días	Número de días consecutivos húmedos: es el número máximo de días consecutivos en el año donde la precipitación es superior a 1 mm
R5 d	mm	Máxima cantidad de precipitación acumulada en 5 días consecutivos
SDI I	mm/día	Indicador simplificado de la intensidad de las precipitaciones. Se obtiene dividiendo el acumulado anual de las precipitaciones entre en número de días con lluvias superiores a 1 mm

La distribución espacial de los diferentes indicadores, muestra en general poca coincidencia como se puede apreciar en la figura 3.9, la cual está más asociada a las diferencias en el forzamiento de los dos MCG, que a las asociadas al producido por diferentes escenarios de emisiones. En el caso del número de días consecutivos húmedos en el año, la dispersión de los patrones espaciales es menor, reflejando una reducción más o menos marcada en todas las áreas, excepto sobre Panamá. En los otros indicadores, donde la dispersión es mayor, existe poca incertidumbre en zonas de América del Sur y el Istmo de Panamá.

Sobre Cuba se aprecia un predominio a la reducción del número de días consecutivos húmedos, el cual es más generalizado sobre las provincias de Mayabeque y Artemisa. Sin embargo, el cambio de este indicador de un período a otro resulta relativamente bajo del orden de uno a cuatro días menos. En el caso de la intensidad anual de las precipitaciones el cambio proyectado, aun cuando refleja incertidumbre en cuanto al signo del cambio, las magnitudes oscilan por lo general entre -0,5 y 0,5 mm/día, sugiriendo un futuro comportamiento similar al actual. En el caso del indicador R5D, el cual se asocia a procesos lluviosos, la incertidumbre de las proyecciones es evidente, ofreciendo una imagen menos clara del futuro comportamiento asociado a este tipo de evento extremo del régimen de precipitaciones.

Debe notarse, que los resultados relacionados con los eventos extremos descritos, requieren de un análisis más profundo que el realizado en este estudio, con el fin de comprender la naturaleza de los cambios que se producirán en los procesos atmosféricos que generan dichos extremos. Solo así podrá llegarse a conclusiones más apropiadas y sólidas respecto a los cambios aquí analizados.

