

Instituto Meteorológico Nacional



## Análisis de escenarios IPCC

Elaborado por:  
Francisco Sancho

Julio 2016



## Contenidos

1	Presentación.....	6
2	Resumen ejecutivo .....	8
3	Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica .....	17
4	Las Vías de Concentración Representativas .....	19
4.1	Los informes previos de evaluación del IPCC.....	19
4.2	El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC .....	21
4.3	Los escenarios previos a las VCR.....	23
4.4	El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados .....	26
4.5	Los escenarios VCR resultantes .....	29
4.6	El forzamiento radiativo .....	32
4.6.1	El papel de los gases de efecto invernadero .....	38
4.6.2	La sensibilidad climática .....	45
5	Los escenarios VCR y el cambio climático.....	46
5.1	Escenarios de las fuerzas impulsoras.....	47
5.2	Cambios en los agentes de forzamiento .....	50
5.2.1	Cambios de corto plazo en agentes de forzamiento.....	50
5.2.1.1	Emisiones de factores de forzamiento de corto plazo .....	51
5.2.1.2	Concentraciones de factores de forzamiento de corto plazo .....	52
5.2.2	Cambios de largo plazo en agentes de forzamiento .....	52
5.2.2.1	Emisiones de gases de efecto invernadero .....	52
5.2.2.2	Concentraciones de gases de efecto invernadero .....	53
5.2.2.3	Cambio de uso del suelo .....	54
5.2.2.4	Emisiones de combustibles fósiles en los escenarios VCR .....	60
5.3	Cambios en la temperatura .....	62
5.3.1	Cambios de corto y mediano plazo en la temperatura .....	62
5.3.2	Cambios de largo plazo en la temperatura .....	64
5.4	Cambios en el ciclo del agua.....	70
5.4.1	Cambios en el ciclo del agua a corto plazo .....	70
5.4.2	Cambios en el ciclo del agua a largo plazo.....	72
5.4.3	Escorrentía y evaporación .....	76
5.4.4	Eventos extremos en el ciclo del agua .....	77

5.4.5	Los recursos de agua dulce .....	79
5.5	Cambios en la circulación atmosférica .....	81
5.5.1	Cambios de corto plazo en la circulación atmosférica .....	81
5.5.2	Cambios de largo plazo en la circulación atmosférica .....	82
5.6	Cambios en los océanos .....	84
5.6.1	Cambios proyectados en el corto plazo para los océanos .....	84
5.6.2	Cambios de largo plazo en los océanos .....	86
5.6.3	Sistemas marinos.....	91
5.7	Cambios en la criósfera .....	92
5.7.1	Cambios de corto plazo en la criósfera .....	92
5.7.2	Cambios de largo plazo en la criósfera .....	92
5.8	Fenómenos climáticos regionales.....	95
5.8.1	Sistemas monzónicos.....	96
5.8.2	Fenómenos Tropicales.....	96
5.8.3	ENOS: El Niño y La Niña .....	97
5.8.4	Ciclones .....	97
5.8.5	Principales riesgos del impacto del cambio climático .....	99
5.8.6	Sistemas de producción de alimentos y la seguridad alimentaria .....	102
5.8.7	Áreas urbanas.....	103
6	Fenómenos climáticos futuros en la región de América Central y el Caribe.....	105
7	Elementos para la elección de escenarios base para el clima futuro del país .....	112
8	Bibliografía .....	120

## Cuadros

Cuadro 1.	Emisiones y sumideros en suelo y océanos en los escenarios VCR. ....	61
Cuadro 2.	Probabilidad de niveles de temperatura en el corto y mediano plazo* .....	63
Cuadro 3.	Probabilidad de niveles de temperatura en el largo plazo* .....	65
Cuadro 4.	Cambios esperados en la temperatura media .....	68
Cuadro 5.	Cambio en temperatura global sobre la superficie del mar .....	86
Cuadro 6.	Tabla comparativa de los criterios y resultados de las VCR .....	115

## Gráficos

Gráfico 1. Enfoque en la construcción de escenarios .....	6
Gráfico 2. Emisiones de GEI en escenarios SRES e IS92 .....	26
Gráfico 3. Enfoque en la construcción de escenarios .....	30
Gráfico 4. Forzamiento radiativo en el año 2100 para los escenarios VCR.....	34
Gráfico 5. Cambio en radiación media por año según los escenarios VCR .....	35
Gráfico 6. Escenarios VCR de forzamiento radiativo total al año 2500 .....	36
Gráfico 7. Escenarios SRES y VCR de forzamiento radiativo total.....	36
Gráfico 8. Forzamiento radiativo promedio mundial .....	37
Gráfico 9. Distribución probabilística del forzamiento radiativo .....	38
Gráfico 10. Contribución al forzamiento total por tipo de gas .....	39
Gráfico 11. Concentraciones históricas y proyectadas de GEI según los escenarios VCR.....	40
Gráfico 12. Concentraciones históricas y proyectadas de factores a corto plazo.....	41
Gráfico 13. Forzamiento radiativo y concentraciones equivalentes del CO <sub>2</sub> .....	42
Gráfico 14. Forzamiento radiativo SRES y VCR .....	43
Gráfico 15. Cambios en temperatura y precipitación como un escalamiento a 1°C.....	44
Gráfico 16. Población y PIB subyacentes en las VCR .....	48
Gráfico 17. Uso de la energía en los escenarios VCR.....	49
Gráfico 18. Carbono en la energía e intensidad energética del producto .....	49
Gráfico 19. Escenarios de uso del suelo .....	50
Gráfico 20. Evolución esperada de contaminantes del aire .....	51
Gráfico 21. Emisiones de GEI en los escenarios VCR.....	53
Gráfico 22. Concentraciones de GEI en los escenarios VCR.....	53
Gráfico 23. Emisiones y concentraciones de CO <sub>2</sub> en los escenarios VCR .....	54
Gráfico 24. Fracción global de tierra dedicada a cultivos y pastos .....	55
Gráfico 25. Emisiones del cambio en el uso de la tierra .....	56
Gráfico 26. Emisiones de CO <sub>2</sub> acumuladas por cambio en uso del suelo .....	56
Gráfico 27. Sumidero global de carbono en tierra y océanos.....	57
Gráfico 28. Sumidero global de carbono en tierra y océanos en las VCR .....	58
Gráfico 29. Distribución futura de nitrógeno y sulfuro.....	59
Gráfico 30. Emisiones acumuladas de fuentes fósiles .....	61
Gráfico 31. Proyecciones de las anomalías de la temperatura.....	64
Gráfico 32. Frecuencia proyectada de días cálidos y fríos.....	64
Gráfico 33. Cambios en temperatura media en la superficie .....	65
Gráfico 34. Cambios en la temperatura media anual.....	67
Gráfico 35. Proyección de temperatura en días con temperatura extrema .....	69
Gráfico 36. Frecuencia de días con temperatura extrema .....	70
Gráfico 37. Relación entre el aumento de temperaturas y precipitaciones .....	73
Gráfico 38. Cambio en la precipitación media anual (2081-2100).....	74
Gráfico 39. Cambios en la humectación media global.....	76
Gráfico 40. Cambios en la escorrentía media global .....	77
Gráfico 38. Cambios (%) en máximo de precipitación acumulada en 5 días consecutivos .....	79

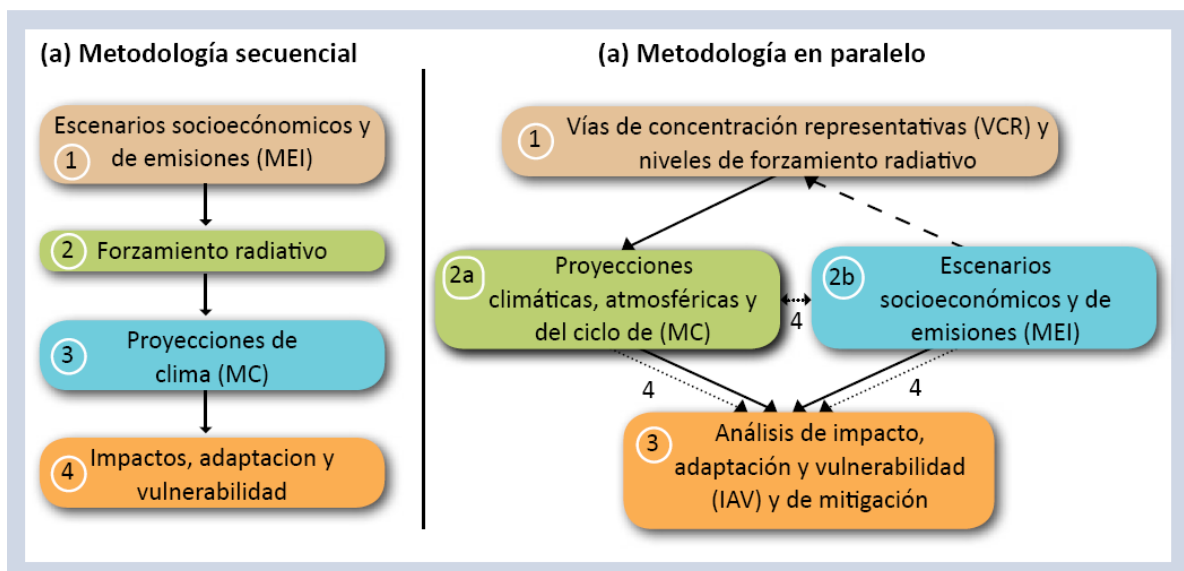
Gráfico 42. Variación (%) del caudal medio anual a 2 °C .....	81
Gráfico 40. Circulación de Hadley .....	82
Gráfico 41. Cambios estacionales en la presión media a nivel del mar .....	84
Gráfico 45. Cambio en la temperatura media global en la superficie del mar .....	85
Gráfico 46. Circulación termohalina .....	85
Gráfico 44. Acidificación global en la superficie oceánica .....	87
Gráfico 45. Cambio en pH en superficie del océano .....	88
Gráfico 46. Cambios de oxígeno en los océanos .....	89
Gráfico 47. Media global de aumento en el nivel del mar .....	89
Gráfico 48. Distribución espacial del cambio en el nivel del mar .....	91
Gráfico 49. Cambios proyectados en la cubierta de hielo en los polos .....	93
Gráfico 50. Extensión del hielo esperado para los polos .....	94
Gráfico 51. Cambios en la cobertura de nieve en zonas de permafrost .....	95
Gráfico 52. Cambios en la frecuencia de inundaciones .....	98
Gráfico 53. Exposición humana a inundaciones .....	98
Gráfico 54. Riesgos de impactos del cambio climático .....	100
Gráfico 55. Proporciones de cobertura de la tierra por tipo de vegetación .....	102
Gráfico 59. Cambio de temperatura en América Central de diciembre a febrero .....	107
Gráfico 60. Cambio de temperatura en el Caribe de diciembre a febrero .....	108
Gráfico 61. Cambio de temperatura en América Central de junio a agosto .....	108
Gráfico 62. Cambio de temperatura en el Caribe de junio a agosto .....	109
Gráfico 63. Cambio en precipitación en América Central de octubre a marzo .....	109
Gráfico 64. Cambio en precipitación en el Caribe de octubre a marzo .....	110
Gráfico 65. Cambio en precipitación en América Central de abril a setiembre .....	110
Gráfico 65. Cambio en precipitación en el Caribe de abril a setiembre .....	111

## 1 Presentación

Las Vías de Concentración Representativas (VCR)<sup>1</sup> son los nuevos tipos de escenarios que describen las trayectorias de concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero (GEI), otros contaminantes atmosféricos y patrones en el uso de la tierra, para evaluación de simulaciones climáticas para proyectar sus consecuencias del cambio climático.

Los escenarios de proyección climática del pasado en los reportes de evaluación del Panel Intergubernamental Panel de Cambio Climático (IPCC), se configuraban a partir de los “impulsores” asociados con el patrón de desarrollo, como lo son los aspectos socioeconómicos, tecnológicos, demográficos, de uso de energía, de estilo de vida, y de uso de la tierra, entre otros, los que se empleaban como factores de partida para determinar las emisiones y concentraciones de GEI (ver gráfico 1).

Gráfico 1. Enfoque en la construcción de escenarios



Fuente: Alvarado, Luis F. (2012), basado en Moss et al., 2008.

Ahora, los escenarios VCR parten de los niveles de forzamiento radiativo, los cuales depende de la concentración de factores de forzamiento como los GEI y otros gases de corta vida. Los escenarios VCR son entonces trayectorias a las que se puede llegar con diferentes esquemas en el patrón de desarrollo. A partir de estos escenarios, los impulsores del desarrollo pueden ser configurados con una amplia gama de posibilidades de acuerdo a los

<sup>1</sup> También son conocidas por su nombre en inglés Representative Concentration Pathways (RCP), y a partir de su nombre en inglés se utiliza la nomenclatura para cada uno de los escenarios estudiados (*RCP 2,6*, *RCP 4,5*, *RCP 6,0* y *RCP 8,5*)

contextos geográficos, socioeconómicos, tecnológicos y ambientales pertinentes para cada caso de estudio.

El forzamiento radiativo afecta el balance energético que define el sistema climático, por lo que es una métrica que se puede modelar para dar seguimiento al efecto que se tiene sobre diversas variables climáticas como la temperatura, el ciclo del agua, los océanos, etc. Estas proyecciones climáticas, a su vez, se utilizan para la evaluación de los impactos del cambio climático y los procesos de adaptación.

Los escenarios VCR representan un amplio rango de emisiones de gases de efecto invernadero que incluye un escenario estricto de políticas climáticas globales (*RCP 2,6*), dos escenarios intermedios (*RCP 4,5* y *RCP 6,0*), y un escenario con las emisiones de gases de efecto invernadero más altas (*RCP 8,5*).

Las VCR tienen la particularidad de que son escenarios globales y regionales a muy alto nivel de resolución, por lo que para la aplicación de sus resultados en la elaboración de los escenarios de clima futuro del país, se requiere de evaluar la pertinencia de cada escenario y sus implicaciones para bajar al nivel de detalles de los efectos esperados a nivel local en riesgos, vulnerabilidad, nivel de exposición, adaptación y mitigación.

Este trabajo busca explorar los fundamentos en la elaboración de los escenarios VCR, para ofrecer criterios de decisión que determinen la pertinencia de algunos de estos escenarios para la configuración del futuro climático del país.

## 2 Resumen ejecutivo

Las Vías de Concentración Representativas es el conjunto de nuevos escenarios de emisiones de GEI para evaluar las consecuencias del cambio climático.

En el pasado, los escenarios de proyección climática se configuraban a partir de los “impulsores” asociados con el patrón de desarrollo, como lo son los aspectos socioeconómicos, tecnológicos, demográficos, de uso de energía, de estilo de vida, y de uso de la tierra, entre otros. Los impulsores se usaban como factores de partida para determinar las emisiones y concentraciones de GEI. Ahora, los escenarios VCR parten de los niveles de forzamiento radiativo, los cuales depende de la concentración de factores de forzamiento como los GEI y otros gases de corta vida.

En el año 2012, el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) presentó el estudio Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica, enmarcado dentro del proyecto *Mejoramiento de las capacidades nacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico al cambio climático en Costa Rica, como mecanismo para disminuir el riesgo al cambio climático y aumentar el índice de desarrollo humano*. Para este proyecto se reconocía la introducción de las VCR, pero no fueron la base para el estudio, sino que se usaron los escenarios basados en los Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés)<sup>2</sup> construidos a partir de escenarios socioeconómicos, A2 y el B2 como casos intermedios de escenarios con altas y bajas emisiones. Como una nueva etapa de escenarios climáticos para el país, esta revisión de las VCR busca explorar sus fundamentos, para ofrecer criterios de decisión que determinen la pertinencia de algunos de estos escenarios para la configuración del futuro climático del país.

En el Quinto Reporte de Evaluación (AR5) del 2013, el IPCC introduce nuevos escenarios de emisiones de GEI para el desarrollo de los escenarios futuros del clima que se conocen como las Vías de Concentración Representativas (VCR), que incluyen un escenario, como se verá, implica una aplicación de políticas de mitigación (*RCP 2,6*), dos escenarios intermedios (*RCP 4,5* y *RCP 6,0*), y un escenario con las emisiones de gases de efecto invernadero más altas (*RCP 8,5*), que como se verá implica ausencia de políticas de mitigación. Las VCR representan un gran avance en el manejo y la comparabilidad de modelos por parte del IPCC y en la disponibilidad de datos e información para la configuración de los escenarios del futuro climático.

---

<sup>2</sup> Conocidos en inglés como Special Report on Emission Scenarios (SRES), (Nakicenovic et al., 2000)



El desarrollo de los escenarios VCR se debió a que el IPCC requería nuevos escenarios con información más detallada para la generación actual de modelos climáticos, especialmente aquellos que buscan la exploración del impacto de las diferentes políticas globales de largo plazo sobre el clima, además de aquellos sin la presencia de políticas globales y que solo registrarían las políticas nacionales climáticas y no climáticas, con algún efecto sobre algunos de los agentes de forzamientos, tal y como se venía haciendo con los SRES. Tales escenarios permitirían evaluar los costos y los beneficios de los objetivos de mitigación a largo plazo y el papel de la adaptación. Estos requerimientos impulsaron al IPCC a solicitar a la comunidad científica el desarrollo de un nuevo conjunto de escenarios para facilitar la futura evaluación del cambio climático, los cuales no se desarrollarán directamente por el IPCC, sino por la comunidad científica de investigación del clima.<sup>3</sup>

Respecto a la nomenclatura de las VCR, la palabra "representativas" significa que cada uno de las VCR representa un conjunto más amplio de escenarios en la literatura científica de las investigaciones sobre el cambio climático. La palabra "vías" implica que no son escenarios finales con proyecciones únicas de aspectos socio-económico y otros impulsores, sino que son consistentes con múltiples escenarios socio-económicos alternativos. La palabra "concentración" hace hincapié que las concentraciones se utilizan como el principal factor de forzamiento.

Las VCR son escenarios de análisis de emisiones y concentraciones de GEI y otros factores de forzamiento con los que se basan los estudios del clima hasta el año 2100, año hasta el cual los modelos que incluyen estos escenarios permiten analizar las trayectorias VCR. Después de ese año, y hasta el 2150, lo que se hace es fijar objetivos de estabilización suave en el forzamiento radiativo, para analizar la respuesta climática ante tales supuestos, extendiendo las proyecciones al 2300.

El forzamiento radiativo (FR), es una medida de cómo algunos factores fuerzan un cambio en el equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente dentro de la atmósfera terrestre, lo cual repercute sobre el clima. Estos factores de forzamiento son de dos tipos: Los gases de invernadero homogéneos, que incluye al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el dióxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>), el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), tres tipos de perfluorocarbonos (PFC), 16 especies de ozono (O<sub>3</sub>) controladas por el Protocolo de Montreal y ocho especies halogenadas. El otro tipo de agentes son los de forzamiento del clima a corto plazo, que vuelva a incluir al metano, al igual que los aerosoles como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxido de mono-nitrógeno (NO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV),

---

<sup>3</sup> Moss et al. (2010)

carbón negro, monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) y especies halogenadas que no se incluyen en el primer grupo.

El forzamiento radiativo en el año 2100 para los escenarios VCR es de 2,6 W/m<sup>2</sup> para el escenario bajo, 4,5 W/m<sup>2</sup> para un escenario medio-bajo, 6,0 W/m<sup>2</sup> para un escenario medio-alto y 8,5 W/m<sup>2</sup> para un escenario alto. Además, hay un escenario denominado *RCP 6,0* a 4,5, que implica que el escenario *RCP 6,0* se ajusta después de 2100 para llegar a converger con *RCP 4,5* en 2250. El escenario *RCP 2,6* también se ha referido como *RCP3PD*, que implica que la trayectoria del forzamiento radiativo de este escenario alcanza un nivel máximo de 3 W/m<sup>2</sup>, a eso de mitad de siglo, seguido de una disminución para converger en los 2,6 W/m<sup>2</sup> al final de siglo. Tanto, el escenario *RCP 4,5* como el *RCP 6,0* se estabilizan desde el 2100, por lo que se conocen como escenarios de estabilización. El *RCP 8,5* se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo hasta el año 2150, a partir de cual se estabilizan. Para analizar la respuesta climática, todos los escenarios VCR extienden las proyecciones al 2300, manteniendo sus niveles de estabilización una vez cada uno lo alcanza.

La sensibilidad del clima en equilibrio, la temperatura media ante una duplicación de la concentración del CO<sub>2</sub>, se encuentra positivo en el AR5, con una alta confianza en el rango de 1,5 °C a 4,5 °C, y poco improbable que se encuentre a menos de 1 °C y o a más de 6 °C. A diferencia del el Cuarto Reporte de Evaluación (AR4), el AR5 no ofrece una mejor estimación de la sensibilidad del clima en equilibrio, ya que no hay acuerdo sobre los valores evaluados en los diversos estudios.

La quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) establece una fase histórica va desde la moderna era industrial hasta el momento en que se inician los experimentos CMIP5, y ese periodo se extiende desde 1850 al 2005<sup>4</sup>. La fase de proyecciones establece como largo plazo simulaciones del clima y proyecciones que alcanzan finales del siglo XXI, con una extensión especial hasta el 2300. Además de estos experimentos a largo plazo, el CMIP5 establece una nueva serie simulaciones de *corto* plazo<sup>5</sup> que se enfocan en las décadas próximas hasta 2035. Un periodo intermedio se extiende un segundo periodo de 30 años, de 2036 al 2065, lo que permite simulaciones que se pueden caracterizar como de mediano plazo. Para las simulaciones de largo plazo, que se enfocan en resultados para el 2100, las proyecciones promedian valores de las últimas dos décadas del siglo, por lo que los resultados hacen referencia a un periodo de largo plazo que va desde 2081 al 2100. Para los escenarios extendidos después del 2100, no se hacen nuevas proyecciones, sino que los análisis se centran en los niveles estabilizados de

---

<sup>4</sup> Van Vuuren et al., 2011

<sup>5</sup> Taylor et al., 2012

concentraciones de factores de forzamiento que para el *RCP 2,6*, el *RCP4.5* y el *RCP 6,0* se han estabilizado ya en el 2100 y el *RCP 8,5* se estabilizan en el 2150.

En los escenarios de impulsores en los estudios base de las VCR, la población crece cerca de una tercera parte entre el 2000 y el 2100 en el *RCP 2,6*, cerca de un 40% para el *RCP4.5*, un 50% para el *RCP 6,0* y se duplica para el *RCP 8,5*. En el *RCP 2,6* hay un moderado crecimiento en el uso de energía y crece cerca del 70% entre el 2000 y el 2100, en el *RCP 4,5* se duplica, mientras que para el *RCP 6,0* es similar en el *RCP 2,6*. Mientras tanto el *RCP 8,5* es un escenario altamente intensivo en uso de energía, que casi se triplica entre el 2000 y el 2100.

Respecto al uso de la tierra, en el *RCP 2,6* las tierras de cultivo aumentan, pero en gran medida como resultado de la producción de bioenergía. El uso de los pastizales es más o menos constante, como resultado al aumento de la producción de productos de origen animal, pero acompañada por mayor intensidad para asegurar mejoras en la cría de animales. Como resultado disminuye la cobertura boscosa. El *RCP 4,5* muestra una política climática global en que la cobertura boscosa se incrementa, mientras que los cultivos y los pastizales disminuyen en el uso del suelo, debido a incrementos en el rendimiento y cambios en los patrones de alimentación. La cobertura boscosa se expande no solo por menor expansión de las pasturas permanentes, sino también los que muestran una contracción de las tierras agrícolas. El *RCP 6,0* muestra un uso cada vez mayor de las tierras de cultivo, pero una disminución en los pastos. Esta disminución se debe a una aplicación mucho más fuerte de mejores técnicas en intensidad de cría animal. La cobertura boscosa se expande por menor expansión de las pasturas permanentes. En el *RCP 8,5* el uso del suelo en cultivo y pastizales aumenta impulsado principalmente por un aumento de la población mundial, disminuye por lo tanto la cobertura boscosa.

Una de las características más consistentes en los nuevos escenarios, es que las temperaturas medias globales continuarán aumentando, aunque a diferentes tasas según el escenario, durante el siglo XXI en todos las VCR, y especialmente a mediados del siglo, este calentamiento global comienza a ser más dependiente de los factores de forzamiento radiativo, particularmente de los gases de efecto invernadero.

En el corto plazo, el incremento en la temperatura media global para el periodo 2016-2035, con relación al periodo de referencia de 1986-2005, estará en el rango de 0,3°C a 0,7°C. Existe alta probabilidad de que la temperatura sobrepase 1°C para el periodo de corto plazo (2016-2035)<sup>6</sup> en todos los escenarios y es prácticamente seguro que suceda para el

---

<sup>6</sup> Ya para finales del año 2016, la agencia británica Met Office Hadley Centre anunció que por primera vez la temperatura media en la superficie terrestre alcanzó 1°C por encima de los niveles preindustriales.  
[http://www.metoffice.gov.uk/news/release/archive/2015/one-degree?utm\\_source=twitterfeed&utm\\_medium=twitter](http://www.metoffice.gov.uk/news/release/archive/2015/one-degree?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter)

mediano plazo (2046-2065). El aumento de la temperatura a 1,5°C es improbable para el periodo 2016-2035, pero es probable para el periodo 2046-2065 en los escenarios *RCP 2,6*, *RCP 4,5* y *RCP 6,0*. Un incremento de 2 °C para el periodo 2046-2065 solo parece probable en el *RCP 8,5*, y es improbable que llegue a 3°C en el corto plazo o mediano plazo.

En el largo plazo (2080-2100), el cambio de la temperatura media global, con relación a 1986-2005, será probablemente de 1°C dentro de un rango de 0,3°C a 1,7°C (*RCP 2,6*), de 1.8°C en *RCP 4,5* y un rango de 1,1°C a 2,6°C. En *RCP 6,0* la media es 2,2°C en un rango 1.4°C a 3.1°C, y para *RCP 8,5* la media es de 3,8°C y un rango de 2.6°C a 4.8°C. Las temperaturas promedio en el período 2081-2100 se proyectan con una confianza alta que las temperaturas aumenten en más de 1,5°C para *RCP 4,5*, *RCP 6,0* y *RCP 8,5* y que pueda superar los 2°C para *RCP 6,0* y *RCP 8,5*. El cambio de temperatura por encima de 2°C bajo *RCP 2,6* es poco probable. El calentamiento medio por encima de 4°C es poco probable en todos las VCR, a excepción de *RCP 8,5*.

Es prácticamente seguro que en la mayoría de lugares habrá más periodos calientes y menos periodos fríos, y aumentos en la frecuencia, duración y magnitud de los extremos cálidos, junto con el estrés por calor. También es muy probable que las olas de calor, se producirán con una mayor frecuencia y duración,

En el corto plazo, es probable que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones intensas aumentarán sobre la zonas terrestres. Estos cambios son impulsados principalmente por los aumentos en el contenido de vapor de agua atmosférico, pero también se ven afectados por los cambios en la circulación atmosférica. Los cambios en la precipitación media en un mundo más cálido exhibirán variación espacial considerable. Algunas regiones experimentarán aumentos en la precipitación, y otras regiones experimentarán descensos y otros aún no experimentarán cambios significativos en absoluto. Hay un alto nivel de confianza que el contraste de precipitación media anual entre las regiones secas y húmedas, y que el contraste entre las estaciones húmedas y secas se incrementará en la mayor parte del mundo a medida que aumentan las temperaturas. El patrón general de cambio indica que las altas latitudes son muy propensas a experimentar mayores cantidades de precipitación debido al aumento de la humedad específica de la troposfera más caliente, así como un aumento del transporte de vapor de agua desde los trópicos hacia el final de este siglo. Muchas regiones de latitudes medias y subtropicales áridas y semiáridas probablemente experimentarán menos precipitación y muchas regiones húmedas de latitudes medias probablemente experimentarán más precipitaciones a finales de este siglo. Respecto a eventos en la precipitación de corta duración a nivel mundial, es probable que a medida que aumentan las temperaturas haya un cambio con más tormentas intensas individuales y un menor número de tormentas débiles. Se prevé disminuciones en la

humedad del suelo en ciertas regiones del planeta y aumento en el riesgo de sequía agrícola en las regiones secas.

Es muy probable un aumento en el corto plazo en el promedio mundial de la temperatura de la superficie y la temperatura medida verticalmente en el océano. Es muy probable que para el periodo 2016-2035, la temperatura media global en la superficie y en la profundidad del mar seán más cálidas respecto al periodo 1986-2005. Las proyecciones de aumento en la temperatura superficial del mar, la salinidad y el contenido de calor del océano es relativamente insensible a la trayectoria de las emisiones de GEI durante las próximas dos décadas, sin embargo, los resultados proyectados cambian conforme el siglo avanza. En el transcurso del siglo, los océanos del mundo se calentarán en todos los escenarios y las diferencias en los cambios de temperatura del océano proyectados para las diferentes VCR se manifiestan más notablemente a medida que avanza el siglo XXI. La acidificación del océano en la superficie del océano seguirá con la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya que también aumentará en las profundidades del océano en forma del CO<sub>2</sub> que sigue penetrando los océanos. Todos los escenarios VCR son consistentemente en todo el mundo con el aumento de la acidificación del océano hacia 2100. El nivel del mar en términos regionales va a cambiar debido a los cambios en la circulación oceánica, los cambios en el contenido de calor del océano, la redistribución de masas en todo el sistema del planeta y los cambios en la presión atmosférica. Es muy probable que más del 95% de los océanos van a experimentar el aumento del nivel relativo del mar regional, mientras que la mayoría de las regiones que experimentan una caída del nivel del mar se encuentran cerca de los glaciares y las capas de hielo.

Es muy probable que la cubierta de hielo marino en el Ártico continuará la contracción y el adelgazamiento en el curso del siglo XXI, conforme se eleva la temperatura media global. Al mismo tiempo, en la Antártida se espera una disminución de la extensión y volumen del hielo marino, pero en una menor magnitud. Es muy probable que la capa de nieve en el hemisferio norte se reducirá según aumenta la temperatura global durante el siglo. Una reducción del permafrost es muy probable con el aumento de la temperatura global. Los cambios proyectados en el permafrost son una respuesta no sólo al calentamiento, sino también a los cambios en la cubierta de nieve, que ejerce un control sobre el suelo subyacente, y se proyecta que a finales del siglo XXI, la disminución del permafrost esté entre un 37% para *RCP 2,6* al 81% para *RCP 8,5*.

Las VCR en general, muestran una tendencia a la disminución de las emisiones de contaminantes del aire. Las tendencias de las emisiones de contaminantes del aire están determinados por tres factores: el cambio de la tecnología de automotores, la política de control de la contaminación del aire, y la política climática. Todos las VCR incluyen la

suposición de que el control de la contaminación del aire se vuelve más estricto con el tiempo, como resultado del aumento de los niveles de ingresos. A nivel mundial, esto causaría menores emisiones, aunque las tendencias pueden ser diferentes para regiones específicas o en periodos particulares. Un segundo factor que influye en los resultados es la política climática más estricta para el *RCP 2,6*, caso contrario a la ausencia de política climática global en el *RCP 8,5*.

En el caso del *RCP 2,6* las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de contaminantes del aire se reducen sustancialmente con el tiempo mediante estrictas políticas globales de cambio climático, de reducción de emisiones y adaptación. Asimismo, como en los SRES<sup>7</sup>, no se descartan políticas locales de cambio climático que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI. Se suma la presencia de políticas locales energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación. En el caso del *RCP 4,5*, se trata de un escenario con la aplicación de políticas de cambio climático globales, aunque menos estrictas que el *RCP 2,6*, que no se descarta políticas locales de cambio climático y políticas locales energéticas y ambientales. En el *RCP 6,0* hay ausencia de políticas climáticas globales, pero hay influencia de políticas locales climáticas, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático. El *RCP 8,5* se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo debido a la ausencia de políticas climáticas globales. Sin embargo, pese a la existencia de políticas locales climáticas locales, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, estas políticas locales no se perciben con gran influencia en las proyecciones, ya que la expansión de las emisiones que el *RCP 8.5* involucra, tiene mayor influencia en las proyecciones globales.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> muestran altos niveles en el escenario *RCP 8,5* en correspondencia con la ausencia de políticas climáticas globales. La mayoría de las políticas no climáticas, se manifiestan en el escenario *RCP 6,0*, en el cual también hay ausencia de políticas climáticas globales, pero las políticas no climáticas de índole local producen la tendencia de reducción de emisiones hacia finales del siglo. El escenario *RCP 4,5* muestra influencia de políticas climáticas con escenarios de bajas emisiones. El *RCP 2,6* representa el rango de escenarios con emisiones más bajas, lo que implica políticas climáticas severas para limitar las emisiones. Las tendencias de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O son en gran parte debido a las diferencias en la política climática asumidas, junto con las diferencias en los supuestos de los escenarios. Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O muestran una tendencia de rápido crecimiento en el *RCP 8,5*, sin política climática y alta población. Para *RCP 6,0* y *RCP 4,5*, las emisiones de CH<sub>4</sub> son más estables a lo largo del siglo, mientras que para *RCP 2,6* las emisiones se

---

<sup>7</sup> Leggett et al. (1992).

reducen notablemente. Para el N<sub>2</sub>O los escenarios VCR muestran un comportamiento similar, aunque aquí las emisiones para *RCP 4,5* permanecen estables mientras que para *RCP 6,0* aumentan con el tiempo. Este comportamiento se debe a que la actividad agrícola crecerá a un ritmo modesto.

Las concentraciones de gases de efecto invernadero en las VCR tienen grandes coincidencias con las tendencias de las emisiones. Para el CO<sub>2</sub> el escenario *RCP 8,5* sigue concentraciones en rápido aumento, mientras *RCP 6,0* y *RCP 4,5* muestran una estabilización de las concentraciones. El *RCP 2,6* tiene un máximo en las concentraciones a eso del 2050, seguido por una disminución modesta de alrededor de 400 partes por millón (ppm) de CO<sub>2</sub>, a finales de siglo. Para CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O las concentraciones en los VCR siguen los efectos de la política climática.

La elección de una u otra VCR para la construcción de escenarios para el país es una decisión difícil, debido a que cada uno de estos escenarios busca simplemente ser una referencia, sin que uno u otro se descarte de antemano, ya que su aplicabilidad depende de supuestos sobre múltiples variables futuras sobre las cuales siempre existe un nivel de incertidumbre. Es por ello que el análisis del IPCC en el AR5 no busca favorecer los resultados de alguno de los escenarios en particular, sino que hace un análisis que hace referencia a uno y a otro escenario, reconociéndose que al final su aplicabilidad está ligado a la necesidad de considerar o no la presencia de políticas climáticas globales<sup>8</sup> que se sumen a las políticas no climáticas locales que todos los escenarios pueden incluir, como las de calidad del aire.

Dada la fuerte discusión en la comunidad mundial sobre el problema climático y las fuertes negociaciones que se llevan a cabo especialmente en el contexto de las Contribuciones Previstas Nacionalmente Determinadas (Intended Nationally Determined Contributions, INDC<sup>9</sup>), parece que descartar la presencia de políticas climáticas globales en el futuro, sería una conjetura muy fuerte de asumir. Es por esto que el uso de un escenario como el *RCP 8,5*, en el cual se descarta la presencia de políticas climáticas globales, sumado a que las políticas locales tienen poca influencia, posiblemente no sería lo recomendable.

Este trabajo busca explorar los fundamentos en la elaboración de los escenarios VCR, para determinar la pertinencia de algunos de estos escenarios para la configuración del futuro climático del país. Dada la fuerte discusión global sobre el problema climático, parece que descartar la presencia de políticas climáticas y no climáticas para este siglo, sería una conjetura muy fuerte de asumir. Es por esto que el uso del escenario *RCP 6,0* puede

---

<sup>8</sup> Van Vuuren et al (2011)

<sup>9</sup> Cuyo acuerdo base se logró en la Conferencias de las Partes (COP) en París 2015, en la Convención Marco de Cambios Climático de Naciones Unidas.

permitir la inclusión de los efectos de las políticas no climáticas, y mantener ausencia de políticas climáticas, en el entendido que no se logren acuerdos globales y sólo aplicaciones regionales. Un contraste importante podría ser la comparación con un escenario en donde el planeta alcanza acuerdos más exigentes sobre las políticas climáticas y no climáticas, y este escenario lo presenta el *RCP 2,6*. Por este motivo, el análisis de los escenarios alternativos posiblemente sea más recomendable entre el *RCP 2,6* y *RCP 6,0*.



### 3 Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica

En el año 2012, el Instituto Meteorológico Nacional presentó el estudio Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica, enmarcado dentro del proyecto *Mejoramiento de las capacidades nacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico al cambio climático en Costa Rica, como mecanismo para disminuir el riesgo al cambio climático y aumentar el índice de desarrollo humano*<sup>10</sup>.

El objetivo de dicho estudio fue proporcionar los escenarios climáticos futuros a baja resolución espacial por medio de modelos dinámicos (globales y regionales) con el fin de aplicarlos al estudio de impactos a nivel de las comunidades, de manera de evaluar la vulnerabilidad al cambio climático, las debilidades ante las amenazas, y asegurar el uso óptimo de los recursos disponibles bajo medidas de adaptación, con el fin de obtener ventajas de los impactos positivos y minimizar los impactos negativos.

Este trabajo se enfocó en producir proyecciones climáticas a escalas de espacio y tiempo más pequeñas, lo cuales no se logran en los escenarios basados en modelos de circulación global (MCG), que tienen mayor aplicación en las proyecciones planetarias por su alta resolución espacial. Se tenía como premisa de que “si bien el cambio climático es un problema global, los impactos son un problema local”<sup>11</sup>, por lo que para la representación de clima en menores escalas de espacio y tiempo, el trabajo recurre a los modelos climáticos regionales (MCR), ya que los escenarios de cambio climático de los modelos globales no pueden aplicarse efectivamente para evaluar impactos a escala regional.

El estudio recurre a técnicas de reducción de escala para modelos de circulación general, que combinan un modelo climático regional. “El modelo global simula la respuesta de los forzamientos de gran escala de la circulación global, mientras que el MCR se encarga de los procesos que ocurren a una resolución espacial menor que la del MCG”<sup>12</sup>. Con estas técnicas el estudio realizó una reducción de la resolución desde 300 km en los MCG, a 50 km y hasta 1 km en los MCR utilizados a partir de la aplicación de una metodología del delta y una línea base de alta resolución.

Para el estudio Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica se reconocía que con el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Fifth Assessment Report, AR5), el desarrollo de los escenarios climáticos iba a cambiar con la introducción de las VCR. No obstante, las VCR no fueron la base para el estudio, sino que se usaron los escenarios SRES

---

<sup>10</sup> Alvarado, Luis F. (2012)

<sup>11</sup> Alvarado, Luis F. (2012)

<sup>12</sup> Alvarado, Luis F. (2012)

construidos a partir de escenarios socioeconómicos, y que se usaron para estimar las emisiones y las proyecciones de cambio climático del Tercer Informe de Evaluación del IPCC (Third Assessment Report, TAR).

Los escenarios SRES seleccionados fueron el A2 y el B2 como casos intermedios de escenarios con altas y bajas emisiones. Los modelos climáticos que se utilizaron fueron uno regional (Providing Regional Climates for Impacts Studie, (PRECIS) y cuatro de enfoque global: UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1, CGCM3.1 (T47) y CSIRO-Mk3.0, los cuales pertenecen al grupo de modelos que se utilizaron en el TAR y fueron seleccionados por la disponibilidad de datos para los escenarios de emisiones, la representatividad del clima observado, su rango de incertidumbre y una sensibilidad climática muy similar al “best estimate” del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (AR4), que se estima en 3°C y en un rango de 2°C a 4,5°C de aumento en temperatura ante una duplicación del CO<sub>2</sub> respecto a los niveles pre-industriales.

Para la generación de los escenarios de cambio climático, el estudio se basa en la combinación del Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change (MAGICC) y la base de datos de los modelos globales del IPCC Scenario Generator (SCENGEN). “Los datos proporcionados por MAGGIC-SCENGEN son anomalías o cambios absolutos de la temperatura media (°C) y los cambios de la precipitación (mm/día) con respecto a la climatología de datos observados”<sup>13</sup>.

El estudio de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados presentó una segunda fuente de datos del Programa en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS), lo que permitió obtener los datos absolutos de temperaturas extremas.

Respecto al clima de referencia o baseline, se utilizó una climatología simulada por medio del modelo PRECIS para 1961-1990 y climatologías de hasta 1 km de resolución obtenidas de observaciones para el periodo 1950-2000. El clima de control de la lluvia anual fue comparado con la climatología de la base de datos CMAP del período 1981-2000. En cuanto a la temperatura media, se comparó la simulación del clima actual provenientes de los modelos globales y la correspondiente a los datos reales de la base de datos ERA-40 del período 1980-1999.

Como una nueva etapa de escenarios climáticos para el país, esta revisión de las VCR busca explorar sus fundamentos, para ofrecer criterios de decisión que determinen la pertinencia de algunos de estos escenarios para la configuración del futuro climático del país.

---

<sup>13</sup> Alvarado, Luis F. (2012)

## 4 Las Vías de Concentración Representativas

### 4.1 Los informes previos de evaluación del IPCC

Para poner en contexto los resultados de los escenarios VCR, a continuación se revisarán las principales conclusiones de los cuatro reportes previos que el IPCC publicó antes del Quinto Reporte de Evaluación, el cual es el que incluye los escenarios VCR.

El Primer Reporte de Evaluación (First Assessment Report, FAR)<sup>14</sup> data de 1990, y desde entonces el IPCC estableció que hay un efecto invernadero natural que provoca un calentamiento del planeta, sin embargo, las emisiones resultantes de las actividades humanas han venido aumentando sustancialmente las concentraciones atmosféricas de los GEI, tales como el dióxido de carbono, metano, clorofluorocarbonos y el óxido nitroso. El IPCC confirmó que estos GEI amplían el efecto invernadero, lo que resulta en un calentamiento adicional del planeta, y de mantenerse las emisiones de estos gases a las tasas mostradas, las concentraciones de GEI en la atmósfera van a comprometer la situación de la Tierra en los siglos venideros. En el FAR ya se encontró que desde finales del siglo XXI, la temperatura media del aire superficial del planeta había aumentado entre 0,3 °C a 0,6 °C, mientras que el nivel del mar mundial se había incrementado en un 10 a 20 cm.

En el FAR se sientan algunos conceptos que explican la responsabilidad de las actividades antrópicas sobre el calentamiento del clima, ya que el IPCC reconoce que el mismo varía de forma natural en todas las escalas de tiempo, sea anualmente o de cientos o de millones de años, por lo que el planeta ha enfrentado ciclos glaciares con variaciones en 5°C a 7°C a través de estos ciclos, y con grandes cambios en el volumen del hielo y del nivel del mar, e incluso algunas latitudes han experimentado cambios de temperatura tan grandes como 10°C a 15°C. Pero desde la última era glacial, de hace unos 10.000 años, las temperaturas superficiales globales han fluctuado sólo alrededor de 1°C.

