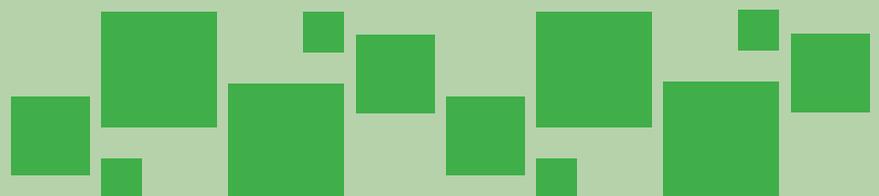


## CAPÍTULO 3

# EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y MEDIDAS DE ADAPTACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO





El cambio climático a nivel global ha aumentado considerablemente, al menos durante las últimas tres décadas. En el reporte de 2013, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) concluye que el calentamiento en el sistema climático es una realidad y que se están observando cambios que no tienen precedentes. Los cambios significativos en las variables climatológicas, en particular, de la precipitación y la temperatura, ponen en riesgo el desarrollo normal de la sociedad en muchos países, y muy especialmente a la población de escasos recursos de los llamados países en vías de desarrollo, que padecerán los efectos más negativos debido a su mayor vulnerabilidad.

Para el Estado venezolano, la sustentabilidad es el principio básico de la política ambiental, tal como lo establece la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela (Gaceta Oficial Extraordinaria N° 5.453 de la República Bolivariana de Venezuela, marzo de 2000); esta es el proyecto político y filosófico del marco jurídico nacional, e indica que el ambiente es un sujeto de derecho. Particularmente, el Título III, Capítulo IX, *De los derechos ambientales*, establece los derechos y deberes de los venezolanos en relación con el disfrute de un ambiente “seguro, sano y ecológicamente equilibrado”.

De igual manera, el proyecto político bolivariano está contenido y desagregado en el tiempo, a través del Plan de la Patria (Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social 2013-2019), donde se destaca de manera particular la transversalidad del 5º Objetivo: “Contribuir con la preservación de la vida en el planeta y la salvación de la especie humana”.

Este principio del proyecto político busca satisfacer las demandas de los usuarios actuales sin comprometer las futuras generaciones, encontrando y operando mecanismos y estrategias que garanticen equilibrios de mediano y largo plazo. Sin embargo, esta sustentabilidad está siendo seriamente amenazada por el cambio climático, que, al igual como ocurre en varios países a nivel global, es uno de los fenómenos ambientales que mayor interés ha despertado en las últimas décadas debido al gran impacto adverso que ha causado en diversos sectores.

Los estudios de la variabilidad y de cambio climático requieren contar con información científica a nivel regional con el objetivo de identificar, diseñar y llevar a cabo acciones de mitigación y adaptación ante los posibles impactos de fenómenos hidrometeorológicos. Una de las herramientas fundamentales para tal fin es el uso de modelos climáticos globales que permiten proyectar las condiciones potenciales del clima futuro. Para ello es necesario establecer escenarios climáticos basados en diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) posibles en el futuro, de acuerdo con la actividad humana y criterios socioeconómicos. A partir de los resultados de estos modelos globales se proyectan los resultados regionales correspondientes. Igualmente se requiere determinar el grado de vulnerabilidad frente al cambio climático, para la

formulación de planes y medidas de adaptación en sectores de destacada importancia para el país, como el sector de los recursos hídricos, la salud, la agricultura, el incremento sobre el nivel del mar y los recursos marinos costeros entre otros.

### 3.1 Escenarios climáticos para Venezuela

Los escenarios climáticos para Venezuela, usados en esta Segunda Comunicación, están basados en los Escenarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (EEGEI) desarrollados recientemente y presentados en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013). Estos escenarios de emisiones fueron denominados “Trayectorias de Concentraciones Representativas” (RCP por sus siglas en inglés), de los cuales existen cuatro versiones de acuerdo con diferentes concentraciones de GEI: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5.

Entre ellos se escogieron como EEGEI a los RCP4.5 y RCP8.5; el primero representa resultados cuyas emisiones de GEI provocarán a finales de siglo unas concentraciones finales de CO<sub>2</sub> de grado “intermedio”, que implican un forzamiento radiativo de unos 4,5 W m<sup>-2</sup>, mientras que el RCP8.5 muestra resultados con altas emisiones de GEI, que conducirán a finales de siglo a unas concentraciones tan altas de CO<sub>2</sub> que llevarán a un forzamiento radiativo de 8,5 W m<sup>-2</sup>. El RCP4.5 se considera un “escenario intermedio”, mientras que el RCP8.5 puede ser considerado un “escenario pesimista”.

#### 3.1.1 Los modelos climáticos para los escenarios seleccionados en Venezuela

Los modelos climáticos usados para simular el clima futuro global son el HADGEM2 (desarrollado en Inglaterra) y el MIROC5 (desarrollado en Japón). Las resoluciones de estos modelos son muy gruesas (grillas de unos 200 km de lado) y para mejorarlas se usaron “Modelos Climáticos Regionales”, con resolución espacial más fina (grillas de unos 20 km de lado). Estos modelos usan las salidas de los Modelos Climáticos Globales y corren los procesos en un área más pequeña. El modelo climático regional usado para Venezuela es el desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE, por sus siglas en portugués), de Brasil, llamado ETA. Estas versiones del modelo regional se denominan en adelante como Eta\_HADGEM2 y Eta\_MIROC5. Los resultados obtenidos se logran a través de una colaboración científica entre el INPE y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Inameh), de Venezuela. Estos resultados son tomados para su análisis en esta Segunda Comunicación.

Para ambos modelos, las grillas de las salidas tienen una resolución espacial de 20 km de lado, y los análisis que siguen, así como los datos originales y los estadísticos respectivos, cubren el área entre las coordenadas -74,0 a -58,0°W, y 0 a 13°N, como se observa en la Figura 3.1. Se obtuvieron datos desde 1961 hasta 2005, para comparar cómo simulan los modelos en el siglo XX, usando como mediciones nacionales la Normal 1971-2000. Esta comparación se realizó solamente con las simulaciones de los dos modelos para el escenario RCP4.5, dado que no reviste un interés particular un análisis de sensibilidad entre escenarios.

Para simular el clima futuro, se estimaron las precipitaciones y temperaturas medias mensuales, trimestrales y anuales para tres períodos, bajo los dos escenarios, RCP4.5 y RCP8.5:

- 2030: promedio de los treinta años entre 2016 y 2045.
- 2060: promedio de los treinta años entre 2046 y 2075.
- 2090: promedio de los veinte años entre 2080 y 2099.

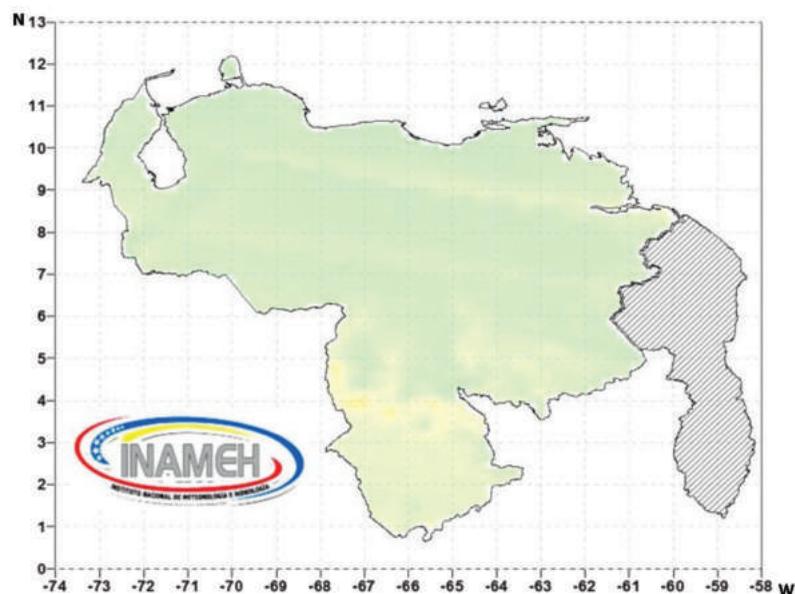


Figura 3.1 Área total de datos considerada en los escenarios climáticos.

### 3.1.2 Escenario climático RCP4.5 para Venezuela

A continuación se presenta una comparación gráfica y en mapas, para los valores simulados por los modelos Eta\_HADGEM2 y Eta\_MIROC5; y los mapas que resumen el comportamiento futuro de la temperatura y precipitación, medias trimestrales y anuales, para los años 2030, 2060 y 2090, según la Trayectoria Representativa de Concentraciones RCP4.5.