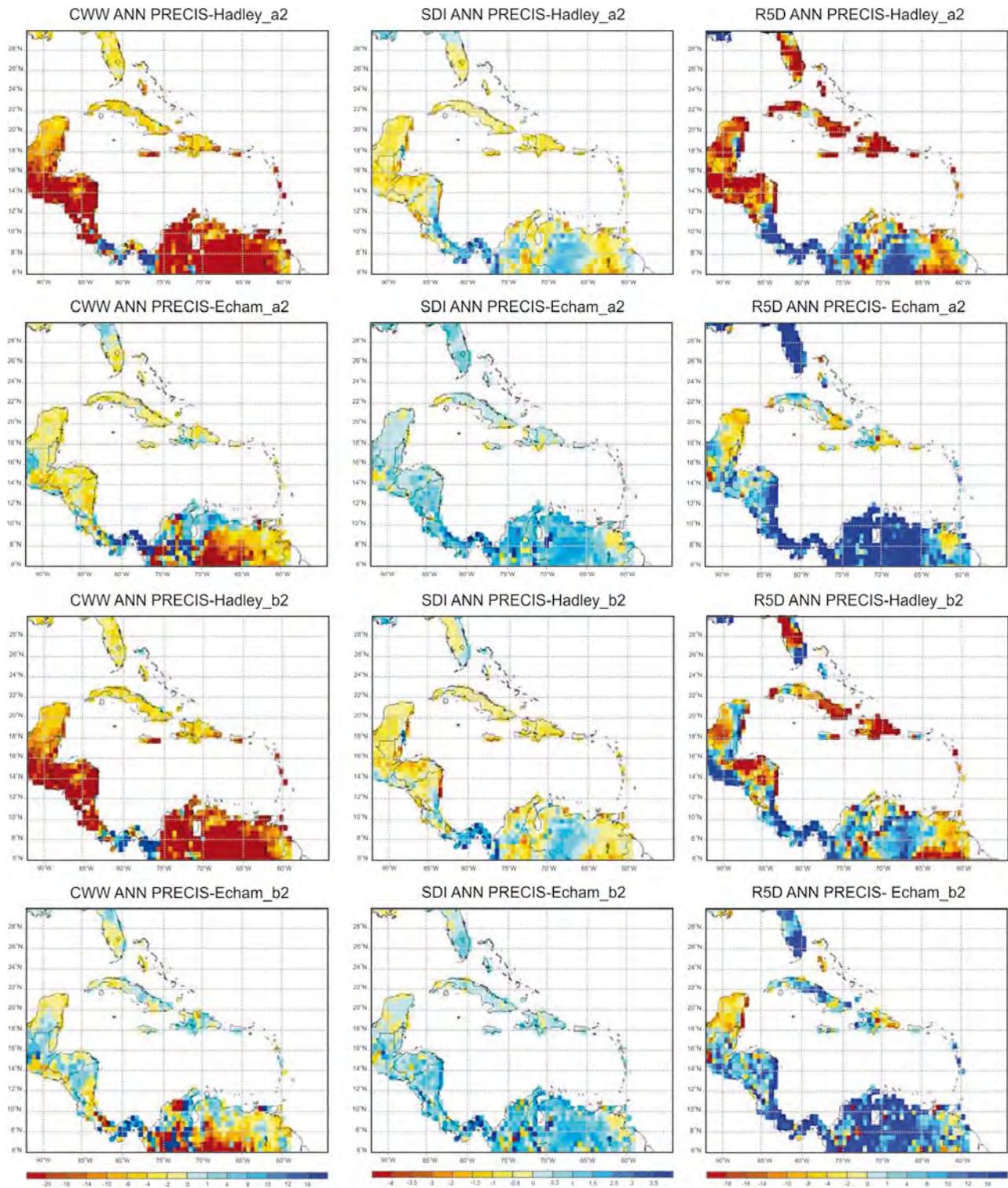


Figura 3.9. Cambios en los índices extremos de la precipitación proyectados para el período 2071-2099 con respecto a 1961-1989. Las dos primeras filas se asocian con los experimentos HA2 y HB2, mientras que las dos últimas se relacionan con EA2 y EB2, respectivamente

## BIBLIOGRAFÍA

1. Angeles, M.E., J.E. Gonzalez, D.J. Erickson, and J.L. Hernández, (2007): Predictions of change in the Caribbean region using global general circulation models *Int. J. Climatol.*, 27, 555-569, doi:10.1002/joc.1416.
2. Centella A., T. Gutiérrez, M. Limia and R. Rivero-Jaspe (1999): Climate Change scenarios for impact studies in Cuba. *Climate Research*, 12, 223-230.
3. Centella A., A. Bezanilla and K. Leslie (2008): A Study of the Uncertainty in Future Caribbean Climate Using the PRECIS Regional Climate Model. Technical Report, Community Caribbean Climate Change Center, Belmopan, 16pp.
4. Claussen, M. *et al.*, (2002): Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models. *Clim. Dyn.*, 18, 579-586.
5. Collins, M., Ben B. Booth, Glen R. Harris James M. Murphy, David M. H. Sexton Mark J. Webb (2006): Towards quantifying uncertainty in transient climate change. *Clim. Dyn.*, 27, 127-147.
6. Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Raisanen, 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, United Kingdom and 32 New York, NY, USA.
7. Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G. and Peterson, T. (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, 19, 193-212.
8. Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W. and coauthors (2006): Climate – carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *J. Climate* 19, 3337-3353.
9. Giorgi, F. y N. Diffenbaugh, 2008: Developing regional climate change scenarios for use in assessment of effects on human health and disease. *Climate Research*. 36, 141-151.
10. Giorgi, F. and Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the "reliability ensemble averaging" (REA) method. *J. Climate* 15, 1141-1158.
11. Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell and R. A. Wood (2000): The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16:147-168.
12. Haites, E., D. Pantin, M. Attzs, J. Bruce and J. MacKinnon (2002): Assessment of the Impact of Climate Change on CARICOM Countries. Environmentally and Socially Sustainable Development-Latin America and Caribbean Region, the World Bank.
13. Harvey, D. *et al.*, (1997): An Introduction to Simple Climate Models Used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC Technical Paper 2 [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, D.J. Griggs, and K. Maskell (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 51 pp.
14. Hewitt, C. D., and D. J. Griggs (2004): Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts, *Eos Trans. AGU*, 85(52), doi: 10.1029/2004EO520005.
15. Hulme, M., T.M.L. Wigley, E.M. Barrow, S.C.B. Raper, A. Centella, S. Smith and A.C. Chipanshi (2000): Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook, Climatic Research Unit, Norwich, UK, 52 pp.
16. Hudson D., and Jones R (2002): Regional climate model simulations of present day and future climates of southern Africa. Hadley Center Technical Note 39, Hadley Center for Climate Prediction and Research, Met Office, Bracknell, U. K.