La magnitud del calentamiento global desde que inició la era industrial es consistente con el incremento de GEI de las actividades humanas, incluso aunque se reconozca el efecto de la variabilidad natural.

Con base en el FAR, el IPCC estableció unos escenarios base de las emisiones de gases de efecto invernadero futuras, con una tasa de aumento de la temperatura media global durante el siglo XXI de aproximadamente 0,3°C por década, lo que mostraba una alteración del clima superior a lo observado en los últimos 10.000 años.

---

<sup>14</sup> IPCC (1990)

[https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_first\\_assessment\\_1990\\_wg1.shtml](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_first_assessment_1990_wg1.shtml)

En el Segundo Reporte de Evaluación (Second Assessment Report, SAR)<sup>15</sup>, que se publicó en 1996, el IPCC confirma que las concentraciones de gases de efecto invernadero han seguido en aumento, con tendencias atribuibles principalmente a las actividades humanas, en las que destaca el uso de combustibles fósiles y el uso del suelo y agricultura. En este reporte se destaca el rol de los aerosoles antropogénicos que tienden a producir un forzamiento radiativo negativo, con lo que su contribución neta es más bien un enfriamiento relativo del planeta. Este reporte encuentra que el aumento en el nivel del mar es entre 10 y 25 cm en 100 años, es especialmente debido al aumento de la temperatura media global. Además, que las simulaciones con modelos acoplados océano-atmósfera proporcionan información importante acerca del clima, que en su balance, evidencia la influencia humana.

El Tercer Reporte de Evaluación (TAR)<sup>16</sup> del año 2001, permitió constatar que las emisiones de GEI y aerosoles de origen humano seguían aumentando y alterando la atmósfera, con efectos sobre el clima, con mayor evidencia de su efecto directo, aunque con mucha incertidumbre en cuanto a su magnitud, con poco forzamiento radiativo de los factores naturales durante el siglo pasado. Esta mayor evidencia ofrece una visión más global de un mundo en calentamiento y otros cambios en el sistema climático. Se reitera que desde 1861 y durante el siglo XX el aumento de la temperatura fue de 0,6 ° C, mientras que el nivel del mar aumentó en el mismo periodo entre 1,1 a 0,2 metros. Nuevos análisis de datos indicaron que el aumento de la temperatura en el siglo XX es probable que haya sido el más grande de todos los siglos en los últimos 1.000 años.

En el Cuarto Reporte de Evaluación (Fourth Assessment Report, AR4)<sup>17</sup> del año 2007, el IPCC señala que las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso habían aumentado notablemente como resultado de las actividades humanas desde 1750 y, actualmente, exceden los valores preindustriales que habían sido determinados a partir de núcleos de hielo que revelaban el clima durante varios miles de años. Los incrementos globales en la concentración de dióxido de carbono se debían principalmente al uso de combustibles fósiles y el cambio del uso del suelo, mientras que las de metano y óxido nitroso provenían principalmente de la agricultura. Aquí se introduce que el efecto neto global de las actividades humanas desde 1750 ha sido una de calentamiento originado por un forzamiento radiativo de 1,6 W/m<sup>2</sup>.

El planteamiento directo en el AR4 es que “el calentamiento climático es inequívoco”, y lo evidencia el aumento observado del promedio de las temperaturas globales del aire y los océanos, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo, y el aumento del nivel medio

---

<sup>15</sup> IPCC (1995) [https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg\\_i/ipcc\\_sar\\_wg\\_i\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_i/ipcc_sar_wg_i_full_report.pdf)

<sup>16</sup> IPCC (2001) <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/>

<sup>17</sup> IPCC (2007) [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml)

del mar. Entre la década de los noventa del siglo pasado y la primera década de este siglo, se han presentado los últimos doce años más cálidos desde 1850, con una tendencia en el calentamiento del planeta que se manifiesta creciente con el paso de las décadas, lo mismo que pasa con la tasa de aumento del nivel del mar. La información paleo-climática apoyó el hallazgo de que el calor de la última mitad del siglo pasado tuvo un crecimiento que ha sido inusual en al menos los últimos 1.300 años.

La mayor parte del aumento observado en las temperaturas medias mundiales desde mediados del siglo XX, se debe especialmente al aumento observado en las concentraciones de GEI antropogénicos, con efecto de esta influencia humana que se manifiesta en otros aspectos del clima, como los efectos de eventos extremos en los patrones de precipitación y sequía, patrones de viento, y derretimiento del hielo cerca de los polos en ambos hemisferios.

Otro planteamiento directo en el AR4 es que el calentamiento antropogénico y el aumento del nivel del mar continuaría por siglos, incluso luego que las concentraciones de GEI se estabilicen, el patrón de afectación del clima persistirá mayor tiempo.

#### 4.2 El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC

En el Quinto Reporte de Evaluación (AR5)<sup>18</sup> del 2013, el IPCC introduce nuevos escenarios de emisiones de GEI que se conocen como las Vías de Concentración Representativas (VCR), los cuales serán revisados en profundidad en este análisis.

Para una mejor comprensión de los escenarios VCR, se revisará brevemente el tipo de escenarios precursores a las VCR, los cuales se incluían en los reportes anteriores del IPCC. Estos tipos de escenarios previos presentaban algunas limitaciones que motivaron el desarrollo de las VCR a partir del AR5.

“El objetivo principal del desarrollo de la VCR fue proporcionar información sobre las posibles trayectorias de desarrollo de los principales agentes de forzamiento del cambio climático, en consonancia con la literatura actual escenario que permitió el análisis posterior por ambos: modelos climáticos y los modelos de evaluación integrada (Integrated Assessment Models, IAM). Los modeladores del clima utilizarán las series temporales de las concentraciones futuras y las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes del aire y el cambio del uso del suelo a partir de las cuatro VCR con el fin de

---

<sup>18</sup> IPCC (2013)

llevar a cabo nuevos experimentos en los modelos climáticos y producir nuevos escenarios climáticos como parte de una fase paralela”<sup>19</sup>.

La introducción de las VCR representa un gran avance en el manejo y la comparabilidad de modelos por parte del IPCC y en la generación de datos e información para configurar los escenarios del futuro climático. No obstante, es necesario entender que las VCR siguen asociados a las mismas fuentes de incertidumbre de los escenarios del pasado, ya que las trayectorias esperadas acerca de las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, no son predicciones, lo que significa que no hay un único escenario probable con el cual alimentar de datos e información a los modelos climáticos. Los posibles climas del futuro se pueden derivar de escenarios alternativos de emisiones de GEI y otros factores de forzamiento radiativo, los cuales a su vez, se derivan por una variedad de factores socioeconómicos que se proyectan para el futuro. “En este sentido, un escenario de cambio climático se puede definir como una posible representación del clima futuro bajo una determinada concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera. Por lo tanto, la diversidad de los posibles escenarios de cambio climático nace como consecuencia de la incertidumbre de cómo evolucionaría nuestra sociedad en el futuro”<sup>20</sup>.

Los escenarios VCR son posibles escenarios de emisiones y concentraciones de factores de forzamiento que permiten alimentar modelos de análisis del cambio climático, y este proceso de análisis está sujeto a tres fuentes de incertidumbre: la primera fuente está asociada a la variabilidad interna natural, que pone límites fundamentales en la precisión con la que se pueden proyectar las variables climáticas futuras y que incluye fenómenos como la variabilidad en las trayectorias de las tormentas de latitudes medias y el fenómeno del Niño y la Niña (El Niño-Oscilación del Sur, ENOS), entre otras. La segunda fuente de incertidumbre es con relación a la forma de cómo se modelan y especifican las emisiones y concentraciones de los agentes que originan el forzamiento del sistema climático y el producto de la interacción de agentes naturales y antropogénicas, tales como gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles, erupciones volcánicas, forzamiento solar y el cambio en uso del suelo. La tercera fuente de incertidumbre es la relacionada con la respuesta del sistema climático a estos agentes de forzamiento.

Los desafíos que surgen en la estimación de la variabilidad natural se relacionan con las escalas de tiempo a las que se realicen las proyecciones, ya que en periodos de corto plazo como las estaciones, años o decenas, la variabilidad interna natural puede tener mayor peso que la concentración de factores de forzamiento radiativo, y algunos eventos extremos

---

<sup>19</sup> Moss et al. (2010)

<sup>20</sup> Alvarado, Luis F. (2012)

poco comunes no se pueden modelar adecuadamente, ya que no cuentan con número suficiente de registros como para proporcionar estimaciones robustas.

Respecto al pasado del forzamiento del sistema climático, existe gran incertidumbre, debido a la falta de observaciones directas durante un periodo de tiempo suficientemente prolongado, lo que influye en las proyecciones futuras de algunas variables. A esto se suma la incertidumbre sobre los factores que inciden en este forzamiento, como las futuras emisiones antropogénicas y cambio esperado en el uso de la tierra, así como los forzamientos naturales originados en la actividad de volcanes y de los ciclos del sol. Se suma además la incertidumbre acerca de la relación del ciclo del carbono y otros agentes biogeoquímicos con el clima, por lo que para proyectar la respuesta climática a los agentes de forzamiento se enfrentan las limitaciones de los modelos climáticos para representar el sistema climático real y su relación con las concentraciones de gases y el forzamiento radiativo, junto con otros procesos que intervienen y se retroalimentan con el clima, lo que origina los llamados efectos de propagación.

Los escenarios VCR no están exentos, por lo tanto, de estas fuentes de incertidumbre. La variabilidad interna afecta las proyecciones a escalas regionales y a escalas temporales de más corto plazo. Existe el reto de modelar el futuro asociado al forzamiento antropogénico proveniente de GEI y de los aerosoles. Además, la consideración de diversos procesos climáticos que deben incluir los efectos de propagación enfrenta la limitación de la insuficiencia de observaciones para variables globales, pero en especial para variables de alcance regional y algunos fenómenos extremos de corto plazo.

#### 4.3 Los escenarios previos a las VCR

Las evaluaciones desarrolladas por el IPCC han venido evolucionando, aunque siempre constituyendo un proceso de obtención de modelos de análisis sobre el futuro del clima basados sobre una serie de hipótesis alternativas sobre cómo el futuro puede llevarse a cabo. Antes del AR5 la generación de escenarios se basó en los Informes Especiales del IPCC sobre escenarios de emisiones (SRES)<sup>21</sup>, los cuales fueron introducidos por el IPCC en 1996, como un nuevo conjunto de escenarios de emisiones para reemplazar los escenarios IS92 que anteriormente se utilizaban<sup>22</sup>.

Los SRES partían que las proyecciones del cambio climático a largo plazo requerían supuestos sobre las actividades humanas o los efectos naturales que podrían alterar el clima lo largo de décadas y siglos. De esta manera los SRES se construían para proyectar las

---

<sup>21</sup> Como se indicó con anterioridad se utilizan las siglas por su nombre en inglés.

<sup>22</sup> Leggett et al. (1992).

emisiones futuras provenientes de la actividad humana con base en factores demográficos, socioeconómicos, tecnológicos, el uso de la tierra en agricultura y silvicultura, y factores de índole política que definen el desarrollo de la sociedad y la forma en que se usan los factores originarios de las emisiones antropogénicas.

Los escenarios SRES son ampliamente utilizados en los reportes anteriores del IPCC, especialmente en el AR4, en los cuales no se incluían las políticas climáticas globales como iniciativas de mitigación con la aplicación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) o los objetivos de emisiones del Protocolo de Kioto. Sin embargo, incluye aquellas políticas locales de cambio climático y de otra índole ambiental, como las de calidad del aire y las que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI, como el cambio demográfico, el desarrollo social y económico, el cambio tecnológico, el uso de recursos y gestión de la contaminación<sup>23</sup>.

Los escenarios SRES usaban un enfoque secuencial, que implicaba que comenzaban con la proyección de los factores demográficos, socioeconómicos y tecnológicos, los cuales son incorporados en escenarios de emisiones de GEI. Los escenarios de emisiones por su parte, son utilizados en los modelos climáticos, sean simples para determinar esencialmente las concentraciones de gases de efecto invernadero y otros agentes de forzamiento o modelos de circulación general más complejos que permiten analizar múltiples interacciones climáticas, como los Modelos de Circulación de Atmósfera-Océano (MCGAO).<sup>24</sup>

Estos escenarios podían ser construidos a partir de supuestos simples idealizados sobre algunos componentes proyectados, por ejemplo un crecimiento de 1% anual de las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico o una duplicación o cuadruplicación en el 2100 de las concentraciones iniciales de GEI del siglo XX, lo cual sólo busca la comprensión del proceso de afectación que se puede esperar del clima. Alternativamente, los escenarios se pueden construir a través de escenarios completos producidos por los modelos de evaluación integrada, en donde las proyecciones son resultado de la relación compleja de factores que integran un modelo climático.

Para la generación de los escenarios SRES en AR4 se siguieron cuatro líneas evolutivas de las emisiones futuras que configuraron cuatro familias con 40 sub-escenarios en total. Estas

---

<sup>23</sup> Leggett et al. (1992).

<sup>24</sup> Alvarado, Luis F. (2012)



familias agrupaban los sub-escenarios que tenían una línea evolutiva común. Estas cuatro familias se conocieron como escenarios A1, A2, B1 y B2, los que se explican a continuación<sup>25</sup>:

- A1: describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido, con una población mundial que alcanza su máximo a mediados de siglo y disminuye posteriormente, así como con una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se da una convergencia en desarrollo entre las regiones, la creación de capacidades y el aumento de las interacciones culturales y sociales que permite la reducción de las diferencias regionales en el ingreso per cápita. Dentro de este grupo de escenarios destaca el subgrupo de escenarios A1B, que describe una alternativa del cambio tecnológico en el sistema energético en donde se marcha a un equilibrio en el uso de fuentes fósiles y fuentes renovables de energía, debido a una continua mejora tecnológica. Otro subgrupo es el A1F1, que se basa en una trayectoria intensiva en combustibles fósiles, mientras que el escenario A1T, es intensivo en tecnologías renovables.
- A2: describe un mundo muy heterogéneo. El tema de fondo es la autosuficiencia y la preservación de las identidades locales. Los patrones de desarrollo entre las regiones convergen muy lentamente, lo que se acompaña con un aumento continuo de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional con lo que reproduce algunas diferencias entre regiones y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están más igualmente fragmentados entre regiones.
- B1: describe un mundo convergente con la misma población mundial, que aumenta hacia mediados de siglo y disminuye posteriormente, al igual que en A1. Sin embargo, los cambios rápidos en las estructuras económicas son hacia una economía de servicios e información, con reducciones en la intensidad de materiales en los productos de consumo y la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso recursos. El énfasis está puesto en soluciones globales a la sostenibilidad económica, social y ambiental, incluyendo la mejora de la equidad, pero sin iniciativas climáticas adicionales.
- B2: describe un mundo basado en soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo con población que aumenta progresivamente, a un ritmo menor que en A2, con niveles medios de desarrollo económico, y menor y más diverso cambio tecnológico que en el A1 y B1. Este escenario está orientado hacia la

---

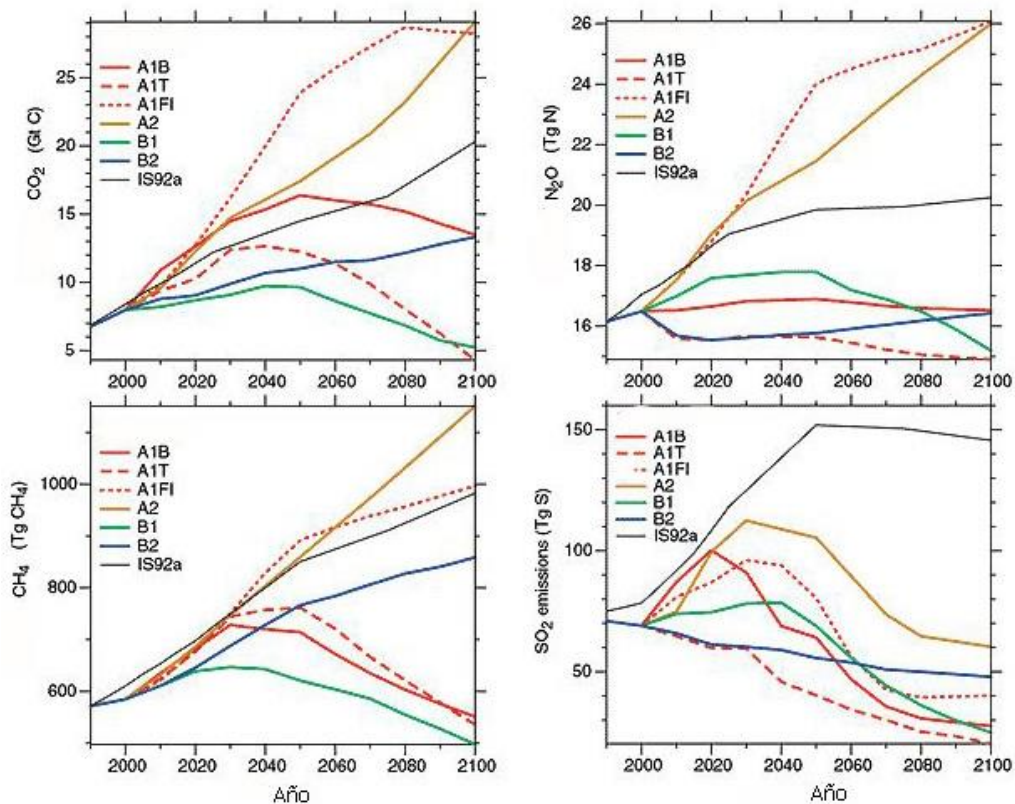
<sup>25</sup> IPCC (2007)

[https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_synthesis\\_report.htm](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm)

protección del medio ambiente y la equidad social, pero centrados en enfoques locales y regionales.

En el gráfico 2 se muestran las trayectorias para el 2100 de acuerdo a los anteriores escenarios basados en IS92 e SRES del dióxido de carbono, el óxido de nitrógeno y el metano, como principales gases de efecto invernadero, así como el dióxido de azufre como principal aerosol. Destaca la trayectorias decrecientes hacia al final del siglo XXI en los escenarios A1B, A1F y B2.

Gráfico 2. Emisiones de GEI en escenarios SRES e IS92



Fuente: (IPCC, 2013).

#### 4.4 El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados

El análisis del conjunto de escenarios, tanto para los que fue el AR4 como para el reciente AR5, se realiza bajo un estándar en el marco del Proyecto de Intercomparación de Modelos

Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) del Programa Mundial de Investigaciones Climática<sup>26</sup>.

Las proyecciones del cambio climático incluidas en el anterior reporte AR4 incorporan los resultados del CMIP3, y se basaron principalmente en los SRES (A2, A1B y B1). Sin embargo, estos modelos presentaban una diversidad de esquemas del ciclo del carbono, las concentraciones de GEI y de los aerosoles, incluso para un mismo conjunto de escenarios, por lo que se hacía necesario una estandarización de estos criterios.

El IPCC requería nuevos escenarios con información más detallada sobre el funcionamiento de la actual generación de modelos climáticos, que buscan la exploración del impacto de las diferentes políticas sobre el clima, además de los escenarios sin la presencia de dichas políticas, tal y como se venía haciendo con los SRES. Tales escenarios permitirían evaluar los costos y los beneficios de los objetivos climáticos a largo plazo y el papel de la adaptación. Estos requerimientos impulsaron al IPCC a solicitar a la comunidad científica el desarrollo de un nuevo conjunto de escenarios para facilitar la futura evaluación del cambio climático, los cuales no se desarrollarán directamente por el IPCC, sino por la comunidad científica de investigación del clima.<sup>27</sup>

Como resultado, el desarrollo de escenarios climáticos para el AR5 se hizo bajo el proyecto CMIP5, a partir de las concentraciones de forzamiento radiativo proporcionadas por las Vías de Concentración Representativas, las cuales permiten mayor comparabilidad de los Modelos de Circulación de Atmósfera-Océano (AOGCM) que parten de las concentraciones de GEI, con modelos de sistema tierra (Earth System Models, ESM) que parten más bien de las emisiones de GEI.

El desarrollo de los escenarios VCR se realizó en tres fases<sup>28</sup>:

- 1) Desarrollo de un conjunto de escenarios a partir de las emisiones y las concentraciones de GEI y otros contaminantes relevantes, así como las trayectorias del uso del suelo, los cuales definen las trayectorias de forzamiento radiativo que definen las VCR.
- 2) El desarrollo paralelo de escenarios de los impulsores socioeconómicos, demográficos y tecnológicos consistentes con las VCR.
- 3) Una integración de las VCR y los escenarios de los impulsores.

---

<sup>26</sup> <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>

<sup>27</sup> Moss et al. (2010)

<sup>28</sup> Moss et al. (2010)

El objetivo principal de la primera fase de desarrollo de las VCR es proporcionar información sobre las posibles trayectorias de desarrollo de los principales agentes de forzamiento del cambio climático, para generar series temporales de las emisiones y concentraciones futuras de gases de efecto invernadero, de contaminantes del aire y el cambio del uso del suelo, que permitan el análisis por modelos climáticos y por los modelos de evaluación integrada del clima, con el fin de llevar a cabo nuevos experimentos con el modelo climático y producir paralelamente nuevos escenarios climáticos regionales y de impulsores, con una gama de diferentes futuros tecnológicos, socio-económicas y políticas que podrían conducir a una vía de determinada concentración.

Respecto a la nomenclatura de los escenarios VCR, la palabra "representativas" significa que cada uno de las VCR representa un conjunto más amplio de escenarios en la literatura científica de las investigaciones sobre el cambio climático, con los cuales debe ser compatible, se aplique o no política climática.

La palabra "vías" implica que las VCR no son escenarios finales con proyecciones únicas de los aspectos socio-económicos y otros impulsores, sino que son conjuntos consistentes de múltiples escenarios socio-económicos que se desarrollen en fases posteriores.

El uso de la palabra "concentración" hace hincapié que las concentraciones se utilizan como el principal factor de forzamiento en las VCR, y los modelos climáticos pueden calcular los niveles de emisión asociados.

Cada una de las VCR proporciona una descripción consistente del futuro, en términos de emisiones y concentraciones, por lo que fueron construidas después de procesos consultivos con la comunidad científica y revisión de escenarios extremos e intermedios publicados en literatura científica existente, desarrollados de forma independiente por diferentes grupos de investigación, asegurando la trazabilidad científica del proceso.

Cada escenario VCR proporciona información geográficamente explícita sobre todos los componentes de forzamiento radiativo que son necesarios como entrada para los modelos del clima y la química atmosférica procedente de emisiones de gases de efecto invernadero, contaminantes del aire y uso de la tierra.

Para esto los escenarios VCR han armonizado los supuestos del año de referencia para las emisiones y el uso del suelo, y la transición entre los análisis de períodos históricos y futuros. Cada VCR cubren un período de tiempo hasta 2100, pero la versión extendida permite experimentos del clima siglos después hasta el 2300.

Esta representatividad de los VCR busca facilitar la aplicación de modelos climáticos que son relevantes para la formulación de políticas y la evaluación científica, y es un requisito solicitado por el IPCC sobre el desarrollo de nuevos escenarios<sup>29</sup>.

De la revisión de la literatura científica, la conclusión es que el conjunto de escenarios convergen al año 2100 con forzamiento radiativo que oscila desde un mínimo de 2,5 W/m<sup>2</sup> a un valor entre 8 y 9 W/m<sup>2</sup>.<sup>30</sup> Este rango corresponde a una distribución normal con un intervalo de confianza de 5% a 95%. Las VCR debían entonces estar en este rango y estar cada uno lo suficientemente separados, alrededor 2 W/m<sup>2</sup>, uno del otro, de manera de proporcionar resultados climáticos distinguibles<sup>31</sup>. El resultado fue que cuatro escenarios fueron seleccionados como representativos de la literatura<sup>32</sup>. Los cuatro escenarios fueron armonizados para utilizar emisiones con año base común. Se integró información del uso de la tierra, con datos igualmente armonizados con los datos de las VCR y una reducción de escala a una cuadrícula de 0,5 × 0,5 grados<sup>33</sup>.

En el caso de los contaminantes del aire, como los aerosoles y precursores del ozono troposférico, los datos de emisión en los escenarios VCR fueron armonizados y sometidos a una reducción de escala similar (una cuadrícula de 0,5 × 0,5 grados). Los GEI responden a una resolución geográfica global. Además, los datos de emisión fueron convertidos a datos de concentración, utilizando un modelo seleccionado de ciclo simple de carbono climático para los gases de efecto invernadero homogéneos y un modelo de la química atmosférica de sustancias reactivas de corta duración<sup>34</sup>.

#### 4.5 Los escenarios VCR resultantes

Las Vías de Concentración Representativas son entonces el conjunto de escenarios que se introducen bajo el CMIP5, el cual permite la estandarización para la generación de escenarios de emisiones y concentraciones de GEI, aerosoles, gases de corta vida y cambios en el uso del suelo, las cuales se traducen en proyecciones de forzamiento radiativo para un horizonte fijado en el año 2100.

En lugar de ser desarrollados como los SRES, a partir de escenarios basados en impulsores socioeconómicos, demográficos, tecnológicos y de uso de la tierra, los escenarios VCR son

---

<sup>29</sup> IPCC (2007)

<sup>30</sup> Fisher et al (2007) y Van Vuuren et al (2011)

<sup>31</sup> Moss et al., (2008)

<sup>32</sup> Van Vuuren et al (2011)

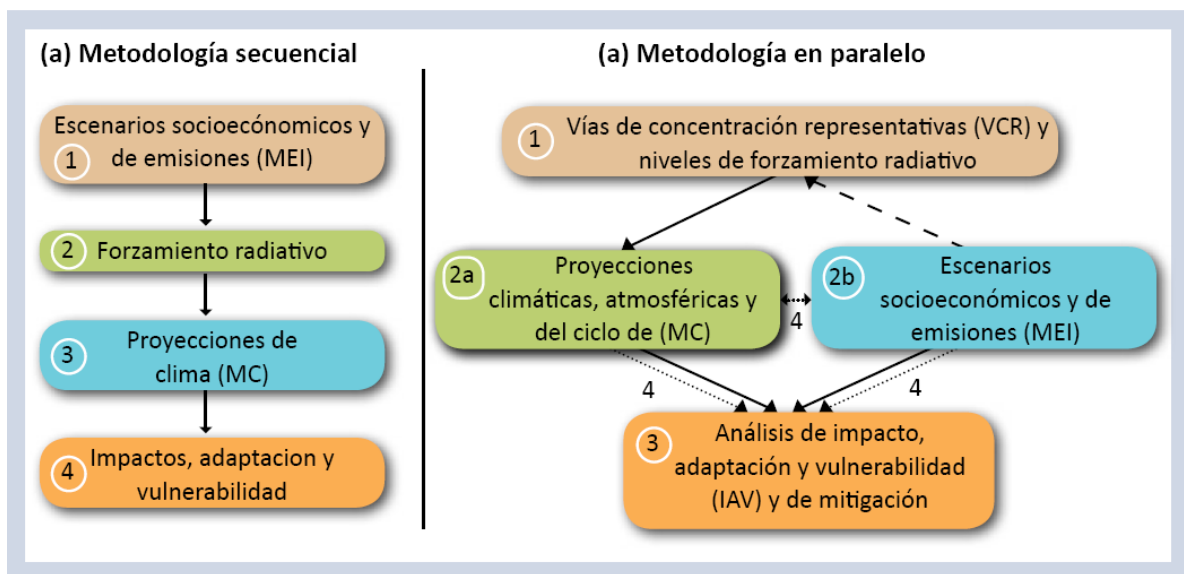
<sup>33</sup> Una cuadrícula con una resolución de aproximadamente 60 kilómetros.

<sup>34</sup> Van Vuuren et al (2011)

consistentes con muchos posibles escenarios futuros de estos impulsores, permitiendo diferentes combinaciones de los resultados en emisiones y concentraciones de GEI, pero cualquier escenario socioeconómico se agrupa finalmente en alguna VCR, con base en la condición de forzamiento radiativo que dicho escenario socioeconómicos conlleva. De allí que estos nuevos escenarios se denominen vías o trayectorias de concentración representativas, pues lejos de tratar de ser escenarios definitivos, son un conjuntos de proyecciones que pueden ser consistentes con muchos escenarios socioeconómicos, demográficos y tecnológicos alternativos.

En el gráfico 3 se muestra cómo el desarrollo de los escenarios SRES había sido de manera secuencial, pues a partir de los escenarios socioeconómicos, se construían los de emisiones para elaborar las proyecciones del cambio climático. La creación de las vías de concentración representativas, no parten de los escenarios socioeconómicos, sino de concentraciones definidas en los cuatro escenarios VCR. Dentro de las VCR, los escenarios socioeconómicos son una construcción paralela a los modelos de predicción del clima y análisis del cambio climático, que en su conjunto permiten la evaluación de los impactos, y los efectos de las políticas de adaptación y de mitigación<sup>35</sup>.

Gráfico 3. Enfoque en la construcción de escenarios



Fuente: Alvarado, Luis F. (2012), basado en Moss et al. (2008).

Las VCR reciben su nombre de acuerdo al nivel de forzamiento radiativo objetivo para el 2100 para cada escenario, tal y como se verá en la siguiente sección, cuyas estimaciones se

<sup>35</sup> Alvarado, Luis F. (2012)

basan en el forzamiento de los gases de efecto invernadero y otros agentes de forzamiento. Los escenarios son producto de la integración del conjunto de modelos que tienen en común el forzamiento radiativo de cada escenario VCR<sup>36</sup>.

Los escenarios VCR son producto de cuatro Modelos de Evaluación Integrados (Integrated Assessment Models, IAM):

- El *RCP 2,6* se basó en el Integrated Model to Assess the Global Environment (IMAGE) desarrollado por el equipo de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos y que integra 32 modelos. La trayectoria de este escenario es bajas emisiones y muy bajos niveles de concentraciones. El forzamiento radiativo alcanza primero un valor de alrededor de 3,0 W/m<sup>2</sup> a mediados de siglo, y vuelve a 2,6 W/m<sup>2</sup> para el año 2100. Para alcanzar tales niveles de forzamiento radiativo, las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de contaminantes del aire se reducen sustancialmente con el tiempo<sup>37</sup>.
- El *RCP 4,5* fue desarrollado por el equipo del Global Change Assessment Model (GCAM) del Global Change Research Institute en conjunto con el Pacific Northwest National Laboratory (JGCRI) en los Estados Unidos, que integró 42 modelos. Es un escenario de estabilización en la que radiativo total se estabiliza forzamiento poco después de 2100, alcanzando para entonces la radiación a largo plazo<sup>38</sup>.
- El *RCP 6,0* fue desarrollado por el equipo del AIM en el Instituto Nacional de Estudios Ambientales (ERI) en Japón, que integró 25 modelos. Es un escenario de estabilización en la que radiativo total se estabiliza forzamiento poco después de 2100, por la aplicación de una serie de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero<sup>39</sup>.
- Por último, el *RCP 8,5* fue desarrollado utilizando el Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE) y el Marco de Evaluación del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) de Austria, proceso que integró 39 modelos<sup>40</sup>. El *RCP 8,5* se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo.

---

<sup>36</sup> En la sección anterior se reseñan los criterios de diseño y proceso de análisis de expertos alrededor del IPCC para el desarrollo de las VCR (IPCC, 2007), un total de cuatro niveles de forzamiento VCR de radiación fueron elegidos (Moss et al., 2008)

<sup>37</sup> Van Vuuren et al. (2006), Vvan Vuuren et al. (2007)

<sup>38</sup> Smith and Wigley (2006), Wise et al. (2009)

<sup>39</sup> Fujino et al. (2006), Hijioka et al. (2008)

<sup>40</sup> Riahi et al. (2007)



Como se había indicado, las VCR son escenarios de emisiones y concentraciones de factores de forzamiento que permiten el análisis de modelos del clima hasta el año 2100, hasta cuando los modelos permiten analizar las trayectorias VCR. Después de ese año, lo que se hace es mantener los niveles de estabilización en el forzamiento radiativo (para el RCP 8,5 se alcanza hasta el 2150), para analizar la respuesta climática ante tales condiciones, extendiendo las proyecciones de los escenarios al 2300.

Dado a que son múltiples los factores que contribuyen con el cambio climático, su modelación a partir de un solo factor es un reto, ya que no se pueden dejar de lado los otros importantes factores determinantes del clima. Así es como la adopción del forzamiento radiativo, debido a que guarda una relación lineal con la temperatura, es la base común de los modelos que conforman los escenarios VCR, ya que facilita la base de estimación del potencial de respuesta del clima a cambios en el flujo de los factores determinantes de las condiciones del clima. Además, es una métrica en la cual puede expresarse cualquier modelo que busque simular la relación de las concentraciones de GEI y el clima.

Para el seguimiento de las emisiones de GEI y otros contaminantes se consideran 12 sectores: el transporte aéreo, envío internacional, otros medios de transporte terrestre, plantas de energía eléctrica, transformación y distribución de energía; disolventes; manejo de residuos, procesos y combustión de industria, edificios residenciales y comerciales, la quema de residuos agrícolas, y cambio de uso del suelo en agricultura y bosques.

Para las emisiones se usa como año base el año 2000, para lo cual se aplicó el proceso de armonización y de resolución para todos las VCR, referido anteriormente.

#### 4.6 El forzamiento radiativo

De acuerdo al IPCC, “el forzamiento radiativo es una medida de cómo el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra se comporta cuando se alteran los factores que afectan el clima. La palabra radiativo proviene del hecho de que estos factores cambian el equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente dentro de la atmósfera terrestre. El equilibrio radiativo controla la temperatura de la superficie terrestre. El término forzamiento se utiliza para indicar que el equilibrio radiativo de la Tierra está siendo separado de su estado normal”<sup>41</sup>. El forzamiento radiativo “se cuantifica por lo general como la tasa de cambio de energía por área de unidad del planeta medida en la parte superior de la atmósfera” se mide en watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) durante un periodo

---

<sup>41</sup> [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html)



de tiempo y las VCR incluyen cuatro escenarios a partir de proyecciones de forzamiento radiativo a los que estos escenarios convergen para el 2100.

El forzamiento radiativo es debido a los cambios en la concentración atmosférica de los factores de forzamiento<sup>42</sup>. Los agentes de forzamiento son de dos tipos: Los gases de invernadero homogéneos, que incluye al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el dióxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el metano  $\text{CH}_4$ , el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), tres tipos de perfluorocarbonos (PFC), 16 especies de ozono controladas por el Protocolo de Montreal y ocho especies halogenadas. El otro tipo de agentes son los de forzamiento del clima a corto plazo, que vuelve a incluir al metano, al igual que los aerosoles como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxido de mononitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), Compuestos orgánicos volátiles (COV), carbón negro, monóxido de carbono (CO) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y especies halogenadas que no se incluyen en el primer grupo<sup>43</sup>. Las perturbaciones naturales o de origen humano en el sistema climático producen el forzamiento radiativo, el que a su vez produce un desequilibrio en el balance global de la energía en la parte superior de la atmósfera, afectando la temperatura media global y otros elementos del clima.

El forzamiento radiativo en el año 2100 para los escenarios VCR es de  $2,6 \text{ W/m}^2$  para el escenario bajo,  $4,5 \text{ W/m}^2$  para un escenario medio-bajo,  $6,0 \text{ W/m}^2$  para un escenario medio-alto y  $8,5 \text{ W/m}^2$  para un escenario alto.<sup>44</sup> Además, hay un escenario denominado RCP6.0 a 4.5, que implica que el escenario *RCP 6,0* se ajusta después de 2100 para llegar a converger con *RCP 4,5* en 2250. El escenario *RCP 2,6* también se ha referido como RCP3PD<sup>45</sup>, que implica que la trayectoria del forzamiento radiativo de este escenario alcanza un nivel máximo de  $3 \text{ W/m}^2$ , a eso de mitad de siglo, seguido de una disminución para converger en los  $2,6 \text{ W/m}^2$  al final de siglo (ver gráfico 4). Tanto, el escenario *RCP 4,5* como el *RCP 6,0* se estabilizan desde el 2100, por lo que se conocen como escenarios de estabilización. El *RCP 8,5* se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo hasta el año 2150, a partir de cual se estabilizan.

---

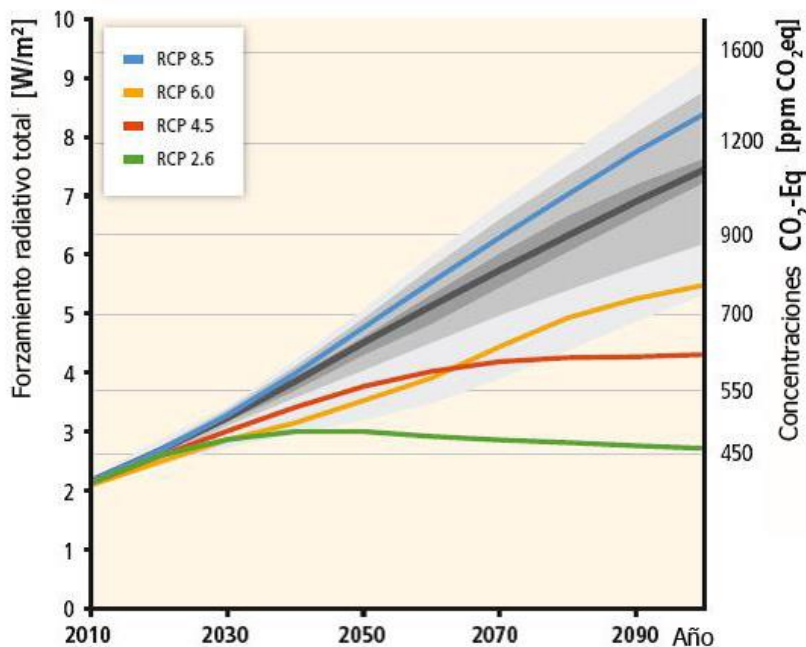
<sup>42</sup> Se utilizaron dos métodos para armonizar los datos sobre las concentraciones con el fin de proporcionar un conjunto completo de datos necesarios para las simulaciones de modelos climáticos. (Hibbard et al., 2007)

<sup>43</sup> Van Vuuren et al (2011)

<sup>44</sup> Fujino et al, 2006; Riahi et al, 2007; Van Vuuren et al, 2007; Hijikata et al, 2008; Wise et al, 2009; Masui et al, 2011; Riahi et al, 2011; Thomson et al, 2011, y Van Vuuren et al, 2011

<sup>45</sup> PD = Pico-Disminución

Gráfico 4. Forzamiento radiativo en el año 2100 para los escenarios VCR



Fuente: IPCC (2013)

Los escenarios *RCP 2,6* y *RCP 8,5* son los extremos definidos por el IPCC después de la revisión de los diversos estudios que sirvieron de base dentro del CMIP5<sup>46</sup>. Asimismo, el *RCP 4,5* y *RCP 6,0* son producto de la elección de escenarios medios que son equidistantes a los extremos.

Respecto a la existencia ausencia de políticas<sup>47</sup>, el escenario *RCP 2,6* supone estrictas políticas globales de cambio climático, de reducción de emisiones y adaptación. Asimismo, como en los SRES<sup>48</sup>, no se descartan políticas locales de cambio climático que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI. Se suma la presencia de políticas locales energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación. En el caso del *RCP 4,5*, se trata de un escenario con la aplicación de políticas de cambio climático globales, aunque menos estrictas que el *RCP 2,6*, que no se descarta políticas locales de cambio climático y políticas locales energéticas y ambientales. En el *RCP 6,0* hay ausencia de políticas climáticas globales, pero hay influencia de políticas locales climáticas, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático. El *RCP 8,5* se

<sup>46</sup> Como se mencionó, este rango corresponde a una distribución normal con un intervalo de confianza de 5% a 95% de los modelos estudiados.

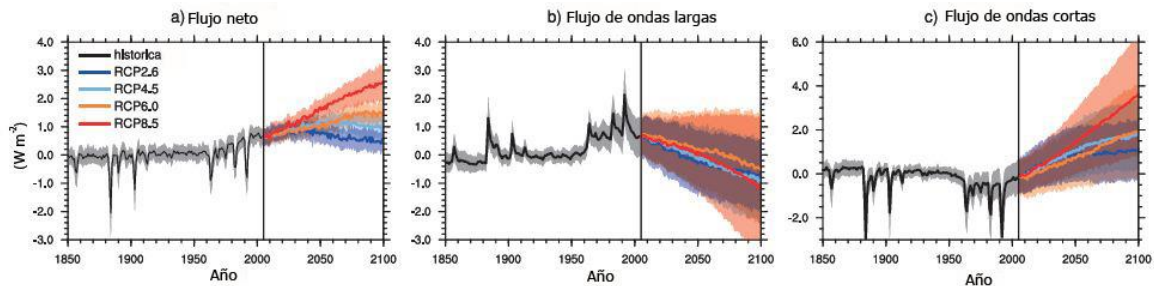
<sup>47</sup> Van Vuuren et al (2011)

<sup>48</sup> Leggett et al. (1992).

caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo debido a la ausencia de políticas climáticas globales. Sin embargo, pese a la existencia de políticas locales climáticas locales, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, estas políticas locales no se perciben con gran influencia en las proyecciones, ya que la expansión de las emisiones que el *RCP 8.5* involucra, tiene mayor influencia en las proyecciones globales.

La evolución futura del desequilibrio energético difiere dependiendo de cada uno de estos escenarios VCR. En el gráfico 5 se ve el flujo en la radiación asociada a cada escenario. El primer gráfico muestra el cambio neto promedio del flujo de energía a la atmósfera por año, y se ve que este promedio tiene una tendencia positiva para *RCP 8,5* y *RCP 6,0*, mientras que para *RCP 4,5* y *RCP 2,6* la tendencia es negativa. El segundo gráfico muestra la radiación emitida de onda larga por la superficie y la atmósfera hacia el espacio. Y el tercer gráfico muestra radiación de onda corta absorbida por la Tierra.