#### Comportamiento de las temperaturas medias simuladas

Ambos modelos simulan un incremento de la temperatura media con el paso del tiempo, por años y trimestres. Los patrones son muy similares en ambos casos; los dos modelos simulan correctamente a diciembre-febrero como el trimestre más frío del año, y a marzo-mayo como el más cálido. En todos los casos, el Eta\_HADGEM2 simula temperaturas mayores que el Eta\_MIROC5, y también, en ambos modelos, el incremento de temperatura con el tiempo es más notable en el trimestre diciembre-febrero. El Eta\_HADGEM2 llega a simular valores de temperatura media en el trimestre marzo-mayo de 32,5 °C en 2090; considerando que la temperatura media actual en la zona ronda los 27,5 °C, eso representa para finales de siglo un incremento en el orden de 5 °C. Para visualizar algunos valores con mayor detalle, de las 2663 grillas que cubren Venezuela se seleccionaron tres: una de las grillas más cálidas y una de las grillas más frías, según ambos modelos; y una grilla

muy cálida según la distribución de temperaturas basada en las estaciones nacionales. La primera está en el sur de Guárico, cerca de la frontera con Apure; la más fría, en el Páramo merideño; y la tercera está al sur del lago de Maracaibo. Figura 3.2.

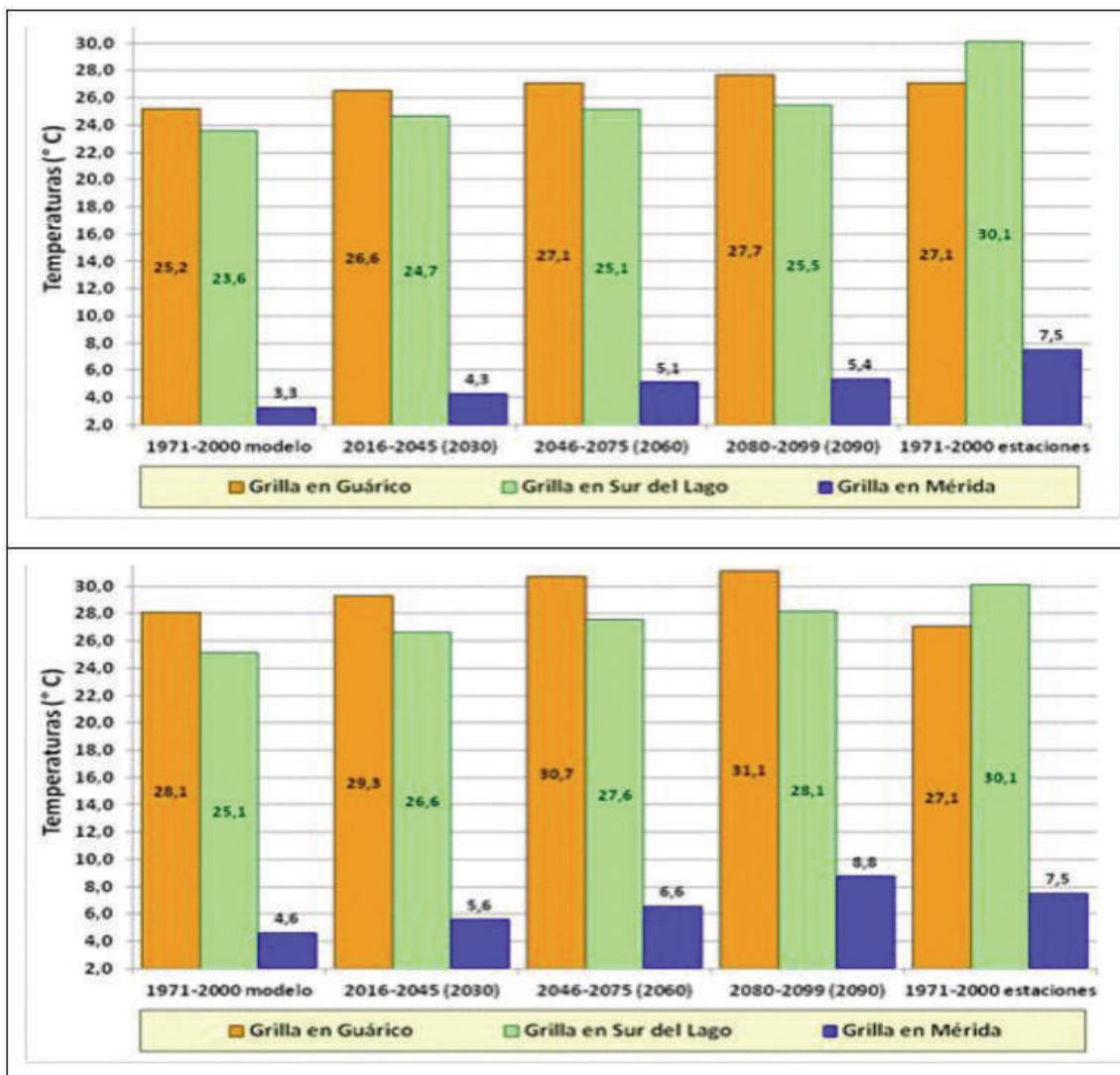


Figura 3.2 Temperaturas medias anuales para el período 1971-2000, medidas por estaciones nacionales y simuladas, y para los períodos futuros 2030, 2060 y 2090, según los modelos Eta\_MIROC5 (arriba.) y Eta\_HADGEM2 (abajo) RCP4.5)

Ambos modelos subestiman la temperatura histórica en la grilla fría entre 3 °C y 4 °C; en los Llanos el Eta\_MIROC5 subestima en 2 °C la temperatura actual, y al sur del lago la subestimación es de unos 3,5 °C. A causa de la subestimación, aunque el modelo simula un incremento de temperatura con el tiempo, apenas a finales de siglo se alcanzan valores similares a los actuales. El Eta\_HADGEM2 sobreestima la temperatura en los Llanos en 1 °C, y la subestima al sur del lago en unos 5 °C.

Con respecto al transcurso mensual, las simulaciones de ambos modelos en las grillas cálida y fría muestran correctamente la bimodalidad, más marcada en la grilla fría, que está situada al oeste del meridiano  $-70^{\circ}\text{W}$ , como se observa en la Figura 3.3.

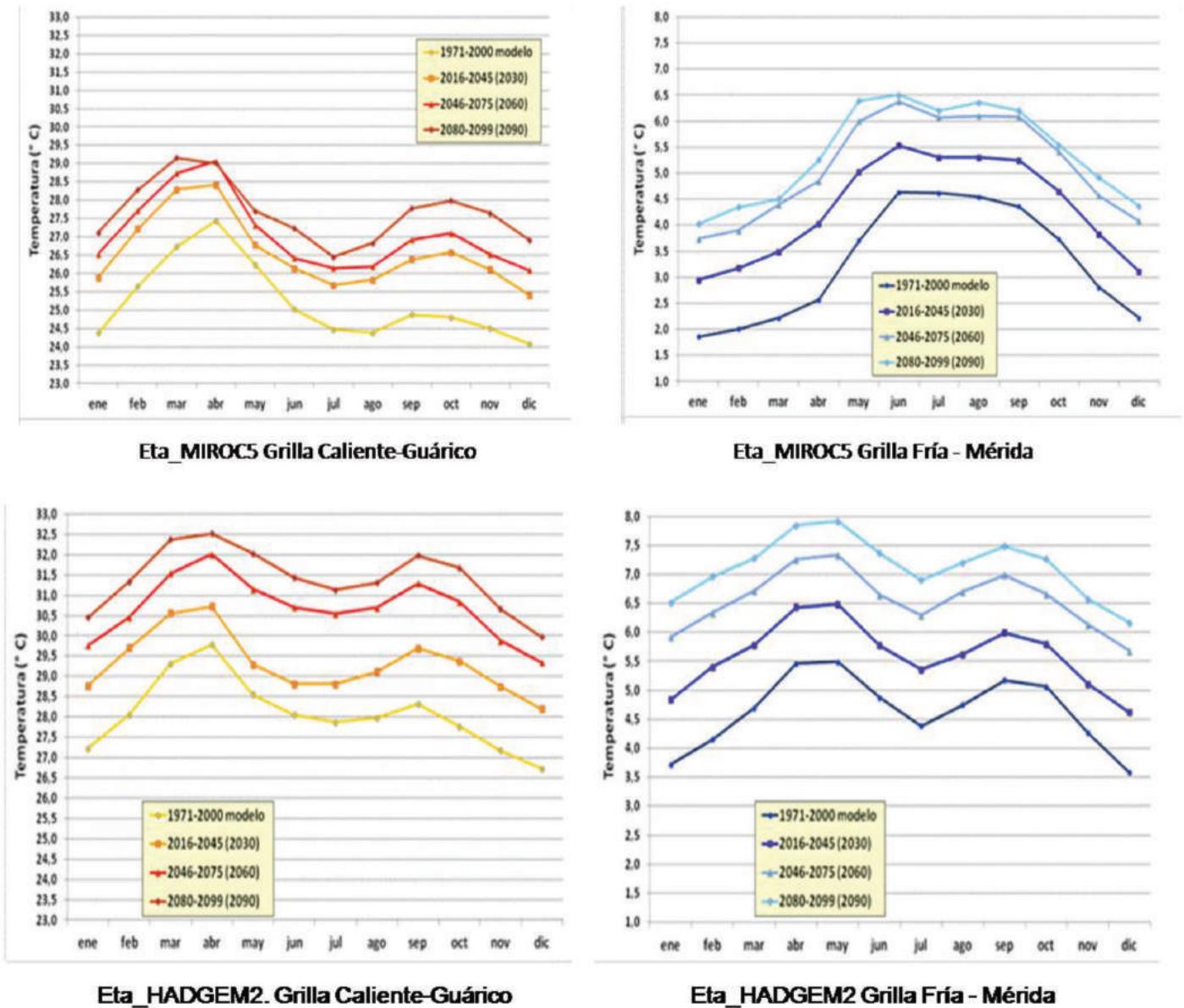


Figura 3.3 Temperaturas medias mensuales para el período histórico (1971–2000), medidas por estaciones nacionales y simuladas para los períodos futuros 2030, 2060 y 2090, según los modelos Eta\_MIROC5 (arriba) y Eta\_HADGEM2 (abajo). Escenario RCP4.5