17. Hulme, M., Jenkins, G. J., Lu, X., Turnpenny, J. R., Mitchell, T. D., Jones, R. G., Lowe, J., Murphy, J. M., Hassell, D., Boorman, P., McDonald, R. and Hill, S. (2002): *Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report*, Tyndall Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK. 120 pp.
18. IPCC, (2007): *Summary for Policymakers*. 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, United Kingdom and New York, NY, USA.
19. Jenkins G., J. Lowe (2003): *Handling uncertainties in the UKCIP02 scenarios of climate change* Hadlen Center Tech Note 44.
20. Jones, R. G., Murphy, J. M. and Noguer, M. (1995): *Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 1413-1449.
21. Jones R. G., Noger M., Hassell D. C., Hudson D., Wilson S., Jenkins G., and Mitchell, J. (2004): *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Center, Exeter, UK, 40 pp.
22. Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds B, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. (1996): *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. *Bull Am Meteorol. Soc* 77:437-47.
23. Kumar, K. R., A. K. Sahai, K. Krishna Kumar, S. K. Patwardhan, P. K. Mishra, J. V. Revadekar, K. Kamala and G. B. Pant (2006): *High-resolution climate change scenarios for India for the 21st century*. *CURRENT SCIENCE*, vol. 90, NO. 3, 10, 334-345 p.
24. Leggett, J (edit) 1992: *"Emissions Scenarios for the IPCC: an Update"*, *Climate Change (1992): The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, UK, pp. 68-95
25. Marengo J., R Jones, L. Alves., C. Malverde (2009): *Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from 34 35 the PRECIS regional climate modeling system*. *Int J Climatol*. DOI: 10.1002/joc.
26. Martinez D., R. Porfirio da Rocha, A. Bezanilla-Morlot, L. Alvarez-Escudero, J. P. Reyes-Fernández, Y. Silva-Vidal and R. W. Arritt (2006): *Sensitivity studies of the RegCM3 simulation of summer precipitation, temperature and local wind field in the Caribbean Region*, *Theoretical and Applied Climatology*, volume 86, 5-22.
27. Mearns, L. O., F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme and M. Lal (2003): *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments*, IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis, 38 pp.
28. Mearns L. (2004): *NARCCAP North American regional climate change assessment program A multiple AOGCM and RCM climate scenario project over North America*. AGU Fall Meeting. 12/17/2004. San Francisco.
29. Mitchell, TD (2000): *An investigation of the pattern scaling technique for describing future climate*. PhD Thesis, University of East Anglia, 2001.
30. Mitchell TD, (2003): *Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates*. *Clim Change* 60: 217-242.
31. Murphy, J. M., D. M. H. Sexton, D. N. Barnett, G. S. Jones, M. J. Webb, M. Collins, and D. A. Stainforth (2004): *Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations*. *Nature*, 430, 768-772.
32. Moss R, Jae Edmonds, Kathy Hibbard, Tim Carter, Seita Emori, Mikiko Kainuma, Tom Kram, Martin Manning, Jerry Meehl, John Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Keywan Riahi, Steven Rose, Steve Smith, Ron Stouffer, Allison Thomson, Detlef vanVuuren, John Weyant, and

- Tom Willbanks (2008): Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25 pp. ISBN: 978-92-9169-124-1.
33. Nakicenovic, N., and R. Swart (eds.), (2000): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599 pp.
  34. Nuñez M., Solman S, Cabre MF. (2008): Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change scenarios in the late twenty-first century. *Climate Dynamics* 30: 533–552, DOI: 10.1007/s00382-007-0304-3.
  35. Raisanen J. (2007): How reliable are climate models? *Tellus A*, vol: 59, no. 1: 2-29
  36. Rausher S., F. Giorgi, N. Diffenbaughy A. Seth (2008): Extension and Intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century, *Clim Dyn*, DOI 10.1007/s00382-007-0359-1.
  37. Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C. and Kaplan, A. (2002). Global analyses of SST, sea ice and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geographical Research*.
  38. Reichler, T. and Kim, J. (2008): How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Met. Soc.* 89, 303–11.
  39. Rivington M, Miller D, Matthews K B, Russell G, Buchan K. (2008): Evaluating Regional Climate Model estimates against site-specific observed data in the UK. *Climatic Change* 88(2):157-185.
  40. Sanchez-Gómez *et al.*, (2008): Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Clim Dyn* 33, 723-736.
  41. Santer BD, Wigley TML, Schlesinger ME, Mitchell JFB. (1990): Developing climate scenarios from equilibrium GCM results. Report nNo. 47, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg.
  42. Solomon S. Gian-Kasper Plattner, Reto Knutti, and Pierre Friedlingstein (2009): Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc Natl Acad Sci USA* No. 106: 1704-1709.
  43. Taylor, M. A., Centella, A., Charlery, J., Borrajero, I., Bezanilla, A., Campbell, J. D. *et al.*, (2007): Glimpses of the future: A briefing from the PRECIS Caribbean climate change project, Caribbean Community Climate Change Centre, Belmopan, Belize. 24 pp.
  44. Wang C, Lee SK (2007): Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophys Res Lett* 34. doi:10.1029/2006GL028579.
  45. Whetton, P.H. *et al.*, (2001): Developing scenarios of climate change for Southeastern Australia: An example using regional climate model output. *Clim. Res.*, 16(3), 181–201.
  46. Wigley, T.M.L. and Raper, S.C.B. (1992): Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature* 357, 293-300.
  47. Wilby, R.L., C.W. Dawson, and E.M. Barrow (2002): SDSM – A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ Model. Software*, 17, 147–159.
  48. Wilby, R.L, S.P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton and L.O. Mearns (2004): Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods, IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis, 27 pp.
  49. Wilson, S. S., D. C. Hassell, D. Hein, R. G. Jones and R. B. E. Taylor (2006): Installing and using the Hadley Centre regional climate modelling system PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
  50. Xie, P. and Arkin, P.A. (1997): Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 2539-2558.