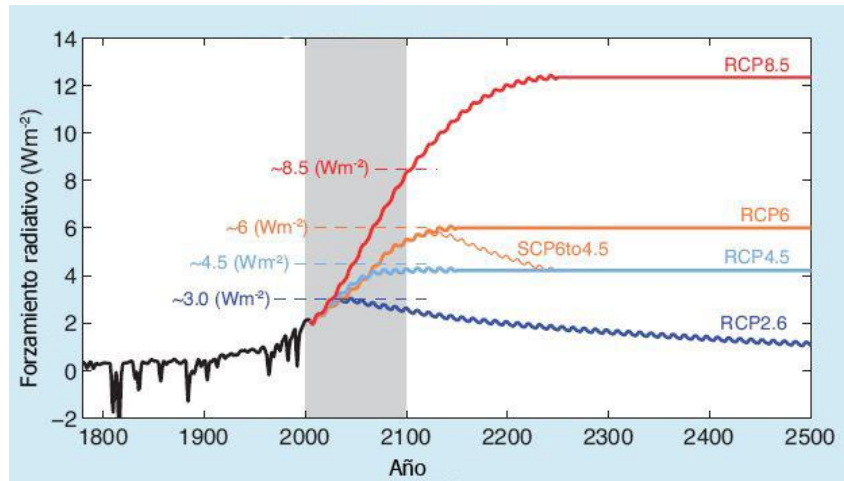
Gráfico 5. Cambio en radiación media por año según los escenarios VCR



Fuente: (IPCC, 2013).

En cuanto a la radiación total a partir de las emisiones antrópicas y las naturales, el gráfico 6 muestra las proyecciones para cada escenario VCR. La línea negra inicial representa el forzamiento radiativo desde la época preindustrial fijada en 1800 y las proyecciones se extienden hasta el año 2500. Como se ve, el año 2100 se usa como horizonte para definir la nomenclatura de cada escenario, y después de ese año hay una tendencia suave hasta el 2150 para alcanzar los objetivos de estabilización en el forzamiento radiativo que anteriormente se explicó. También se puede observar el quinto escenario denominado RCP6 a 4.5, y cómo plantea una convergencia entre estos dos escenarios intermedios.

Gráfico 6. Escenarios VCR de forzamiento radiativo total al año 2500

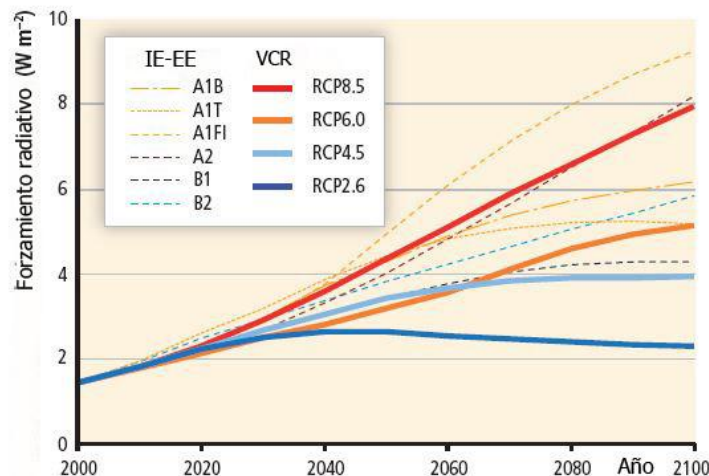


Fuente: (IPCC, 2013).

En el gráfico 7 se presentan las trayectorias de forzamiento radiativo nuevamente para los escenarios VCR, pero ahora comparándolos con los escenarios de los anteriores reportes SRES del IPCC. La comparación es desde 1950, como referencia de la época pre-industrial, y la línea negro continua muestra la evolución de la fuerza radiativa antropogénica.

Las líneas discontinuas proyectadas al 2100 representan los escenarios previos al AR5, mientras que las líneas continuas proyectadas representan los escenarios VCR. Para los escenarios VCR la nomenclatura utilizada es *RCP 2,6*, *RCP 4.5*, *RCP 6.0* y *RCP 8,5*, lo que señala su nombre en inglés (Representative Concentration Pathways) y el nivel de forzamiento radiativo (en Watts por m<sup>2</sup>) al que converge en el año 2100.

Gráfico 7. Escenarios SRES y VCR de forzamiento radiativo total

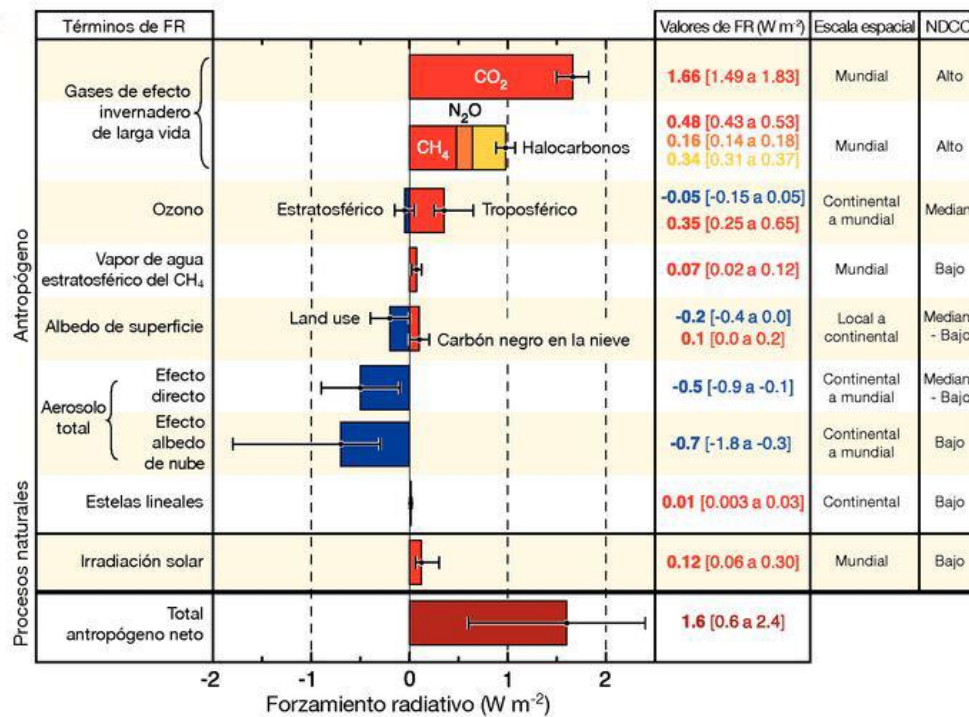


Fuente: (IPCC, 2013).

Los escenarios VCR muestran un rango desde el RCP 2,6 al RCP 8,5, dentro de los cuales se encuentran las proyecciones de los escenarios anteriores al AR5, excepto el escenario A1F1 que implicaba un futuro tecnológico intensivo en el uso de combustibles fósiles, y que por lo tanto se tendría un forzamiento radiativo antropogénico mayor. Los escenarios RCP 6,0 y RCP 8,5 confirman la tendencia observada desde la era pre-industrial de aumento en el forzamiento radiativo.

El forzamiento radiativo antropogénico desde la era pre-industrial ha aumentado a 1,6 W/m<sup>2</sup> (ver gráfico 8). Los gases de efecto invernadero de larga vida presentan un aumento en el forzamiento radiativo de 2,63 W/m<sup>2</sup>, lo cual es contrarrestado por los efectos de forzamiento radiativo negativo de los aerosoles y el cambio neto en el uso de la tierra<sup>49</sup>.

Gráfico 8. Forzamiento radiativo promedio mundial

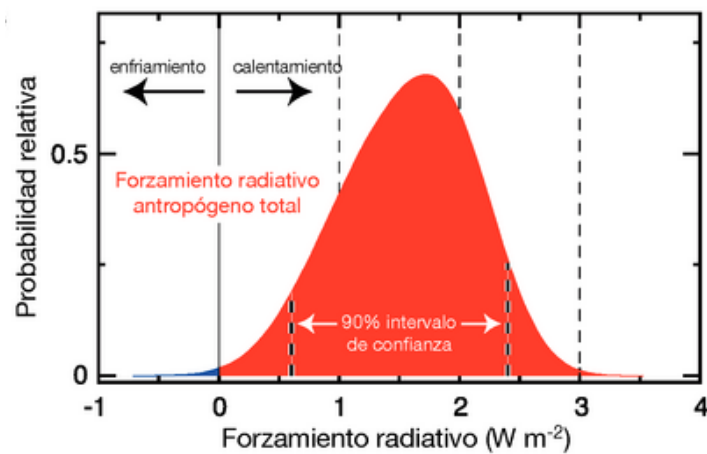


Fuente: (IPCC, 2013).

En el gráfico 9 se muestra una de las constantes en los escenarios del AR5, y es que se trabaja con una distribución con 90% de confianza, con lo que el forzamiento antropogénico se estima con un valor central de 1,6 W/m<sup>2</sup> antes mencionado y entre un intervalo que va de 0,6 W/m<sup>2</sup> a 2,4 W/m<sup>2</sup>.

<sup>49</sup> IPCC (2013)

Gráfico 9. Distribución probabilística del forzamiento radiativo



Fuente: (IPCC, 2013).

#### 4.6.1 El papel de los gases de efecto invernadero

Como se indicó anteriormente, los agentes de forzamiento son los gases de efecto invernadero bien mezclados como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el dióxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el metano  $\text{CH}_4$ , el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ) y otras especies halogenadas, así como los agentes de forzamiento del clima a corto plazo como el metano, los aerosoles y otras especies halogenadas que no se incluyen anteriormente.

En el gráfico 10 se muestra el nivel de contribución en el forzamiento de cada agente y para cada escenario VCR. El  $\text{CO}_2$  representa en todos los escenarios más del 80% de la contribución total y se espera que tanto el metano, el óxido nitroso y el ozono disminuyan su contribución histórica.

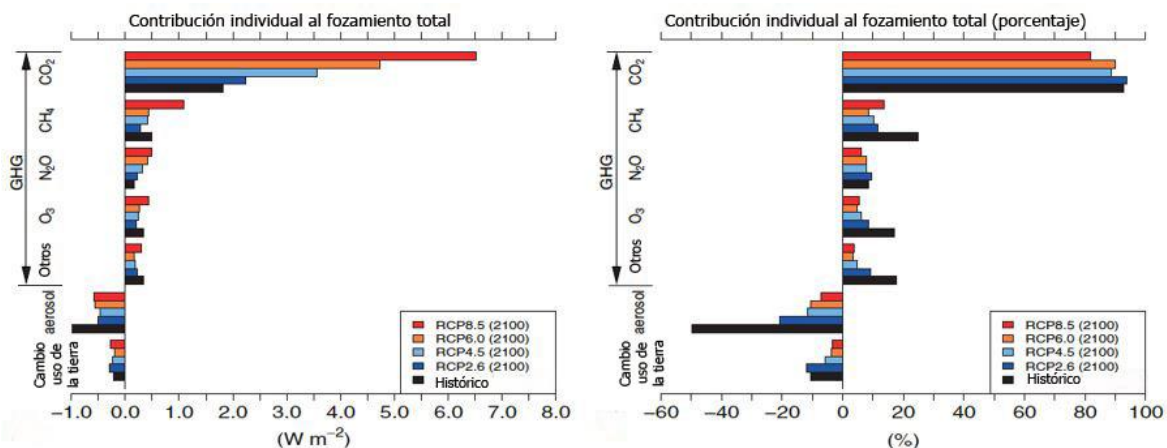
El forzamiento radiativo es producto de la concentración de estos agentes, los cuales han venido aumentando históricamente. El  $\text{CO}_2$  troposférico ha aumentado de una media de 278 ppm en 1750 a 390.5 ppm en 2011<sup>50</sup>, así el forzamiento radiativo del  $\text{CO}_2$  en este periodo es de 1.82  $\text{W}/\text{m}^2$ . Por su parte, la media global de concentraciones de  $\text{CH}_4$  han aumentado de 722 partes por mil millones (ppmm) en 1750 a 1803 ppmm para el año 2011 y su forzamiento radiativo es de 0,48  $\text{W}/\text{m}^2$ . Las concentraciones de óxido nitroso han aumentado de 270 ppmm en 1750 a 324.2 ppmm en 2011, con un forzamiento de 0,17  $\text{W}/\text{m}^2$ . Por último, basado en una combinación de modelos de aerosol globales, el AR5

<sup>50</sup> Para el año 2015, las concentraciones del  $\text{CO}_2$  troposférico incluso alcanzaron 399 ppm <http://resumen.cl/2016/05/lejos-disminuir-las-emisiones-mundiales-co2-siguen-acelerandose/>



estima forzamiento radiativo de la interacción de los aerosoles es -0,35 entre 1750 y el 2011<sup>51</sup>.

Gráfico 10. Contribución al forzamiento total por tipo de gas



Fuente: (IPCC, 2013).

Las proyecciones de concentración de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y aerosoles como el clorofluorocarbono CFC12 se muestran en el gráfico 11, para un periodo que va desde 1800 al 2300. Para el CO<sub>2</sub> y el N<sub>2</sub>O la tendencia es muy similar a la que se vio en la trayectoria del forzamiento radiativo. En el caso del metano esa tendencia no se encuentra así de lineal y sus concentraciones a partir del 2100 comienzan a declinar<sup>52</sup>.

El ozono estratosférico ha experimentado una reducción significativa desde la década de 1960 debido a compuestos halogenados que contienen bromo y cloro, lo que lleva a una disminución global estimada del ozono estratosférico del 5% entre los años 1970 y mediados de la década de 1990. La mayor parte de la pérdida de ozono se asocia con el bromo de larga duración y compuestos que contienen cloro, como los clorofluorocarbonos (CFC) y sus sustitutos, liberados por las actividades humanas, además de N<sub>2</sub>O. Con el advenimiento del Protocolo de Montreal, las emisiones de clorofluorocarbonos y su sustitución ha disminuido fuertemente, y ya se han producido signos de estabilización de ozono e incluso de recuperación<sup>53</sup>.

La tendencia esperada para los aerosoles se considera decreciente desde la actualidad, debido a las políticas en favor de la calidad del aire, por lo tanto, si bien los aerosoles tienen una gran contribución negativa al forzamiento total, esta contribución disminuye tanto en

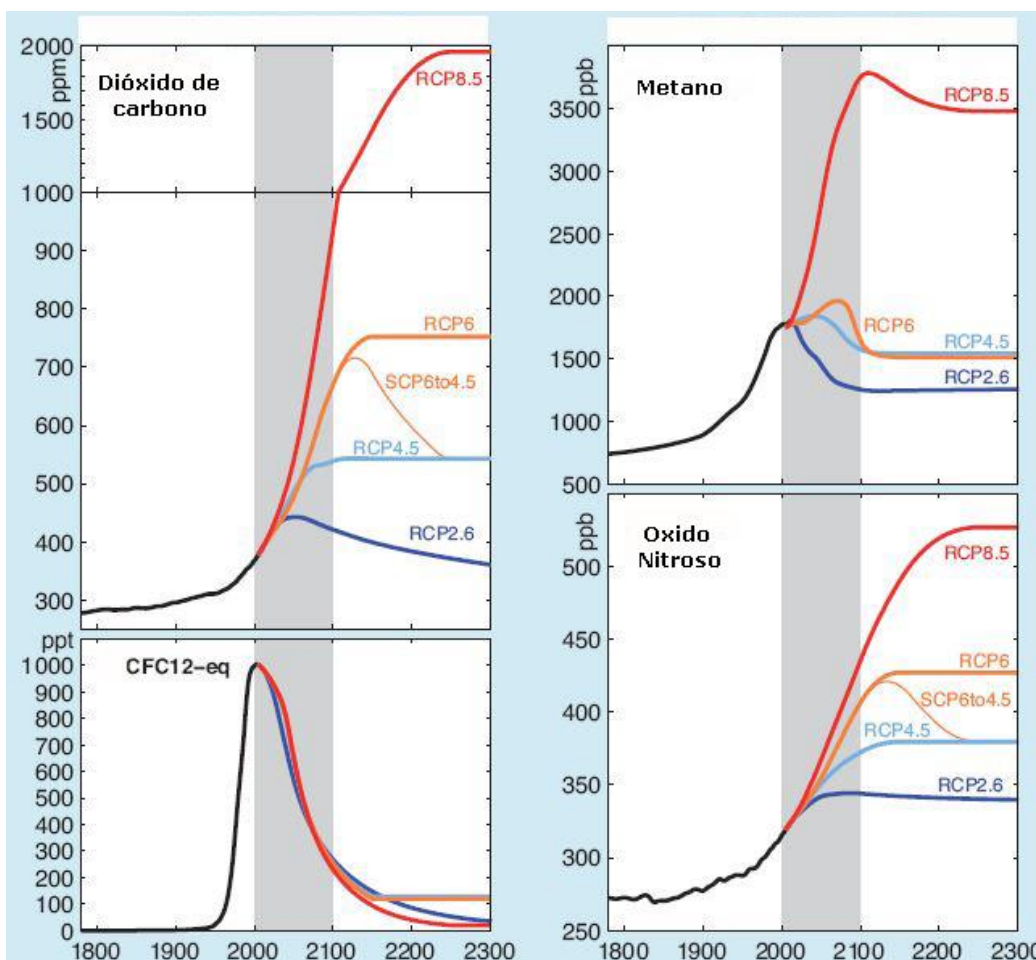
<sup>51</sup> IPCC (2013)

<sup>52</sup> En la sección 4.7.1.2 contiene mayor detalle del comportamiento de las concentraciones de estos para cada escenario.

<sup>53</sup> Solomon, Susan (1999).

términos absolutos como relativos en el futuro para todos los escenarios de las VCR. Esto significa que mientras que los aerosoles antropogénicos han tenido un efecto de enfriamiento en el pasado, se espera que su descenso en todos los escenarios VCR en relación con los niveles actuales, tenga un efecto de calentamiento neto en el futuro.

Gráfico 11. Concentraciones históricas y proyectadas de GEI según los escenarios VCR



Fuente: (IPCC, 2013).

Un aspecto que se considera en las VCR es que si se llevan a cabo políticas de reducción rápida de aerosoles de sulfatos por la mejora de la calidad del aire o por disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> de combustibles fósiles, se daría una contribución al rápido calentamiento de la temperatura en el corto plazo, por la reducción del efecto de enfriamiento de los aerosoles.

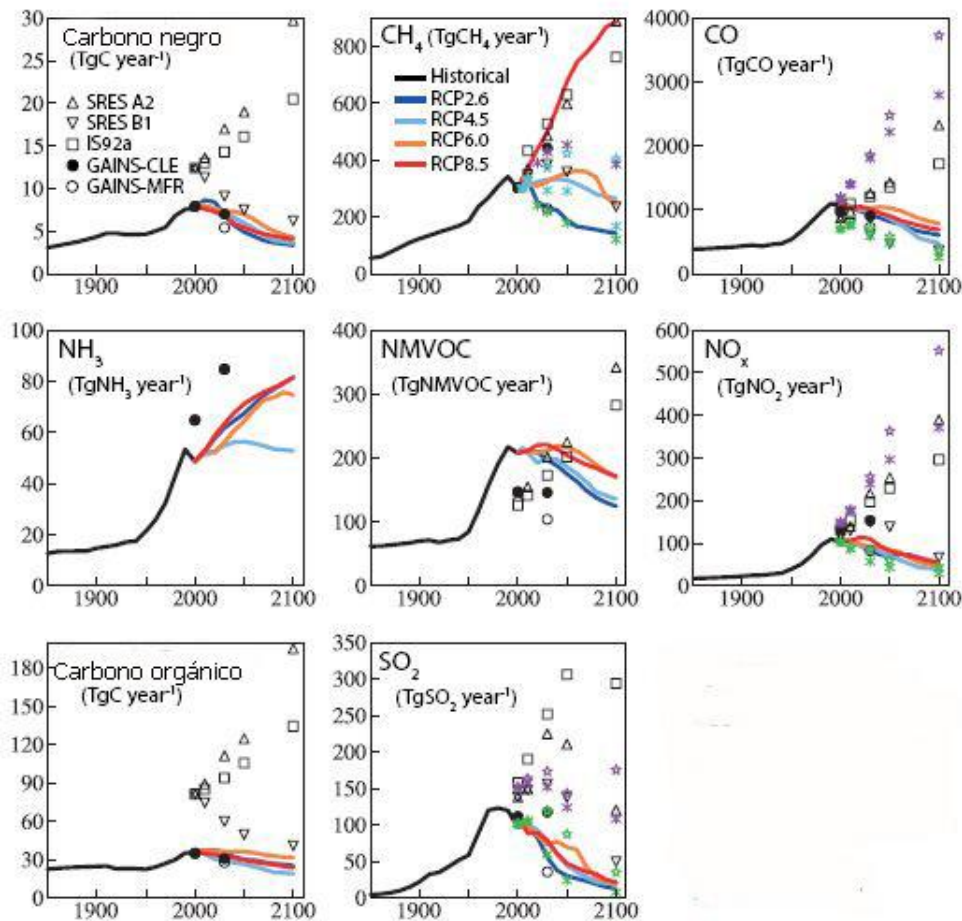
Si por su parte, se llevan a cabo políticas de control de CH<sub>4</sub> se podría compensar el efecto de los aerosoles, pero las políticas sobre el CH<sub>4</sub> podrían tener un efecto más retardado, por el tiempo que duran las diferentes sustancias en modificar sus concentraciones



atmosféricas en respuesta a la reducción de sus emisiones. Incluso el calentamiento a partir de aerosoles con efecto refrigerante como el carbono negro, presenta efectos cruzados con la reducción también resultante de sulfatos y aerosoles de efectos indirectos, que producen incertidumbre sobre la magnitud real del efecto de la reducción de los aerosoles.

La evolución y la proyección de los factores de forzamiento del clima a corto plazo se presentan para cada escenario y se muestran en el gráfico 12, en el cual se muestran los escenarios VCR para el carbón negro, nuevamente el metano con efecto en el corto plazo, el monóxido de carbono, el amonio, los compuesto orgánicos volátiles, el óxido de nitrógeno, el carbón orgánico y el dióxido de azufre<sup>54</sup>.

Gráfico 12. Concentraciones históricas y proyectadas de factores a corto plazo



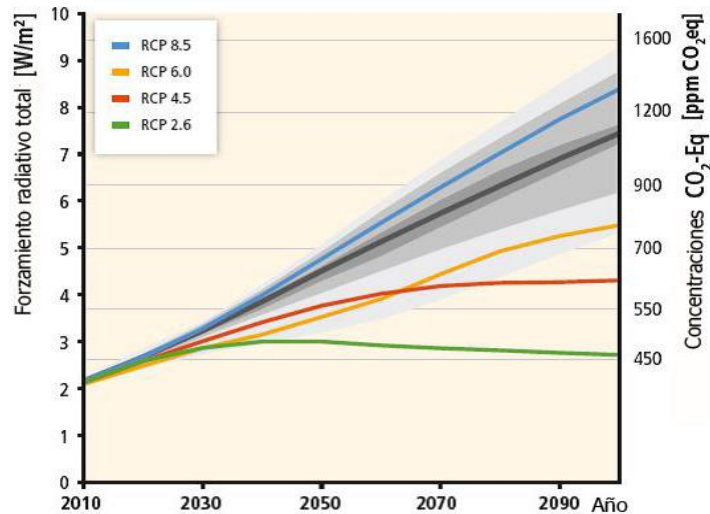
Fuente: (IPCC, 2013).

<sup>54</sup> En la sección 4.7.1.1 contiene mayor detalle del comportamiento de las concentraciones de estos gases y contaminantes para cada escenario.

El potencial de calentamiento mundial (PCM) es una medida útil para comparar el impacto climático potencial de las emisiones de los diferentes factores de forzamiento y el potencial de calentamiento mundial durante un período de tiempo específico. El efecto del forzamiento radiativo tiene una relación lineal con la respuesta de la temperatura superficial promedio mundial. Sin embargo, la respuesta climática no siempre corresponde con el forzamiento, ya que los procesos climáticos son controlados por procesos como el efecto del albedo y la inercia térmica entre zonas terrestres y marítimas.

Las concentraciones totales de CO<sub>2</sub> equivalente<sup>55</sup> antes de la era industrial se ubicaban por debajo de las 300 ppm, en el gráfico 13 se muestran los escenarios de concentraciones para las VCR y su correspondencia con las proyecciones de forzamiento. La trayectoria de concentraciones para el *RCP 2,6* claramente es decreciente y tiene como meta una estabilización para el año 2300 a 360 ppm. Con el *RCP 4,5* las concentraciones se estacionan desde el presente ligeramente por debajo de las 600 ppm, mientras que para el *RCP 6,0* las concentraciones se estacionan cerca de las 800 ppm. Como se puede ver, el *RCP 8,5* es un escenario crítico, por cuanto las concentraciones continuarán aumentando a tasa constante. Este escenario alto supera las 1000 ppm desde el año 2100 y las concentraciones se estabilizan en 2000 ppm en el año 2150.

Gráfico 13. Forzamiento radiativo y concentraciones equivalentes del CO<sub>2</sub>

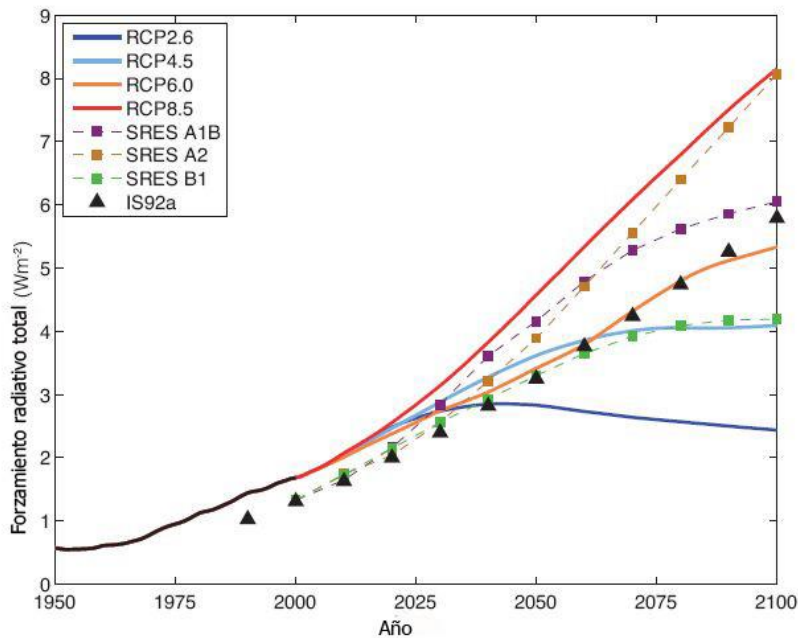


Fuente: (IPCC, 2013).

<sup>55</sup> De acuerdo con IPCC (2013), las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalente es una métrica para comparar el forzamiento radiativo de una mezcla de los diferentes GEI en un momento determinado, y se obtiene multiplicando las concentraciones de cada GEI por su potencial de calentamiento global para el horizonte de tiempo dado.

Es importante resaltar que el reporte de evaluación AR5 no es sustancialmente diferente al reporte anterior AR4 en cuanto a los promedios y rangos globales proyectados en temperatura, así como en los cambios en precipitación, ya que como se observa en el gráfico 14, el forzamiento radiativo en los SRES se encuentran dentro del rango de los escenarios VCR, por lo que hay una coherencia global de las proyecciones de temperatura y precipitación basadas en CMIP3 y CMIP5.

Gráfico 14. Forzamiento radiativo SRES y VCR



Fuente: (IPCC, 2013).

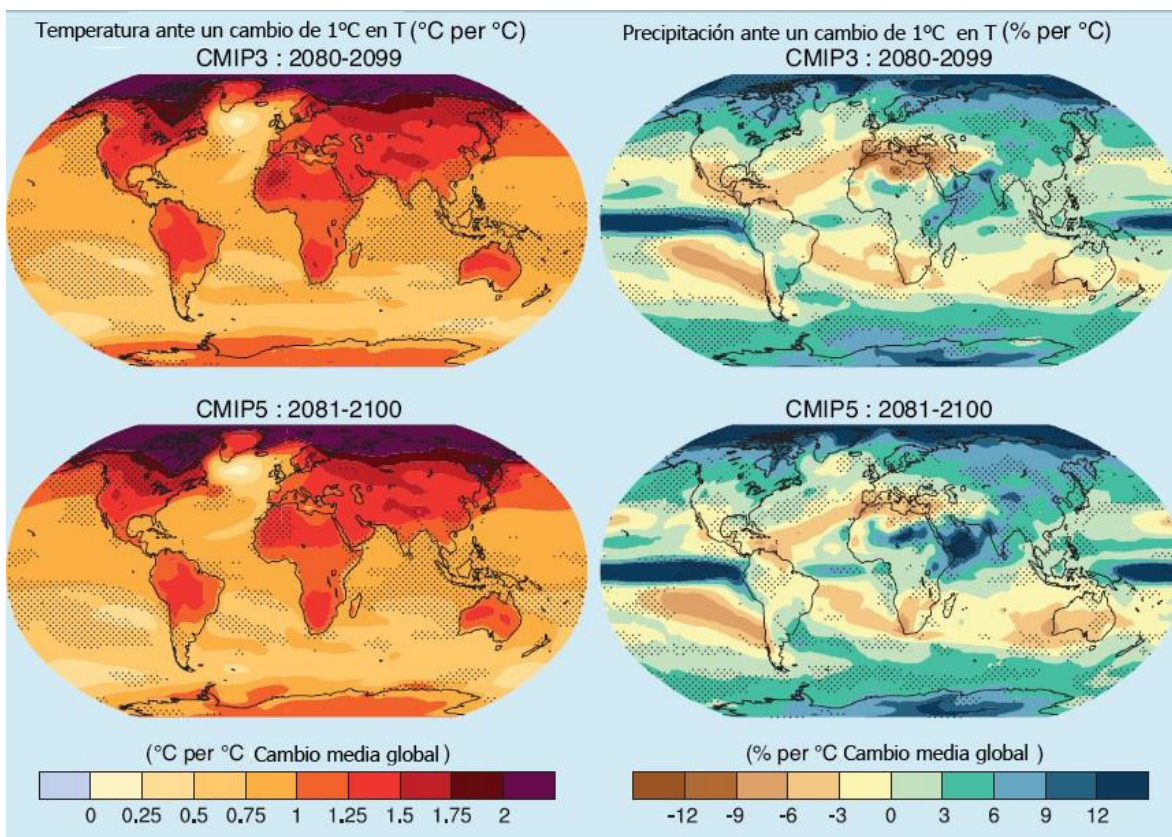
En el gráfico 15 se muestra la comparación de los resultados de CMIP3 que reunió los escenarios para el AR4 y los resultados de CMIP5 con los escenarios del AR5. Estos gráficos recogen los cambios en los patrones de temperatura y precipitación como un escalamiento a 1°C de la temperatura media global de la superficie y calculados como la diferencia entre los promedios de los últimos 20 años proyectados del siglo XXI y los promedios de los últimos 20 años históricos de referencia (1980-1999 para CMIP3 y 1986-2005 para CMIP5).

Se puede observar que no se dan grandes cambios en la distribución de temperatura y de porcentaje de cambio de precipitación<sup>56</sup>. Los cambios son más regionales, cuando se observa cómo la tendencia de modificación de la temperatura y la precipitación se extenderá geográficamente. Estos cambios regionales se deben especialmente al cambio del tipo de escenarios, una vez adoptados las VCR. Con la introducción del RCP2.5, que no

<sup>56</sup> IPCC (2013)

tienen parangón en el anterior reporte, ya que incorporan políticas de mitigación, el rango de las temperaturas es mayor en AR5. En CMIP5 se utiliza la retroalimentación en la interacción ciclo de carbono- cambios del clima, lo cual reduce la incertidumbre en las proyecciones de corto y largo plazo, aunque en el corto plazo los modelos VCR con menor forzamiento radiativo muestran mucha incertidumbre por la mayor influencia de fenómenos climáticos no relacionados con el forzamiento producto de los GEI. Las VCR reúnen mayor número de experimentos y estudios en CMIP5 que permiten una caracterización más completa y rigurosa de clima y sus interacciones con el ciclo del carbono.

Gráfico 15. Cambios en temperatura y precipitación como un escalamiento a 1°C



Fuente: (IPCC, 2013).

El CMIP5 presenta una mayor acumulación de información científica sobre evaluaciones de variabilidad y cambio del clima con lo que utiliza más del doble de los modelos que se usaron para CMIP3. Además, usa un mayor número de agentes de forzamiento, especialmente respecto a aerosoles que tienen un gran impacto en las proyecciones de corto plazo, particularmente en la escala regional y sobre el ciclo del agua, como es el caso del carbono

negro. Asimismo, el CMIP5 introduce factores de forzamiento relacionados con el cambio en el uso de la tierra.

Con respecto al forzamiento radiativo de origen natural en el AR5 se estima que hay poca confianza en que se den importantes eventos en el periodo de proyección. Por ejemplo, es difícil prever importantes erupciones volcánicas porque su ocurrencia es desconocida. En cuanto a irradiación solar, los cambios son inciertos, excepto un ciclo conocido de 11 años, pero por la incertidumbre en la irradiación total, es un efecto no incluido en el CMIP5. Los aerosoles naturales como el polvo mineral y la sal de mar se suponen sin variación año tras año.

#### 4.6.2 La sensibilidad climática

La sensibilidad climática se refiere al cambio de temperatura de equilibrio en respuesta a los cambios del forzamiento radiativo, y es producto del estado del clima inicial, los cambios en la concentración atmosférica de GEI y la retroalimentación con elementos como los cambios en la cobertura del hielo y el mismo sistema climático<sup>57</sup>. Los cambios de temperatura entonces siguen linealmente al cambio en el forzamiento radiativo:  $\Delta T = \lambda FR$ , en donde el parámetro  $\lambda$  puede variar sustancialmente entre los diferentes agentes de forzamiento.

La sensibilidad del clima en equilibrio (ECS) se refiere al cambio en el equilibrio global de la temperatura media del aire cerca de la superficie que resultaría de una duplicación sostenida de la concentración de dióxido de carbono atmosférico equivalente<sup>58</sup>. En el AR5 se encuentra que el ECS es positivo, con una alta confianza en el rango de 1,5 °C a 4,5 °C, y poco improbable que se encuentre a menos de 1 °C y o a más de 6 °C. A diferencia de AR4, el AR5 no ofrece un “best estimate” de la sensibilidad del clima en equilibrio, ya que no hay acuerdo sobre los valores evaluados en los diversos estudios<sup>59</sup>.

Por su parte, la respuesta climática transitoria<sup>60</sup> (TCR, por sus siglas en inglés) es el cambio de temperatura ante el forzamiento radiativo por la duplicación en las concentraciones del CO<sub>2</sub>, pero a diferencia de la ECS, la TCR integra la amplificación o propagación procedente de todos los procesos que operan en el sistema climático, incluyendo la fuerza de la retroalimentación de cambios en el albedo, vapor, nubosidad, almacenamiento de calor en el océano, la presencia de aerosoles y cobertura de hielo o de la vegetación. En el AR5 se

---

<sup>57</sup> [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/es/mains2-3.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/mains2-3.html)

<sup>58</sup> [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/tssts-4-5.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-4-5.html)

<sup>59</sup> IPCC (2013).

<sup>60</sup> <https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/345.htm>



encuentra con una alta confianza, la respuesta climática transitoria (TCR) es positiva, probablemente en el rango de 1°C a 2.5°C y poco probable superior a 3°C.

La temperatura media global resultante del carbono antropogénico está en función de la concentración de carbono equivalente acumulado y la respuesta climática transitoria (TCR) y con las VCR se encuentra entre 0,8°C y 2,5°C por cada 1000 pico gramos de carbono (PgC).

## 5 Los escenarios VCR y el cambio climático

Las proyecciones del clima en los escenarios VCR plantean un corto plazo, que va de 2016 al 2035, el cual muestra una menor sensibilidad a los escenarios de concentraciones de factores de forzamiento radiativo, y bajo la aplicación de modelos de propagación, que implica la retroalimentación de todos los procesos que operan en el sistema climático, las proyecciones en el corto plazo presentan una gran sensibilidad a las incertidumbres en las emisiones de aerosoles, especialmente a escala regional y para las variables del ciclo hidrológico.

En algunas regiones, las respuestas de clima a factores locales y regionales como los cambios en el uso del suelo o el comportamiento natural de eventos meteorológicos extremos, serán más importantes que las respuestas debidas al forzamiento a los gases de efecto invernadero y aerosoles.

Como se expuso anteriormente, estos escenarios suponen que no hay grandes erupciones volcánicas y que las emisiones de aerosoles antropogénicos se reducen rápidamente durante el corto plazo.

Para el mediano plazo, los escenarios VCR reconocen un periodo que va del 2046 al 2065 y para el largo plazo desde 2080 al 2100. En estos periodos el comportamiento del clima está más afectado por las concentraciones de los factores de forzamiento, por lo que se perciben mejor los efectos de las actividades antrópicas sobre el clima.

Las VCR proporcionan las proyecciones hasta el año 2100, pero para la exploración de respuestas a largo plazo en los sistemas climáticos, las VCR se ampliaron al año 2300, en lo que se conocen las vías de concentración extendidas. Dadas la gran incertidumbre relacionada con las proyecciones a largo plazo de las emisiones, como la demografía, la política y la tecnología, no se desarrollan proyecciones socio-económicas más allá de 2100, sino que se usan reglas simples para extender la concentración, las emisiones y el forzamiento radiativo. Después del 2100 y hasta el 2150, lo que se hace es fijar objetivos de

estabilización suave en el forzamiento radiativo, para analizar la respuesta climática ante tales supuestos.<sup>61</sup>

## 5.1 Escenarios de las fuerzas impulsoras

Si bien las VCR fueron concebidas sobre la base de sus emisiones y niveles de concentración de GEI y otros factores de forzamiento radiativo, existen escenarios socioeconómicos procedentes de los equipos de desarrollo de cada uno de los escenarios, los cuales son sólo una referencia individual de las múltiples opciones de escenarios socioeconómicos que se podrían asociar a cada VCR.

Los escenarios de referencia de la población y el producto interno bruto (PIB), subyacentes a las cuatro VCR se muestran en el gráfico 16, el cual incluye las proyecciones bajas y altas de población procedentes de Naciones Unidas y los percentiles 90 y 98 de los escenarios del PIB en la literatura sobre escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Con excepción del escenario *RCP 8,5*, los escenarios han hecho una construcción de otros supuestos intermedios sobre las principales fuerzas impulsoras, ya que el *RCP 8,5* se basa en una versión revisada del escenario A2 de los SRES, que se basa en un alto crecimiento de la población y más bajos ingresos en los países en desarrollo<sup>62</sup>. La zona gris en el gráfico de población indica el rango de los escenarios bajo y alto de los datos de Naciones Unidas utilizados<sup>63</sup>. El área gris claro del gráfico del ingreso indica el rango para el percentil 98 y el área gris oscura para el percentil 90<sup>64</sup>. Las líneas de puntos indican los cuatro de los escenarios de referencia de los SRES.

Respecto al PIB, en el largo plazo el crecimiento del PIB es mayor en *RCP 2,6*, con un efecto de retroalimentación, ya que hay menores efectos del cambio climático sobre la economía dada las políticas globales de cambio climático. En el largo plazo en *RCP 6,0* el crecimiento del PIB es el menor, porque la ausencia de políticas globales de cambio climático retroalimenta efectos negativos sobre la economía. Al igual que en el *RCP 6,0* En el largo plazo el crecimiento del PIB es el menor, porque la ausencia de políticas globales de cambio climático retroalimenta efectos sobre la economía, pero es menor el efecto porque el *RCP 8,5* implica mayor expansión en el consumo de la energía<sup>65</sup>.

---

<sup>61</sup> Meinshausen et al. (2011).

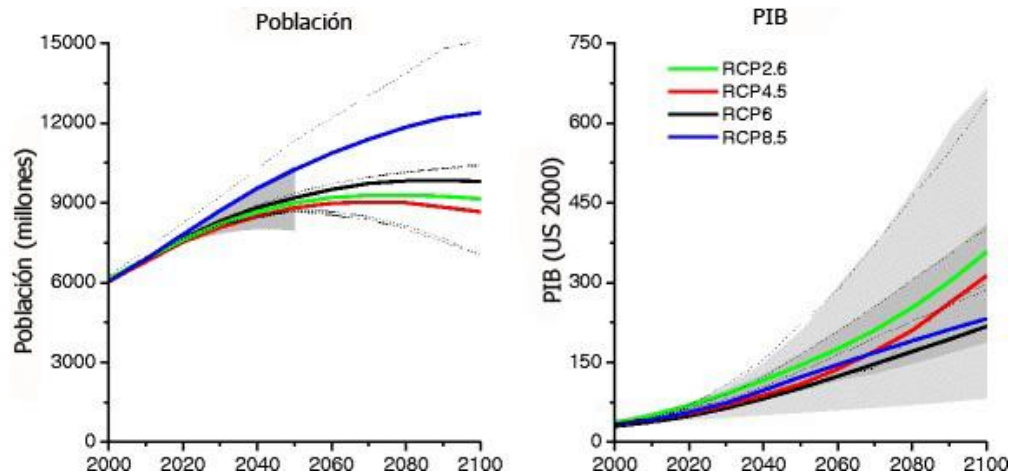
<sup>62</sup> Van Vuuren et al (2011)

<sup>63</sup> Van Vuuren et al (2011) cita a ONU (2003) cuyas referencias se ofrecen en la bibliografía.

<sup>64</sup> Van Vuuren et al (2011) cita a Hanaoka et al. (2006) cuyas referencias se ofrecen en la bibliografía.

<sup>65</sup> Hanaoka et al. (2006)

Gráfico 16. Población y PIB subyacentes en las VCR



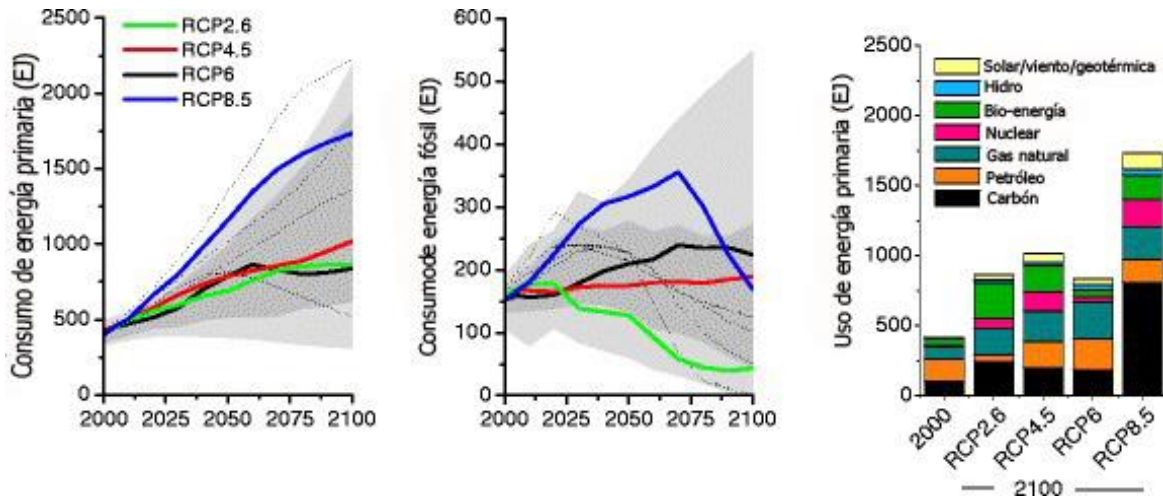
Fuente: Van Vuuren et al (2011)

Con respecto al uso de la energía, los escenarios *RCP 2,6*, *RCP 4,5* y *RCP6* implicarían un consumo de energía primaria de entre 750 y 900 exajulios (EJ) en 2100 (gráfico 17), que es un rango de aproximadamente el doble del nivel de las primera década de este siglo. El *RCP 8,5* es un escenario altamente intensivo en energía, como resultado de un alto crecimiento de la población y una menor tasa de desarrollo de la tecnología, alcanzando el consumo en cerca de 1750 EJ. Por su parte, el uso de combustibles fósiles en todos los escenarios, excepto el *RCP 2,6*, muestra niveles ligeramente mayores de consumo que los mostrados en el año 2000, gracias a la utilización de tecnologías de almacenamiento y tecnologías de captura de carbono. En el *RCP 2,6* hay una notable disminución en el consumo de petróleo como resultado del agotamiento paulatino de sus reservas y a la política climática<sup>66</sup>. El uso de combustibles renovables aumenta en todos los escenarios, así como la bio-energía y la energía nuclear. Las principales fuerzas impulsoras están aumentando la demanda de energía, pero la contención en el consumo de combustibles fósiles se da por aumento de los precios de estos combustibles y la política climática.