Simulaciones anuales de temperatura con el modelo Eta\_MIROC5 para los períodos futuros 2030, 2060 y 2090 y trimestrales del período histórico 1971-2000 y futuros 2030, 2060 y 2090

En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestra el comportamiento anual y trimestral obtenido con el modelo Eta\_MIROC5, escenario RCP4.5.

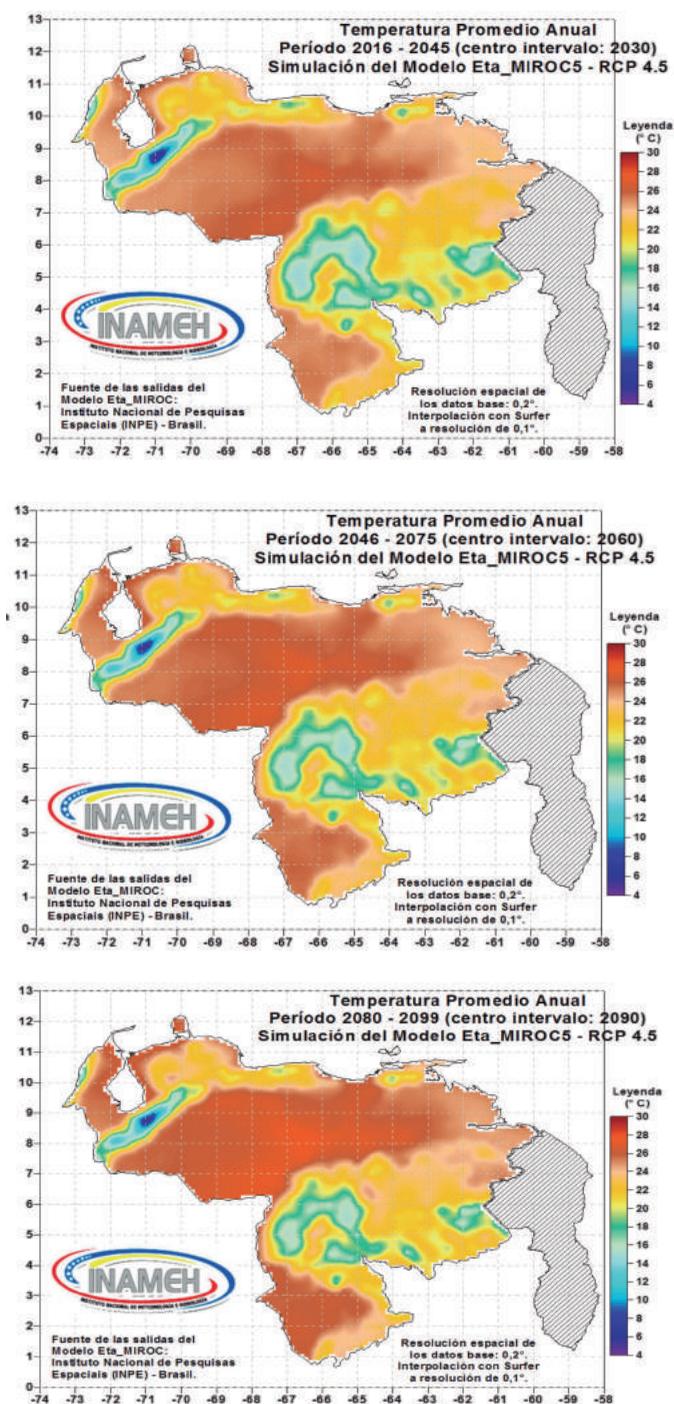


Figura 3.4 Temperatura media anual para los períodos 2030, 2060 y 2090, simulada por el modelo Eta\_MIROC5 (RCP4.5)

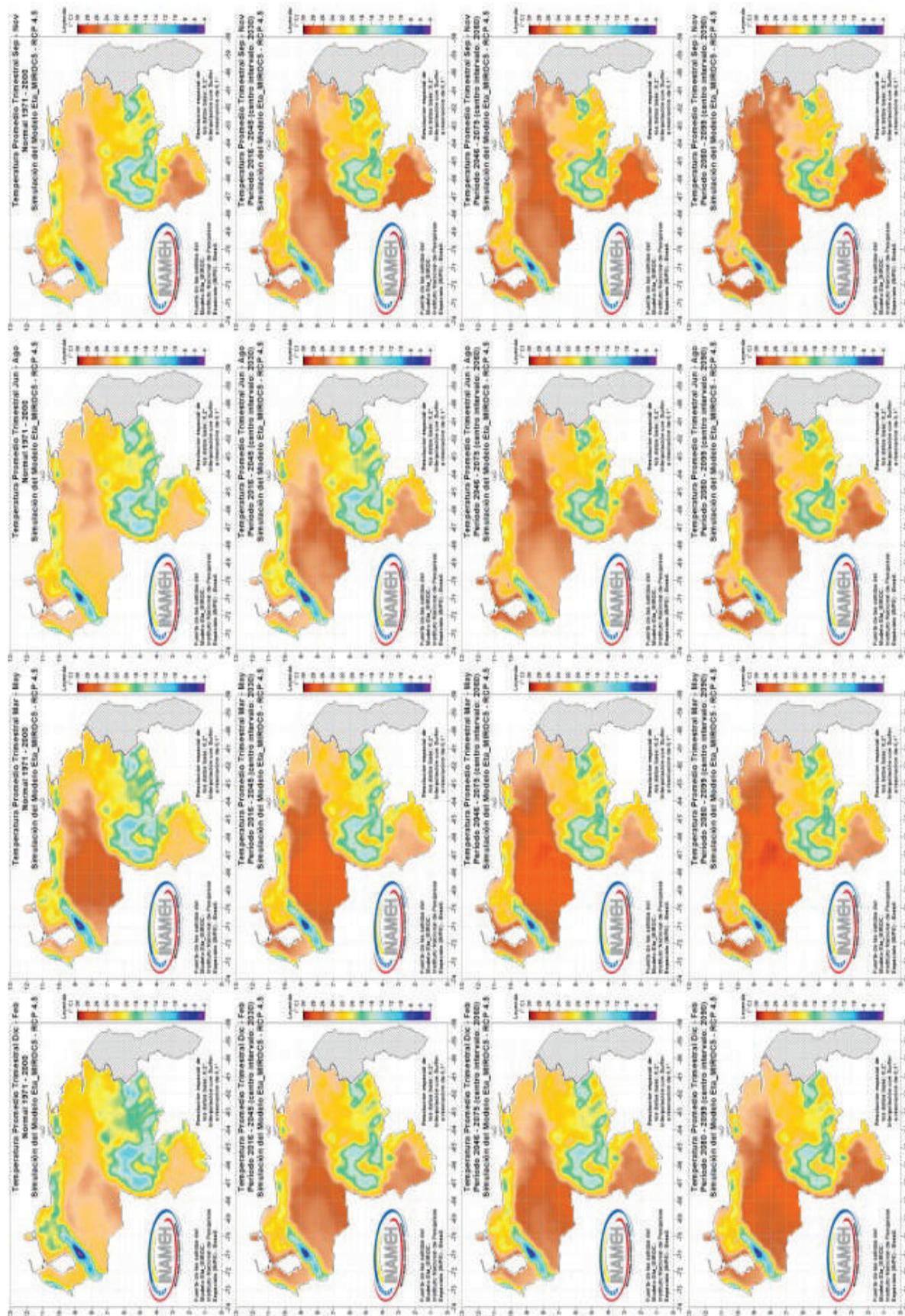


Figura 3.5 Temperaturas medias trimestrales para el período 1971-2000 y los períodos futuros 2030,2060 y 2090, simuladas por el modelo Eta\_MIROC5 (RCP4.5)

Simulaciones anuales de temperatura con el modelo Eta\_HADGEM2 para los períodos futuros 2030, 2060 y 2090 y trimestrales del período histórico 1971-2000 y futuros 2030, 2060 y 2090

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestra el comportamiento anual y trimestral obtenido con el modelo Eta\_HADGEM2, escenario (RCP4.5).