<sup>66</sup> Van Vuuren et al (2011)



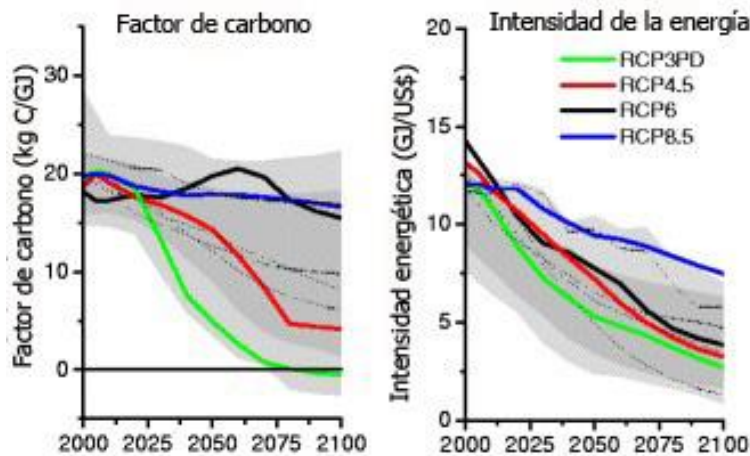
Gráfico 17. Uso de la energía en los escenarios VCR



Fuente: Van Vuuren et al (2011)

Los escenarios *RCP 2,6* y *RCP 4,5* logran la mayor parte de las reducciones de emisiones mediante la reducción de la relación carbono por unidad de energía (factor de carbono) pero también es el escenario más bajo en términos de la intensidad energética, medida como energía consumida por unidad de producción. Los escenarios *RCP 6,0* y *RCP 8,5* muestran una tendencia más constante en el factor de carbono, ya que son escenarios con mayor dependencia en los combustibles fósiles (ver gráfico 18). Respecto a la intensidad energética, se observa una caída en todos los escenarios, y prácticamente similar para para el *RCP 2,6*, el *RCP 6,0* y el *RCP 4,5*. Para el *RCP 8,5* la reducción es más lenta, relacionado con la tendencia esperada de mayor consumo de energía la mayor parte del siglo XXI.

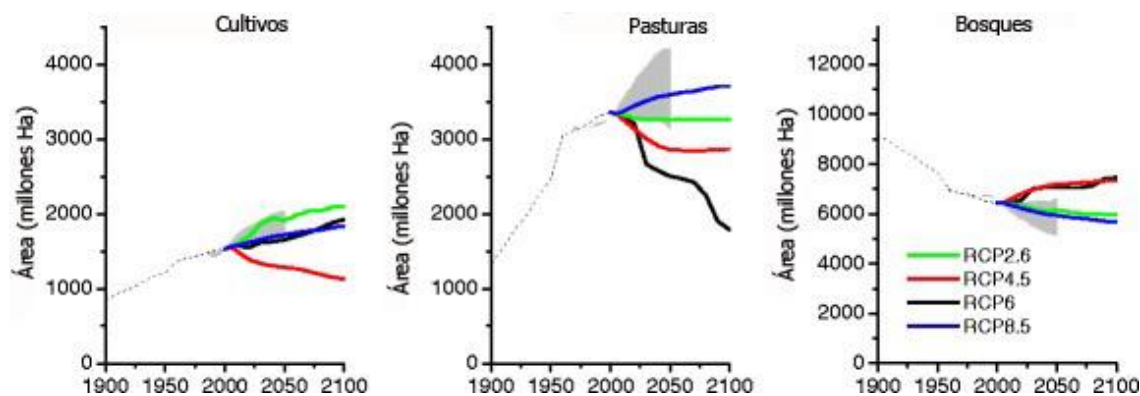
Gráfico 18. Carbono en la energía e intensidad energética del producto



Fuente: Van Vuuren et al (2011)

Respecto al uso de la tierra, las VCR cubren una amplia gama de escenarios de uso de la tierra entre cultivos, pasturas y bosques, que se muestran en el gráfico 19. El uso del suelo en cultivos y pastizales aumenta en *RCP 8,5*, impulsado principalmente por un aumento de la población mundial. Las tierras de cultivo también aumentan en el *RCP 2,6*, pero en gran medida como resultado de la producción de bioenergía. El uso de los pastizales es más o menos constante en el *RCP 2,6*, como resultado del aumento de la elaboración de productos de origen animal, pero acompañada por mayor intensidad para asegurar mejoras en la cría de animales. El *RCP 6,0* muestra un uso cada vez mayor de las tierras de cultivo, pero una disminución en los pastos. Esta disminución se debe a una tendencia similar como se ha señalado para *RCP 2,6*, pero con una aplicación mucho más fuerte de mejores técnicas en intensidad de cría animal. Por último, el *RCP 4,5* muestra una política climática global en que la cobertura boscosa se incrementa, mientras que los cultivos y los pastizales disminuyen en el uso del suelo, debido a incrementos en el rendimiento y cambios en los patrones de alimentación. Para *RCP 4,5* y *RCP 6,0*, la cobertura boscosa se expande, por la expansión menor que se espera en las pasturas, como por la contracción que se espera de las tierras agrícolas, en el caso del *RCP 4,5*.

Gráfico 19. Escenarios de uso del suelo



Fuente: Van Vuuren et al (2011)

## 5.2 Cambios en los agentes de forzamiento

### 5.2.1 Cambios de corto plazo en agentes de forzamiento

Las cantidades de gases en la superficie que indican la calidad del aire, como  $O_3$ ,  $CH_4$  y materia particulada en suspensión de tipo  $PM_{2,5}$ <sup>67</sup>, son impulsadas principalmente por las

<sup>67</sup> El indicador  $PM_{2,5}$  se refiere a las partículas con menos de 2,5 micrones de diámetro. Éstas se conocen comúnmente como partículas finas y contienen aerosoles secundarios, partículas de combustión y vapores

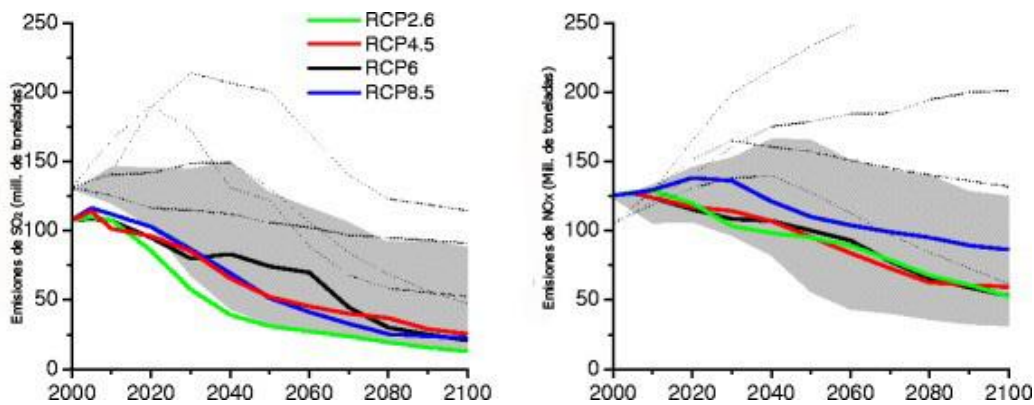
emisiones y no por el cambio climático. La respuesta de la calidad del aire a los cambios inducidos por el clima es más incierto que la respuesta a los cambios de las emisiones de estos gases. A nivel global, el calentamiento disminuye el acervo de O<sub>3</sub> en superficie, pero niveles altos de CH<sub>4</sub> pueden compensar esta disminución.

Las observaciones y la modelación indican que las temperaturas superficiales más altas a nivel local en las regiones con mayor contaminación, implicarán aumento en los niveles de O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>, y para este último, el cambio climático puede alterar sus fuentes naturales como incendios forestales, aerosoles y precursores bio-génicos, los cuales son más probables en escenarios de baja precipitación.

### 5.2.1.1 Emisiones de factores de forzamiento de corto plazo

Las VCR en general, muestran una tendencia a la disminución de las emisiones de contaminantes del aire. Las tendencias de las emisiones de contaminantes del aire están determinados por tres factores: el cambio de la tecnología de automotores, la política de control de la contaminación del aire, y la política climática. El gráfico 20 muestra como ejemplo las tendencias de los contaminantes del aire como el SO<sub>2</sub> y el NO<sub>x</sub>.

Gráfico 20. Evolución esperada de contaminantes del aire



Fuente: Van Vuuren et al (2011)

Todos las VCR incluyen la suposición de que el control de la contaminación del aire se vuelve más estricto con el tiempo, como resultado del aumento de los niveles de ingresos. A nivel mundial, esto causaría menores emisiones, aunque las tendencias pueden ser diferentes para regiones específicas o en periodos particulares. Un segundo factor que influye en los resultados es la política climática más estricta para el RCP 2,6, mientras ausencia de política climática en el RCP 8,5. La aplicación de la eficiencia energética o el uso de las energías

metálicos y orgánicos, así como componentes ácidos. Las partículas finas pueden llegar hasta los alvéolos pulmonares. [http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit\\_esp/pollutants/facts.html](http://www.unep.org/tnt-unep/toolkit_esp/pollutants/facts.html)

renovables reducen tanto las emisiones de gases de efecto invernadero como los contaminantes atmosféricos.

#### 5.2.1.2 Concentraciones de factores de forzamiento de corto plazo

En cuanto a los efectos sobre el ozono troposférico existe una clara diferencia entre las VCR. Para el *RCP 8,5* y *RCP 6,0* el forzamiento radiativo producto del ozono troposférico se incrementa, mientras hay una disminución en *RCP 4,5* y *RCP 2,6*. Este es el resultado de las tendencias asumidas en el control de la contaminación del aire y la política climática.

Por su parte, las concentraciones de aerosoles disminuyen en todos las VCR, debido a la fuerte disminución de sus emisiones. Por último, para la deposición de nitrógeno, una disminución puede ser observada a través de la VCR para la mayoría de las regiones de altos ingresos. Sin embargo, en muchas regiones en desarrollo, el aumento de la deposición de nitrógeno se proyecta para el final del siglo XXI, la mayoría relacionados con los aumentos proyectados en las emisiones de  $\text{NH}_3$  debido a las actividades agrícolas.

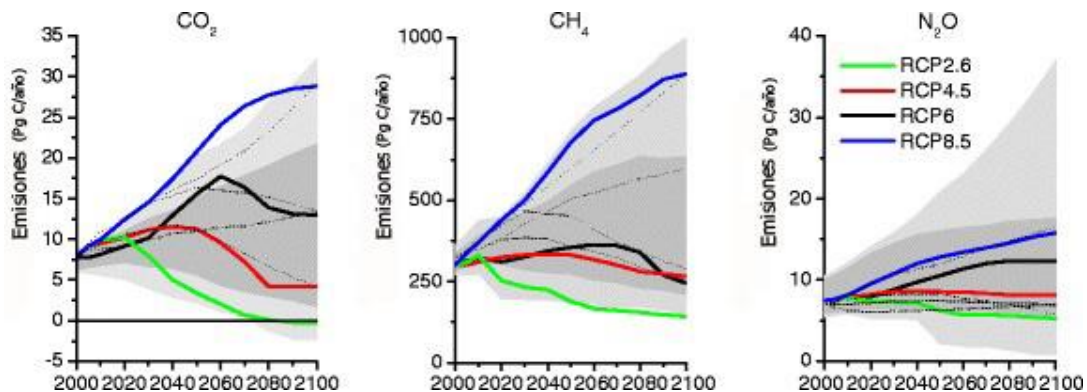
### 5.2.2 Cambios de largo plazo en agentes de forzamiento

#### 5.2.2.1 Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de  $\text{CO}_2$  muestran altos niveles en el escenario *RCP 8,5* en correspondencia con la ausencia de políticas climáticas globales. La mayoría de las políticas no climáticas, se manifiestan en el escenario *RCP 6,0*, en el cual también hay ausencia de políticas climáticas, pero las políticas no climáticas producen la tendencia de reducción de emisiones hacia finales del siglo. El escenario *RCP 4,5* muestra influencia de políticas climáticas con escenarios de bajas emisiones. El *RCP 2,6* representa el rango de escenarios con emisiones más bajas, lo que implica políticas climáticas severas para limitar las emisiones.

Las tendencias de las emisiones de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  son en gran parte debido a las diferencias en la política climática asumidas, junto con las diferencias en los supuestos de los escenarios. Las emisiones de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  muestran una tendencia de rápido crecimiento en el *RCP 8,5*, sin política climática y alta población. Para *RCP 6,0* y *RCP 4,5*, las emisiones de  $\text{CH}_4$  son más estables a lo largo del siglo, mientras que para *RCP 2,6* las emisiones se reducen notablemente. Para el  $\text{N}_2\text{O}$  los escenarios VCR muestran un comportamiento similar, aunque aquí las emisiones para *RCP 4,5* permanecen estables mientras que para *RCP 6,0* aumentan con el tiempo. Este comportamiento se debe a que la actividad agrícola crecerá a un ritmo modesto (ver gráfico 12).

Gráfico 21. Emisiones de GEI en los escenarios VCR

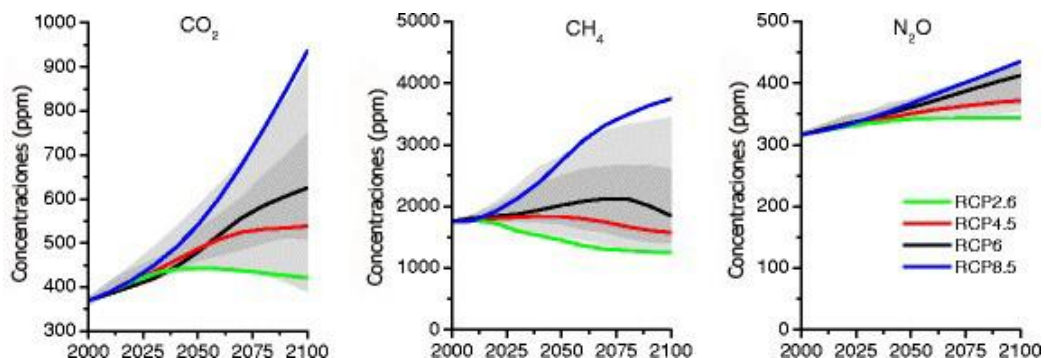


Fuente: Van Vuuren et al (2011)

### 5.2.2.2 Concentraciones de gases de efecto invernadero

Las concentraciones de gases de efecto invernadero en las VCR tienen grandes coincidencias con las tendencias de las emisiones. Para el  $\text{CO}_2$  el escenario *RCP 8,5* sigue concentraciones en rápido aumento, mientras *RCP 6,0* y *RCP 4,5* muestran una estabilización de las concentraciones. El *RCP 2,6* tiene un máximo en las concentraciones a eso del 2050, seguido por una disminución modesta de alrededor de 400 ppm de  $\text{CO}_2$ , a finales de siglo. Para  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  las concentraciones en los VCR siguen los efectos de la política climática. Las tendencias en las concentraciones de  $\text{CH}_4$  son más pronunciadas, como resultado de la relativamente corta vida de  $\text{CH}_4$ . La reducción de emisiones, como en el *RCP 2,6* y *RCP 4,5*, pueden dar lugar a un pico de concentraciones mucho más temprano en el siglo. Para  $\text{N}_2\text{O}$ , su relativamente larga vida útil y una reducción modesta implican un aumento de las concentraciones en todas las VCR (ver gráfico 22).

Gráfico 22. Concentraciones de GEI en los escenarios VCR



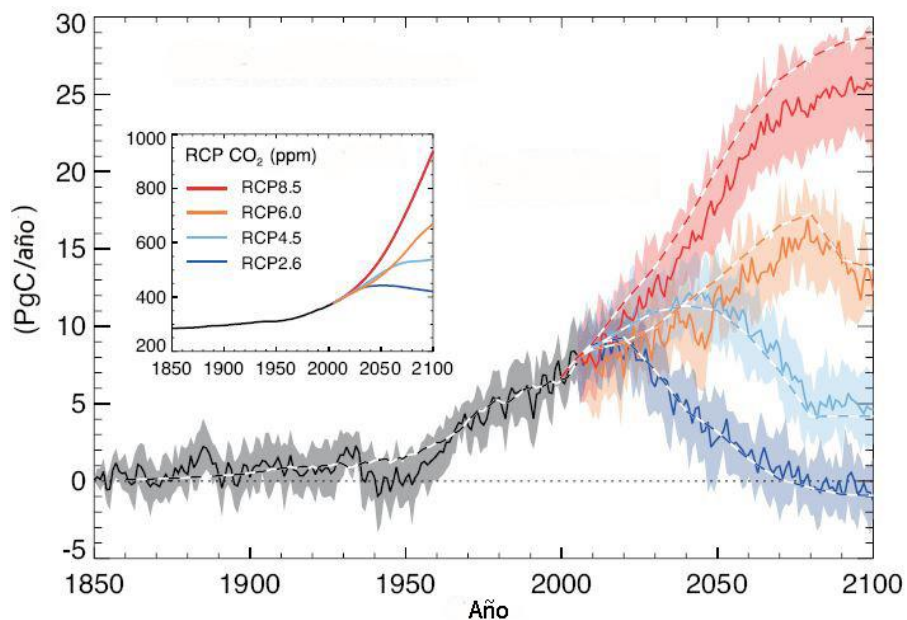
Fuente: Van Vuuren et al (2011)



La combinación de las tendencias de los gases de efecto invernadero y los de contaminantes atmosféricos se traducen en cambios en las concentraciones que afectan el desarrollo integral del forzamiento radiativo. Como se ha visto, el forzamiento radiativo total se determina de agentes de forzamiento como los gases de efecto invernadero, los agentes de forzamiento de corto plazo y el uso de la tierra. El factor más dominante, con mucho, es el forzamiento del CO<sub>2</sub>. Los niveles de forzamiento radiativo se correlacionan con las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Cuando en el gráfico 23 se ven las concentraciones de CO<sub>2</sub> (del recuadro pequeño) y se compara con las emisiones, se aprecia que la relación es casi lineal para cada escenario VCR hasta alrededor del 2050, y se prevé que las emisiones de CO<sub>2</sub> se contraigan en *RCP 2,6*, *RCP 4,5* y *RCP 6,0* hacia finales del siglo XXI, en mayor medida que la contracción del forzamiento radiativo previsto.

Gráfico 23. Emisiones y concentraciones de CO<sub>2</sub> en los escenarios VCR



Fuente: (IPCC, 2013).

### 5.2.2.3 Cambio de uso del suelo

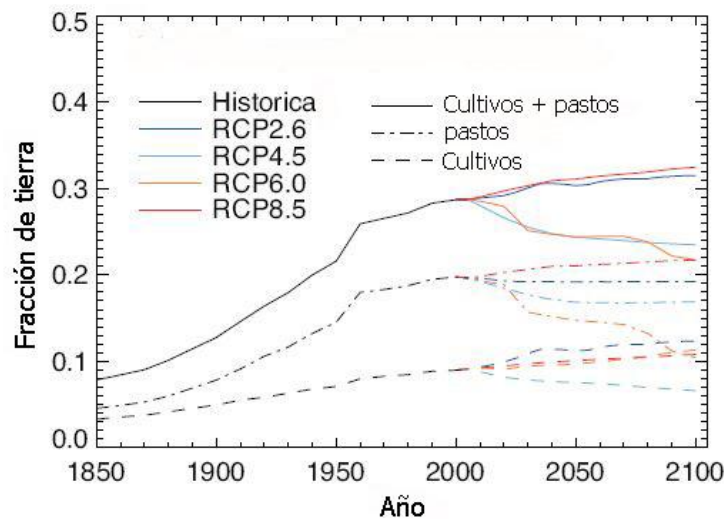
Las VCR proyectan con un alto nivel de confianza que la absorción del carbono oceánico de origen antropogénico continuará aumentando en los cuatro escenarios hasta el año 2100, pero en mayor medida en los escenarios de alta concentración de CO<sub>2</sub>. La evolución futura de la absorción de carbono de la tierra es mucho más incierta, aunque la mayoría de los escenarios VCR proyectan una absorción neta de carbono por los ecosistemas terrestres,

que continúa hasta el año 2100. Sin embargo, en el caso del *RCP 8,5* simula una fuente neta de CO<sub>2</sub> a la atmósfera para el año 2100 debido al efecto combinado del cambio climático y el cambio de uso del suelo.

El cambio de uso del suelo es un importante factor de modificación de la cubierta forestal de la tierra y el almacenamiento del carbono terrestre, y en las trayectorias de las VCR muestran tendencias muy distintas y abarcan una amplia gama de proyecciones, las cuales son muy sensibles a las hipótesis con respecto a la cantidad de tierra necesaria para la producción de alimentos, el aumento de rendimiento de los cultivos, los cambios en la dieta de la población, o cómo se aplica e intensifica la tecnología agrícola.

El aumento del área de las tierras de cultivo y pastos en *RCP 8,5* está definido principalmente por un aumento de la población mundial, pero también aumenta el área de las tierras de cultivo en el *RCP 2,6*, debido a la producción de bioenergía y al aumento de la demanda de alimentos. En el *RCP 6,0* se da una expansión de las tierras de cultivo, pero una disminución en los pastos. En *RCP 4,5* es el único escenario con una disminución de las tierras cultivadas. Los resultados de los escenarios se ven en el gráfico 24.

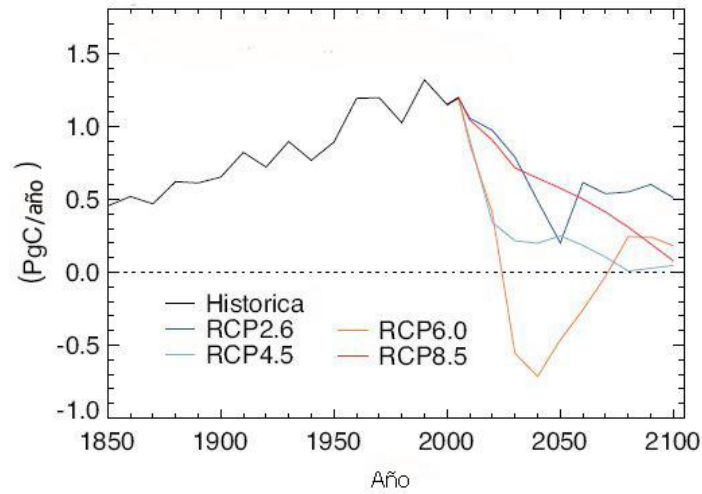
Gráfico 24. Fracción global de tierra dedicada a cultivos y pastos



Fuente: (IPCC, 2013).

Cuando el cambio de uso del suelo se traduce en emisiones de CO<sub>2</sub>, los resultados varían notablemente entre los diferentes escenarios VCR (ver gráfico 25), dado el aumento de las superficies de cultivo y pastizales, los escenarios *RCP 2,6* y *RCP 8,5* dan lugar a las más altas emisiones debidas al cambio de uso del suelo. Las emisiones en *RCP 4,5* son intermedias y en *RCP 6,0* las emisiones netas negativas durante varios años. Todos los escenarios presentan emisiones decrecientes en el tiempo

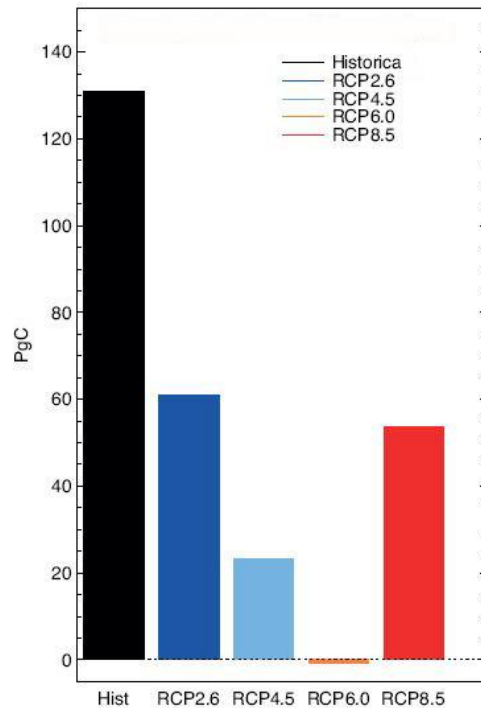
Gráfico 25. Emisiones del cambio en el uso de la tierra



Fuente: (IPCC, 2013).

Respecto a las emisiones acumuladas al 2100, en los escenarios VCR las emisiones de uso de la tierra en el siglo XXI serán menos de la mitad de las históricas desde 1850 hasta la actualidad. Las emisiones netas en el RCP2.5 son las más altas por las razones antes apuntadas y le siguen de cerca las del RCP 8,5, mientras que las del RCP 4,5 son emisiones netas bajas pero en el RCP 6,0 son virtualmente cero (ver gráfico 26).

Gráfico 26. Emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas por cambio en uso del suelo

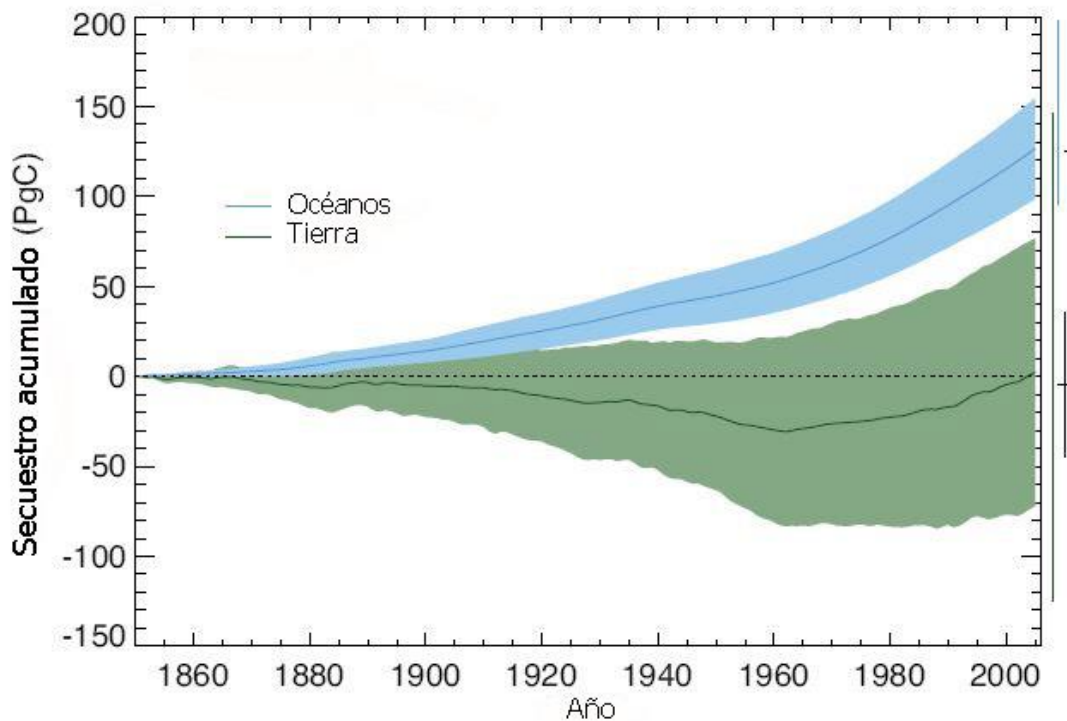


Fuente: (IPCC, 2013).



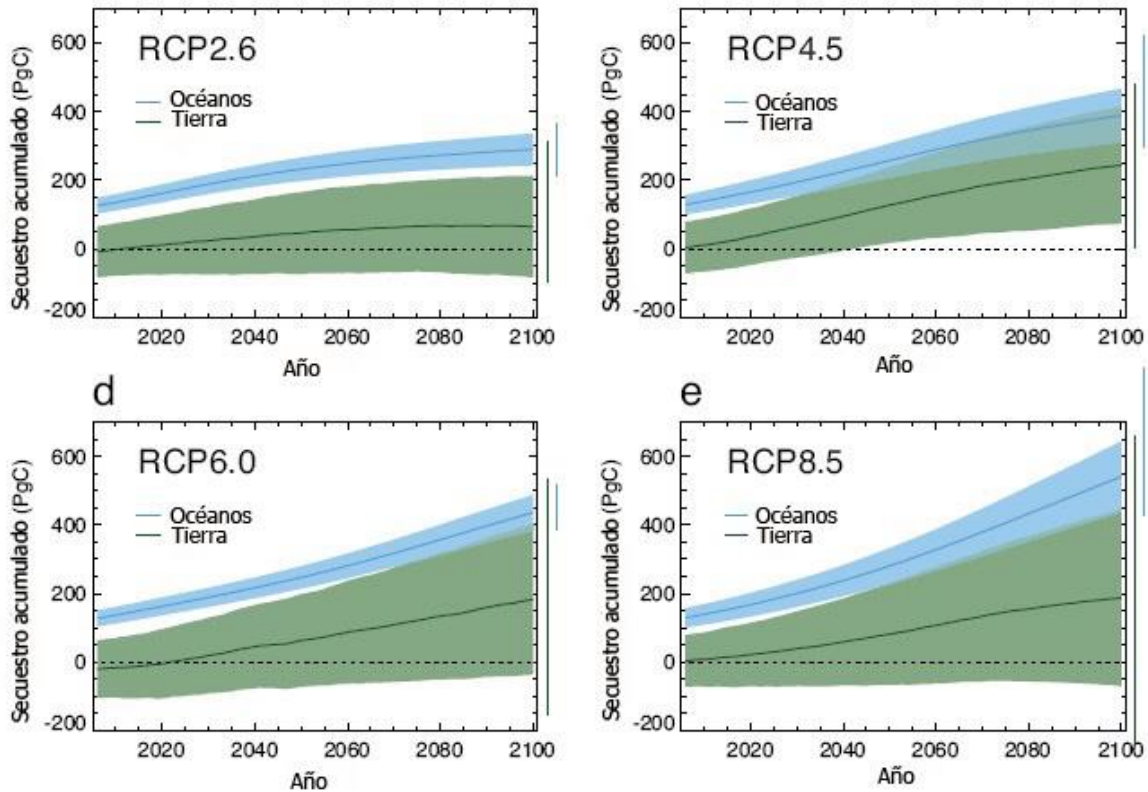
Hay una gran certeza de que el cambio climático aumente los sumideros de carbono de la tierra y del océano global causado por el aumento de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, existen diferencias regionales en la respuesta del océano y la tierra en los flujos de CO<sub>2</sub> sobre el clima. El gráfico 27 señala cómo históricamente los océanos tuvieron un secuestro neto de carbono, mientras que el secuestro neto en la tierra fue negativo, aunque con una media cerca a cero en secuestro neto. El gráfico 28 contiene el secuestro acumulado para cada uno de los escenarios VCR.

Gráfico 27. Sumidero global de carbono en tierra y océanos



Fuente: (IPCC, 2013).

Gráfico 28. Sumidero global de carbono en tierra y océanos en las VCR



Fuente: (IPCC, 2013).

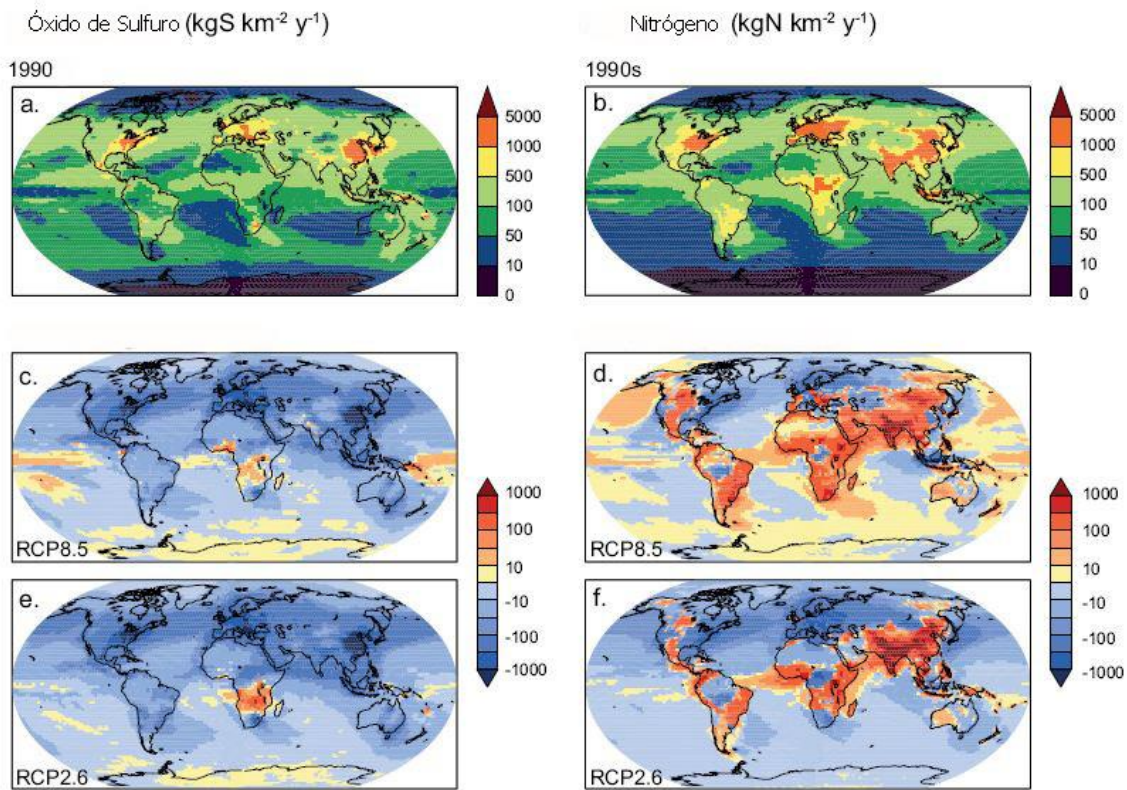
En todos los escenarios hay una reversión del secuestro de carbono en el suelo, ya que se proyecta un secuestro neto positivo en la superficie terrestre, al igual para los océanos. La mayor acumulación en los escenarios de mayor forzamiento está relacionado con la mayor disponibilidad de carbono atmosférico. Sin embargo, pese a este mayor carbono atmosférico, es muy probable en los cuatro escenarios VCR, que la escasez de nutrientes limitará el efecto del aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico atrapado en sumideros de carbono en tierra.

Hay un alto nivel de confianza que la baja disponibilidad de nitrógeno limitará el almacenamiento de carbono en la tierra, incluso cuando se considera la deposición de nitrógeno antropogénico, pese a que la adición de nitrógeno antropogénico y las respuestas del ciclo natural del nitrógeno a los cambios globales tendrán un impacto importante en el ciclo global del carbono. Como principal nutriente para el crecimiento vegetal, el nitrógeno puede tanto limitar la absorción de carbono futuro y estimularlo en función de los cambios en su disponibilidad. En el escenario *RCP 8,5* la falta de nitrógeno disponible proyecta que se reduciría el secuestro de carbono terrestre en un promedio de 137 pico gramos de

carbono (PgC) al 2100. Para el PCR6.0 tal reducción es de 109 PgC, 117 PgC para PCR4.5 y 85 PgC para el PCR2.6.

Dada la estrecha conexión entre el nitrógeno de la atmósfera y los ciclos de azufre, también se modelan los escenarios VCR para la deposición de azufre (SOx), el cual se prevé que disminuya en todas los escenarios VCR. El gráfico 29 muestra los cambios de la distribución del azufre y el nitrógeno respecto al año 1990 para los dos escenarios VCR extremos de RCP 2,6 y RCP 8,5.

Gráfico 29. Distribución futura de nitrógeno y sulfuro



Fuente: (IPCC, 2013).

Respecto a la limitación de fósforo, las proyecciones son más inciertas y no se puede afirmar insuficiencia de dicho nutriente en los escenarios futuros.

Hay un alto nivel de consistencia en los escenarios VCR de que los ecosistemas tropicales almacenan menos carbono en un clima más cálido, asimismo que a altas latitudes, el calentamiento aumentará el almacenamiento de carbono del suelo, aunque ninguno de los modelos presenta la descomposición del carbono en el suelo congelado del permafrost, lo que puede compensar el aumento de almacenamiento de carbono del suelo, ya que hay una gran certeza de que las reducciones en la extensión del permafrost debido al

calentamiento causará emisión del carbono actualmente congelado. La pérdida de carbono de los suelos congelados constituye una retroalimentación radiativo positivo que falta incorporar mejor en las proyecciones de las VCR.

Las estimaciones actuales de las reservas de carbono del suelo permafrost son de aproximadamente 1700 pico gramos de carbono (PgC) por los grandes depósitos de carbono orgánico que contiene y representa el componente más importante de las reservas de carbono terrestre, que incluye el permafrost submarino en los estantes poco profundas del océano Ártico. Algo de este carbono está congelado desde la última glaciación, con lo que mantiene al menos el doble de la cantidad de carbono que actualmente está presente en la atmósfera en forma de dióxido de carbono.

En general, en los escenarios VCR existe gran confianza de que las reducciones en la extensión del permafrost debido al calentamiento causarán la emisión parcial del carbono actualmente congelado, sin embargo, existe mucha incertidumbre sobre la magnitud de las pérdidas de carbono a través de las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> a la atmósfera. La magnitud de la fuente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por la descomposición de carbono del permafrost en respuesta al calentamiento varía ampliamente de acuerdo con diferentes técnicas y escenarios.

#### 5.2.2.4 Emisiones de combustibles fósiles en los escenarios VCR

Como se indicó anteriormente, las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en los escenarios VCR aumentan el sumidero de carbono en océanos y suelos. La simulación del ciclo del carbono terrestre y oceánico permite la cuantificación de las emisiones procedentes de los combustibles fósiles compatibles con los escenarios VCR (ver cuadro 1). Las VCR no hacen suposiciones acerca de la manera de alcanzar las emisiones compatibles, sino que calculan la emisión total global que se requiere para seguir la vía de la concentración de CO<sub>2</sub>, de acuerdo a la respuesta del ciclo del carbono para el clima y para el cambio de uso del suelo. Entre 2012 y 2100, los resultados implican emisiones de combustibles fósiles compatibles acumulados de 270 PgC para RCP 2,6, 780 PgC para RCP 4,5, 1060 PgC para RCP 6,0 y 1685 PgC para RCP 8,5.

Para el RCP 2,6, los modelos proyectan un promedio del 50% de reducción de emisiones a partir del año 2050 con respecto a los niveles de 1990 para lograr la disminución del forzamiento radiativo de 3 W/m<sup>2</sup> a 2,6 W/m<sup>2</sup> en 2100. El escenario RCP 2,6 alcanza esta tasa de emisión negativa a través del uso a gran escala de la bioenergía con captura de carbono y almacenamiento, lo que es una forma de eliminación de dióxido de carbono de la geoingeniería.

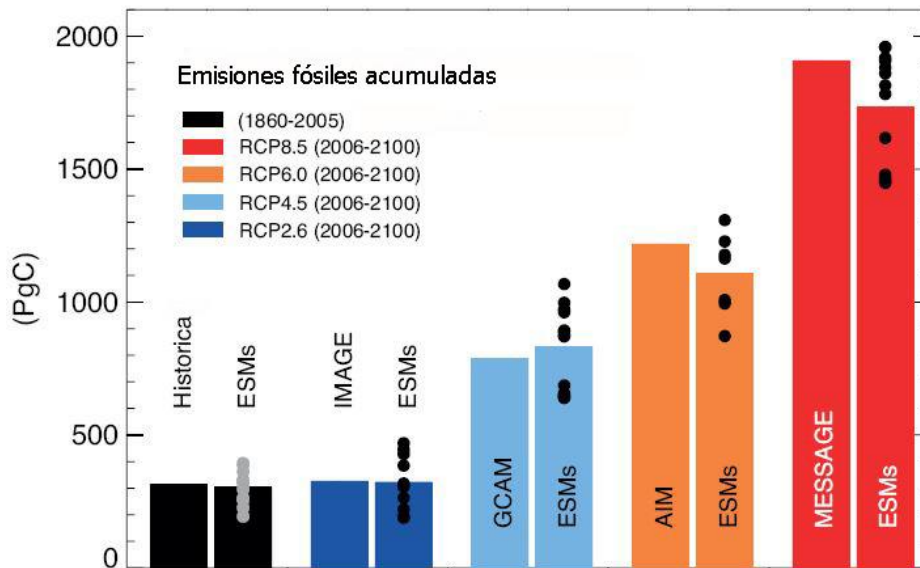
Cuadro 1. Emisiones y sumideros en suelo y océanos en los escenarios VCR.

	Emisiones fósiles compatibles con escenarios VCR (PgC)		Cambio carbono zonas terrestres (PgC)		Cambios en carbono de océanos (PgC)	
	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango
<b>1850–2011</b>	350	235 a 455	10	–125 a 160	140	110 a 220
<b>RCP 2,6</b>	270	140 a 410	65	–50 a 195	150	105 a 185
<b>RCP 4,5</b>	780	595 a 1005	230	55 a 450	250	185 a 400
<b>RCP 6,0</b>	1060	840 a 1250	200	–80 a 370	295	265 a 335
<b>RCP 8,5</b>	1685	1415 a 1910	180	–165 a 500	400	320 a 635

Fuente: (IPCC, 2013).

En el gráfico 30 se pueden observar los supuestos de emisiones acumuladas procedentes del uso de fuentes fósiles para cada escenario. La acumulación entre el 2006 y el 2100 para el RCP 2,6 es muy cercano al acumulado histórico entre 1860 y 2005. En el extremo del RCP 8,5, la acumulación prácticamente cuadruplica al acumulado histórico.

Gráfico 30. Emisiones acumuladas de fuentes fósiles



Fuente: (IPCC, 2013).



## 5.3 Cambios en la temperatura

### 5.3.1 Cambios de corto y mediano plazo en la temperatura

Una de las características más consistentes en los nuevos escenarios, es que las temperaturas medias globales continuarán aumentando durante el siglo XXI en todos las VCR, y especialmente a mediados del siglo, este calentamiento global comienza a ser más dependiente de los factores de forzamiento radiativo, especialmente de los gases de efecto invernadero.

El incremento en la temperatura medio global para el periodo 2016-2035 con relación al periodo de referencia de 1986-2005 estará en el rango de 0,3 °C a 0,7 °C.

Las proyecciones climáticas para periodos anteriores a 2050 no son muy sensibles a los escenarios alternativos disponibles para las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>. A corto plazo, sin embargo, las proyecciones son sensibles a los cambios en las emisiones de los agentes de forzamiento climático con tiempos de vida más cortos, en particular el CH<sub>4</sub> de tiempo de vida de una década, el O<sub>3</sub> troposférico de tiempo de vida de semanas, y los aerosoles troposféricos de vida útil de días.

En el cuadro 2 se muestran las probabilidades estimadas de que se verifiquen diversos niveles de temperatura en cada una de los escenarios VCR. Por ejemplo, existe alta probabilidad de que la temperatura sobrepase 1°C para el periodo 2016-2035 en todos los escenarios y es prácticamente seguro que suceda para el periodo 2046-2065. El aumento de la temperatura a 1,5°C es improbable para el periodo 2016-2035, pero es probable para el periodo 2046-2065 en los escenarios *RCP 2,6*, *RCP 4,5* y *RCP 6,0*. Un aumento de 2 °C para el periodo 2046-2065 solo parece probable en el *RCP 8,5*, y es improbable que llegue a 3°C en el corto plazo o mediano plazo.

Los patrones espaciales de calentamiento a corto plazo proyectados con los escenarios VCR indican que es altamente probable que el calentamiento de la temperatura del aire en superficie durante las próximas décadas por influencia antropogénica se producirá más rápidamente en las zonas terrestres que sobre los océanos, y es muy probable que este calentamiento antropogénico sobre el Ártico en invierno va a ser mayor que la media mundial de calentamiento. Con respecto a los niveles de la variabilidad generada internamente existe una gran confianza que el calentamiento antropogénico tenga mayor influencia en las zonas tropicales y subtropicales que en las latitudes medias.

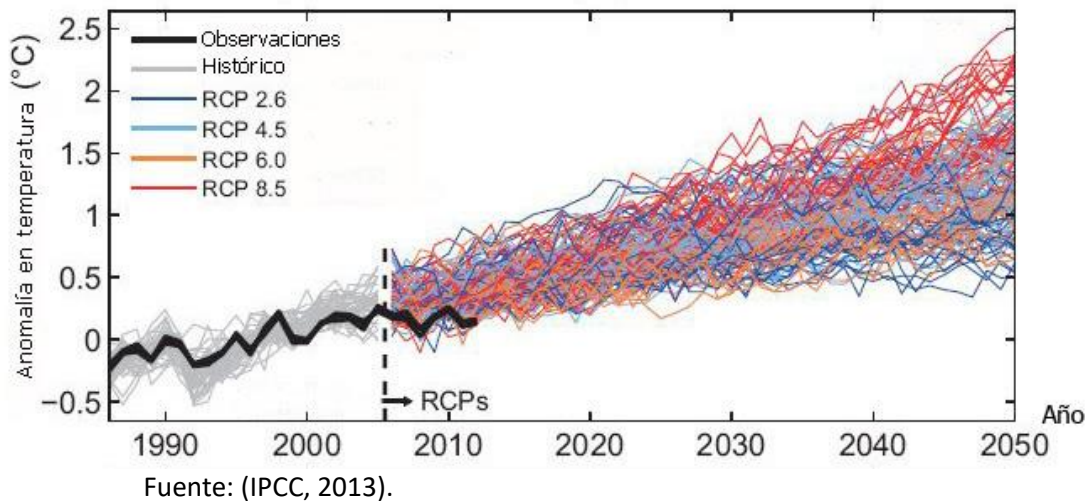
Cuadro 2. Probabilidad de niveles de temperatura en el corto y mediano plazo\*

Escenario	(2016–2035)	(2046–2065)
Temperatura +1,0°C		
RCP 2,6	100%	100%
RCP 4,5	98%	100%
RCP 6,0	96%	100%
RCP 8,5	100%	100%
Temperatura +1,5°C		
RCP 2,6	22%	56%
RCP 4,5	17%	95%
RCP 6,0	12%	92%
RCP 8,5	33%	100%
Temperatura +2,0°C		
RCP 2,6	0%	16%
RCP 4,5	0%	43%
RCP 6,0	0%	32%
RCP 8,5	0%	95%
Temperatura +3,0°C		
RCP 2,6	0%	0%
RCP 4,5	0%	0%
RCP 6,0	0%	0%
RCP 8,5	0%	21%
* Respecto al periodo 1850-1900		

Fuente: (IPCC, 2013).

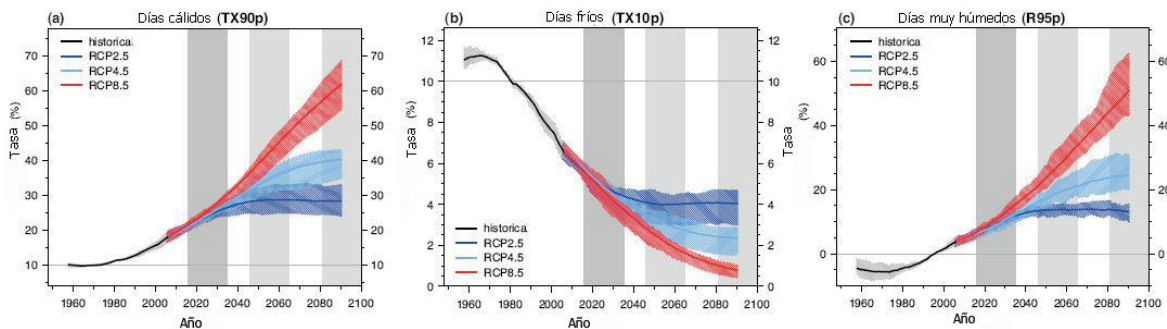
En el siguiente gráfico 31 se observan las anomalías de las proyecciones de la temperatura media global respecto al promedio del periodo 1986-2005. El término anomalía de la temperatura significa la diferencia del valor con respecto a otro valor de referencia o promedio. Una anomalía positiva indica que la temperatura observada es más alta (más cálida) que el valor de referencia, mientras que una anomalía negativa indica que la temperatura observada es más baja (más fría) que el valor de referencia. En el gráfico superior se muestra cómo cada escenario VCR en realidad consiste de un conjunto de modelos, en los que tienen una anomalía positiva y creciente.

Gráfico 31. Proyecciones de las anomalías de la temperatura



De acuerdo a las VCR, es probable que en las próximas décadas la frecuencia de días cálidos y noches cálidas aumentarán en la mayoría de las regiones de la tierra, mientras que la frecuencia de los días fríos y noches frías disminuirán. En los modelos también se proyecta un incremento en la duración, la intensidad y la extensión espacial de las olas de calor para el corto plazo (ver gráfico 32).

Gráfico 32. Frecuencia proyectada de días cálidos y fríos

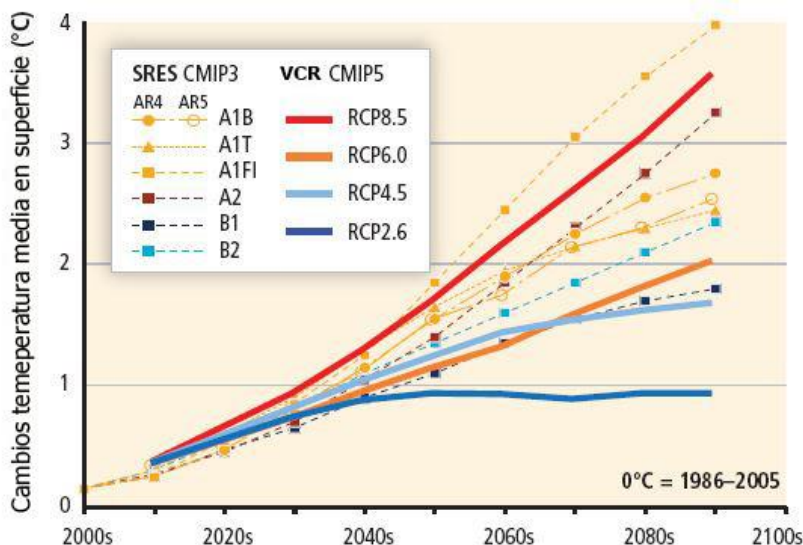


### 5.3.2 Cambios de largo plazo en la temperatura

Bajo los supuestos de las VCR, basados en la concentración de GEI, el cambio de la temperatura media global 2081-2100, con relación a 1986-2005, será probablemente de 1°C dentro de un rango de 0,3°C a 1,7°C para el escenario *RCP 2,6*, de 1,8°C con un rango de 1,1°C a 2,6°C para *RCP 4,5*. En *RCP 6,0* la media es 2,2°C en un rango 1,4°C a 3,1°C, y para *RCP 8,5* la media es de 3,8°C y un rango de 2,6°C a 4,8°C. En el gráfico 33 se muestran estas proyecciones de cambios en la temperatura tanto para las VCR como para los anteriores escenarios.



Gráfico 33. Cambios en temperatura media en la superficie



Fuente: (IPCC, 2013).

Con respecto a esta temperatura promedio global para el periodo 1850-1900, las temperaturas promedio en el periodo 2081-2100 se proyectan con una confianza alta que aumenten en más de 1,5°C para *RCP 4,5*, *RCP 6,0* y *RCP 8,5* y que pueda superar los 2°C para *RCP 6,0* y *RCP 8,5*. El cambio de temperatura por encima de 2°C bajo *RCP 2,6* es poco probable. El calentamiento por encima de 4°C es poco probable en todos las VCR, a excepción de *RCP 8,5*. Estas simulaciones se pueden ver en el cuadro 3.

Cuadro 3. Probabilidad de niveles de temperatura en el largo plazo\*

	+1,0°C	+1,5°C	+2,0°C	+3,0°C	+4,0°C
<b>RCP 2,6</b>	94%	56%	22%	0%	0%
<b>RCP 4,5</b>	100%	100%	79%	12%	0%
<b>RCP 6,0</b>	100%	100%	100%	36%	0%
<b>RCP 8,5</b>	100%	100%	100%	100%	62%

\* Respecto al periodo 1850-1900

Fuente: (IPCC, 2013).

Una característica clave que ha estado presente en las VCR es que el calentamiento de la tierra es mayor en comparación con los océanos. Hay un alto grado de confianza que a nivel mundial, al final del siglo XXI, los cambios en el promedio de temperatura en la superficie terrestre excederán los cambios en la temperatura media del océano por un factor en el rango de 1.4 a 1.7 y es notablemente constante en el tiempo a partir de 2020 hasta 2100.

Respecto a los efectos y proyecciones regionales, se destaca que el aumento de temperatura del aire es mínimo en el Atlántico Norte y suroeste, en parte debido a las capas profundas del océano en esas regiones. En el Pacífico ecuatorial, el calentamiento es mayor en una banda estrecha, lo que se ha descrito previamente como un calentamiento Tipo-El Niño, el cual es producto de la disminución prevista de las circulaciones atmosféricas tropicales.

El calentamiento amplificado de la superficie en latitudes árticas es también una característica en las VCR, los que muestran una media de calentamiento entre 2,2 y 2,4 veces el calentamiento medio global para 2081-2100 en comparación con 1986-2005. Se prevé que la temperatura del aire en superficie sobre la región del Ártico se caliente entre 2.5 a 5 veces más que en el Antártico, ya que el exceso de masa de tierra en el hemisferio norte en comparación con el hemisferio sur, unido a la mayor absorción de calor por el océano Antártico, en comparación con las cuencas oceánicas del norte, significará que en general el hemisferio norte se calienta más que el hemisferio sur.

Además, el calentamiento del Ártico es mucho mayor que en la Antártida, debido a la presencia de la capa de hielo de la Antártida y las diferencias en las respuestas locales en la nieve y el hielo. La falta de una respuesta transitoria de calentamiento amplificado en altas latitudes polares del sur se asocia con mezcla en el océano profundo, fuerte absorción de calor del océano y la persistencia de esta vasta capa de hielo antártica. A todo esto se une que los cambios en la radiación de onda larga en la parte superior de la atmósfera asociada con el calentamiento superficial se oponen al calentamiento de la superficie en todas las latitudes, pero en menor medida en el Ártico.

A medida que aumenta la temperatura media global, el patrón de las temperaturas medias regionales atmosféricas muestra el calentamiento a través de la troposfera y de enfriamiento en la estratosfera, lo que influye en los resultados regionales de la temperatura.

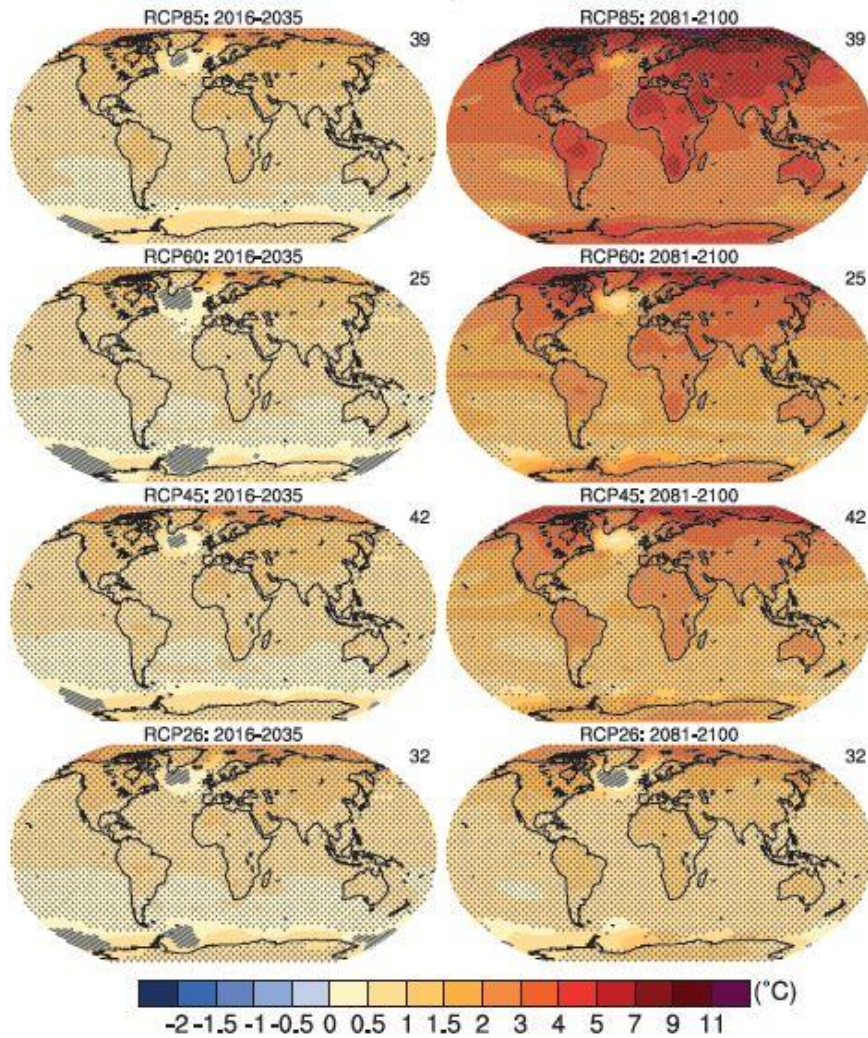
El conductor principal de calentamiento a largo plazo es el total de emisiones de CO<sub>2</sub> y las dos se relacionan de forma lineal. Es probable que el calentamiento de la atmósfera, como respuesta climática transitoria a las emisiones acumuladas de carbono, sea entre 0,8°C y 2,5°C por cada 1000 PgC. En el gráfico 34 se observa que para todos los escenarios la distribución de la temperatura muestra un periodo 2081-2100 más cálido respecto al previo de 2016-2035<sup>68</sup>. Entre mayor sea el forzamiento radiativo del escenario, el aumento de la

---

<sup>68</sup> Los números a la par de cada gráfico indica el número de modelos contribuyendo en el escenario de cada periodo.

temperatura es más evidente, y aunque para el RCP2.5 el aumento es más ligero, siempre se nota la tendencia creciente de la temperatura global.

Gráfico 34. Cambios en la temperatura media anual



Fuente: (IPCC, 2013).

El cuadro 4 resume los cambios esperados en la temperatura media y los rangos esperados a un nivel de confianza en el intervalo de 5% a 95%. Los valores se dan para los periodos 2046-2065 y 2081-2100. Véase que con el escenario *RCP 2,6* la temperatura media se estabiliza a mediados del siglo XXI.

Cuadro 4. Cambios esperados en la temperatura media

Escenario	2046-2065		2081-2100	
	Media	Rango	Media	Rango
<b>RCP 2,6</b>	1°C	0,4 a 1,6	1°C	0,3 a 1,7
<b>RCP 4,5</b>	1,4°C	0,9 a 2,0	1,8°C	1,1 a 2,6
<b>RCP 6,0</b>	1,3°C	0,8 a 1,8	2,2°C	1,4 a 3,1
<b>RCP 8,5</b>	2°C	1,4 a 2,6	3,7°C	2,6 a 4,8

Fuente: (IPCC, 2013).

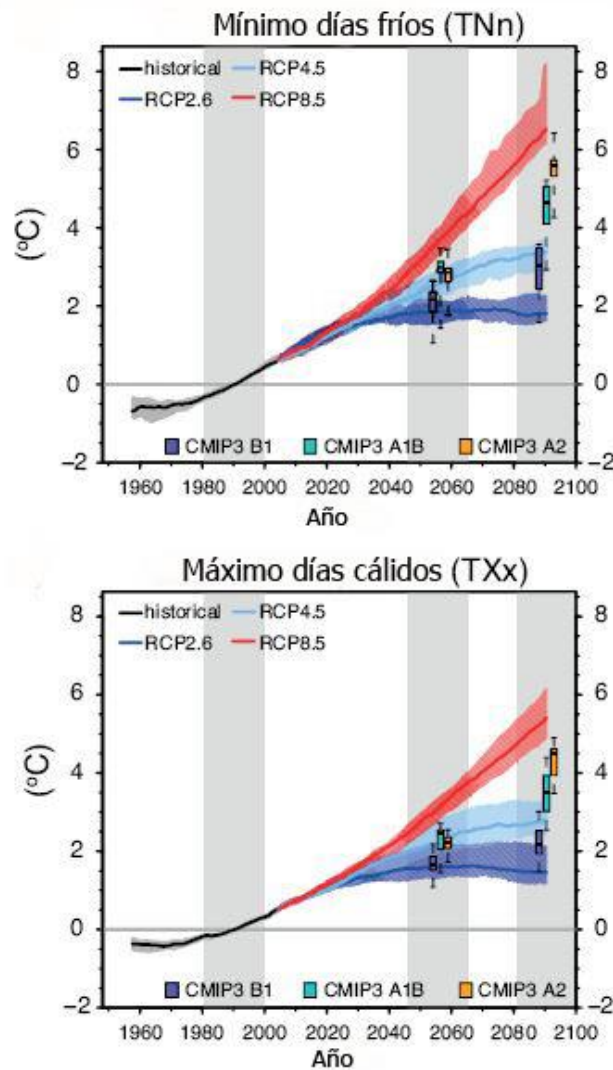
En el largo plazo a medida que el clima continúa calentándose, se han observado cambios en varios tipos de temperaturas extremas, y se espera que continúe en el futuro conjuntamente con el calentamiento global. Sin embargo, la magnitud de los cambios en las temperaturas extremas varía con las características de escala de tiempo, magnitud, duración, extensión espacial y definición que se utilice del fenómeno extremo bajo análisis.

Es prácticamente seguro que en la mayoría de lugares habrá más periodos calientes y menos periodos fríos, ya que las temperaturas extremas aumentarán por el aumento de las temperaturas medias globales. Se espera un aumento en la frecuencia, duración y magnitud de los días extremos cálidos, junto con los episodios de estrés por calor. También es muy probable que las olas de calor, definidas como períodos de días con temperaturas por encima de un umbral determinado de la climatología histórica, se producirán con una mayor frecuencia y duración, principalmente como consecuencia directa del aumento de las temperaturas medias estacionales.

Los eventos de alta temperatura en rangos de análisis de veinte años se prevé que aumenten a un ritmo similar o superior a la tasa de aumento de las temperaturas medias de verano en la mayoría de las regiones. Además, los extremos fríos de invierno también se calientan más que la temperatura media en las latitudes altas del norte como resultado de la mayor temperatura global y el declive en la cubierta de nieve para el caso de las zonas que se acercan a los polos.

En el gráfico 35 se muestra cómo en todos los escenarios las temperaturas mínimas de las noches frías, así como las temperaturas máximas de los días cálidos van en aumento.

Gráfico 35. Proyección de temperatura en días con temperatura extrema

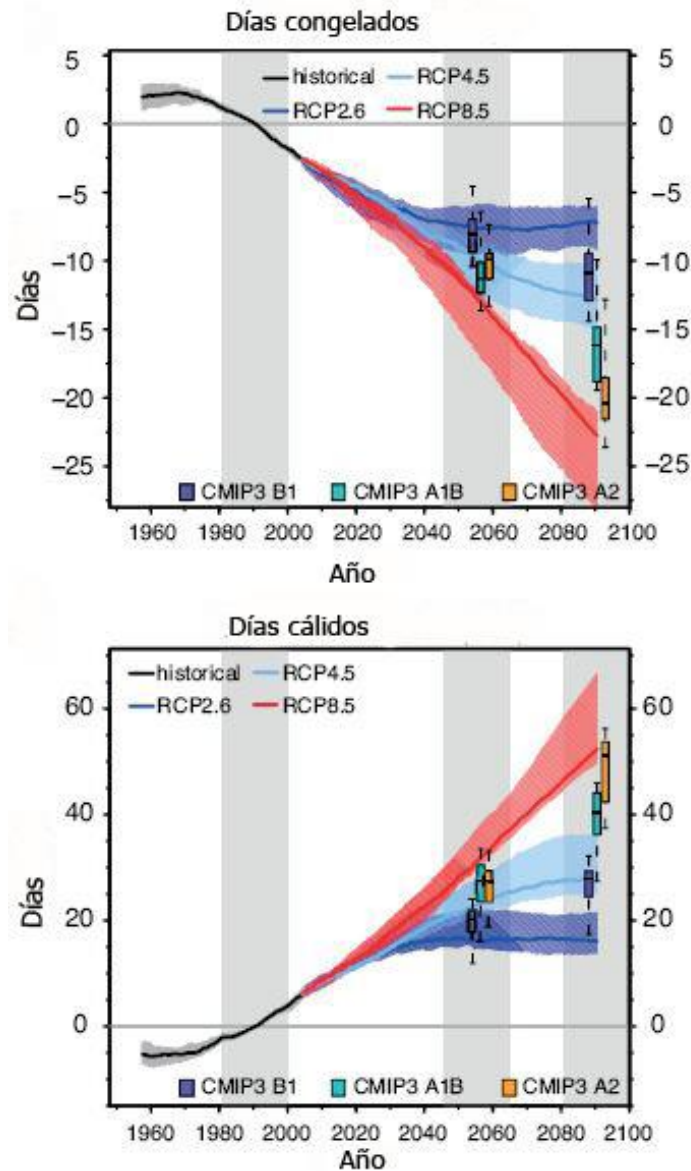


Fuente: (IPCC, 2013).

Asimismo, en las VCR muestran que los días fríos extremos disminuyen en el tiempo y los días cálidos aumentan en frecuencia (ver gráfico 36).



Gráfico 36. Frecuencia de días con temperatura extrema



Fuente: (IPCC, 2013).

## 5.4 Cambios en el ciclo del agua

### 5.4.1 Cambios en el ciclo del agua a corto plazo

El ciclo del agua se compone de agua almacenada en el planeta en todas sus fases, junto con el movimiento del agua a través del sistema climático de la Tierra. En la atmósfera, el agua se produce principalmente como vapor de agua, pero también se produce en forma de sólido (hielo) y gotas de agua líquida en las nubes. El océano es agua líquida sobre todo, pero está parcialmente cubierta por el hielo en las regiones polares. En las zonas terrestres

el agua en forma líquida aparece como aguas superficiales (como lagos y ríos, la humedad del suelo y las aguas subterráneas), y el agua sólida se produce en las capas de hielo, glaciares, lagos congelados, la nieve y el hielo en la superficie y el permafrost. Las proyecciones futuras de cambios en el ciclo del agua están vinculadas con los cambios en el ciclo de la energía y la circulación atmosférica.

El vapor de agua atmosférico es el principal GEI en la atmósfera y sus cambios afectan a todas las partes del ciclo del agua. Sin embargo, la cantidad de vapor de agua está dominado por procesos que ocurren de forma natural y no se ve afectado significativamente por las actividades humanas. Globalmente, se prevé que la humedad relativa permanezca más o menos constante, ya que los aumentos de vapor de agua son principalmente una consecuencia de la relación Clausius-Clapeyron, asociado con el aumento de las temperaturas en la troposfera inferior, donde reside la mayor parte vapor de agua atmosférico. Sin embargo, la humedad específica tenderá a aumentar ante un clima más cálido. El calentamiento proyectado de la tierra y del océano promueve cambios en la humedad atmosférica, que conduce a una pequeña disminución de la humedad relativa cerca de la superficie de la mayoría de las áreas terrestres, con la notable excepción de algunas partes de África tropical<sup>69</sup>.

La precipitación media muy probablemente se incrementará en algunas de las latitudes altas y medias, y en los sub-trópicos la mayor probabilidad es que las precipitaciones no disminuirán. A escalas regionales los cambios en las precipitaciones pueden estar dominadas por una combinación de la variabilidad natural interna, forzamiento volcánico y efectos de los aerosoles antropogénicos.

Durante las próximas décadas es muy probable un aumento de la humedad cerca de la superficie. Es probable que habrá aumentos de evaporación en muchas regiones. Hay poca confianza en los cambios proyectados en la humedad del suelo y la escorrentía superficial.

En el corto plazo, es probable que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones intensas aumentarán sobre la Tierra. Estos cambios son impulsados principalmente por los aumentos en el contenido de vapor de agua atmosférico, pero también se ven afectados por los cambios en la circulación atmosférica. El impacto de forzamiento antropogénico a escalas regionales es menos evidente, ya que los cambios de escala regional se ven fuertemente afectados por la variabilidad natural y también dependerá del curso de las futuras emisiones de aerosoles volcánicos, y otros factores de forzamiento como cambios en el uso de la tierra.

---

<sup>69</sup> IPCC (2013)



#### 5.4.2 Cambios en el ciclo del agua a largo plazo

La humedad específica del aire que se origina sobre los océanos se regirá por las temperaturas del aire oceánico. A medida que este aire se mueve sobre la tierra y se calienta, la humedad relativa de la tierra disminuye<sup>70</sup>. La disminución de humedad relativa sobre la mayoría de la superficies de tierra a finales del siglo XXI es consistente con el aumento de temperatura esperado al final del siglo y con el comportamiento observado durante la primera década del mismo.

El aumento de vapor de agua en la troposfera inferior con el aumento de la temperatura provocará un aumento en la humedad transportada por la circulación, lo que aumenta los valores de precipitación. El debilitamiento de la circulación de retorno tropical antes mencionado se opone parcialmente a este comportamiento termodinámico, sin embargo, existe mucha seguridad de que en el largo plazo la precipitación global aumentará con el aumento de la temperatura global.

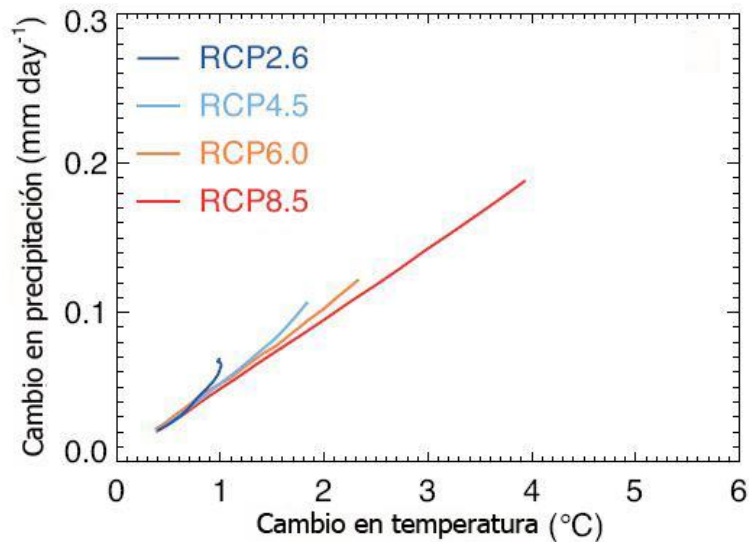
La precipitación media global aumentará a una tasa por °C menor que la del vapor de agua atmosférico, mientras que por su parte, la relación entre la precipitación global y la temperatura global es aproximadamente lineal. Sin embargo, los cambios futuros de largo plazo en las precipitaciones están definidos en mayor medida por los cambios en el balance energético de la atmósfera y la forma en que éstos más tarde interactúan con la circulación, la humedad y la temperatura. La sensibilidad de la precipitación, es decir, el cambio de la precipitación global con la temperatura, es de 0,5% a 3% por °C en los escenarios VCR.

En el gráfico 37 se muestra la relación lineal entre el aumento de las temperaturas y las precipitaciones, pero además se observa que entre menor sea el forzamiento radiativo mayor será el cambio futuro de las precipitaciones respecto al cambio a la temperatura, lo que hace más empinado la relación conforme menor es el forzamiento radiativo. La razón se debe a que un aumento de CO<sub>2</sub> tiene dos efectos contrapuestos en la precipitación. Primero, la mayor concentración de CO<sub>2</sub> disminuye el enfriamiento radiativo de la troposfera y reduce la precipitación, pero a más largo plazo el aumento de CO<sub>2</sub> induce un aumento lento de temperatura y vapor de agua, mejorando de este modo el enfriamiento radiativo de la atmósfera y el aumento de la precipitación global.

---

<sup>70</sup> Siempre y cuando la humedad específica permanezca constante según la ecuación de Clausius-Clapeyron.

Gráfico 37. Relación entre el aumento de temperaturas y precipitaciones

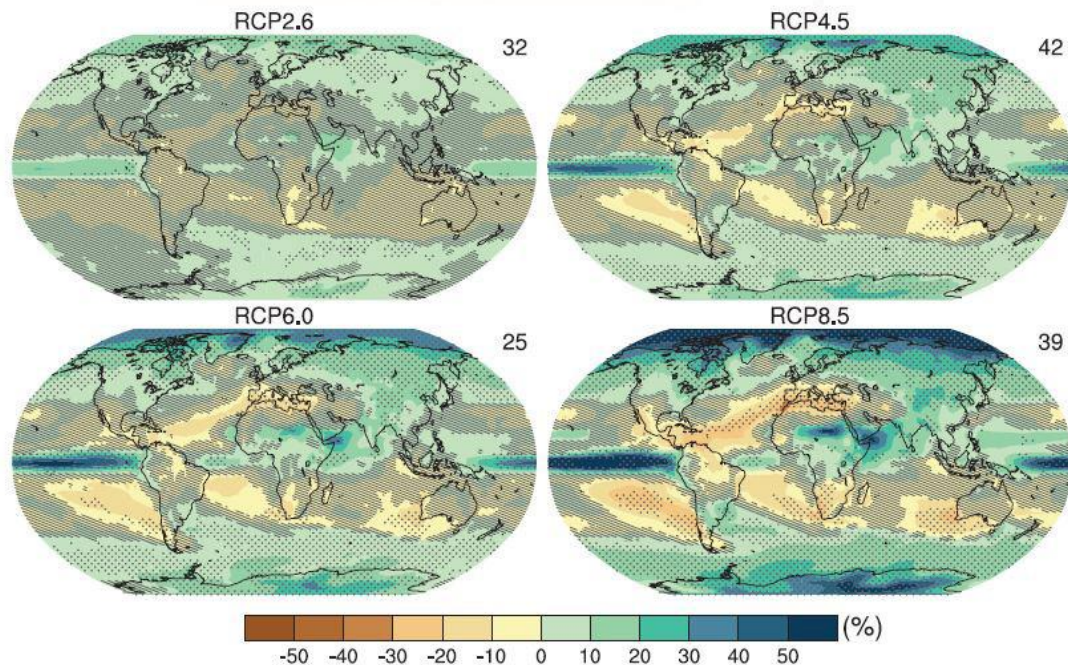


Fuente: (IPCC, 2013).

Los cambios en la precipitación media en un mundo más cálido exhibirán una variación espacial considerable, especialmente bajo *RCP 8,5*. Algunas regiones experimentarán aumentos en la precipitación, y otras regiones experimentarán descensos y otras aún no experimentarán cambios significativos en absoluto. Hay un alto nivel de confianza que el contraste de precipitación media anual entre las regiones secas y húmedas, y que el contraste entre las estaciones húmedas y secas, se incrementará en la mayor parte del mundo a medida que aumentan las temperaturas. El patrón general de cambio indica que las altas latitudes son muy propensas a experimentar mayores cantidades de precipitación debido al aumento de la humedad específica de la troposfera más caliente, así como un aumento del transporte de vapor de agua desde los trópicos hacia el final de este siglo. Muchas regiones de latitudes medias y subtropicales áridas y semiáridas probablemente experimentarán menos precipitación y muchas regiones húmedas de latitudes medias probablemente experimentarán más precipitaciones a finales de este siglo, especialmente en el escenario *RCP 8,5*.

Los mapas de cambio de la precipitación media anual son respecto al periodo 1986-2005 para los cuatro escenarios VCR se muestran a continuación en el gráfico 38. Se observa que conforme aumenta el forzamiento radiativo en cada escenario hay una expansión tanto de las regiones afectadas por la disminución de la precipitación como de las regiones con aumento de las precipitaciones.

Gráfico 38. Cambio en la precipitación media anual (2081-2100)



Fuente: (IPCC, 2013).

A altas latitudes del hemisferio norte, el aumento de la precipitación se traducirá durante el invierno en un aumento de las nevadas en las regiones más frías y una disminución de las nevadas en las regiones más cálidas, debido a la disminución del número de días de congelación.

Se espera un gran aumento de la precipitación media anual sobre el Océano Pacífico ecuatorial tanto en verano e invierno y un desplazamiento hacia el ecuador de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur. Esto se explica principalmente por los cambios en la circulación atmosférica y porque las interacciones atmósfera-océano estarán definidas por el calentamiento de la temperatura en la superficie del mar y un gran aumento precipitación.

En las regiones subtropicales secas hay una disminución de la precipitación que se explica por los cambios en los patrones de transporte de humedad y porque sobre el océano, la heterogeneidad de aumento de la temperatura en las diversas regiones afecta el aumento de la troposfera inferior al vapor de agua. Además, hay una disminución de la precipitación hacia los polos de las zonas secas subtropicales como consecuencia de la expansión latitudinal de la celda de Hadley.

Hay un alto nivel de confianza que el contraste de precipitación media estacional entre las regiones secas y húmedas se incrementará en un clima más cálido en la mayor parte del mundo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que excepciones importantes pueden ocurrir en regiones específicas, especialmente a lo largo del ecuador y en los bordes hacia los polos de la zona seca subtropical. En estas regiones, los cambios en la circulación atmosférica conducen a los cambios de los patrones de precipitación.

En los trópicos, los cambios en las precipitaciones presentan fuertes contrastes regionales, con un aumento de la precipitación sobre los océanos Pacífico e Índico ecuatoriales y disminuyen en gran parte del océano subtropical.

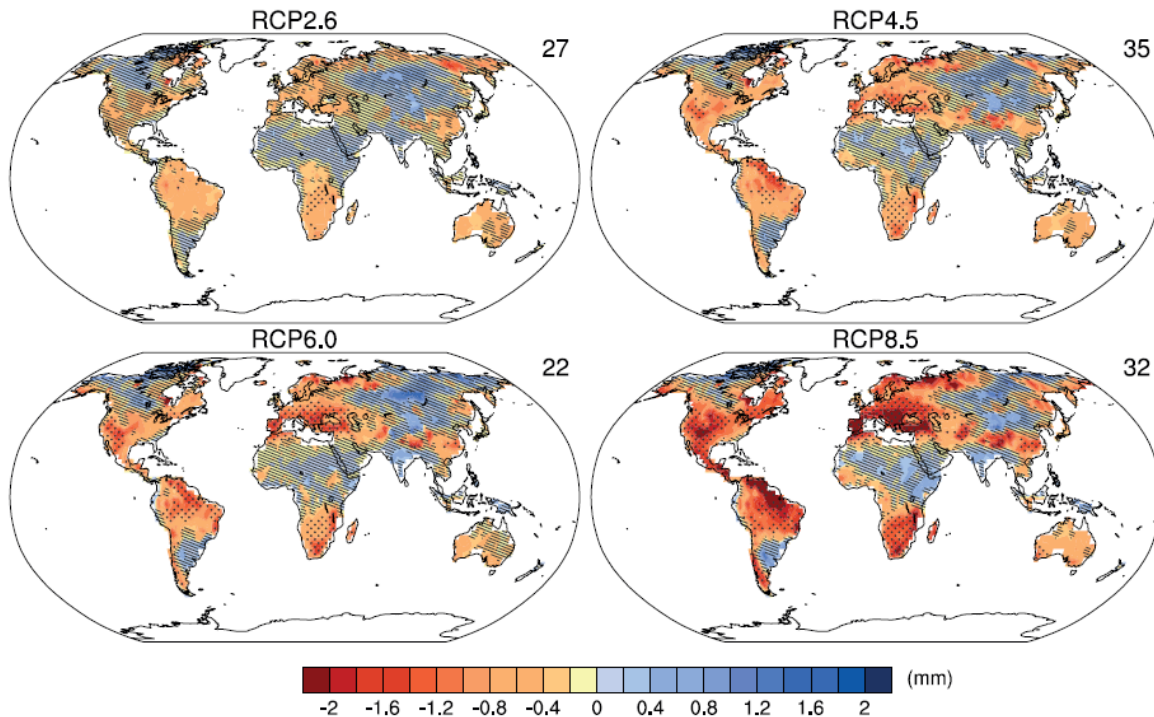
Respecto a eventos en la precipitación de corta duración a nivel mundial, es probable que a medida que aumentan las temperaturas haya un cambio con más tormentas intensas individuales y un menor número de tormentas débiles. En la mayor parte de las masas terrestres de latitudes medias y de las regiones tropicales húmedas, es muy probable que las precipitaciones extremas sean más intensas y más frecuentes en un mundo más cálido. En el lapso de periodos de 20 años aumenta la posibilidad de eventos cuya precipitación diaria máxima anual alcance del 5,3% por °C de aumento, ante el incremento de la temperatura local.

La evaporación superficial anual se prevé que aumentará a medida que aumenta la temperatura global sobre la mayor parte del océano y se prevé que cambie a lo largo del planeta, siguiendo un patrón similar en forma de precipitación. Es probable el aumento a finales del siglo XXI en la escorrentía anual en las altas latitudes septentrionales, correspondiendo a grandes incrementos de precipitación en invierno y primavera.

Cerca de la superficie, la humedad neta del suelo es el resultado de una serie de procesos complejos como la precipitación, la evapotranspiración, el drenaje, el flujo superficial, la infiltración, además de la heterogeneidad, la pendiente y la textura del suelo.

Se prevé disminuciones en la humedad del suelo en ciertas regiones del planeta y aumento en el riesgo de sequía agrícola en las regiones secas. La pérdida de la humedad del suelo es consistente con los cambios proyectados en la circulación de Hadley y el aumento de las temperaturas superficiales. En las regiones donde se prevé la humectación de la superficie, los cambios son generalmente más pequeños que la variabilidad natural. Los patrones generales son moderadamente consistente a través de los escenarios VCR, con cambios que tienden a ser más fuertes con los aumentos en el forzamiento radiativo (ver gráfico 39).

Gráfico 39. Cambios en la humectación media global



Fuente: (IPCC, 2013).

#### 5.4.3 Escorrentía y evaporación

En los escenarios VCR, la escorrentía muestra disminuciones para el siglo XXI en el sur de Europa, Oriente Medio y el suroeste de EE.UU, así como aumentos en el sudeste de Asia, África tropical oriental y en las altas latitudes septentrionales. Estos cambios son mayores conforme aumentan la magnitud de forzamiento radiativo, tal y como se observa en el gráfico 40.

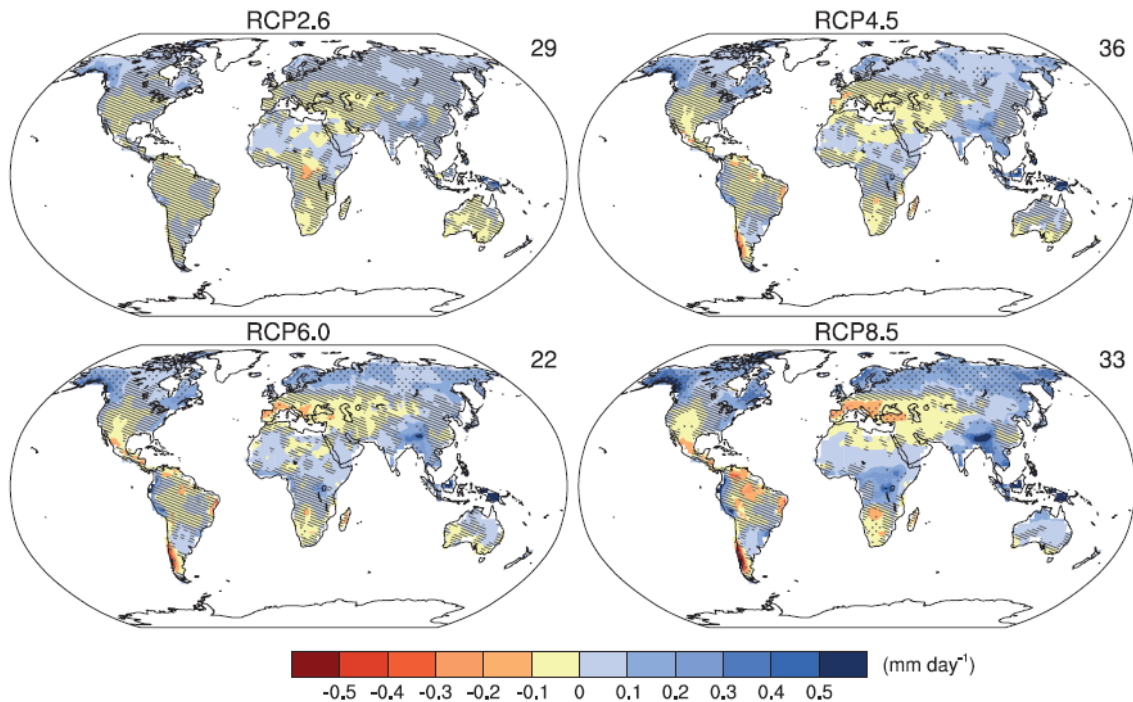
La evaporación aumenta en la mayor parte del océano y la tierra, con zonas prominentes de disminución en tierra (sur de África y a lo largo del mediterráneo en la parte noroeste de África). Las áreas de disminución corresponden a zonas con menor precipitación. La evaporación media anual aumenta sobre tierra en las latitudes más septentrionales, consistente con el aumento de las precipitaciones y el calentamiento global que aumentaría la evaporación.