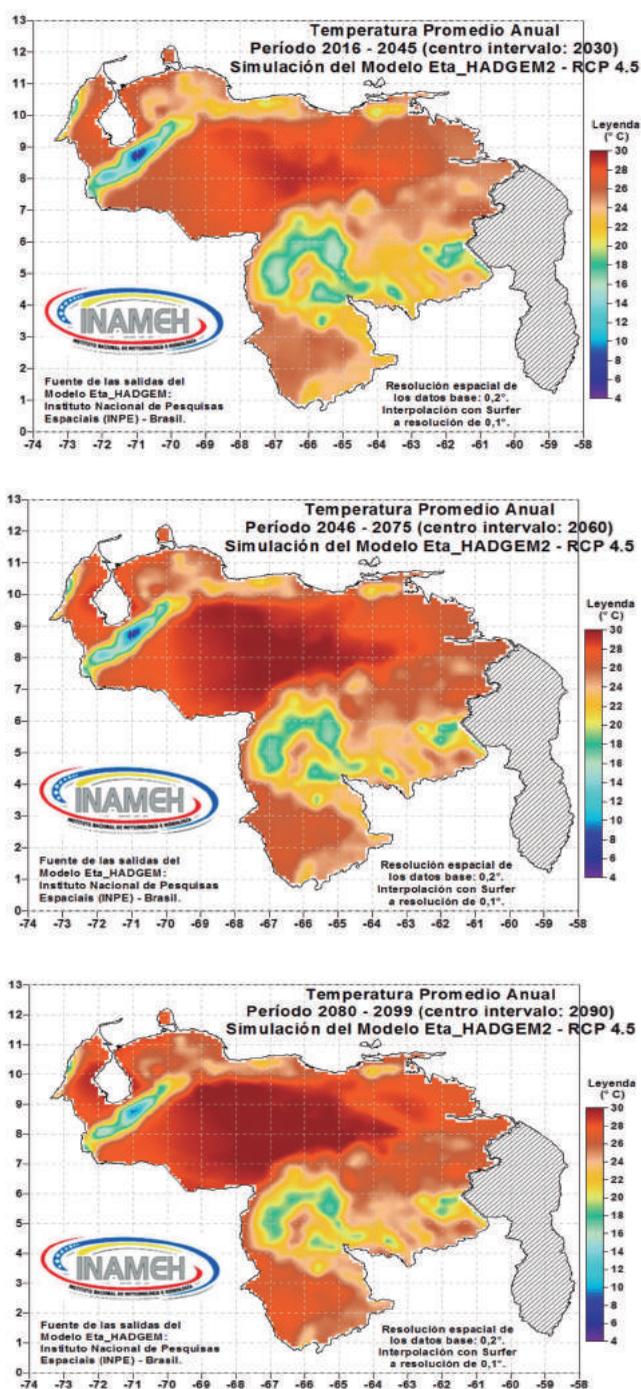


Figura 3.6 Temperatura media anual para los períodos 2030, 2060 y 2090, simulada por el modelo Eta\_HADGEM2 (RCP4.5)

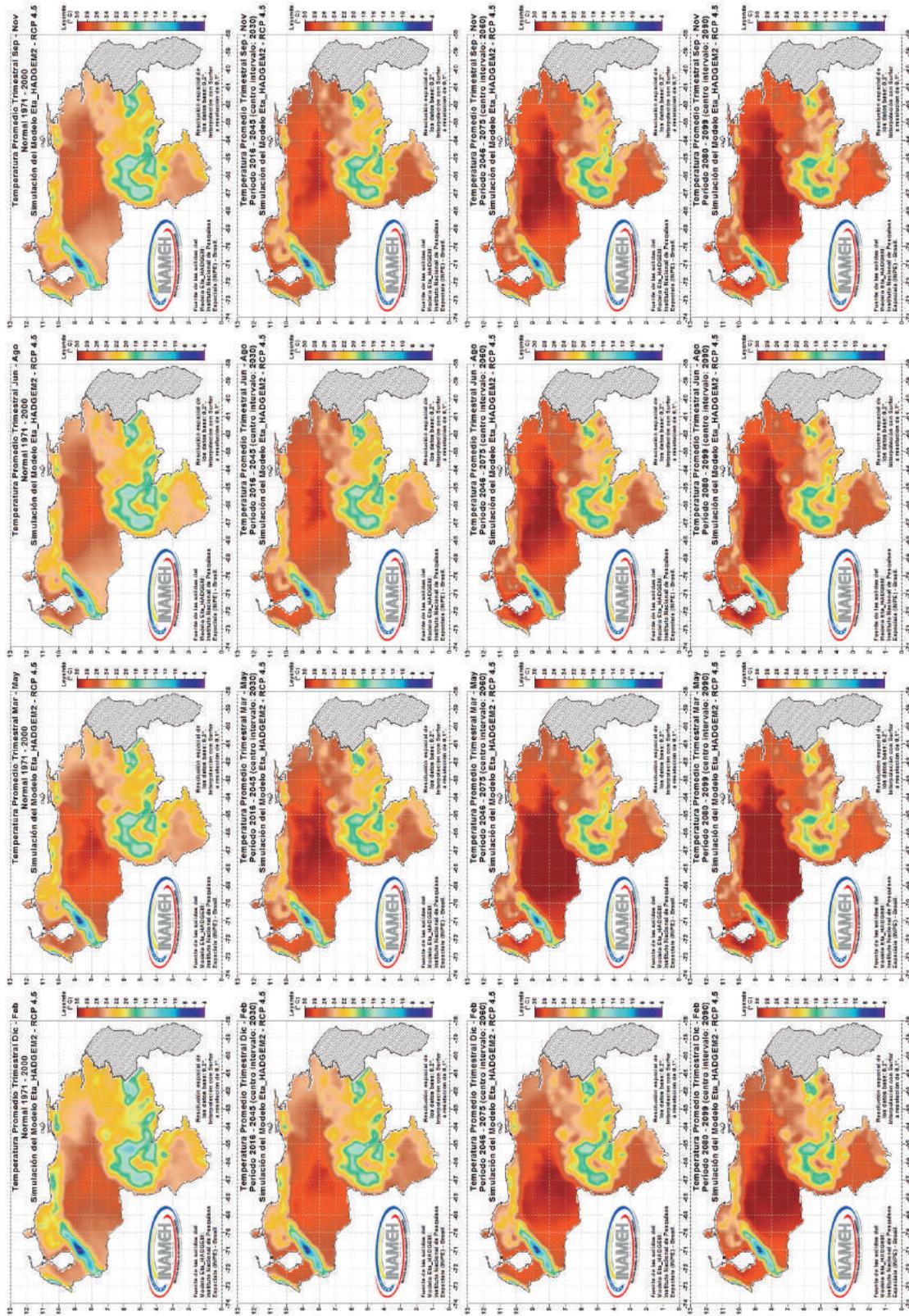


Figura 3.7 Temperaturas medias trimestrales para el período 1971-2000 y los períodos futuros 2030, 2060 y 2090, simuladas por el modelo Eta\_HADGEM2 (RCP4.5)

### Comportamiento de las precipitaciones medias simuladas

En general, el Eta\_HADGEM2 simula mejor el ciclo anual que el Eta\_MIROC5. En la Figura 3.8 se presenta la distribución porcentual de la lluvia anual por trimestre, de acuerdo con los datos de las estaciones nacionales para la normal histórica 1971-2000; se observa que en toda la zona llanera y sur del país, el trimestre junio-agosto concentra la mayor proporción del total anual de lluvia, mientras que el trimestre diciembre-febrero es en todo el país el que menor proporción de lluvia anual concentra. El trimestre de salida de aguas, septiembre-noviembre también concentra una alta proporción en la zona noroccidental, y también al occidente el trimestre marzo-mayo contribuye con la cuarta parte del total anual de lluvia. Si comparamos estas cifras con las de la Figura 3.9, que representa la proporción de lluvia trimestral promedio para los dos modelos, en los dos escenarios, se observa que el Eta\_HADGEM2 respeta más la proporción según las estaciones nacionales, mientras que el Eta\_MIROC5 simula una fuerte concentración de lluvia entre marzo y agosto, dejando al trimestre septiembre-noviembre con una proporción tan baja como la de diciembre-febrero.