Los cambios en la evapotranspiración reflejan parcialmente los cambios en la precipitación, pero procesos como el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico promueve el cierre de las estomas y la reducción de la transpiración que potencialmente puede producir aumento de la



escorrentía. Existe un potencial de retroalimentación sustancial entre los cambios de vegetación y los ciclos regionales de agua, aunque el impacto de dicha retroalimentación permanece incierto en este momento debido a las limitaciones en el modelado de los cultivos y otros procesos de la vegetación en los modelos.

Gráfico 40. Cambios en la escorrentía media global



Fuente: (IPCC, 2013).

#### 5.4.4 Eventos extremos en el ciclo del agua

Además de los cambios en el patrón estacional de la precipitación media, se prevén profundos cambios en la distribución regional de las precipitaciones. A escala diaria y semanal se esperan tormentas individuales más intensas y un menor número de tormentas débiles. Por otro lado, el aumento de la evapotranspiración de la tierra puede conducir a períodos más frecuentes y más intensos de sequía agrícola.

Si bien no existe una relación general entre los cambios en la precipitación total y la precipitación extrema, hay dos posibles mecanismos que controlan las cantidades de precipitación extrema a corto plazo. La primera considera que los eventos extremos de precipitación se producen cuando la mayor parte del vapor de agua atmosférico disponible precipita rápidamente en una sola tormenta. A medida que aumenta la temperatura del aire, la cantidad saturada de agua en la atmósfera también aumenta. Se espera que tales

aumentos en el vapor de agua atmosférico aumente la intensidad de las precipitaciones individuales aunque menos impacto en su frecuencia. Un segundo mecanismo de precipitación extrema plantea que es producto de la anomalía en la convergencia del flujo de humedad y las corrientes convectivas ascendentes, que cambiarían en un mundo más cálido.

Las proyecciones de los cambios en las precipitaciones extremas futuras pueden ser más grandes a escala regional que para la precipitación media global. Sin embargo, los mecanismos de la variabilidad natural todavía son un factor importante en la evaluación de la solidez de las proyecciones, además de la incertidumbre en los cambios en la circulación a gran escala.

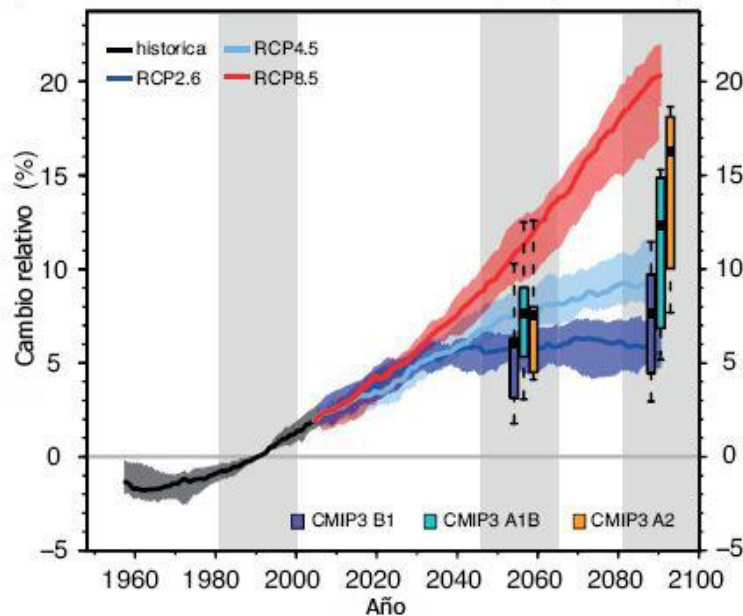
Sin embargo, consistentemente los escenarios VCR proyectan futuros episodios de precipitaciones más intensas en las estaciones húmedas para la mayoría de las áreas terrestres, especialmente en las regiones del monzón y las regiones continentales en latitudes más septentrionales.

En las regiones semiáridas de las latitudes medias y subtropicales, como el Mediterráneo, el suroeste de EEUU, el suroeste de Australia, el sur de África y gran parte de América del Sur, la tendencia que se manifiesta en la mayoría de los modelos de simulación es por períodos secos más largos.

En el siguiente gráfico 41 se muestran las proyecciones de los cambios porcentuales en el máximo anual de precipitación de 5 días consecutivos en las regiones terrestres obtenidos a partir de los escenarios VCR. Los escenarios *RCP 2,6* y *RCP 8,5* indican que los cambios esperados están en el rango de 5% y 20%.



Gráfico 41. Cambios (%) en máximo de precipitación acumulada en 5 días consecutivos



Fuente: (IPCC, 2013).

Por otra parte, el riesgo de futuros episodios de sequía agrícola se incrementa en las regiones de fuerte disminución de la humedad del suelo. El índice de días secos consecutivos (consecutive dry-day index, CDD), que es la longitud del más largo período de días consecutivos con precipitaciones de menos de 1 mm, refuerza estos hallazgos en las regiones con fuertes disminuciones de humedad, con lo que se proyecta un aumento sustancial de la sequía en regiones del Mediterráneo, América Central, Brasil, África del Sur y Australia, mientras que la disminución de la sequía se proyectan en las altas latitudes septentrionales.

#### 5.4.5 Los recursos de agua dulce

Se prevé que el cambio climático durante el siglo XXI pueda reducir los recursos de aguas superficiales y subterráneas renovables significativamente en la mayoría de regiones subtropicales secas, y provoque la intensificación de la competencia por el agua entre sectores. En las regiones secas actuales, es probable que la frecuencia de las sequías aumente a finales del siglo XXI bajo el escenario *RCP 8,5*. Por el contrario, se prevé que los recursos hídricos puedan aumentar en latitudes altas. El cambio climático puede reducir la calidad del agua cruda y plantean riesgos para la calidad del agua potable, incluso con el tratamiento convencional, debido a factores que interactúan, como el aumento de la temperatura, el aumento de sedimentos, nutrientes, y las cargas de contaminantes de

fuertes lluvias. Además del aumento de la concentración de contaminantes durante las sequías y la interrupción de las instalaciones de tratamiento durante las inundaciones.

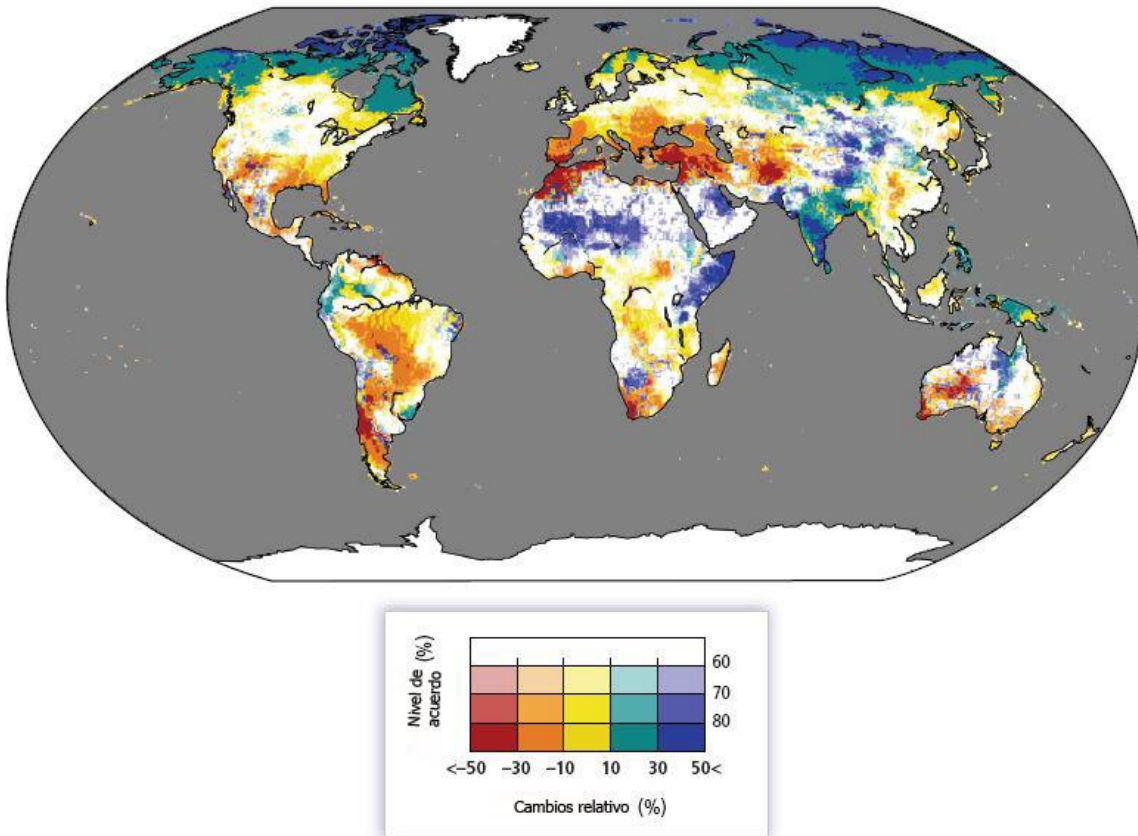
De acuerdo al IPCC (2014), los principales elementos que se han encontrado desde el AR4 respecto al agua son los siguientes:

- Los impactos observados y proyectados del cambio climático sobre los sistemas de agua dulce y su gestión se deben principalmente a los aumentos de la temperatura y el nivel del mar, así como los cambios locales y variabilidad en la precipitación.
- Las zonas áridas y semiáridas están particularmente expuestas.
- Agua con mayor temperatura, precipitación más intensa, y períodos más largos de bajo caudal van reducir la calidad del agua, con impactos en los ecosistemas, la salud humana y los costos operativos de los servicios de agua.
- El cambio climático afecta a la infraestructura y la gestión del agua.
- Los impactos negativos del cambio climático en los sistemas de agua dulce se prevén mayores que sus beneficios.

Ante estos escenarios se requerirá la adopción de técnicas de gestión adaptativa del agua, mayor planificación de escenarios, y enfoques basados en el aprendizaje y soluciones flexibles que pueden ayudar a crear capacidad de resiliencia a los cambios hidrológicos inciertos e impactos debidos al cambio climático.

De acuerdo al IPCC (2014) la distribución estacional de cambio en el caudal varía principalmente con la distribución estacional de cambio en las precipitaciones, que a su vez varía entre los escenarios VCR. El gráfico 42 ilustra esta variabilidad, que muestra el porcentaje de cambio en la esorrentía media anual en una serie de zonas de captación de las diferentes regiones a través de los escenarios, representando un aumento de 2 ° C en la temperatura media global respecto al periodo 1961-1990.

Gráfico 42. Variación (%) del caudal medio anual a 2 °C



Fuente: (IPCC, 2013).

## 5.5 Cambios en la circulación atmosférica

### 5.5.1 Cambios de corto plazo en la circulación atmosférica

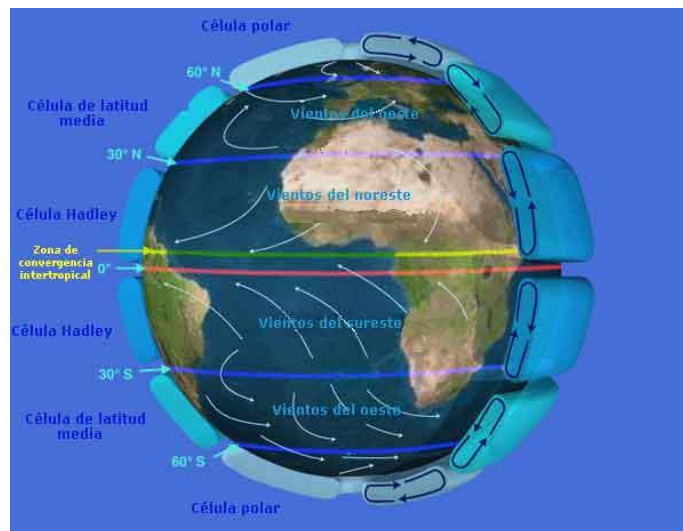
La variabilidad del clima generada por los factores de forzamiento radiativo como GEI, ozono y los aerosoles antropogénicos, contribuye a los cambios a corto plazo en la circulación atmosférica.

Es probable que la circulación de la célula de Hadley, que domina la circulación global atmosférica en las latitudes ecuatoriales y tropicales, así como los vientos del oeste de latitudes medias del hemisferio sur sufra un desplazamiento hacia los polos, lo que implica un ensanchamiento de la célula (ver gráfico 43). Es probable que la recuperación prevista del ozono estratosférico tendrá efectos contrapuestos sobre el ancho de la circulación de Hadley y la posición meridional de la trayectoria de las tormentas del hemisferio sur, respecto a lo apuntado respecto al aumento de las concentraciones de gases de efecto

invernadero, contraponiéndose a que la extensión hacia el polo sea con mayor rapidez que lo percibido en las últimas décadas.

Hay poca confianza en las proyecciones a corto plazo de cambios en la posición, dirección y la fuerza de las tormentas del hemisferio norte. Las variaciones naturales son más grandes que el impacto proyectado de gases de efecto invernadero en el corto plazo.

Gráfico 43. Circulación de Hadley



Fuente: NASA<sup>71</sup>

### 5.5.2 Cambios de largo plazo en la circulación atmosférica

En el largo plazo, los cambios proyectados en la energía y los ciclos del agua coinciden con los cambios en la circulación atmosférica. Se proyecta que la presión media a nivel del mar disminuya en las latitudes altas y se incremente en las latitudes medias conforme las temperaturas globales aumenten. En los trópicos, las circulaciones de Hadley y de Walker, esta última clave en el fenómeno de El Niño y La Niña (ENOS), es probable que reduzcan su velocidad.

La célula de Hadley aumenta su probabilidad de ampliación conforme va disminuyendo asimismo su velocidad, lo que se traduce en regiones tropicales más amplias y una invasión hacia los polos de las zonas secas subtropicales. Esto se halla en los escenarios VCR, que revelan que un aumento de gases de efecto invernadero, especialmente CO<sub>2</sub>, contribuye significativamente al debilitamiento de las células a su retorno a zonas tropicales, mediante la reducción del enfriamiento radiativo en la atmósfera superior.

<sup>71</sup> Tomado de <http://sealevel.jpl.nasa.gov/overview/climate-climatic.html>

Los cambios en la intensidad de la circulación de Walker también estarían vinculados a la diferencia de calentamiento entre el calentamiento de la India y el Océano Pacífico en latitudes bajas. Sin embargo, el debilitamiento previsto de la célula del Pacífico Walker no implica un aumento en la frecuencia o magnitud de los eventos de El Niño.

Bajo las VCR, hacia finales del siglo XXI será más probable el desplazamiento apuntado hacia los polos en los vientos de latitud media, en alrededor de 1 a 2 grados de latitud en ambos hemisferios, aunque con cambios más débiles en el hemisferio norte. Este desplazamiento es probable de alrededor de 1° en el hemisferio norte y de 2° en el hemisferio sur. Existe una incertidumbre sustancial, y por lo tanto hay baja confianza, en la proyección de los cambios en la trayectoria de las tormentas del hemisferio norte, especialmente para la cuenca del Atlántico Norte. Patrones similares de cambio de presión a nivel del mar se encuentran en las tendencias observadas durante las últimas décadas, lo que sugiere un cambio ya detectable, aunque los patrones observados están influenciados tanto por fuerzas naturales y antropogénicas, así la variabilidad interna y la importancia relativa de estas influencias es probable que cambie en el futuro, tomando fuerza la influencia de las actividades antropogénicas.

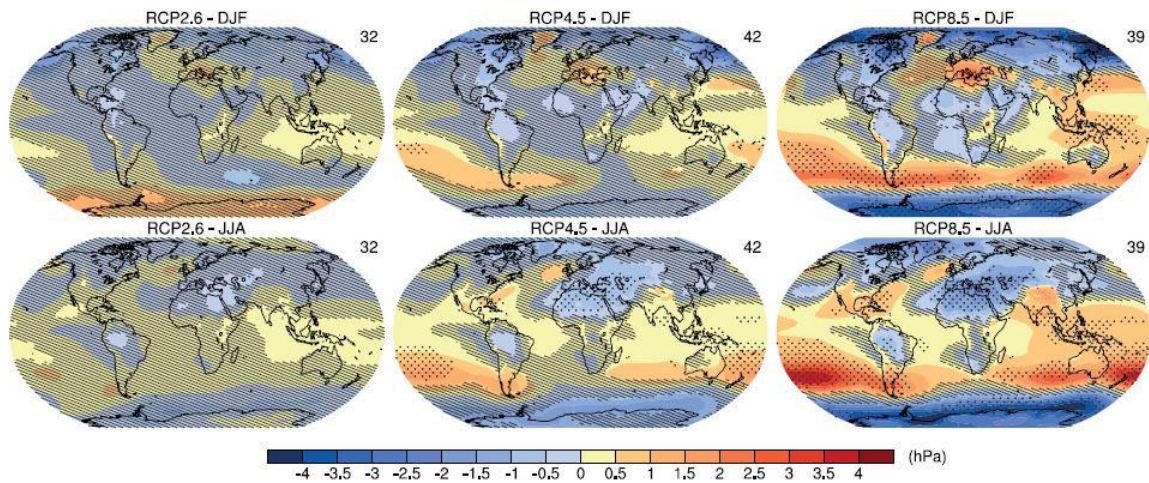
Por otra parte, se da un fortalecimiento de los vientos del oeste en todos los escenarios VCR, con los cambios más grandes en la cuenca del Pacífico.

En todos los escenarios VCR se encuentra que los grandes aumentos estacionales en la presión a nivel del mar se dan en las regiones secas subtropicales como el Mediterráneo y el norte de África y Australia. Por su parte, se espera una disminución en el Pacífico ecuatorial oriental, que se asocia con el debilitamiento de la circulación de Walker.

Conforme más forzamiento radiativo muestra el escenario VCR, se esperan más cambios futuros en los vientos zonales en toda la atmósfera. Los grandes aumentos en los vientos son evidentes en la estratosfera tropical y un desplazamiento hacia los polos y la intensificación del chorro troposférico del hemisferio sur, asociado con un aumento en la temperatura en la troposfera superior. En el hemisferio norte, la respuesta del chorro troposférico es más débil, así como el aumento térmico que provoca la amplificación polar.

El gráfico 44 muestra el patrón de cambio de la presión a nivel del mar para *RCP 2,6*, *RCP 4,5* y *RCP8.6*. Entre mayor es el escenario de forzamiento radiativo, mayor es la distribución espacial de zonas con mayor presión medida en hecto pascales (hPa), asimismo se ve una mayor disminución en los polos.

Gráfico 44. Cambios estacionales en la presión media a nivel del mar



Fuente: (IPCC, 2013).

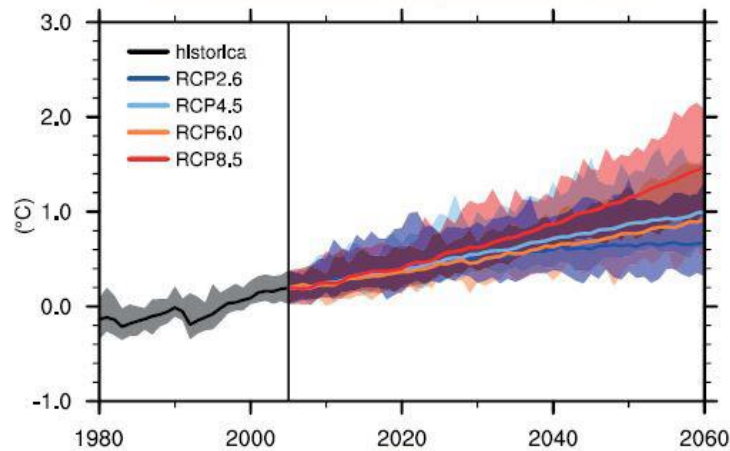
## 5.6 Cambios en los océanos

### 5.6.1 Cambios proyectados en el corto plazo para los océanos

Es muy probable un aumento en el corto plazo en el promedio mundial de la temperatura la superficie y la temperatura medida verticalmente en el océano. Es muy probable que para el periodo 2016-2035, la temperatura media global en la superficie y en la profundidad del mar serán más cálidas respecto al periodo 1986-2005. En el gráfico 45, el aumento en la temperatura en la superficie del mar es sostenida, a excepción del *RCP 2,6*, que antes de la mitad del siglo va estabilizándose.



Gráfico 45. Cambio en la temperatura media global en la superficie del mar

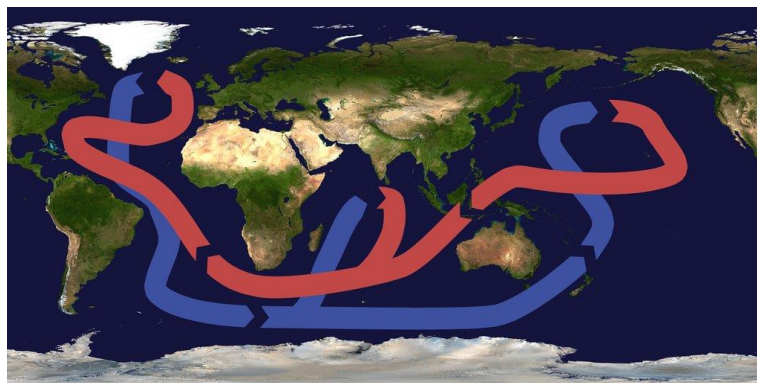


Fuente: (IPCC, 2013).

Es probable que la salinidad se incrementará en el trópico y especialmente en el Atlántico subtropical y disminuya en el oeste del Pacífico tropical, este proceso se espera que comience ya durante las décadas más próximas, aunque como se verá será más débil durante las primeras dos décadas.

En general, es probable que habrá un cierto descenso en la circulación termohalina del Atlántico en 2050, aunque el ritmo y la magnitud de debilitamiento es muy incierto. La circulación termohalina es la circulación oceánica a gran escala que es determinada por los gradientes de densidad globales producto del calor en la superficie y los flujos de agua dulce, con una significativa participación en el flujo neto de calor desde las regiones tropicales hacia las polares, y su influencia sobre el clima terrestre (ver gráfico 46).

Gráfico 46. Circulación termohalina



Fuente: Thermohaline\_circulation.png<sup>72</sup>

<sup>72</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermohaline\\_circulation.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermohaline_circulation.png)



### 5.6.2 Cambios de largo plazo en los océanos

Las proyecciones de aumento en la temperatura superficial del mar, la salinidad y el contenido de calor del océano es relativamente insensible a la trayectoria de las emisiones de GEI durante las próximas dos décadas, sin embargo, los resultados proyectados cambian conforme el siglo avanza. En el transcurso del siglo, los océanos del mundo se calentarán en todos los escenarios y las diferencias en los cambios de temperatura del océano proyectados para las diferentes VCR se manifiestan más notablemente a medida que avanza el siglo XXI.

El calentamiento de los océanos más fuerte se proyecta para la superficie en las regiones tropicales y subtropicales. A mayor profundidad se proyecta que el calentamiento es más pronunciado en el Océano Antártico. Las mejores estimaciones de calentamiento del océano a finales del siglo XXI en los cien primeros metros, y son alrededor de 0,6 °C para el *RCP 2,6* y de 2,0 °C para el *RCP 8,5*. Para los primeros mil metros, estas estimaciones son de 0,3 °C para *RCP 2,6* y 0,6 °C para el *RCP 8,5* a una profundidad de aproximadamente 1 km.

Cuadro 5. Cambio en temperatura global sobre la superficie del mar

	<i>RCP 2,6</i>	<i>RCP 4,5</i>	<i>RCP 6,0</i>	<i>RCP 8,5</i>
<b>Océanos: 2081–2100</b>	0,8 ± 0,4	1,5 ± 0,4	1,9 ± 0,4	3,1 ± 0,6

Fuente: (IPCC, 2013).

Además del calentamiento de nivel superior, los patrones se caracterizan además por un ligero enfriamiento en algunas partes de la zona norte de latitudes medias y altas por debajo de 1000 metros y una absorción de calor pronunciada en las profundidades del Océano Antártico a finales del siglo XXI.

Debido a las grandes escalas de tiempo de esta transferencia de calor desde la superficie hasta la profundidad, el calentamiento del océano continuará durante siglos, incluso si las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen o concentraciones mantienen constantes, y dará lugar a una contribución continuada a la subida del nivel del mar.

Hay un alto nivel de acuerdo que el calentamiento del océano y los cambios en circulación de sus corrientes reducirán la velocidad de absorción del carbono oceánico en el Océano Antártico y el Atlántico Norte, no obstante, la captación de carbono persistirá en esas regiones.

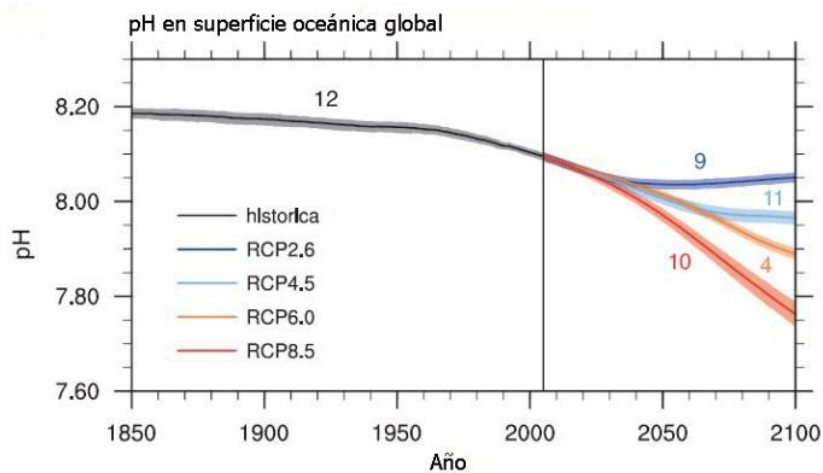
La fracción de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera que se disuelve en el océano reduce el pH del océano superficial y las concentraciones de iones de carbonato. Es prácticamente seguro

que la mayor capacidad de almacenamiento de carbono en el océano aumentará su acidificación en el futuro por la reducción del pH, continuando con las tendencias observadas de las últimas décadas.

La acidificación del océano en la superficie del océano seguirá con la mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya que también aumentará en las profundidades del océano en forma del CO<sub>2</sub> que sigue penetrando los océanos.

Todos los escenarios VCR son consistentes en todo el mundo en cuanto el aumento de la acidificación del océano hacia 2100. La disminución del pH correspondiente en la superficie del océano a finales de siglo XXI es 0,065 en *RCP 2,6*, 0,145 en *RCP 4,5*, 0,203 en *RCP 6,0* y 0,31 en *RCP 8,5* (ver gráfico 47). Como es de esperar, conforme mayor es el forzamiento radiativo del escenario VCR, menor es el pH proyectado.

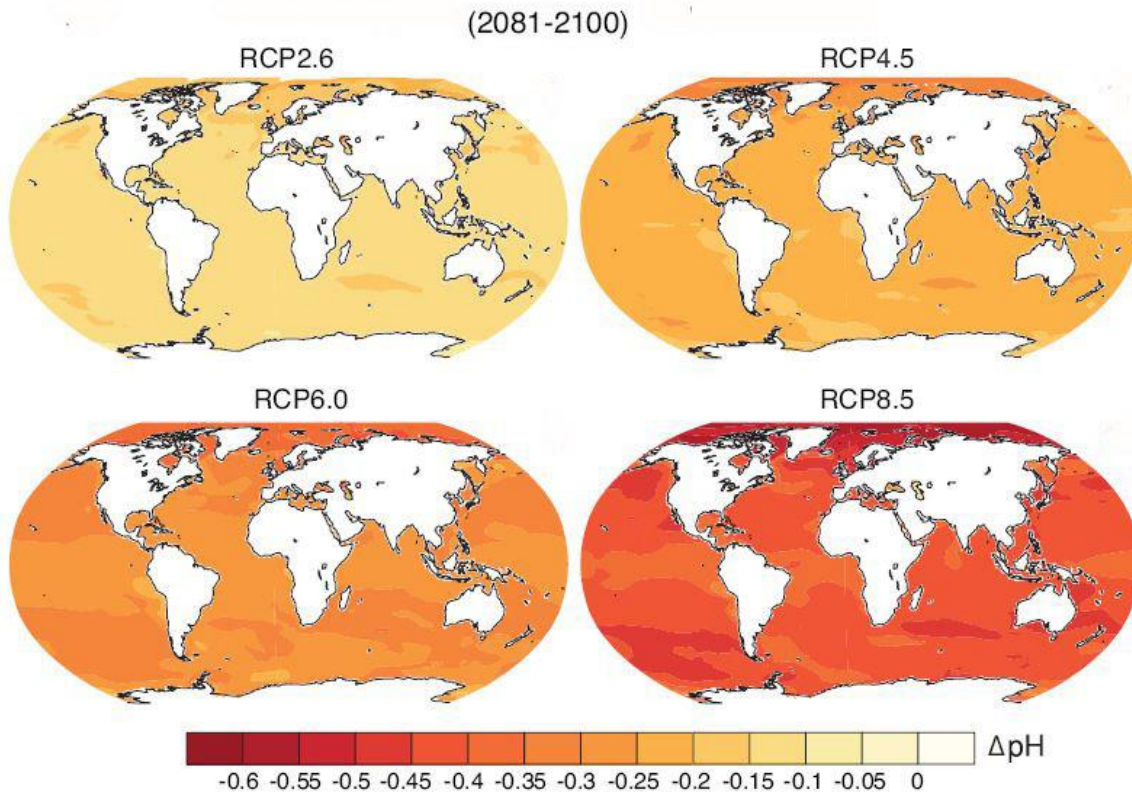
Gráfico 47. Acidificación global en la superficie oceánica



Fuente: (IPCC, 2013).

La distribución proyectada en la acidificación de los océanos para cada uno de los escenarios se muestra en el gráfico 48, y se destaca a mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> asociadas a cada escenarios implica mayor disminución del pH y viceversa.

Gráfico 48. Cambio en pH en superficie del océano

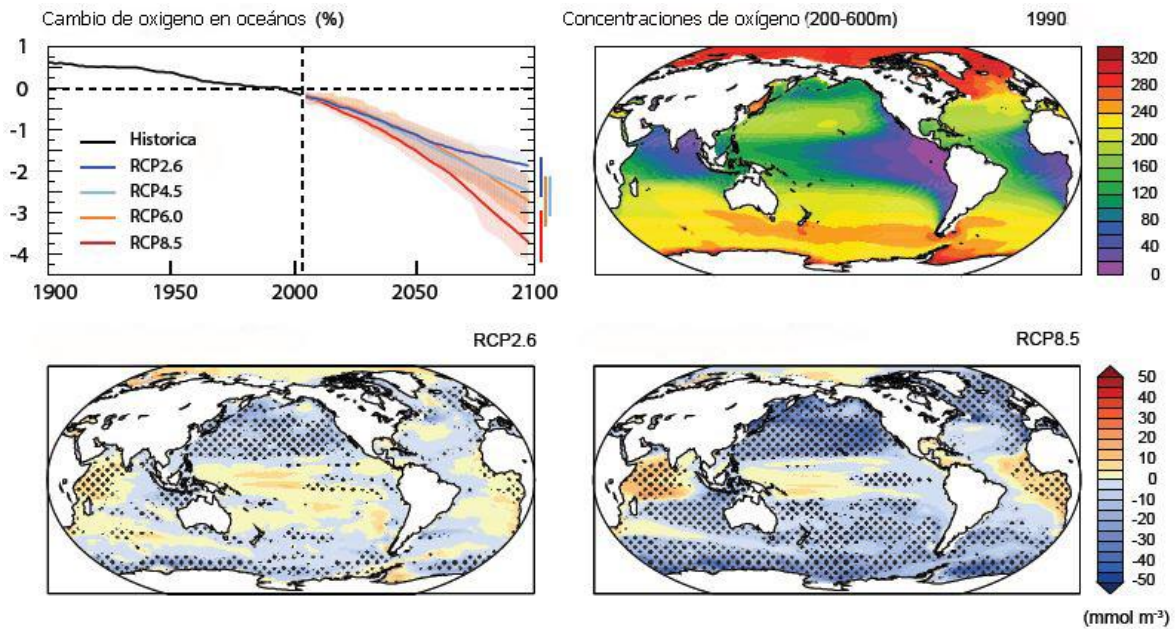


Fuente: (IPCC, 2013).

Es muy probable que el calentamiento global conducirá a la disminución del  $\text{O}_2$  disuelto en el interior del océano, a través de la reducción del calentamiento inducido por la solubilidad del  $\text{O}_2$  y una mayor estratificación del océano. Esto tendrá implicaciones para los nutrientes y el ciclo del carbono, la productividad del océano y los hábitats marinos.

Los cambios simulados en el  $\text{O}_2$  disuelto con respecto a 1990 se muestran en el gráfico 49 para *RCP 2,6*, *RCP 4,5*, *RCP 6,0* y *RCP 8,5*. Los mapas parten de la distribución de concentraciones de oxígeno para 1990, para una profundidad media entre 200 a 600 m. Además, los mapas muestran los dos escenarios extremos de *RCP 2,6* y *RCP 8,5*, en los que se grafica los cambios resultantes en las concentraciones y apuntan que los escenarios de mayor concentración de carbono tiene un mayor impacto en la reducción de oxígeno en los océanos.

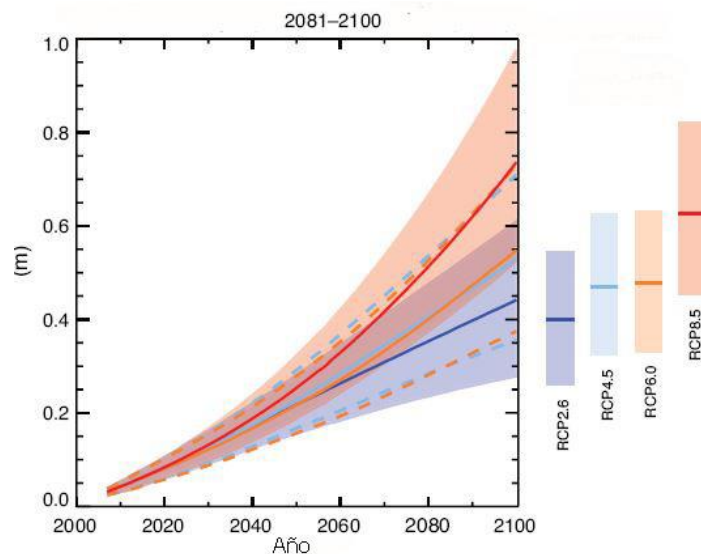
Gráfico 49. Cambios de oxígeno en los océanos



Fuente: (IPCC, 2013).

El aumento global en el nivel del mar para el periodo 2081-2100, en relación a 1986-2005 para las VCR se encuentra en los rangos de 0,26 a 0,55 m para el RCP 2,6, 0,32 a 0,63 m para RCP 4,5, 0,33 a 0,63 m para el RCP 6,0 y 0,45 m a la 0,82 m para el RCP 8,5. En el gráfico 50 se muestran las proyecciones para los diferentes escenarios.

Gráfico 50. Media global de aumento en el nivel del mar



Fuente: (IPCC, 2013).

En todos los escenarios VCR, la expansión térmica es la mayor contribución del aumento en el nivel del mar, que representa aproximadamente el 30-55% del total. El derretimiento de los glaciares representa el 15-35% de dicha contribución. En el año 2100, del 15% al 55% de este volumen glaciar se proyecta a ser eliminados bajo *RCP 2,6*, y de 35% a 85% para *RCP 8,5*.

El nivel del mar en términos regionales va a cambiar debido a los cambios en la circulación oceánica, los cambios en el contenido de calor del océano, la redistribución de masas en todo el sistema del planeta y los cambios en la presión atmosférica. Los cambios en la circulación oceánica resultan de los cambios en el viento y el forzamiento de la flotabilidad, producto de la dinámica del calor y del agua dulce. La pérdida de masas de capa de hielo, la pérdida de masa glaciar y cambios en la hidrología causa la redistribución de masa terrestre del agua entre la criósfera, la tierra y los océanos, dando lugar a cambios regionales distintivos. En algunas localidades costeras, los cambios en el ciclo hidrológico y el hundimiento del suelo asociados con la actividad antropogénica, procesos tectónicos y los procesos costeros, pueden dominar el cambio de nivel relativo del mar, es decir, el cambio de la altura en la superficie del mar respecto a la superficie terrestre.

Es muy probable que más del 95% de los océanos van a experimentar el aumento del nivel relativo del mar regional, mientras que la mayoría de las regiones que experimentan una caída del nivel del mar se encuentran cerca de los glaciares y las capas de hielo. Los cambios locales del nivel del mar se desvían de un 10% a una 30% de la proyección media global, lo que indica que las variaciones espaciales pueden ser grandes. Los cambios regionales en el nivel del mar de hasta un 30% se proyectan en el Océano Antártico y alrededor de América del Norte.

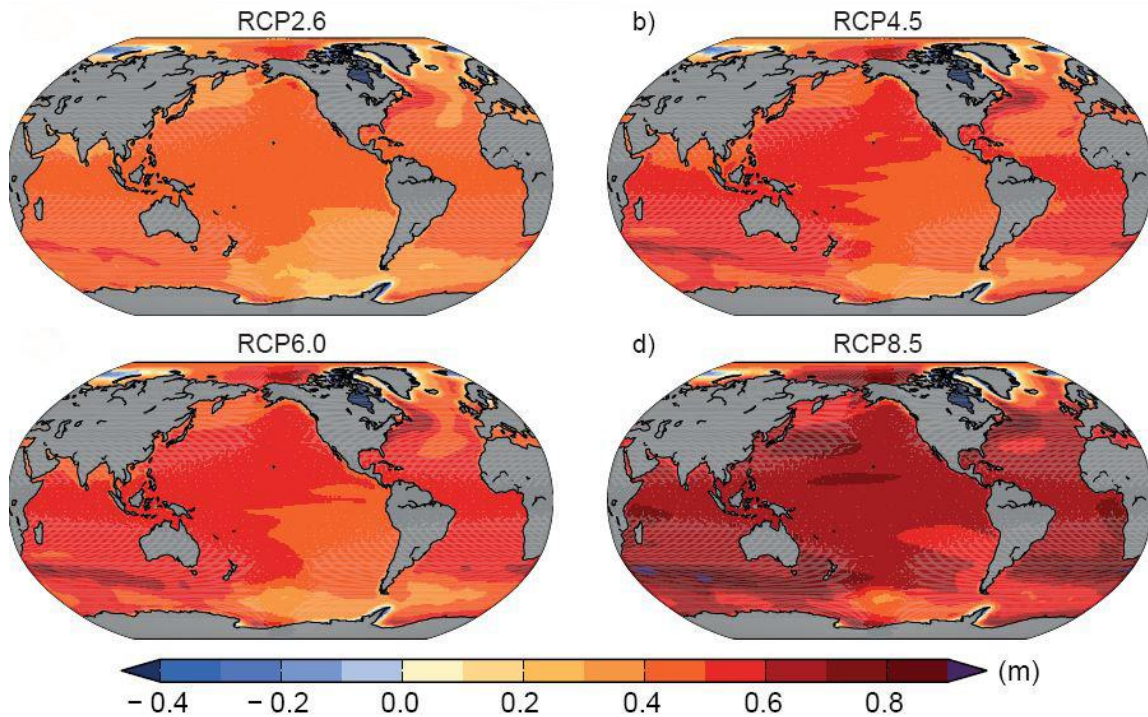
En las regiones ecuatoriales se espera una desviación respecto al nivel global de entre el 10% y el 20%, y hasta un 50% por debajo de la media global en la región del Ártico y algunas regiones cerca de la Antártida. Alrededor del 70% de las costas de todo el mundo se prevé que experimentará un cambio de nivel relativo del mar dentro del 20% respecto al nivel global. En el gráfico 51 se observa la distribución de los cambios en el nivel del mar.

Los cambios en las condiciones de olas oceánicas están determinadas por los cambios en los principales sistemas de viento, especialmente en las principales zonas afectadas por las tormentas tropicales y extra-tropicales. A pesar de las influencias antropogénicas sean consideradas, es probable que las tendencias durante el último medio siglo reflejan en gran medida las variaciones naturales en el forzamiento del viento.



Por otro lado, las recientes reducciones en la extensión del hielo marino en verano han dado lugar a una mayor actividad de las ondas en el Océano Ártico debido a la mayor área de las aguas abiertas.

Gráfico 51. Distribución espacial del cambio en el nivel del mar



Fuente: (IPCC, 2013).

### 5.6.3 Sistemas marinos

Debido al cambio climático previsto a partir de mediados del siglo XXI, la redistribución mundial marina-especies y la reducción de la biodiversidad marina en las regiones sensibles pondrán a prueba el suministro sostenido de la productividad de la pesca y otros servicios de los ecosistemas. Los desplazamientos espaciales de las especies marinas debido al calentamiento proyectado causarán invasiones de latitudes altas y altas tasas de extinción local en las zonas tropicales y mares semi-cerrados. La riqueza de especies y la pesca potencial prevé un aumento en promedio en latitudes medias y altas y disminución en las latitudes tropicales.

La expansión progresiva de zonas con disminución en el mínimo oxígeno y zonas anóxicas se proyecta que va a limitar aún más el hábitat de diversas especies de peces. Sobre alta mar, la producción primaria neta se proyecta con una caída hacia el 2100 en todos los

escenarios VCR. Al cambio climático se le suman las amenazas de sobrepesca y otros factores de estrés no climáticos.

En escenarios de alta emisión como el *RCP 4,5*, *RCP 6,0* y *RCP 8,5*, la acidificación del océano supone riesgos considerables para los ecosistemas marinos, especialmente los ecosistemas polares y los arrecifes de coral, asociados con los impactos en la fisiología, el comportamiento y la dinámica de poblaciones de especies individuales desde el fitoplancton a los animales. Los moluscos altamente calcificadas, equinodermos, y los corales formadores de arrecifes son más sensibles que los crustáceos y peces, con consecuencias potencialmente perjudiciales para la pesca y los medios de vida. La acidificación del océano actúa junto con otros cambios globales como el calentamiento y la disminución de los niveles de oxígeno, que sumados a cambios locales como la contaminación y la eutrofización aumentan el riesgo para la subsistencia de diversas especies marinas y actividades económicas, al igual que para los ecosistemas.

## 5.7 Cambios en la criósfera

### 5.7.1 Cambios de corto plazo en la criósfera

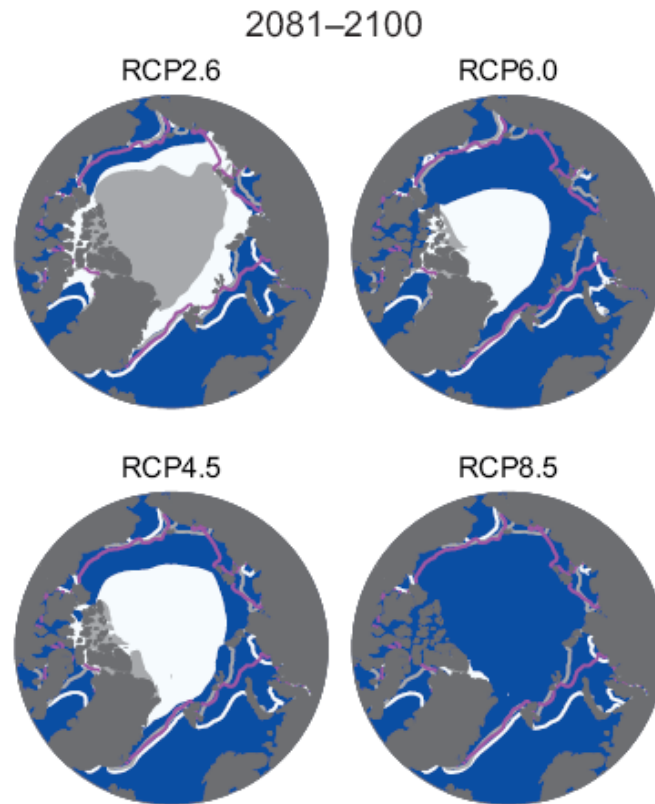
Los escenarios VCR proyectan que el océano Ártico reduzca su cobertura de hielo sensiblemente para los meses de setiembre, que puede implicar un periodo casi libre de hielo bajo el escenario *RCP 8,5*. Es muy probable que conforme la temperatura media global aumente, habrá mayor reducción y adelgazamiento de la capa de hielo marino en el Ártico, así como una disminución de la capa de nieve en latitudes altas del norte durante la primavera, así como cerca de la superficie del permafrost. Hay poca confianza en disminuciones proyectadas a corto plazo en la extensión y el volumen del hielo marino de la Antártida.

### 5.7.2 Cambios de largo plazo en la criósfera

Es muy probable que la cubierta de hielo marino en el Ártico continuará la contracción y el adelgazamiento en el curso del siglo XXI, conforme se eleva la temperatura media global. Al mismo tiempo, en la Antártida se espera una disminución de la extensión y volumen del hielo marino, pero en una menor magnitud. Las proyecciones de los múltiples modelos CMIP5 dan reducciones medias en la extensión del hielo marino del Ártico para 2081-2100 en comparación con 1986-2005 que van desde 8% para *RCP 2,6* al 34% para *RCP 8,5* en febrero y del 43% para *RCP 2,6* a 94 % para *RCP 8,5* en setiembre. Se espera una disminución de hielo en setiembre en el Ártico, con un escenario casi libre de hielo bajo el *RCP 8,5*, tal y como se puede ver en el gráfico 52.



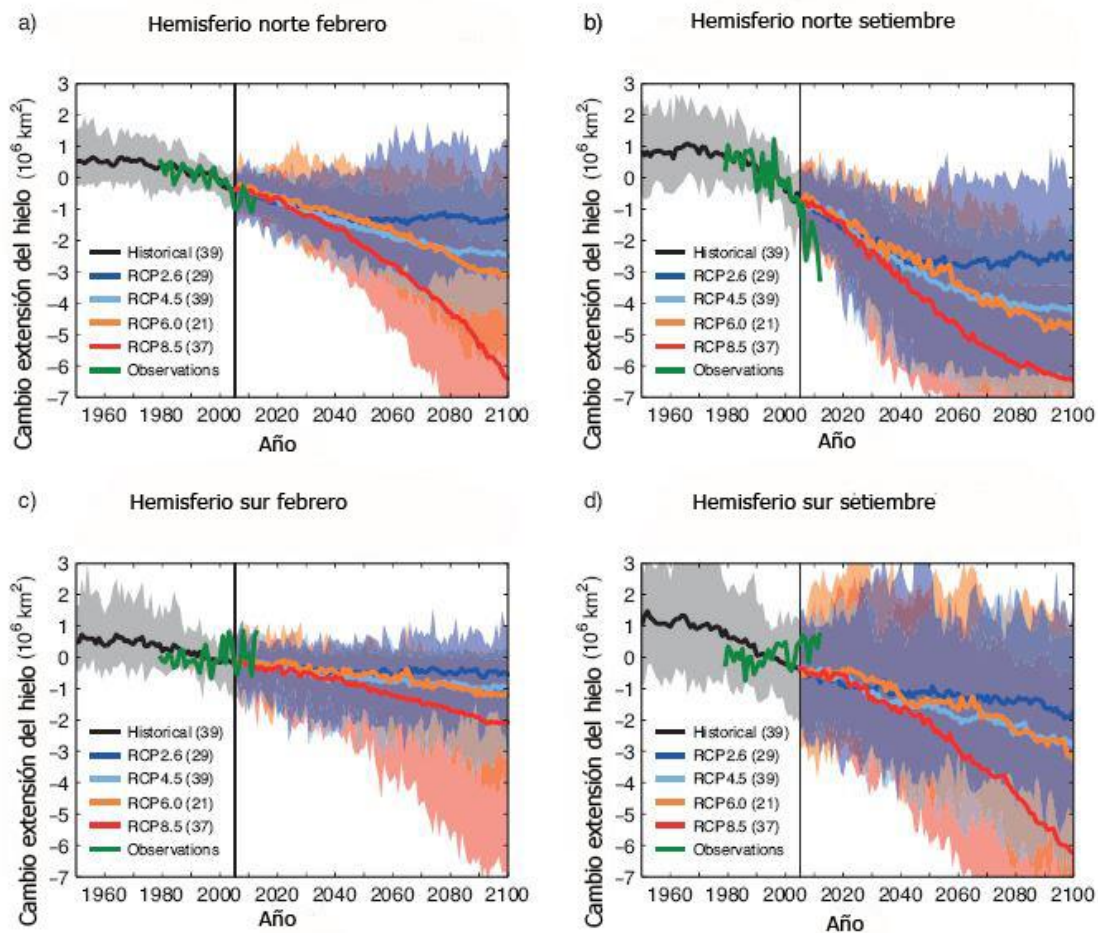
Gráfico 52. Cambios proyectados en la cubierta de hielo en los polos



Fuente: (IPCC, 2013).

En el gráfico 53 se muestran las proyecciones de los escenarios VCR de la extensión del hielo esperado para ambos polos para dos periodos extremos anuales como lo son los meses de febrero y setiembre. El IPCC (2013) encuentra que inequívocamente, a mayores concentraciones de GEI, mayor en la pérdida de hielo. En el hemisferio sur sólo febrero se muestra con una pérdida pronunciada, la que coincide con el verano austral, sin embargo, en el hemisferio norte el patrón de pérdida de hielo es pronunciado tanto en verano como en invierno, especialmente con los escenarios de mayor forzamiento radiativo, y con el RCP 8,5 los patrones de disminución son muy parecidos en ambos periodos del año.

Gráfico 53. Extensión del hielo esperado para los polos



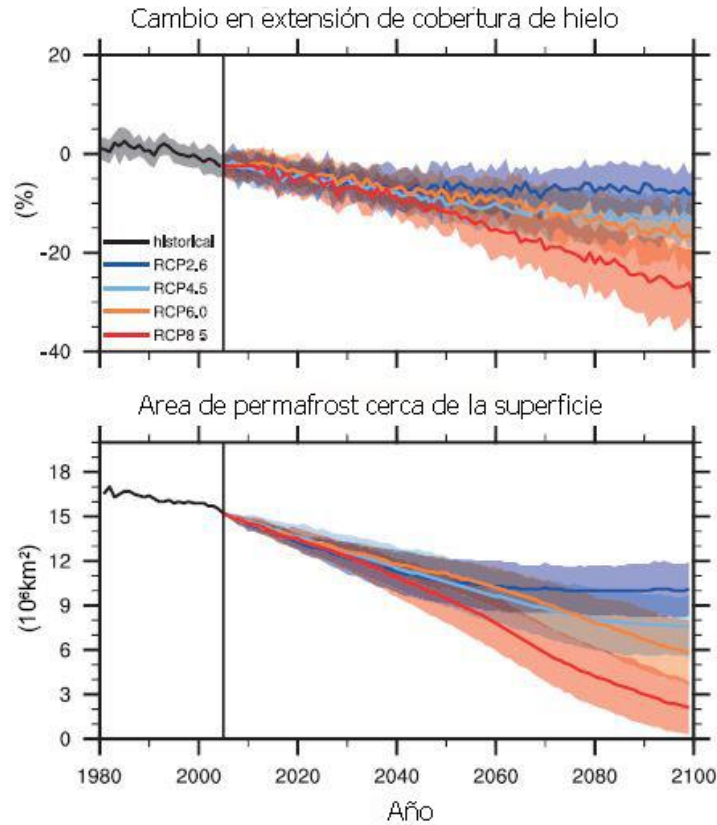
Fuente: (IPCC, 2013).

Hay poca evidencia en las VCR sobre un punto de inflexión en la transición de un océano Ártico estacionalmente libre de hielo a un escenario con la pérdida de hielo marino imparabile e irreversible. En la Antártida la disminución proyectada para 2081-2100 en la extensión del hielo marino va de 16% para *RCP 2,6* a 67% para *RCP 8,5* en febrero y del 8% para *RCP 2,6* al 30% para *RCP 8,5* en septiembre. Sin embargo, hay poca confianza en estas proyecciones, debido a la incapacidad de casi todos los modelos disponibles para reproducir el aumento global de la superficie cubierta de hielo marino de la Antártida.

Es muy probable que la capa de nieve en el hemisferio norte se reducirá según aumenta la temperatura global durante el siglo. Una reducción del permafrost es muy probable con el aumento de la temperatura global. Los cambios proyectados en el permafrost son una respuesta no sólo al calentamiento, sino también a los cambios en la cubierta de nieve, que ejerce un control sobre el suelo subyacente, y se proyecta que a finales del siglo XXI, la disminución del permafrost esté entre un 37% para *RCP 2,6* al 81% para *RCP 8,5*. Las

proyecciones del descenso a finales del siglo de la cubierta de hielo en el hemisferio en primavera varían entre un descenso del 7 % en el *RCP 2,6* a 25% en el *RCP 8,5* (ver gráfico 54).

Gráfico 54. Cambios en la cobertura de nieve en zonas de permafrost



Fuente: (IPCC, 2013).

## 5.8 Fenómenos climáticos regionales

Se prevén cambios durante el siglo XXI en gran escala de los fenómenos climáticos que afectan el clima regional. Algunos de estos fenómenos están definidos por la climatología como por ejemplo los monzones, mientras que algunos por la variabilidad interanual, como por ejemplo El Niño. Estos fenómenos afectan las condiciones climáticas extremas, como inundaciones, sequías y olas de calor, así como los ciclones tropicales y las tormentas extra-tropicales.

### 5.8.1 Sistemas monzónicos

Las medidas globales de la precipitación del monzón es probable que aumenten en el siglo XXI, mientras que la circulación del monzón se prevé que se debilite. Las fechas de comienzo del monzón pueden llegar a ser más temprano o no cambiar mucho, mientras que las fechas de retirada del monzón son propensos a retrasarse, lo que resulta en una prolongación de la temporada del monzón en muchas regiones. El aumento de la precipitación media estacional se manifiesta en los monzones de verano en Asia oriental y meridional, mientras que el cambio en otras regiones del monzón está sujeto a incertidumbres más grandes.

La variabilidad de la precipitación interanual relacionada con el monzón se incrementará en el futuro. Los aumentos futuros de las precipitaciones extremas relacionadas con el monzón es muy probable que en América del Norte, América del Sur, África, Asia Oriental, Asia del Sur, el Sudeste de Asia y Australia.

### 5.8.2 Fenómenos Tropicales

Respecto a los fenómenos tropicales, los cambios en las precipitaciones aumentan en algunas regiones y disminuyen en otras. La distribución espacial de los cambios en las precipitaciones tropicales probablemente está determinada por el patrón actual de calentamiento en el clima y del océano. El primer efecto es aumentar la precipitación cerca de las regiones actualmente lluviosas, y el segundo efecto aumenta las precipitaciones en donde el calentamiento del océano es superior a la media tropical.

Se prevé un aumento de la precipitación media estacional en el flanco ecuatorial de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y una disminución de las precipitaciones en las regiones subtropicales, incluyendo partes de América del Norte y Central, el Caribe, América del Sur, África y Asia occidental. Además ocurren eventos interanuales en el Pacífico en zonas de convergencia, lo que podría provocar sequías más frecuentes en el Pacífico. Hay confianza media que la Zona de Convergencia del Atlántico Sur se desplazará hacia el sur, lo que lleva a un aumento de las precipitaciones en el sureste de América del Sur y una reducción inmediatamente al norte de la zona de convergencia.

El Océano Índico tropical es probable que cuentan con un patrón con calentamiento reducido y una la disminución de las precipitaciones en el este, alternando con aumentos en el calentamiento y en las lluvias en el oeste. Es muy probable que se mantenga activa el modo dipolo del Océano Índico de la variabilidad interanual, afectando a las condiciones climáticas extremas en el este de África, Indonesia y Australia.

Hay poca confianza en las proyecciones para el Atlántico tropical, debido a grandes errores en las simulaciones de modelos en la región, por lo que se tiene baja confianza en las

proyecciones futuras de huracanes en el Atlántico y la precipitación de América del Sur y África Occidental tropical.

### 5.8.3 ENOS: El Niño y La Niña

Hay un alto nivel de confianza que el fenómeno El Niño, dentro del ENOS, seguirá siendo el modo dominante de la variabilidad natural del clima en el siglo XXI, con sus influencias globales, y sus efectos en la variabilidad regional de lluvia que inducirá probablemente a una intensificación. Sin embargo, las variaciones naturales del patrón de amplitud y espacial de ENOS son tan grandes que la confianza en cualquier cambio proyectado para el siglo XXI sigue siendo baja y el cambio proyectado en la amplitud de El Niño es pequeño.

Sobre el Pacífico Norte y América del Norte, los patrones de temperatura y precipitación relacionadas con El Niño y La Niña son propensos a moverse hacia el este en el futuro, mientras que la confianza es baja de que se den los cambios en los efectos del clima en otras regiones, incluyendo América central y del Sur, el Caribe, África, la mayor parte de Asia, Australia y la mayoría de las islas del Pacífico. En un clima más cálido, el aumento de la humedad atmosférica se intensifica la variabilidad temporal de las precipitaciones, aunque la variabilidad de la circulación atmosférica sigue siendo la misma.

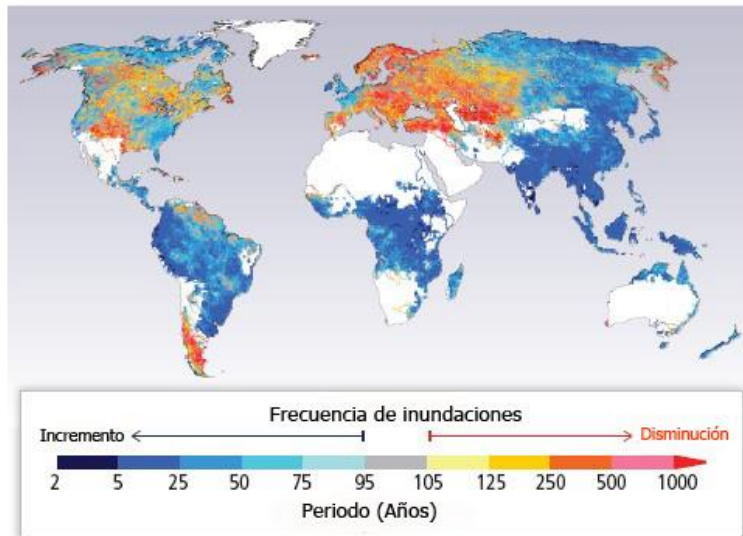
### 5.8.4 Ciclones

Las proyecciones para el siglo XXI indican que es probable que la frecuencia global de los ciclones tropicales disminuya o permanezca esencialmente sin cambios, concurrente con un probable aumento en ambos la velocidad del viento y la lluvia. La influencia del cambio climático futuro en los ciclones tropicales es probable que varían según la región. La frecuencia de las tormentas más intensas es más probable que no aumente en algunas regiones. Las precipitaciones más extremas cerca de los centros de ciclones tropicales al tocar tierra se proyectan en América del Norte y Central, África Oriental, Oeste, Este, Sur y Sudeste de Asia, así como en Australia y en muchas islas del Pacífico.

El número total de ciclones extra-tropicales es poco probable que disminuya y se espera un pequeño desplazamiento hacia los polos en el trayecto de las tormentas del hemisferio sur. Es poco probable que la respuesta de la trayectoria de las tormentas del Atlántico Norte en las proyecciones del clima es un simple desplazamiento hacia los polos. Hay también probabilidad de un desplazamiento hacia el polo proyectado en la trayectoria de las tormentas del Pacífico Norte. Más precipitaciones en los ciclones extra-tropicales conduce a un aumento de las precipitaciones de invierno en el Ártico, el norte de Europa, América del Norte y el hemisferio sur.

El gráfico 55 ofrece la distribución del riesgo de aumento de la frecuencia de inundaciones, en donde hay un aumento del riesgo en zonas tropicales y subtropicales, pese a que varias partes de Asia septentrional presentan incremento del riesgo.

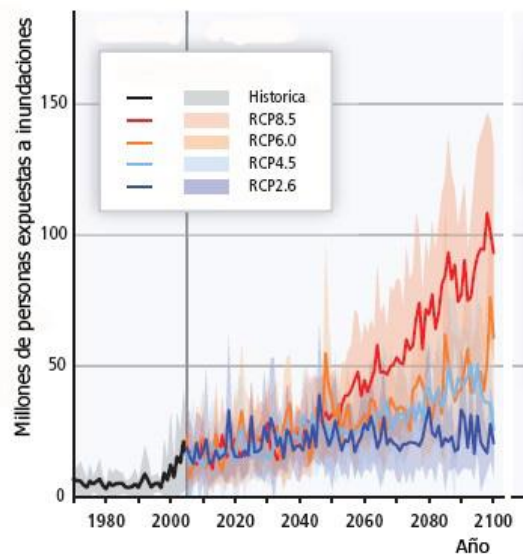
Gráfico 55. Cambios en la frecuencia de inundaciones



Fuente: (IPCC, 2013).

Por su parte, el gráfico 56 presenta el número de personas expuestas a las inundaciones se incrementa conforme mayor es el escenario de concentración de carbono.

Gráfico 56. Exposición humana a inundaciones



Fuente: (IPCC, 2013).



### 5.8.5 Principales riesgos del impacto del cambio climático

Si bien la influencia humana en el sistema climático es clara, la determinación de si dicha influencia constituye una injerencia antropogénica peligrosa varía en cada contexto regional. Sin embargo, asociado a los escenarios VCR se han definido cinco áreas de riesgo del impacto que puede derivarse de las consecuencias del calentamiento global y de la adaptación que deberán enfrentar las personas, las economías y los ecosistemas<sup>73</sup>. Ellos proporcionan un punto de partida para la evaluación de interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Los riesgos identificados son:

- 1) Sistemas únicos y amenazados: Algunos sistemas únicos y amenazados, incluidos los ecosistemas y culturas, ya están en riesgo desde el cambio climático. El número de tales sistemas en riesgo de consecuencias graves es mayor con un calentamiento adicional de alrededor de 1°C. Muchas especies y sistemas con limitada capacidad de adaptación están sujetas a riesgos muy altos con un calentamiento adicional de 2°C, en particular los sistemas ártico-hielo marino y los arrecifes de coral.
- 2) Los fenómenos meteorológicos extremos: los riesgos relacionados con el cambio climático a partir de los fenómenos extremos, como olas de calor, precipitaciones extremas e inundaciones costeras ya son moderados, y son altos con calentamiento adicional de 1 °C. Riesgos asociados con algunos tipos de eventos extremos, como calor extremo, aumentan aún más a temperaturas más altas.
- 3) La distribución desigual de los impactos: Los riesgos se distribuyen de manera desigual y en general son mayores para las personas desfavorecidas y las comunidades de países en todos los niveles de desarrollo. Riesgos ya son moderados debido a los impactos del cambio climático sobre regiones la producción de cultivos. Sobre la base de las disminuciones proyectadas en los rendimientos de los cultivos regionales y la disponibilidad del agua, los riesgos de impactos distribuidos de manera desigual son altas para el calentamiento adicional por encima de 2 °C.
- 4) los impactos agregados globales: Los riesgos de impactos agregados globales son moderados para el calentamiento adicional entre 1 °C y 2 °C, lo que refleja impactos a la biodiversidad tanto de la Tierra y la economía mundial en general. La pérdida de biodiversidad asociada con la extensa pérdida de bienes y servicios de los ecosistemas es un alto riesgo alrededor de 3 °C de calentamiento adicional. Los daños agregados de tipo económico se aceleran al aumentar la temperatura, pero pocos han sido estimados para un calentamiento adicional alrededor de 3 °C o superior.

---

<sup>73</sup> IPCC (2014)

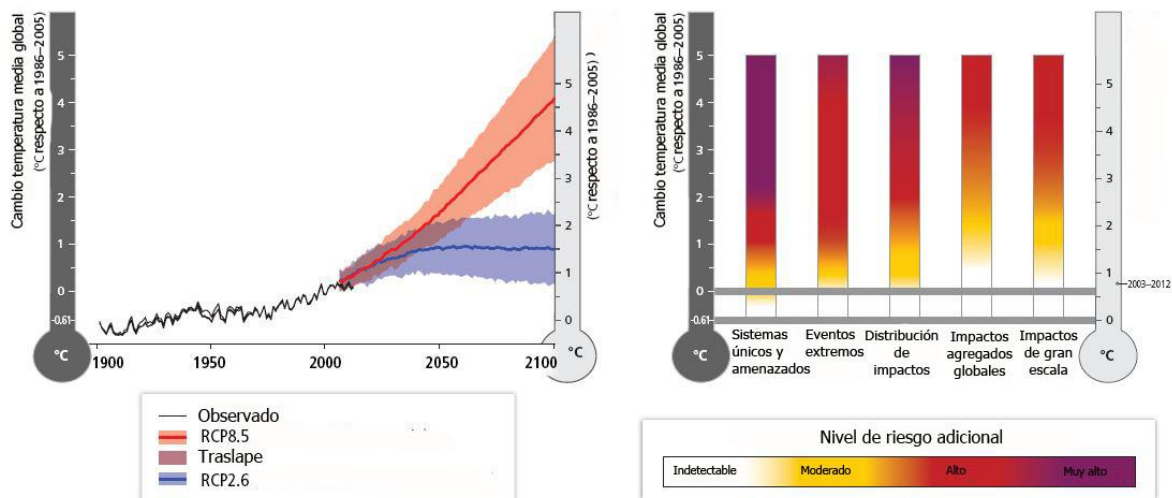
5) Acontecimientos singulares a gran escala: A medida que aumenta el calentamiento, algunos sistemas físicos o ecosistemas pueden estar en riesgo de abrupto y cambios irreversibles. Riesgos asociados a estos puntos de inflexión se comienza a dar con un rango hasta 1 °C de calentamiento adicional, debido a la temprana señales de advertencia de que tanto el agua caliente arrecifes de coral y los ecosistemas del Ártico ya están experimentando cambios de régimen irreversibles. Los riesgos aumentan de manera desproporcionada con los aumentos de temperatura en el rango entre 1 °C y 2 °C, y podrían ser muy altos con un calentamiento adicional por encima de 3 °C, debido a la posibilidad de un aumento grande e irreversible el nivel del mar y de la pérdida de la capa de hielo.

El gráfico 57 ofrece una perspectiva global sobre los riesgos relacionados con el cambio del clima. Las áreas de color indican el riesgo adicional debido al cambio climático cuando se alcanza un nivel de temperatura. El blanco señala el riesgo indetectable, que implica que no hay impactos asociados o no se puede atribuir al cambio climático.

Como referencia, el pasado y proyectado de temperatura superficial media global anual se muestra a la izquierda. Las proyecciones para el aumento de la temperatura se muestran para los escenarios *RCP 2,6* y *RCP 8,5*, al constituir los valores medios extremos esperados.

Es interesante observar que los riesgos generales de impactos del cambio climático pueden reducirse mediante la limitación de la tasa y magnitud del cambio climático. Los riesgos se reducen sustancialmente bajo el escenario evaluado con la proyección de temperaturas más bajas del *RCP 2,6*, en comparación con las proyecciones más altas de temperatura del *RCP 8,5*, sobre todo en la segunda mitad del siglo XXI.

Gráfico 57. Riesgos de impactos del cambio climático



Fuente: (IPCC, 2014).

Una gran parte de las especies terrestres y de agua dulce aumenta el riesgo de extinción debido al cambio climático proyectado durante y más allá del siglo XXI, especialmente en lo que el cambio climático interactúa con otros factores de estrés, tales como la modificación del hábitat, la sobreexplotación, la contaminación y las especies invasoras.

Este riesgo de extinción se incrementa en todos los escenarios VCR conforme aumenta con la magnitud y rapidez del cambio climático. Muchas especies no serán capaces de realizar un seguimiento adecuado del clima durante el siglo XXI bajo los escenarios medio y alto, es decir *RCP 4,5*, *RCP 6,0* y *RCP 8,5*, pero en el *RCP 2,6* se presentarán menos estos riesgos. Algunas especies se adaptarán a los nuevos climas si pueden adaptarse con la suficiente rapidez. Las regiones con mayor riesgo de este tipo deberán adoptar acciones de manejo como el mantenimiento de la diversidad genética, la migración y dispersión asistida de especies, así como la reducción de otros factores de estrés. Estas acciones de manejo pueden reducir el riesgo de impactos a los ecosistemas terrestres y de agua dulce debido al cambio climático, así como aumentar la capacidad inherente de los ecosistemas y sus especies para adaptarse al cambio climático.

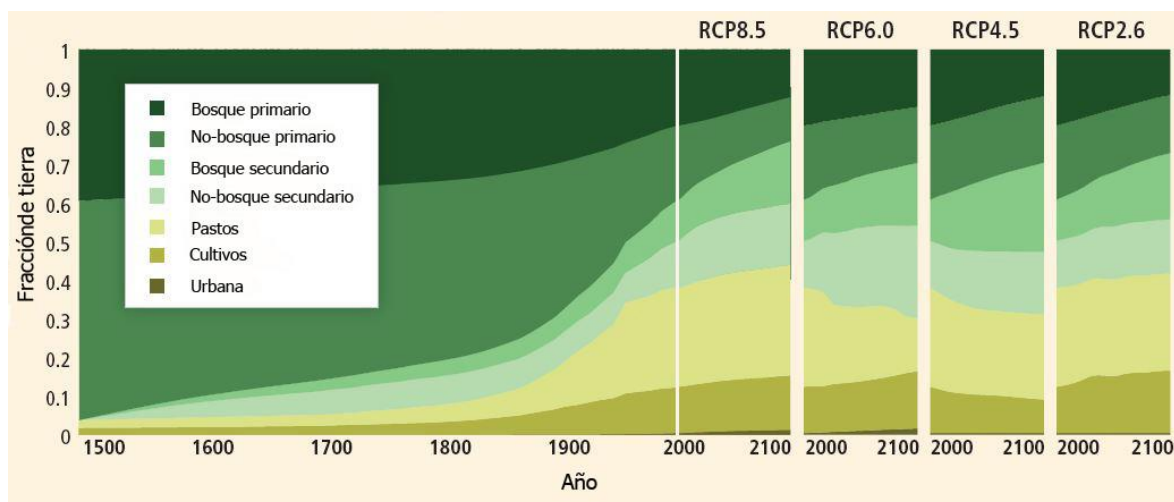
Las velocidades máximas a las que las especies pueden moverse a través de paisajes en comparación con las velocidades a las que se prevé que las temperaturas van a moverse a través de los paisajes, estará dependiendo de las intervenciones humanas, el transporte y la fragmentación del hábitat. Esta capacidad de movimiento afectará a los árboles, las plantas, los mamíferos, los insectos, y moluscos de agua dulce. Se considera que las especies con velocidades más lentas que el cambio de temperatura de su hábitat no podrán realizar un traslado adecuado en ausencia de la intervención y asistencia humana.

La magnitud y velocidad de cambio climático asociados con los escenarios medio a alto como el *RCP 4,5*, el *RCP 6,0* y *RCP 8,5* presentan un alto riesgo de cambio abrupto e irreversible a escala regional en la composición, estructura y función de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas de agua dulce, incluidos los humedales. Algunos ecosistemas que podrían experimentar un impacto sustancial por el clima son el sistema boreal-tundra ártica y la selva amazónica. El carbono almacenado en la biosfera terrestre, por ejemplo en las turberas, el permafrost y los bosques es susceptible a la expulsión a la atmósfera como resultado del cambio climático, la deforestación y degradación de los ecosistemas. El aumento de la mortalidad de árboles y la desaparición de los bosques asociados se prevé que se producen en muchas regiones durante el siglo XXI, debido al aumento de las temperaturas y la sequía. La desaparición de los bosques plantea riesgos para el almacenamiento de carbono, la biodiversidad, la producción de madera, la calidad del agua y la actividad económica.

Cada uno de los escenarios VCR utilizados para las proyecciones futuras del clima tiene un futuro escenario de uso de la tierra, que es consistente tanto con el escenario de emisiones como de concentraciones de cada escenario. En escenarios donde se proyecta que las tierras de cultivo y los pastos van a disminuir, son reemplazadas con vegetación secundaria. Para las regiones de bosques tropicales y boreales se proyectan una disminución de la cubierta forestal primaria en la mayoría de las VCR, pero para el *RCP 6,0* el área total de bosque se mantiene aproximadamente constante y en el *RCP 4,5* la superficie forestal total se expande debido al aumento del bosque secundario. La medida en que la vegetación primaria se sustituye por vegetación secundaria, cultivos, pastos o varía entre cada VCR, sin que haya una relación lineal entre la magnitud del cambio de la vegetación y el nivel de forzamiento radiativo total.

Las mayores reducciones en la cubierta vegetal primaria se proyectan en *RCP 8,5*, debido a la ausencia general de medidas proactivas para controlar el cambio de cobertura terrestre en ese escenario. Las grandes reducciones también se proyectan en *RCP 2,6* debido a la conversión generalizada de la tierra para la producción de biocombustibles. Las menores reducciones están previstas en *RCP 6,0* y *RCP 4,5*, y en este último la menor reducción está asociada a la conservación de los bosques primarios y la forestación como medidas de mitigación. Esta distribución en el tipo de vegetación se muestra en el gráfico 58.

Gráfico 58. Proporciones de cobertura de la tierra por tipo de vegetación



Fuente: (IPCC, 2013).

### 5.8.6 Sistemas de producción de alimentos y la seguridad alimentaria

Los efectos del cambio climático en la producción agrícola y alimentaria son previstos en varias regiones del mundo, con impactos negativos más comunes que los impactos

positivos. Las tendencias positivas son evidentes en algunas regiones de latitudes altas. Desde AR4, ha habido varios periodos de comida rápida y los aumentos de precios de los cereales siguientes extremos climáticos en las principales regiones productoras, lo que indica una sensibilidad de los mercados actuales a los extremos climáticos, entre otros factores.

Se espera una gran sensibilidad negativa del rendimiento de los cultivos en zonas con temperaturas diurnas extremas alrededor de 30 °C o superiores. Estas sensibilidades han sido identificadas para varios cultivos y regiones. Las tendencias de temperatura serán determinantes en los rendimientos de los cultivos a nivel sub-continental a escala mundial. A escala de países, las proyecciones de precipitación siguen siendo factores importantes, pero inciertas para evaluar los impactos futuros.

Para los principales cultivos como el trigo, el arroz y el maíz en las regiones tropicales y templadas, se prevé que el cambio climático, sin un proceso de adaptación, impactará los rendimientos negativamente ante el aumento de la temperatura en 2 °C o más

Después de 2050 el riesgo de impactos más graves de rendimiento aumenta y depende del nivel de calentamiento que ofrece el escenario. Sin embargo, ante cambio climático se prevé que aumente progresivamente la variabilidad inter-anual de rendimiento de los cultivos en algunas regiones. Estos impactos previstos van a ocurrir en el contexto de rápido aumento de la demanda del cultivo.

Todos los aspectos de la seguridad alimentaria son potencialmente afectados por el cambio climático, incluyendo acceso a los alimentos, la utilización y la estabilidad de precios. La redistribución de la pesca marina captura potencial hacia latitudes más altas representa un riesgo de disminución de los suministros, ingresos y empleo en los países tropicales, con posibles consecuencias para la seguridad alimentaria. Así, para estas regiones el aumento de la temperatura, junto con el aumento de la demanda de alimentos, plantearía grandes riesgos para la seguridad alimentaria, con riesgos mayores en las zonas de latitudes bajas.

#### 5.8.7 Áreas urbanas

Muchos de los riesgos globales del cambio climático se concentran en las zonas urbanas, las cuales para acelerar la exitosa adaptación al cambio climático requerirán de inversiones en infraestructura que aumente su resiliencia y les permitan un desarrollo sostenible.

El estrés por calor, precipitaciones extremas, las inundaciones costeras, los deslizamientos de tierra, la contaminación del aire, la sequía y la escasez de agua suponen riesgos en las zonas urbanas para las personas, los bienes, las economías y los ecosistemas.

Los riesgos se amplifican para aquellas zonas que carecen de la infraestructura básica, disponen de viviendas muy expuestas o de mala calidad. Por lo tanto, la reducción del déficit de servicios básicos, la mejora de la vivienda y la construcción de sistemas de infraestructura resistentes podría reducir la vulnerabilidad y la exposición en áreas urbanas.

La adaptación urbana requiere de una gobernabilidad efectiva orientada a reducir el riesgo urbano, junto con la alineación de las políticas e incentivos, el fortalecimiento de la administración pública y la adaptación de la capacidad de la comunidad local en sinergia con el sector privado. Asimismo, se requiere financiamiento adecuado y desarrollo institucional. Es importante contar a su vez con políticas inclusivas y colaborativas con los grupos de bajos ingresos, comunidades vulnerables y gobiernos locales.

Se espera que los principales impactos rurales en el corto plazo sean a través de la disponibilidad y suministro del agua, la seguridad alimentaria y los ingresos agrícolas. Se espera que estos impactos que afectan de manera desproporcionada el bienestar de los sectores pobres en las zonas rurales, como los hogares encabezados por mujeres y los que tienen acceso limitado a la tierra, la infraestructura y la educación. La adaptación en la zona rural requiere las anteriores políticas pero en el contexto de apoyo en la toma de decisiones de los sectores rurales.



## 6 Fenómenos climáticos futuros en la región de América Central y el Caribe

El IPCC (2013) ofrece una revisión de los estudios científicos que analizan sobre los cambios previstos en los principales fenómenos climáticos y su cambio a nivel regional, a medida que las temperaturas medias globales irán aumentando.

De acuerdo con el IPCC, el clima en cada región es el resultado de procesos complejos que cuya respuesta a las influencias a escala global varían fuertemente con la ubicación geográfica. Sin embargo, los avances en la simulación de los fenómenos climáticos de gran escala proporcionan una base científica para una mayor comprensión sobre los fenómenos que tienen influencia en el clima regional y cómo afecta el cambio climático.

América Central y la región del Caribe se ven afectadas por varios fenómenos, incluyendo la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)<sup>74</sup>, el Modo Anular del Norte (Northern Annular Mode, NAM<sup>75</sup>), el fenómeno ENOS y el sistema de ciclones tropicales.

Los ciclos anuales en la región de América Central y el Caribe resultan de las interacciones aire-mar de la *piscina caliente del Hemisferio Occidental* en el Pacífico noreste tropical y los mares intra-americanos<sup>76</sup>. Además, la corriente del Caribe es un elemento clave del clima de verano de la región y es controlado por el tamaño y la intensidad de la *piscina caliente del hemisferio occidental* y también es modulada por la temperatura superficial del mar entre el Pacífico ecuatorial oriental y el Atlántico tropical.

Las proyecciones del IPCC que muestran un incremento en la precipitación media estacional en la zona ecuatorial de la ZCIT, afectan a partes de América Central, el Caribe y América del Sur, entre otras zonas. La proyección de la precipitación tropical sobre los océanos afectados por la ZCIT indican que el cambio medio anual de la precipitación sigue un patrón “warmer-get-wetter”<sup>77</sup>, debido a que el aumento de la temperatura superficial del mar es superior a la media tropical.

---

<sup>74</sup> La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es una banda de zona de convergencia persistente de bajo nivel, la convección atmosférica, y las fuertes lluvias. Sobre el Atlántico y la mitad oriental del Pacífico, la ZCIT se desplaza al norte del ecuador debido a la interacción océano-atmósfera y las influencias extra-tropicales. IPCC (2013)

<sup>75</sup> El Modo Anular del Norte es uno de los modos dipolares extra-tropicales que influyen en la variabilidad de la zona tropical.

<sup>76</sup> Se trata de una zona de circulación débil anticiclónica.

[http://www.conabio.gob.mx/gap/index.php/Procesos\\_oceanogr%C3%A1ficos](http://www.conabio.gob.mx/gap/index.php/Procesos_oceanogr%C3%A1ficos)

<sup>77</sup> Un paradigma prevaleciente de cómo los patrones de lluvia cambiarán en un calentamiento de la Tierra es que el ciclo hidrológico se fortalece causando que las regiones húmedas vienen a ser más húmedas.

<http://www.climate-lab-book.ac.uk/category/precipitation/>

Se espera que el ENOS se mantenga como el modo dominante de la variabilidad interanual en el futuro y, debido a la mayor disponibilidad de humedad, la variabilidad de su precipitación asociada a escala regional probablemente se intensifique. Sin embargo, son inciertas las implicaciones regionales que incluyen América central y el Caribe, entre otras regiones, debido a que según el IPCC, la varianza y el patrón espacial de ENOS son tan grandes en los modelos, que cualquier cambio proyectado en su variabilidad en el siglo XXI sigue siendo de baja confianza. Si bien el fenómeno ENOS es el principal impulsor de la variabilidad del clima, pero patrones tales como la Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation, NAO) y la fuerza de la convección del invierno boreal sobre el Amazonas, influyen los vientos alisios sobre el Atlántico Norte tropical y se puede combinar con el ENOS para modular *la piscina caliente* del Hemisferio Occidental en verano.

Respecto a los ciclones tropicales, en las proyecciones del siglo XXI, es probable que la frecuencia global de la ocurrencia de ciclones tropicales va a disminuir o permanecer esencialmente sin cambios. La futura influencia del cambio climático en los ciclones tropicales es probable que varíen según la región, con poca confianza en proyecciones específicas de la frecuencia e intensidad. Sin embargo, existe una mejor comprensión del proceso y modelos en regiones específicas como América Central, en la que las precipitaciones serán más extremas cerca de los centros de ciclones tropicales al tocar tierra.

De acuerdo con el IPCC (2013), ya desde los modelos CMIP3 generalmente se proyectaba una reducción de las precipitaciones en gran parte de la región del Caribe, en consonancia con la tendencia negativa observada desde 1950. En general, se espera que los sub-trópicos sufran mayores periodos secos conforme el clima se calienta (*warmer-get-dry*). En los modelos CMIP3 y CMIP5 la región de América Central y el Caribe experimentarán un mayor proceso de periodos secos. Estos periodos secos también pueden estar relacionados con el fortalecimiento de la Corriente del Caribe y la elevación de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical del Atlántico.

Para finales de siglo, los modelos proyectan CMIP5 mayor calentamiento en la región de Centro América y el Caribe en el periodo de junio a agosto. El calentamiento se prevé que sea más grande sobre América Central que el Caribe en el verano y el invierno. De octubre a marzo, las proyecciones indican disminución media del conjunto de la precipitación en el norte de América Central. En la precipitación del Caribe se prevé una disminución en el sur, pero aumento en el norte.

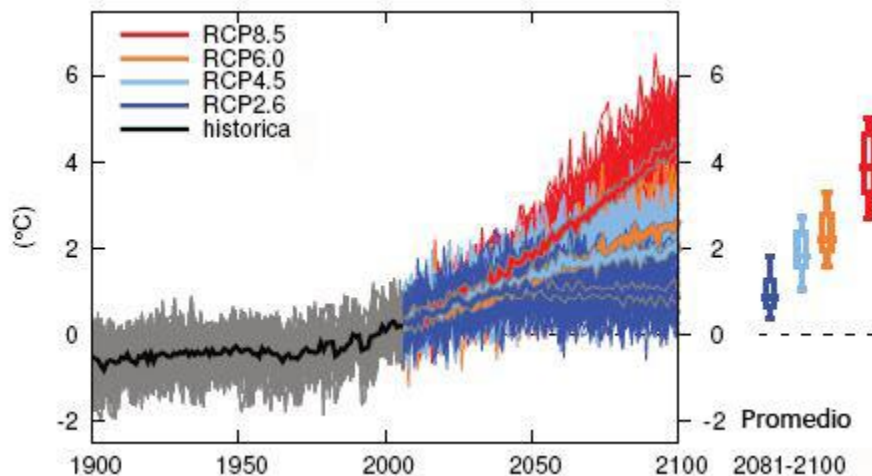
De abril a setiembre, la zona proyectada de reducción de la precipitación se expande por toda la región de Centro América y el Caribe, los cambios en las precipitaciones proyectadas

en el CMIP3, el CMIP5 y un modelo de alta resolución, muestran una reducción en algunas partes del sur del Caribe de diciembre a marzo, y el resto de América Central y el Caribe de junio a setiembre. El CMIP5 muestra una mayor consistencia con el CMIP3 en cuanto al aumento de la precipitación de diciembre a marzo en el sector norte del Caribe. Hay una intensificación y desplazamiento hacia el sur de la ZCIT del Pacífico Oriental, lo que puede contribuir a la sequía en el sur de América Central.