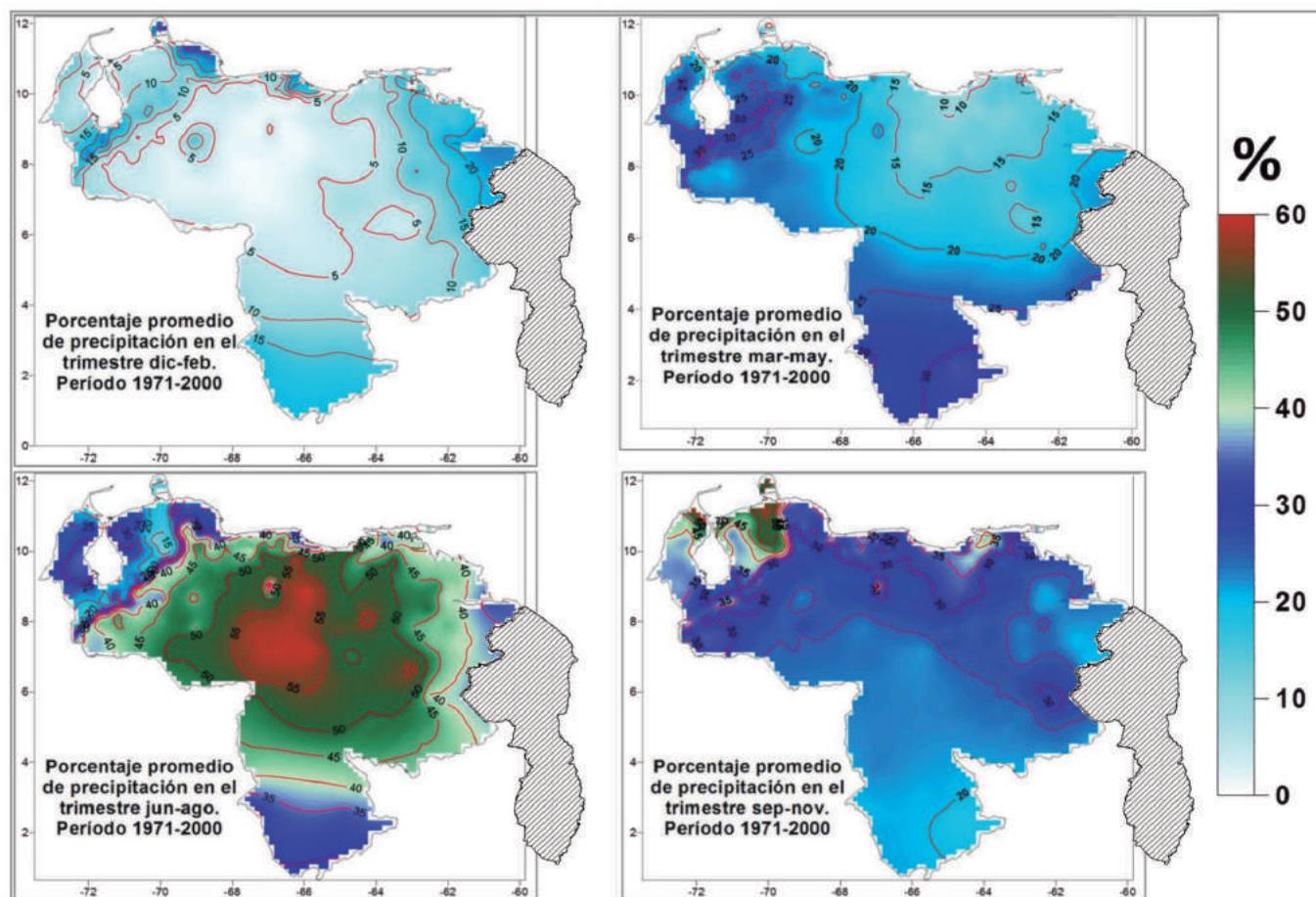


Figura 3.8 Distribución espacial de los porcentajes trimestrales de la lluvia anual, con base en el registro de estaciones nacionales en el período 1971-2000

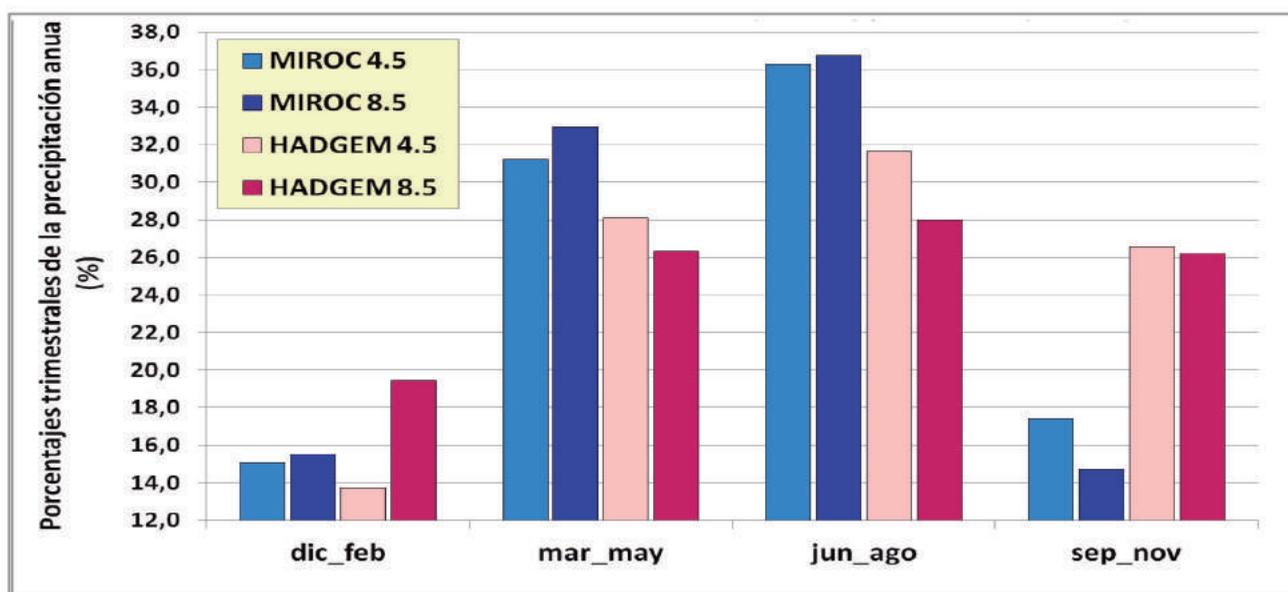


Figura 3.9 Distribución promedio de los porcentajes trimestrales de la lluvia anual de los modelos Eta\_MIROC5 y Eta\_HADGEM2, para los escenarios intermedio (RCP4.5) y pesimista (RCP8.5)

A nivel anual, ambos modelos simulan una disminución generalizada de la lluvia en el país a lo largo del siglo XXI, pero por trimestres hay diferencias significativas entre ellos.

Para el trimestre más seco del año, diciembre-febrero, el Eta\_MIROC5 simula que toda la fachada oriental, el sur de Bolívar, Amazonas y Zulia van haciéndose cada vez más secos, mientras que, por el contrario, en los Llanos occidentales y centrales aumentaría ligeramente la precipitación, en los tres períodos considerados. El Eta\_HADGEM2, por su parte, simula un ligero incremento de la lluvia en todo el centro y norte del país, y solo el Delta, el sur de Zulia y el sur de Amazonas se volverían más secos en el futuro.

En el trimestre de entrada de aguas, marzo-mayo, el Eta\_MIROC5 simula un futuro complejo: hacia 2030 se hace más seco en todo el país, pero hacia mediados y finales de siglo la lluvia aumentaría en los Llanos occidentales y el Delta, aunque continuaría disminuyendo en los Llanos centrales y orientales. Según el Eta\_HADGEM2, por el contrario, la lluvia aumentaría ligeramente en toda la fachada oriental, mientras que hacia el resto del país disminuiría, en los tres períodos considerados.

En el trimestre más lluvioso del año, junio-agosto, el Eta\_MIROC5 simula precipitaciones extremadamente altas para todo el país, excepto en las zonas montañosas de los Andes, Turimiquire, depresión Lara-Falcón y algunas zonas altas de Amazonas, pero en todo el país la precipitación disminuiría durante los tres períodos considerados. El Eta\_HADGEM2 mantiene el patrón de que en la zona oriental la precipitación, que simula con valores muy bajos, se incrementa ligeramente a lo largo de los tres períodos, 2030, 2060 y 2090, mientras que disminuye en el resto del país.

El trimestre de salida de aguas, septiembre-noviembre, es quizá el mejor simulado por el Eta\_MIROC5 en términos de valores y de representación espacial y el patrón es simple: una disminución generalizada de la precipitación a lo largo del siglo XXI, que se hace muy brusca a finales de siglo (2090). El Eta\_HADGEM2 simula para este trimestre el mismo

comportamiento que para el anterior, y como el Eta\_MIROC5, muestra una disminución más brusca hacia 2090, aunque más localizada hacia el sur del estado Amazonas.

Para hacerse una idea más regionalizada sobre los valores de precipitación, se seleccionaron 8 grillas representativas de regiones geográficas del país, y la Figura 3.10 resume el comportamiento de la lluvia anual en 2030, 2060 y 2090, y el valor promedio anual 1971-2000 basado en las mediciones nacionales. Se observa el incremento señalado de la lluvia hacia mediados de siglo que presenta el Eta\_MIROC5 en la costa central, planicie de Maracaibo, Llanos occidentales y sur de Bolívar, y en este último lugar también muestra ese patrón el Eta\_HADGEM2. Ambos modelos subestiman la precipitación en los páramos, pero mientras el Eta\_MIROC5 señala una disminución de la lluvia a lo largo del siglo XXI, el Eta\_HADGEM2 señala un ligero incremento. En la costa central hay una alta incertidumbre: el Eta\_MIROC5 la simula como muy lluviosa y el Eta\_HADGEM2 como muy seca. Los Llanos occidentales son el área mejor simulada, aunque Eta\_MIROC5 simula valores más altos que Eta\_HADGEM2.

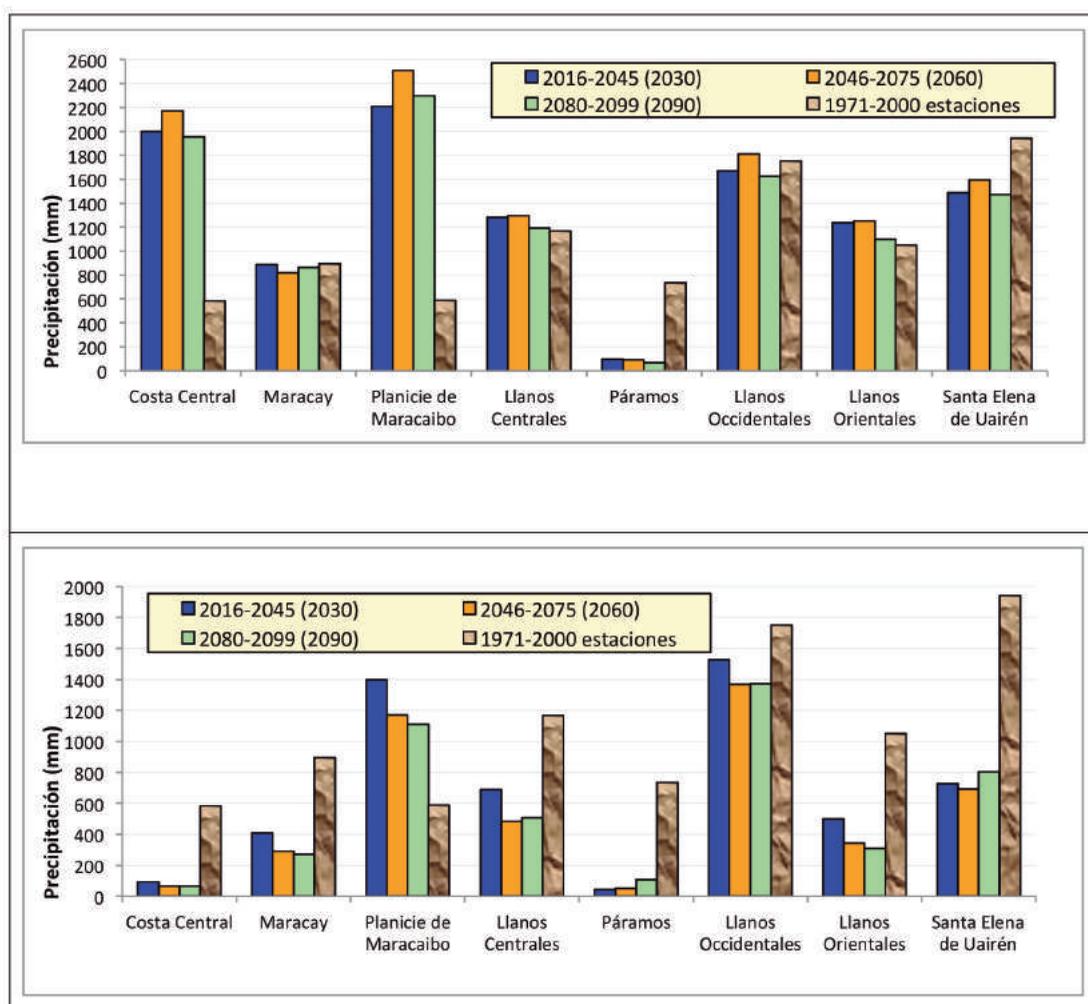


Figura 3.10 Precipitación media anual para ocho grillas representativas de regiones geográficas de Venezuela para los periodos futuros 2030, 2060 y 2090, según los modelos Eta\_MIROC5 (arriba) y Eta\_HADGEM2 (abajo) RCP4.5 y valores históricos del período 1971-2000, según las estaciones nacionales

*Simulaciones anuales de precipitación con el Eta\_MIROC5 para el período 1971-2000 y los períodos futuros 2030, 2060 y 2090*

En las Figuras 3.11 y 3.12 se muestran los resultados obtenidos para la precipitación con el modelo Eta\_MIROC5, escenario RCP4.5.

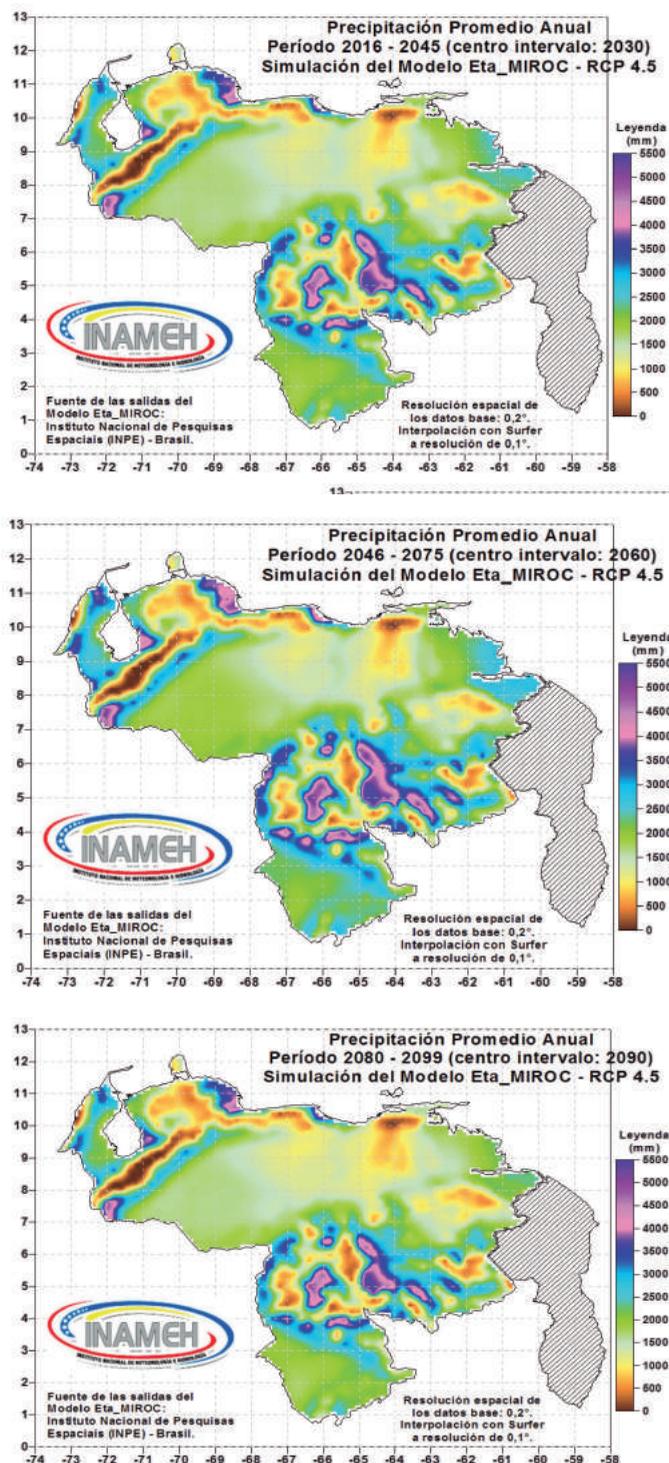


Figura 3.11 Precipitación media anual para los períodos 2030, 2060 y 2090, simulada con el modelo Eta\_MIROC5 (RCP4.5)