En los siguientes gráficos se observan las proyecciones de cambios de temperatura en los escenarios VCR con respecto a la temperatura media entre 1986 y el 2005, en la zona terrestre de América Central y las zonas terrestre y marítima del Caribe. Los gráficos muestran toda la dispersión con los modelos en cada escenario, pero la línea continua gruesa muestra el promedio para cada uno de los escenarios VCR.

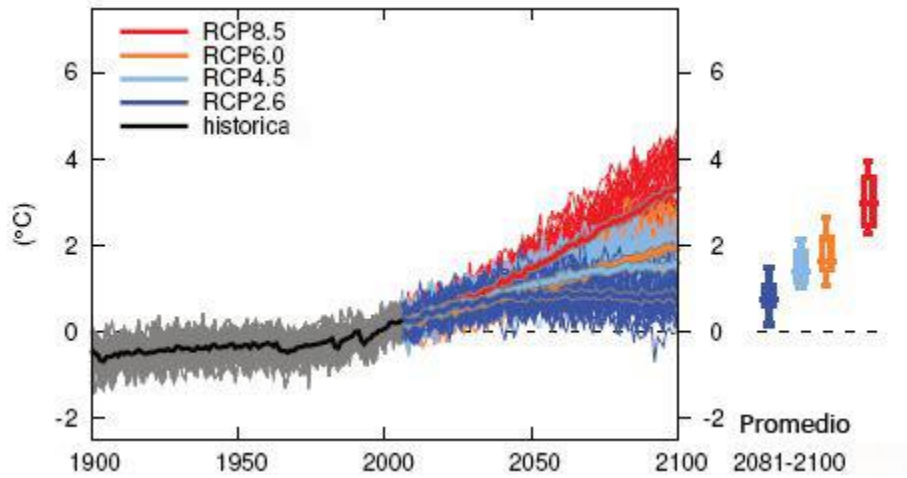
Los gráficos 59 y 60 se refieren a los cambio esperados para diciembre a febrero, mientras que los gráficos 61 y 62 para junio a agosto. En todos los escenarios a mayor forzamiento radiativo mayor el aumento en la temperatura. En el escenario RCP 2,5 el aumento de la temperatura se da hasta mitad de siglo, para luego estabilizarse para el caso de diciembre a febrero o disminuir ligeramente para el caso de junio a agosto. Las barras a la derecha indican el promedio estimado a final de siglo, entre el periodo 2081 y 2100.

Gráfico 59. Cambio de temperatura en América Central de diciembre a febrero



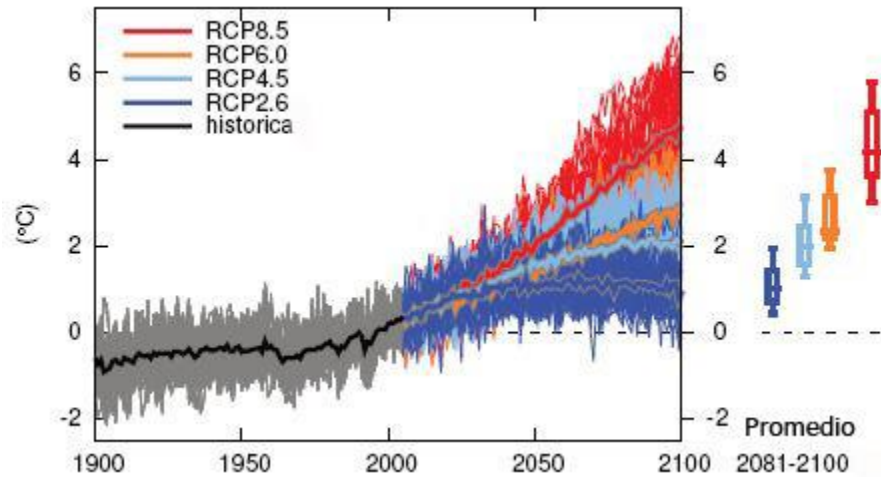
Fuente: (IPCC, 2013).

Gráfico 60. Cambio de temperatura en el Caribe de diciembre a febrero



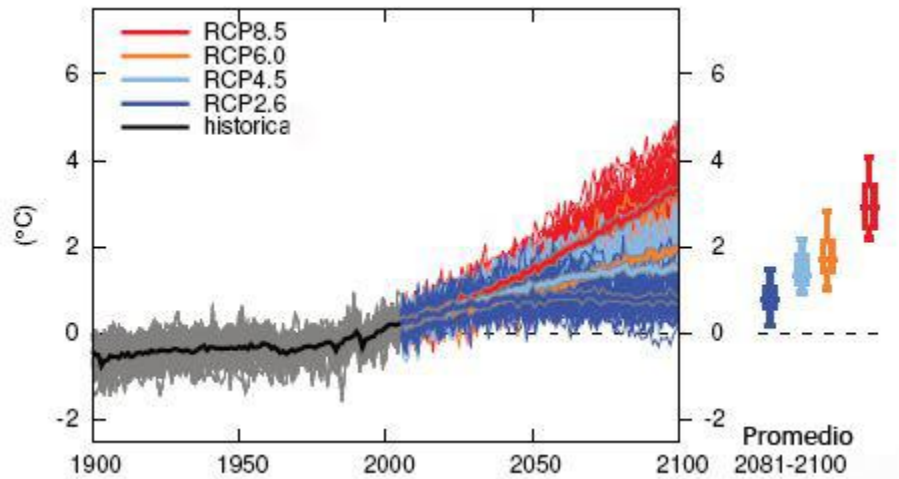
Fuente: (IPCC, 2013).

Gráfico 61. Cambio de temperatura en América Central de junio a agosto



Fuente: (IPCC, 2013).

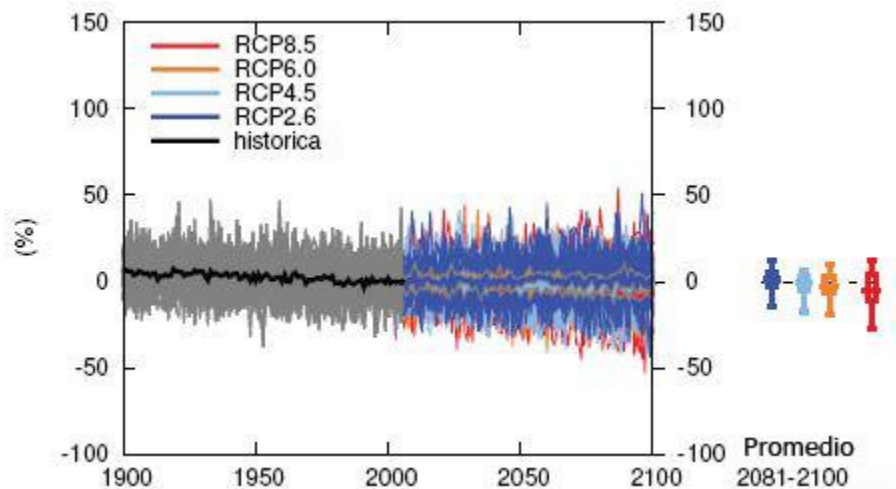
Gráfico 62. Cambio de temperatura en el Caribe de junio a agosto



Fuente: (IPCC, 2013).

En los gráficos siguientes se presentan las proyecciones de cambio en la precipitación en la zona terrestre de América Central y las zonas terrestre y marítima del Caribe. Nuevamente, estos cambios son con respecto al periodo de referencia 1986-2005 y se presenta la dispersión de los modelos en cada escenario y el promedio de cada VCR con la línea continua gruesa.

Gráfico 63. Cambio en precipitación en América Central de octubre a marzo

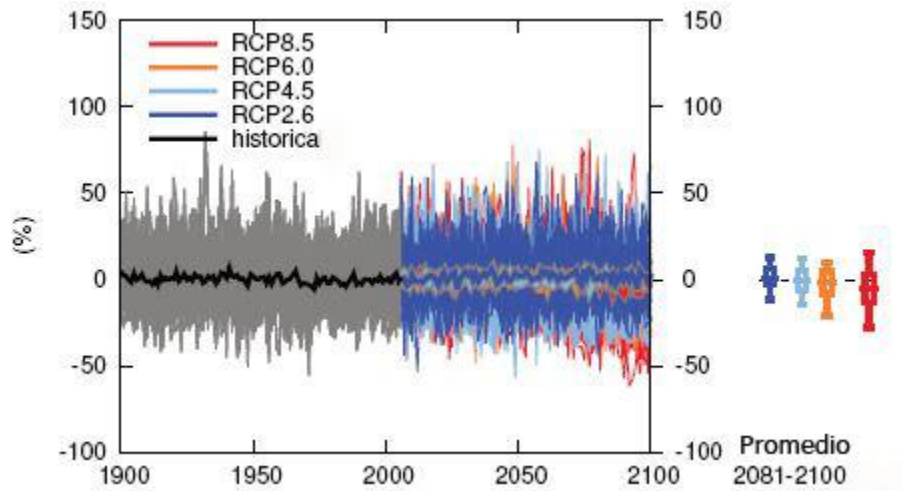


Fuente: (IPCC, 2013).

Los gráficos 63 y 64 se refieren a los cambio de octubre a marzo, mientras que los gráficos 65 y 66 entre abril y setiembre. Aunque los cambios son muy ligeros, se da una disminución en los escenarios *RCP 6,0* y *RCP 8,5*, aunque es muy perceptible la disminución en el *RCP*

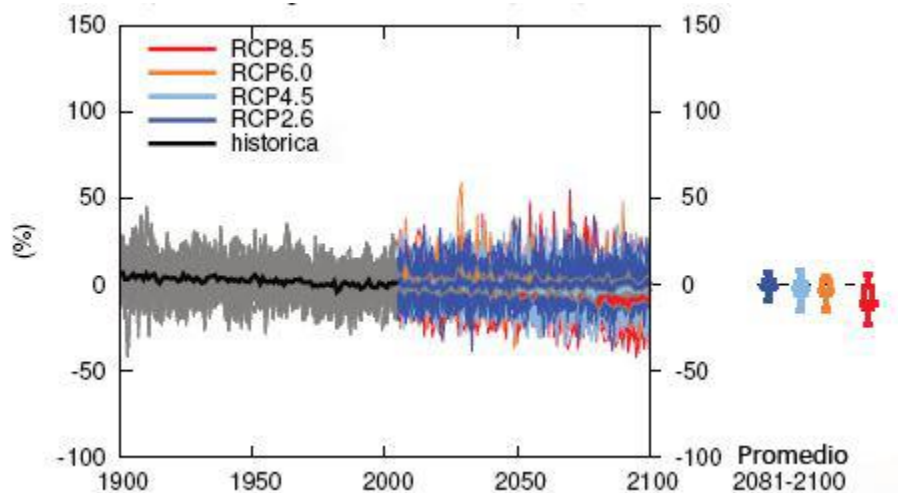
8,5, para abril a setiembre. Mientras tanto, para *RCP 2,6* y *RCP 4,5* prácticamente no se perciben cambios. Las barras a la derecha indican el promedio estimado a final de siglo, entre el periodo 2081 y 2100.

Gráfico 64. Cambio en precipitación en el Caribe de octubre a marzo



Fuente: (IPCC, 2013).

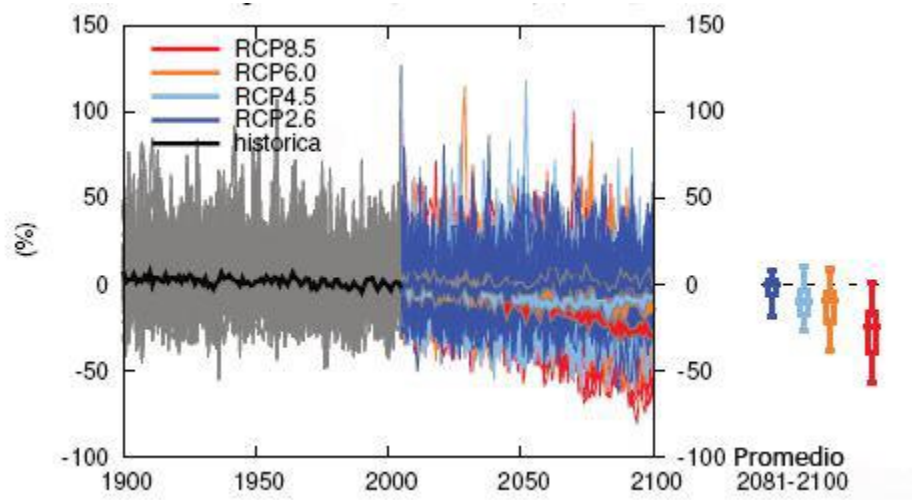
Gráfico 65. Cambio en precipitación en América Central de abril a setiembre



Fuente: (IPCC, 2013).



Gráfico 66. Cambio en precipitación en el Caribe de abril a setiembre



Fuente: (IPCC, 2013).

## 7 Elementos para la elección de escenarios base para el clima futuro del país

Este trabajo busca explorar los fundamentos en la elaboración de los escenarios VCR, para ofrecer criterios de decisión que determinen la pertinencia de algunos de estos escenarios para la configuración del futuro climático del país.

La elección de una u otra VCR para la construcción de escenarios para el país es una decisión difícil, debido a que cada uno de estos escenarios busca simplemente ser una referencia, sin que el IPCC descarte de antemano uno u otro escenario, ya su aplicabilidad que depende de supuestos sobre múltiples variables futuras sobre las cuales siempre existe un nivel de incertidumbre.

Es por ello que el análisis del IPCC en el AR5 no busca recalcar los resultados de alguno de los escenarios en particular, sino que hace un análisis que hace referencia a uno y a otro escenario, reconociéndose que al final la aplicabilidad de uno u otro resultado está ligado al nivel de incertidumbre que se asuma para cada escenario, lo cual procede de la ocurrencia de los escenarios socioeconómicos, poblacionales, uso de la tierra, tecnológicos y de otros disparadores de las emisiones de GEI y contaminantes relevantes para el cambio climático. Estos escenarios de disparadores o fuerzas impulsoras de las emisiones, pueden construirse de manera alternativa a los que se hacen referencia en la sección 5.1, ya que el propósito de las VCR es permitir la exploración de diversos escenarios de fuerzas impulsoras que arriben al forzamiento radiativo de cada VCR.

Snover AK. et al. (2012) sugieren que un primer paso para elegir la pertinencia de un escenario de cambio climático es la importancia de los “driver” o fuerzas impulsoras del clima en la región de interés. En el caso del país, las fuerzas impulsoras del clima son las mismas del área de influencia de América Central y el Caribe. Como se vio en la sección 6, América Central y la región del Caribe se ven afectadas, además de los cambios en la temperatura global, por varios fenómenos, incluyendo la Zona de Convergencia Intertropical, el Modo Anular del Norte, el fenómeno ENOS y el sistema de ciclones tropicales. La pequeñez del país dentro de esta región de influencia climática sugiere que los escenarios de los disparadores de las emisiones, y factores climáticos sean tomados directamente por el IMN de los reportados por el IPCC de acuerdo con las VCR. En las VCR el incremento de las lluvias en algunas regiones del Caribe y la sequía el Pacífico están directamente relacionadas con el calentamiento global “warmer-get-wetter” y “warmer-get-dry”, por lo que los escenarios por seleccionar deberían recoger las necesidades de contrastar la intensidad de los efectos climáticos por analizar, que crece conforme mayor es el forzamiento radiativo.

En el cuadro 6 se ofrece un resume de la serie de criterios y resultados detrás de los escenarios VCR.

Idealmente, para el desarrollo de los escenarios nacionales, la utilización de los cuatro escenarios VCR permitiría mayores contrastes en línea con los resultados arrojados por el IPCC. Al respecto Snover AK. et al. (2012) recomiendan valorar las fuentes de información climática, y con base en las consultas a los técnicos del IMN, las exigencias computacionales asociadas a la simulación de todos esos escenarios, junto con las limitaciones intrínsecas del IMN para dedicar recursos humanos, materiales y de tiempo para explorar todos los escenarios, exige reducir el análisis de escenarios - aspecto recomendado por Snover AK. et al. (2012) como “subset de escenarios”-, seleccionando aquellos que puedan dar representatividad al contexto futuro esperado globalmente y para la región de influencia que afecta el país.

Un criterio relevante para la consideración de uno u otro escenario es el contexto (Snover AK. et al. 2012), y en las VCR además de las fuerzas impulsoras antes vistas, el contexto lo define la presencia o no de políticas climáticas globales<sup>78</sup>, ya que en el caso del *RCP 2,6* las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de contaminantes del aire se reducen sustancialmente con el tiempo, mediante estrictas políticas globales de cambio climático, de reducción de emisiones y adaptación. Asimismo, como en los SRES<sup>79</sup>, no se descartan políticas locales de cambio climático que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI o en los procesos de adaptación. Se suma la presencia de políticas locales energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación. En el caso del *RCP 4,5*, se trata de un escenario con la aplicación de políticas de cambio climático globales, aunque menos estrictas que el *RCP 2,6*, no se descartan políticas locales de cambio climático y políticas locales energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático. En el *RCP 6,0* hay ausencia de políticas climáticas globales, pero hay influencia de políticas locales climáticas, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático.

El *RCP 8,5* se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo debido a la ausencia de políticas climáticas globales. Sin embargo, en este escenario todavía como en los SRES, no se descartan políticas locales de cambio climático. Sin embargo, pese a la existencia de políticas locales climáticas locales, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, estas políticas locales no se perciben con

---

<sup>78</sup> Van Vuuren et al (2011)

<sup>79</sup> Leggett et al. (1992).

gran influencia en las proyecciones, ya que la expansión de las emisiones que el *RCP 8.5* involucra, tiene mayor influencia en las proyecciones globales.

Dada la fuerte discusión en la comunidad mundial sobre el problema climático y las fuertes negociaciones que se llevan a cabo especialmente en el contexto de las Contribuciones Previstas Nacionalmente Determinadas (Intended Nationally Determined Contributions, INDC<sup>80</sup>), parece que descartar la presencia de políticas climáticas globales en el futuro, sería una conjetura muy fuerte de asumir. Es por esto que el uso de un escenario como el *RCP 8,5*, en el cual se descarta la presencia de políticas climáticas globales, sumado a que las políticas locales tienen poca influencia, posiblemente no sería lo recomendable.

En este sentido, el uso del escenario *RCP 6,0* puede permitir la inclusión de los efectos de las políticas locales climáticas y no climáticas como las energéticas de contaminación y las que influyen el uso de la tierra y otras fuerzas impulsoras. Este escenario puede asumirse en el tanto las políticas climáticas globales no sean respaldadas y aplicadas por aquellos desarrollados y en transición al desarrollo que producen las mayores emisiones, y aquellos países en desarrollo que deban seguir los acuerdos en el marco de las INDC. Pese a que hay ausencia de políticas climáticas globales, en el entendido de no se logren acuerdos globales, el escenario *RCP 6,0* recoge condiciones en línea con la influencia de las políticas locales climáticas y no climáticas.

El caso de que este criterio para utilizar el escenario *RCP 6,0* sea aplicado, un contraste importante podría ser la comparación con un escenario en donde el planeta alcanza acuerdos más exigentes sobre las políticas climáticas y no climáticas, y este escenario lo presenta el *RCP 2,6*. Esta situación implicaría asumir que la comunidad mundial asume el reto de responder a las amenazas del cambio climático con acuerdos como las INDC y fortalecimiento de iniciativas locales y regionales como mercados de carbono y otras medidas de mitigación y de adaptación que la comunidad científica viene discutiendo como impostergables.

El escenario *RCP 4,5* ofrece también una aplicación de políticas climáticas y no climáticas, pero menos exigentes que el *RCP 2,6*. Lo cual lo hace una alternativa de comparación con el *RCP 6,0*, pero su cercanía al forzamiento radiativo del *RCP 6,0* que se ha sugerido como alternativa, posiblemente no facilite el contraste suficiente de los efectos entre la comparación de dos escenarios VCR alternativos.

---

<sup>80</sup> Cuyo acuerdo base se logró en la Conferencias de las Partes (COP) en París 2015, en la Convención Marco de Cambios Climático de Naciones Unidas.

Cuadro 6. Tabla comparativa de los criterios y resultados de las VCR

Criterio	Escenario			
	<i>RCP 2,6</i>	<i>RCP 4,5</i>	<i>RCP 6,0</i>	<i>RCP 8,5</i>
<b>Descripción</b>	Extremo del forzamiento radiativo es $\sim 3 \text{ W/m}^2$ antes del 2100 y luego se reducen a $2,6 \text{ W/m}^2$ para el año 2100	Estabilización en $4,5 \text{ W/m}^2$ para el 2100	Estabilización en $6,0 \text{ W/m}^2$ para el 2100	El aumento de forzamiento hasta $8,5 \text{ W/m}^2$ para el año 2100, y sigue aumentando hasta $12,0 \text{ W/m}^2$ para el 2250.
<b>Nivel de emisiones</b>	Escenario bajo en emisiones	Escenario medio-bajo de emisiones	Escenario medio-alto de emisiones	Escenario alto de emisiones
<b>Presencia de políticas</b>	Las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de contaminantes del aire se reducen sustancialmente con el tiempo mediante estrictas políticas globales de cambio climático, de reducción de emisiones y adaptación. Como en los SRES, no se descartan políticas locales de cambio climático que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI o en los procesos de adaptación. Se suman la presencia de políticas locales energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación.	Es un escenario de estabilización en el forzamiento radiativo total para el 2100 por la aplicación de políticas de cambio climático globales, aunque menos estrictas que el <i>RCP 2,6</i> . Como en los SRES, no se descartan políticas locales de cambio climático que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI o en los procesos de adaptación. Se suman la presencia de políticas locales energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación.	Es un escenario de estabilización en el forzamiento radiativo total para el 2100, que pese que hay ausencia de políticas climáticas globales, pero las proyecciones globales están influido por políticas locales climáticas, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación.	Se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo por la ausencia de políticas climáticas globales. Como en los SRES, no se descartan políticas locales de cambio climático que pueden influir en los factores controladores de las emisiones de GEI o en los procesos de adaptación. Pese a la existencia de políticas locales climáticas locales, energéticas y ambientales no orientadas al cambio climático, como el control de la contaminación, estas políticas locales no se perciben con gran influencia en las proyecciones, ya que la expansión de las emisiones que el RPC 8.5 implica, tienen mayor influencia en las proyecciones globales.
<b>Modelos considerados</b>	Integra 32 modelos	Integró 42 modelos	Integró 25 modelos	Integró 39 modelos
<b>Sectores</b>	Transporte aéreo, envío internacional, otros medios de transporte terrestre, plantas de energía eléctrica, transformación y distribución de energía; disolventes;	Transporte aéreo, envío internacional, otros medios de transporte terrestre, plantas de energía eléctrica, transformación y distribución de energía;	Transporte aéreo, envío internacional, otros medios de transporte terrestre, plantas de energía eléctrica, transformación y distribución de	Transporte aéreo, envío internacional, otros medios de transporte terrestre, plantas de energía eléctrica, transformación y distribución de energía;

Criterio	Escenario			
	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5
	manejo de residuos, procesos y combustión de industria, edificios residenciales y comerciales, la quema de residuos agrícolas, y cambio de uso del suelo en agricultura y bosques	disolventes; manejo de residuos, procesos y combustión de industria, edificios residenciales y comerciales, la quema de residuos agrícolas, y cambio de uso del suelo en agricultura y bosques	energía; disolventes; manejo de residuos, procesos y combustión de industria, edificios residenciales y comerciales, la quema de residuos agrícolas, y cambio de uso del suelo en agricultura y bosques	disolventes; manejo de residuos, procesos y combustión de industria, edificios residenciales y comerciales, la quema de residuos agrícolas, y cambio de uso del suelo en agricultura y bosques
<b>Gases de invernadero homogéneos</b>	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), el dióxido nitroso (N <sub>2</sub> O), el metano CH <sub>4</sub> , el azufre (SF <sub>6</sub> ), tres tipos de perfluorocarbonos (PFC), 16 especies de ozono controladas por el Protocolo de Montreal y ocho especies halogenadas.	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), el dióxido nitroso (N <sub>2</sub> O), el metano CH <sub>4</sub> , el azufre (SF <sub>6</sub> ), tres tipos de perfluorocarbonos (PFC), 16 especies de ozono controladas por el Protocolo de Montreal y ocho especies halogenadas	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), el dióxido nitroso (N <sub>2</sub> O), el metano CH <sub>4</sub> , el azufre (SF <sub>6</sub> ), tres tipos de perfluorocarbonos (PFC), 16 especies de ozono controladas por el Protocolo de Montreal y ocho especies halogenadas.	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), el dióxido nitroso (N <sub>2</sub> O), el metano CH <sub>4</sub> , el azufre (SF <sub>6</sub> ), tres tipos de perfluorocarbonos (PFC), 16 especies de ozono controladas por el Protocolo de Montreal y ocho especies halogenadas
<b>Agentes son los de forzamiento del clima a corto plazo</b>	Metano, al igual que los aerosoles como el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), óxido de mono-nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), compuestos orgánicos volátiles (COV), carbón negro, monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH <sub>3</sub> ) y especies halogenadas que no se incluyen en el primer grupo.	Metano, al igual que los aerosoles como el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), óxido de mono-nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), compuestos orgánicos volátiles (COV), carbón negro, monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH <sub>3</sub> ) y especies halogenadas que no se incluyen en el primer grupo.	Metano, al igual que los aerosoles como el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), óxido de mono-nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), compuestos orgánicos volátiles (COV), carbón negro, monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH <sub>3</sub> ) y especies halogenadas que no se incluyen en el primer grupo.	Metano, al igual que los aerosoles como el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), óxido de mono-nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), compuestos orgánicos volátiles (COV), carbón negro, monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH <sub>3</sub> ) y especies halogenadas que no se incluyen en el primer grupo.
<b>Concentraciones de CO<sub>2</sub> equivalente</b>	Tiene como meta una estabilización para el año 2300 a 360 ppm	Se estacionan desde el presente ligeramente por debajo de las 600 ppm	Se estacionan cerca de las 800 ppm	Se estabilizan en 2000 ppm en el año 2050
<b>Producción (PIB)</b>	En el largo plazo el crecimiento del PIB es mayor, con un efecto de retroalimentación, ya que hay menores efectos del cambio climático sobre la economía dada las políticas globales de cambio climático.	En el largo plazo registra el segundo crecimiento del PIB por menores efectos del cambio climático por políticas globales de cambio climático.	En el largo plazo el crecimiento del PIB es el menor, porque la ausencia de políticas globales de cambio climático retroalimenta efectos negativos sobre la economía.	Al igual que en el RCP 6,0 En el largo plazo el crecimiento del PIB es el menor, porque la ausencia de políticas globales de cambio climático retroalimenta efectos negativos sobre la economía, pero es menor el efecto porque el RCP 8,5 implica mayor expansión en el consumo de energía.



Criterio	Escenario			
	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5
<b>Población</b>	Crece cerca de una tercera parte entre el 2000 y el 2100	Crece cerca de un 40% entre el 2000 y el 2100	Crece un 50% entre el 2000 y el 2100	Se duplica entre el 2000 y el 2100
<b>Energía primaria</b>	Moderado crecimiento en el uso de energía. Crece cerca del 70% entre el 2000 y el 2100	Moderado crecimiento en el uso de energía. Se duplica entre el 2000 y el 2100	Moderado crecimiento en el uso de energía. Crece cerca del 70% entre el 2000 y el 2100, similar que en RCP 2,6	Escenario altamente intensivo en uso de energía, escenario altamente intensivo en energía. Casi se triplica entre el 2000 y el 2100
<b>Consumo energía fósil</b>	Hay una notable disminución en el consumo de petróleo como resultado de los precios de combustibles fósiles y agotamiento paulatino de las reservas, a lo que se suma la política climática que incluye utilización de tecnologías de almacenamiento y tecnologías de captura de carbono	En el 2010, el consumo fósil es ligeramente mayores del consumo mostrado en el año 2000, como resultado de los precios de combustibles fósiles y agotamiento paulatino de las reservas, a lo que se suma la política climática que incluye utilización de tecnologías de almacenamiento y tecnologías de captura de carbono. Las políticas climáticas son menos estridentes que en RCP 2,6	En el 2010, el consumo fósil es ligeramente mayor del consumo mostrado en el año 2000, como resultado de los precios de combustibles fósiles y agotamiento paulatino de las reservas	En el 2010, el consumo fósil es ligeramente mayores de consumo que los mostrados en el año 2000, como resultado de los precios de combustibles fósiles y agotamiento paulatino de las reservas
<b>Consumo de petróleo</b>	El uso de combustibles renovables aumenta, así como la bio-energía y la energía nuclear. Las principales fuerzas impulsoras están aumentando la demanda de energía, pero la contención en el consumo de combustibles fósiles se da por aumento de los precios de estos combustibles y la política climática	El uso de combustibles renovables aumenta, así como la bio-energía y la energía nuclear. Las principales fuerzas impulsoras están aumentando la demanda de energía, pero la contención en el consumo de combustibles fósiles se da por aumento de los precios de estos combustibles y la política climática	El uso de combustibles renovables y la energía nuclear aumentan. Las principales fuerzas impulsoras están aumentando la demanda de energía, pero la contención en el consumo de combustibles fósiles se da por aumento de los precios de estos combustibles y la política no climática	El uso de combustibles renovables y la energía nuclear aumentan. Las principales fuerzas impulsoras están aumentando la demanda de energía, pero la contención en el consumo de combustibles fósiles se da por aumento de los precios de estos combustibles y la política no climática
<b>Uso de la tierra</b>	Las tierras de cultivo aumentan, pero en gran medida como resultado de la producción de bioenergía. El uso de los pastizales es más o menos constante, como resultado al aumento de la producción de productos de origen	Muestra una política climática global en que la cobertura boscosa se incrementa, mientras que los cultivos y los pastizales disminuyen en el uso del suelo, dado a incrementos en el rendimiento y cambios en los	Muestra un uso cada vez mayor de las tierras de cultivo, pero una disminución en los pastos. Esta disminución se debe a una aplicación mucho más fuerte de mejores técnicas en intensidad de cría animal. La cobertura	El uso del suelo en cultivo y pastizales aumenta impulsado principalmente por un aumento de la población mundial, disminuye por lo tanto la cobertura boscosa.

Criterio	Escenario			
	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5
	animal, pero acompañada por mayor intensidad para asegurar mejoras en la cría de animales. Como resultado disminuye como resultado la cobertura boscosa.	patrones de alimentación. La cobertura boscosa se expande no solo por menor expansión de las pasturas permanentes, sino también los que muestran una contracción de las tierras agrícolas.	boscosa se expande por menor expansión de las pasturas permanentes.	
<b>Emisiones y concentraciones de factores de forzamiento de corto plazo</b>	Muestran una tendencia hacia la disminución determinada por tres factores: el cambio de la tecnología de automotores, la política de control de la contaminación del aire, y la política climática. Se da un control de la contaminación del aire se vuelve más estricto con el tiempo, como resultado del aumento de los niveles de ingresos. Política climática más estricta. Las concentraciones de aerosoles disminuyen.	Hay política climática y control de contaminantes menos estricta que en RCP 2,6. Las concentraciones de aerosoles disminuyen.	No hay política climática, pero hay influencia de políticas no climáticas. El forzamiento radiativo producto del ozono troposférico se incrementa. Las concentraciones de aerosoles disminuyen	Ausencia de la política climática, el forzamiento radiativo producto del ozono troposférico se incrementa. Las concentraciones de aerosoles disminuyen.
<b>Emisiones de gases de efecto invernadero</b>	Las emisiones de CO <sub>2</sub> representa el rango de escenarios con emisiones más bajas, lo que implica políticas climáticas severas para limitar las emisiones. Las emisiones CH <sub>4</sub> se reducen notablemente. Las emisiones de N <sub>2</sub> O son estables.	Las emisiones de CO <sub>2</sub> muestran influencia de políticas climáticas con escenarios de bajas emisiones. Las emisiones de CH <sub>4</sub> son estables a lo largo del siglo. Las emisiones de N <sub>2</sub> O son estables.	Hay ausencia de políticas climáticas, pero se manifiestan la mayoría de las políticas no climáticas en las emisiones de CO <sub>2</sub> . Las emisiones de CH <sub>4</sub> son estables a lo largo del siglo. Las emisiones de N <sub>2</sub> O aumentan.	Las emisiones de CO <sub>2</sub> muestran altos niveles en correspondencia de la ausencia de políticas climáticas. Las emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O muestran una tendencia de rápido crecimiento en el RCP 8,5, sin política climática y alta población. En las emisiones de N <sub>2</sub> O presenta los mayores aumentos.
<b>Concentraciones de gases de efecto invernadero</b>	El CO <sub>2</sub> tiene un máximo en las concentraciones a eso del 2050, seguido por una disminución a finales de siglo. Para CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O las concentraciones siguen una disminución por los efectos de la política climática.	Muestran una estabilización de las concentraciones de CO <sub>2</sub> . Para CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O las concentraciones siguen una disminución por los efectos de la política climática	Muestran una estabilización de las concentraciones de CO <sub>2</sub> . Para CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O las concentraciones aumentan por ausencia de políticas climáticas, aunque para el CH <sub>4</sub> cae antes del siglo.	Para el CO <sub>2</sub> sigue concentraciones en rápido aumento. Para CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O las concentraciones siguen los efectos de la ausencia de la política climática

Criterio	Escenario				
	RCP 2,6	RCP 4,5	RCP 6,0	RCP 8,5	
<b>Parámetros climáticos</b>					
<b>Probabilidad de niveles de temperatura a corto plazo (2016–2035)</b>	+1,0°C	100%	98%	96%	100%
	+1,5°C	22%	17%	12%	33%
	+2,0°C	0%	0%	0%	0%
	+3,0°C	0%	0%	0%	0%
<b>Probabilidad de niveles de temperatura a mediano plazo (2046–2065)</b>	+1,0°C	100%	100%	100%	100%
	+1,5°C	56%	95%	92%	100%
	+2,0°C	16%	43%	32%	95%
	+3,0°C	0%	0%	0%	21%
<b>Probabilidad de niveles de temperatura a mediano plazo (2081–2100)</b>	+1,0°C	94%	100%	100%	100%
	+1,5°C	56%	100%	100%	100%
	+2,0°C	22%	79%	100%	100%
	+3,0°C	0%	12%	36%	100%
	+4,0°C	0%	0%	0%	62%
<b>Temperatura en el mediano plazo (2081-2100)</b>	1°C	1,4°C	1,3°C	2°C	
<b>Temperatura en el largo plazo (2081-2100)</b>	1°C	1.8°C	2,2°C	3,8°C	
<b>Cambio en temperatura global sobre la superficie del mar en el largo plazo (2081-2100)</b>	0,8°C	1.5°C	1,9°C	3,1°C	
<b>Disminución en el pH del mar</b>	0,065	0,145	0,203	0,31	
<b>Media global de aumento en el nivel del mar</b>	0,405	0,475	0,525	0,635	
<b>Fuente y proyectos de investigación</b>	(Van Vuuren et al., 2007a; van Vuuren et al. 2006)—IMAGE	(Clarke et al. 2007; Smith and Wigley 2006; Wise et al. 2009)—GCAM	(Fujino et al. 2006; Hijioka et al. 2008)—AIM	(Riahi et al. 2007)—MESSAGE	

Fuente: Elaboración propia

## 8 Bibliografía

Alvarado, Luis F.; Contreras, Wilke; Alfaro, Maynor y Jiménez, Estefania. 2012. Escenarios de Cambio Climático Regionalizados para Costa Rica. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas. Instituto Meteorológico Nacional.

Bond, T.C., E. Bhardwaj, R. Dong, R. Jogani, S. Jung, C. Roden, D.G. Streets, S. Fernandes, and N. Trautmann (2007), Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000, *Glob. Biogeochem. Cyc.*

Buhaug, J. J. Corbett, Endresen, V. Eyring, J. Faber, S. Hanayama, D. S. Lee, D. Lee, H. Lindstad, A.Z. Markowska, A. Mjelde, D. Nelissen, J. Nilsen, C. Plsson, J. J. Winebrake, W. Q. Wu, and K. Yoshida, Second IMO GHG study 2009; International Maritime Organization (IMO) London, UK, March, 2009.

Clarke, L., J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, R. Richels, 2007. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, DC, USA.

Eyring, V., I. S. A. Isaksen, T. Berntsen, W. J. Collins, J. J. Corbett, O. Endresen, R. G. Grainger, J. Moldanova, H. Schlager, and D. S. Stevenson, Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping, *Atm. Env.*

Fisher B, Nakicenovic N, Alfsen K, Corfee Morlot J, de la Chesnaye F, Hourcade J-C, Jiang K, Kainuma M, La Rovere E, Matysek A et al (2007) Issues related to mitigation in the long-term context. In: Metz B, Davidson O, Bosch P, Dave R, Meyer L (eds) *Climate change 2007. Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York, pp 169–250

Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, Y. Matsuoka, 2006. Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *Multigas Mitigation and Climate Policy. The Energy Journal Special Issue*.

Hanaoka TR, Kawase M, Kainuma Y, Matsuoka H, Ishii, Oka K (2006). Base de datos de escenarios de emisiones gases de efecto invernadero y análisis de mitigación regional. NIES, Tsukuba

Hibbard KA, Meehl G, Cox P, Friedlingstein P (2007) A strategy for climate change stabilization experiments. *Eos* 88:217–221

Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma, 2008. Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering* 13.

Hurt, G.C., Chini, L.P., Frothingham, S., Betts, R., Feddes, J., Fischer, G., Goldewijk, K.K., Hibbard, K., Janetos, A., Jones, C., Kinderman, G., Kinoshita, T., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S., Stehfest, E., Thomson, A., Thornton, P., van Vuuren, D., and Y.P. Wang. 2009. Harmonization of global land-use scenarios for the period 1500-2100 for IPCC-AR5. *iLEAPS Newsletter*.

IPCC. 2007. Report of the 26th session of the IPCC. Bangkok. April 30–May 4 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC. 2014. *Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects*. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Lamarque, J.F., Bond, T.C., Eyring, V., Granier, C., Heil, A., Klimont, Z., Lee, D., Liousse, C., Mieville, A., Owen, B., Schultz, M.G., Shindell, D., Smith, S.J., Stehfest, E., Van Aardenne, J., Cooper, O.R., Kainuma, M., Mahowald, N., McConnell, J.R., Naik, V., Riahi, K., Van Vuuren, D.P., 2010. Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 10.

Leggett J, Pepper W, Swart RJ (1992) Emissions Scenarios for the IPCC: an Update. In: Houghton JT, Callander BA, Varney SK (eds) *Climate change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 71–95

Lee, D.S., et al., Aviation and global climate change in the 21st century, *Atmospheric Environment* (2009).

Masui T, Matsumoto K, Hijioka Y, Kinoshita T, Nozawa T, Ishiwatari S, Kato E, Shukla PR, Yamagata Y, Kainuma M (2011) A emission pathway to stabilize at 6 W/m<sup>2</sup> of radiative forcing. *Climatic Change*.

Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma MLT, Lamarque J-F, Matsumoto K, Montzka SA, Raper S, Riahi K et al (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*.

Mieville, A., C. Granier, C. Liousse, B. Guillaume, F. Mouillot, J.F. Lamarque, J.M. Grégoire, G. Pitron (2009), Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction, *Atmospheric Environment*, submitted.

Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard KA et al (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report on New Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Noordwijkerhout.

Nakicenovic et al (2000) Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge University Press, Cambridge.

ONU (2003). Proyección de la población mundial a largo plazo (1950-2300). Naciones Unidas, Nueva York.

Riahi, K. Gruebler, A. and Nakicenovic N.: 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 7.

Riahi K, Krey V, Rao S, Chirkov V, Fischer G, Kolp P, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafai P (2011) RCP-8.5: exploring the consequence of high emission trajectories. *Climatic Change*.

Schultz, M.G., A. Heil, J.J. Hoelzemann, A. Spessa, K. Thonicke, J. Goldammer, A.C. Held, J.M. Pereira, M. van het Bolscher (2008), Global Wildland Fire Emissions from 1960 to 2000, *Global Biogeochem. Cyc.*

Smith SJ, Wigley TML (2006) MultiGas forcing stabilization with minicam. *The Energy Journal Special issue #3:373–392*

Smith et al. (2009) in preparation; updated from Smith, Steven J., Pitcher, H., and Wigley, T.M.L. (2001) Global and Regional Anthropogenic Sulfur Dioxide Emissions. *Global and Planetary Change* 29/1-2, pp 99-119 Smith, Steven J, Robert Andres, Elvira Conception and Josh Lurz (2004) Sulfur Dioxide Emissions: 1850-2000.

Smith, S.J. and T.M.L. Wigley, 2006. Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *Energy Journal (Special Issue #3)*.



Snover AK., Mantua NJ, Littell JS, Alexander MA, McClure MM, Nye J. 2013. Choosing and Using Climate-Change Scenarios for Ecological-Impact Assessments and Conservation Decisions. *Conservation Biology*, Volume 27, No. 6, 1147–1157. Society for Conservation Biology. DOI: 10.1111/cobi.12163

Solomon, Susan. 1999. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Review of Geographics*: Volume 37, Issue 3. August 1999. Pages 275–316

Taylor, Karl, Stouffer, Ronald J. and Meehl, Gerald A (2011). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*: April 2, 2011

Thomson AM, Calvin KV, Smith SJ, Kyle GP, Volke A, Patel P, Delgado-Arias S, Bond-Lamberty B, Wise MA, Clarke LE et al (2011) *RCP 4,5*: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*.

Van der Werf, G., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla, and A. F. Arellano Jr. (2006), Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.*

Van Vuuren DP, Eickhout B, Lucas PL, den Elzen MGJ (2006) Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing—exploring costs and benefits within an integrated assessment framework. *Energ J* 27:201–233

Van Vuuren, DP, M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, R. van Houdt (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*.

Van Vuuren, DP, Meinshausen M, Plattner GK, Joos F, Strassmann KM, Smith SJ, Wigley TML, Raper SCB, Riahi K, De La Chesnaye F et al (2008) Temperature increase of 21st century mitigation scenarios. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:15258–15262

Van Vuuren, DP, Jae Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, Allison Thomson, Kathy Hibbard, George C. Hurtt, Tom Kram, Volker Krey, Jean-Francois Lamarque, Toshihiko Masui, Malte Meinshausen, Nebojsa Nakicenovic, Steven J. Smith, Steven K. Rose (2011). *The representative concentration pathways: an overview*. Springer International Publishing. 109: 5. doi:10.1007/s10584-011-0148-z

Wise, MA, KV Calvin, AM Thomson, LE Clarke, B Bond-Lamberty, RD Sands, SJ Smith, AC Janetos, JA Edmonds. 2009. Implications of Limiting CO<sub>2</sub> Concentrations for Land Use and Energy. *Science*. 324:1183-1186. May 29, 2009.