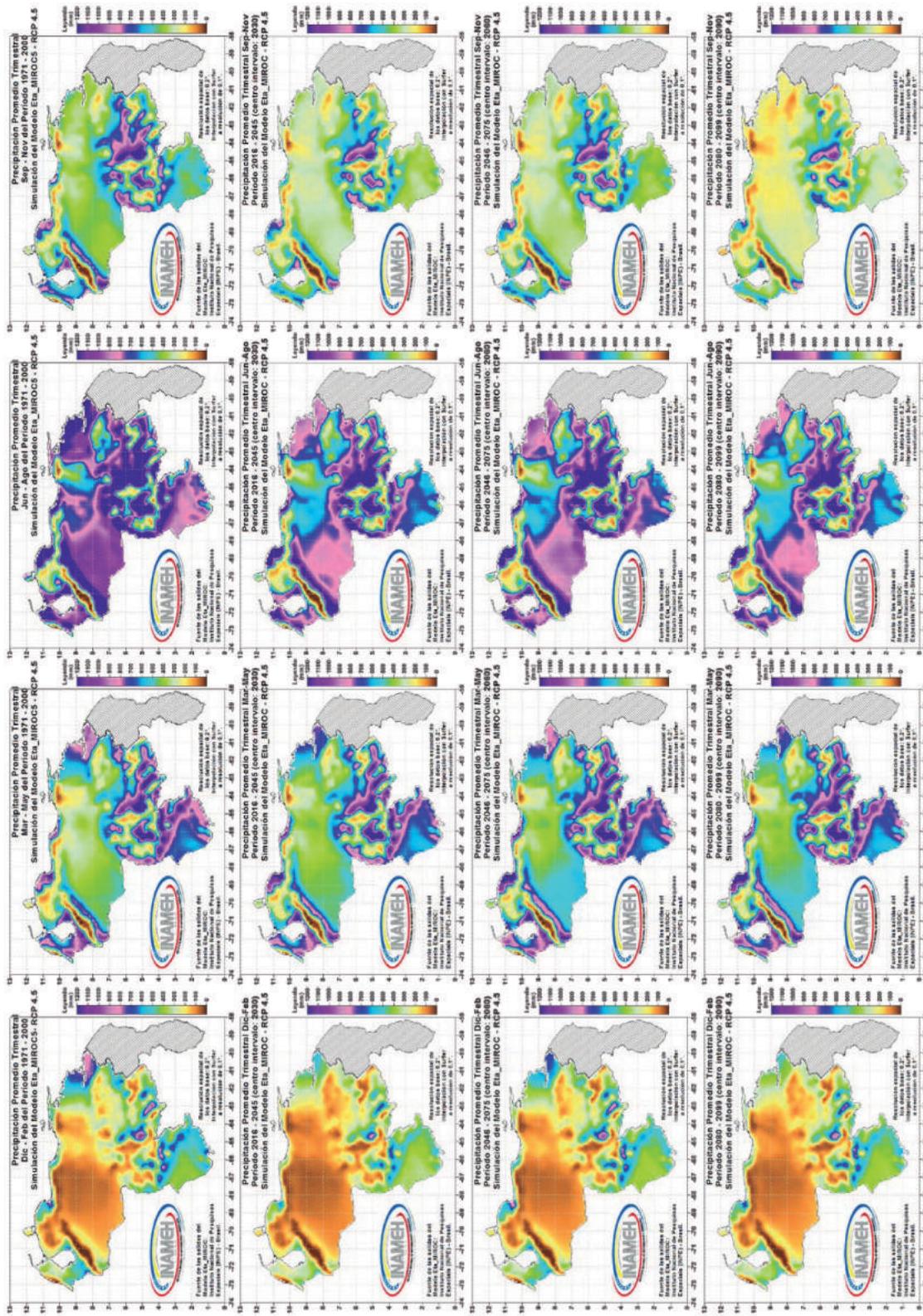


Figura 3.12 Precipitaciones medias trimestrales para el período histórico 1971-2000 y los períodos futuros 2030, 2060 y 2090, simuladas con el modelo Eta\_MIROC5 (RCP4.5)

*Simulaciones del Eta\_HADGEM2 de precipitación para el período 1971-2000 y los períodos futuros 2030, 2060 y 2090*

En las Figuras 3.13 y 3.14 se muestran los resultados obtenidos de precipitación con el modelo Eta\_HADGEM2, escenario RCP4.5.

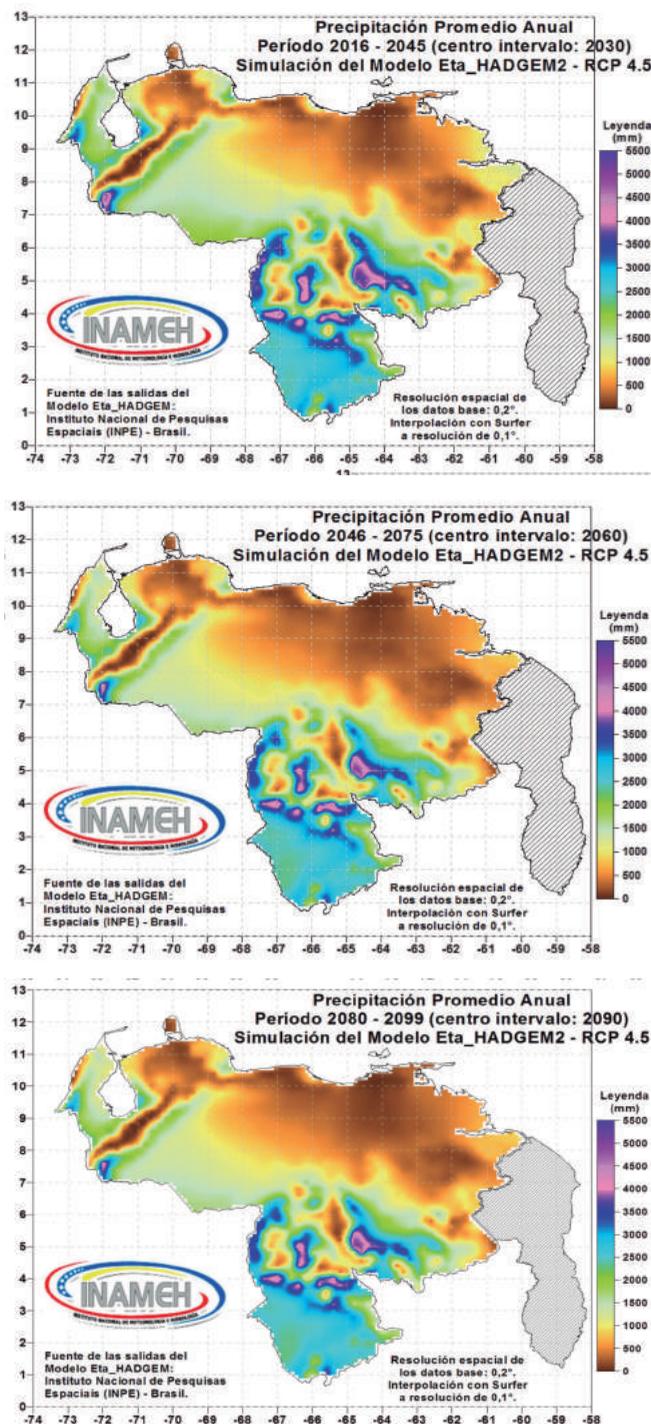


Figura 3.13 Precipitación media anual para los períodos 2030, 2060 y 2090, simulada con el modelo Eta\_HADGEM2 (RCP4.5)

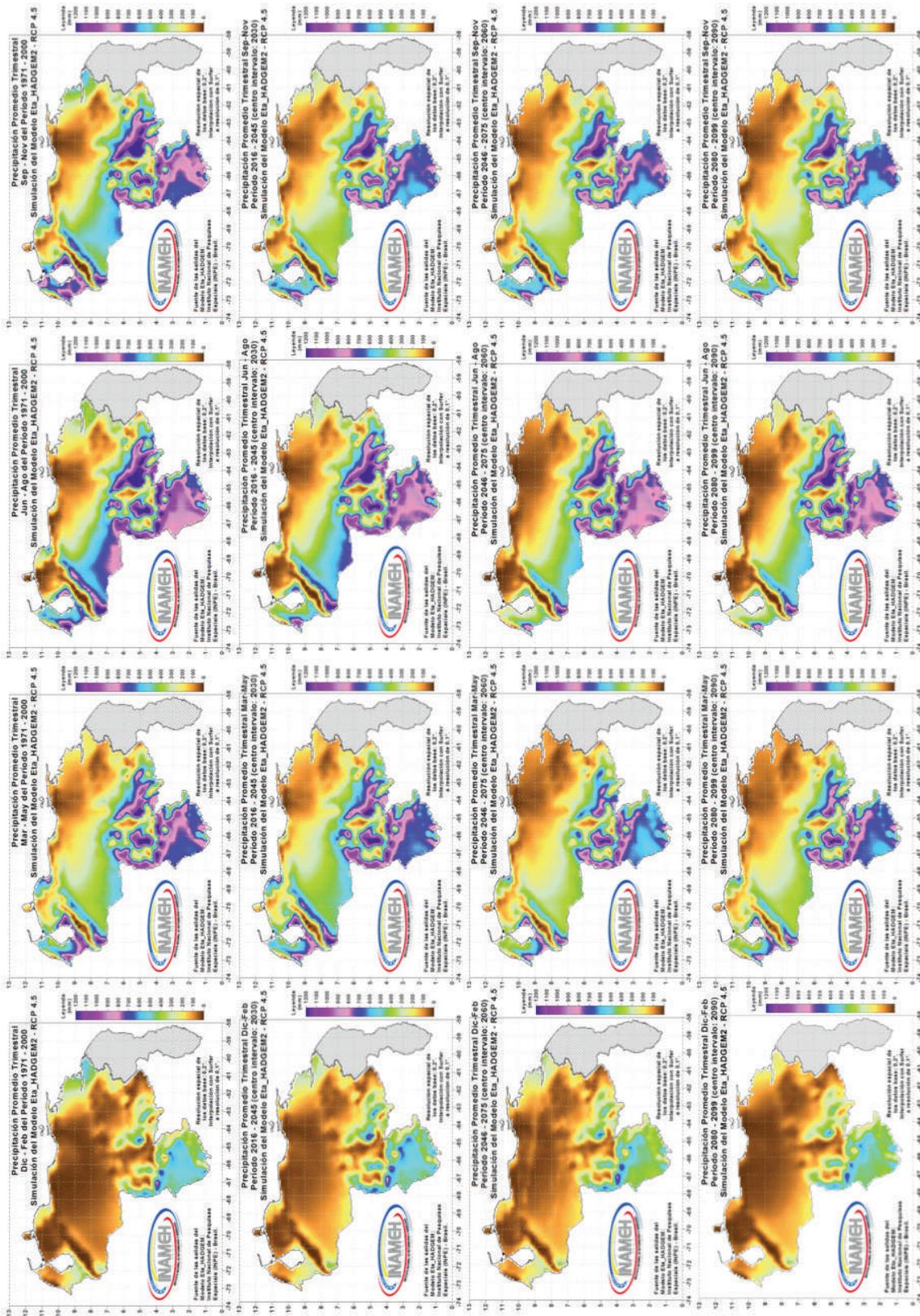


Figura 3.14 Precipitaciones medias trimestrales para el periodo histórico 1971-2000 y los periodos futuros 2030, 2060 y 2090, simuladas con el modelo Eta\_HADGEM2 (RCP4.5)

### 3.1.3 Escenario climático RCP8.5 para Venezuela

A continuación se presentan los mapas que resumen el comportamiento de la precipitación y la temperatura media para los cuatro trimestres y el valor anual, para los años 2030, 2060 y 2090, según la Trayectoria Representativa de Concentraciones RCP8.5.

#### Simulaciones del Eta\_MIROC5 para temperaturas, períodos 2030, 2060 y 2090, RCP8.5

En la Figura 3.15 se presentan los mapas de temperatura media anual para los períodos centrados en 2030, 2060 y 2090, según el Eta\_MIROC5, y en la Figura 3.16 los mapas con los valores promedio trimestrales para los mismos períodos.

Para el escenario pesimista (RCP8.5), el Eta\_MIROC5 simula el ciclo anual de la temperatura razonablemente bien, es decir, el trimestre diciembre-febrero como el más fresco del año, y el trimestre marzo-mayo como el más cálido, y también mantiene el rasgo erróneo de subestimación de los valores de temperatura en las zonas montañosas, especialmente en las montañas de Bolívar y Amazonas, donde las alturas no sobrepasan los 1.400 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), pero el modelo simula temperaturas del orden de los 16 °C incluso a finales de siglo. La tendencia general, sin embargo, es la misma que en todos los modelos a nivel mundial, a saber, un incremento constante de la temperatura a lo largo del siglo XXI. Se observa un incremento fuerte a finales de siglo, especialmente notable en el trimestre septiembre-noviembre, en la zona plana de Amazonas, y en los Llanos bajos. Hacia los Andes, ya para mediados de siglo, prácticamente desaparece la zona con temperaturas menores a 5 °C, incluso en el trimestre diciembre-febrero.

#### Simulaciones del Eta\_HADGEM2 para temperaturas, períodos 2030, 2060 y 2090, RCP8.5

En la Figura 3.17 se presentan los mapas de temperatura media anual para los períodos centrados en 2030, 2060 y 2090, según el Eta\_HADGEM2; y en la Figura 3.18, los mapas con los valores promedio trimestrales para los mismos períodos.

El Eta\_HADGEM2 asimismo simula bien el ciclo anual, para el escenario pesimista, RCP8.5, el trimestre diciembre-febrero lo simula como el más fresco del año y el trimestre marzo-mayo como el más caluroso. Mantiene el rasgo erróneo de la subestimación de la temperatura en las montañas del sur de Bolívar y Amazonas, pero en menor grado que Eta\_MIROC5. En el escenario pesimista, el modelo continúa simulando temperaturas mayores que el Eta\_MIROC5 en casi todo el país, lo que hace sus simulaciones un poco más realistas.

Aquí también se presenta el rasgo del incremento fuerte de la temperatura en el trimestre septiembre-noviembre en la zona plana de Amazonas, especialmente a finales de siglo, aunque menos fuerte que la simulada por el Eta\_MIROC5, y asimismo desaparece de los Andes la zona con temperatura menor a 5 °C desde mediados de siglo, incluso en el trimestre más fresco, diciembre-febrero.

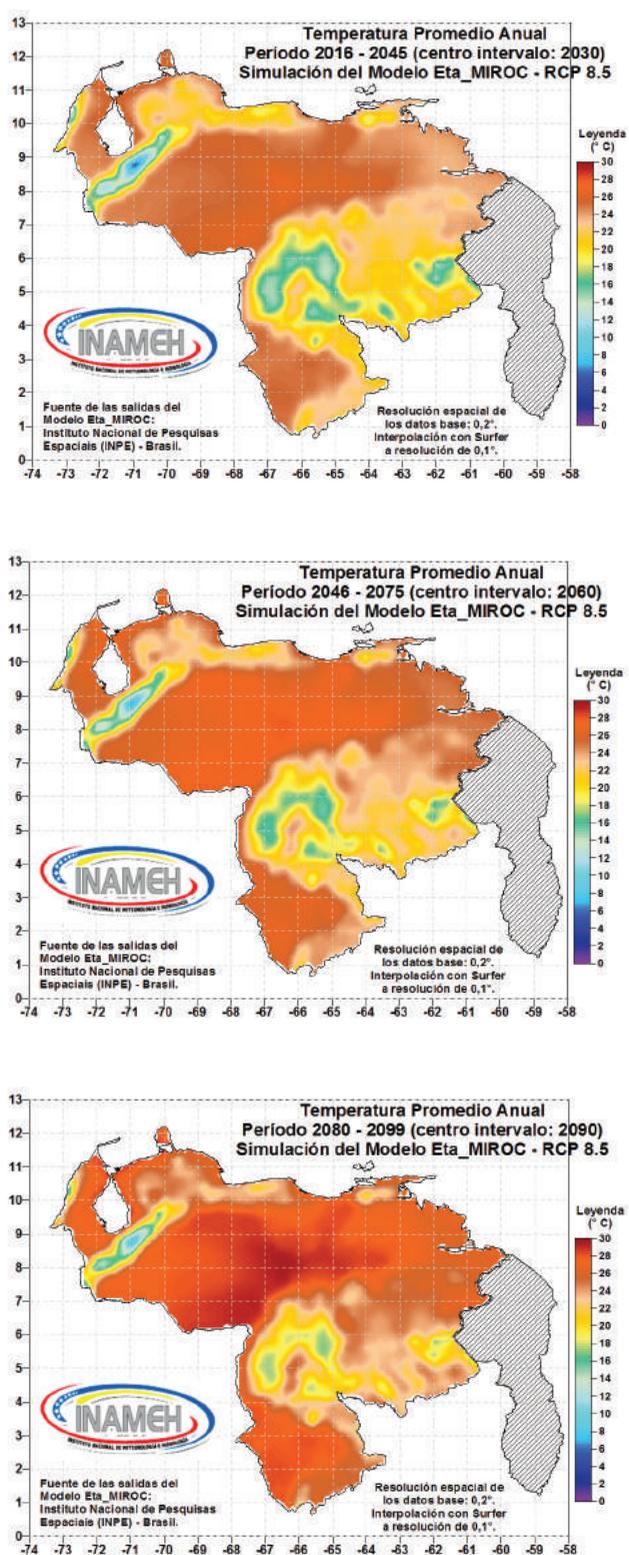


Figura 3.15 Temperatura media anual para los períodos 2030, 2060 y 2090, simulada por el modelo Eta\_MIROC5 (RCP8.5)