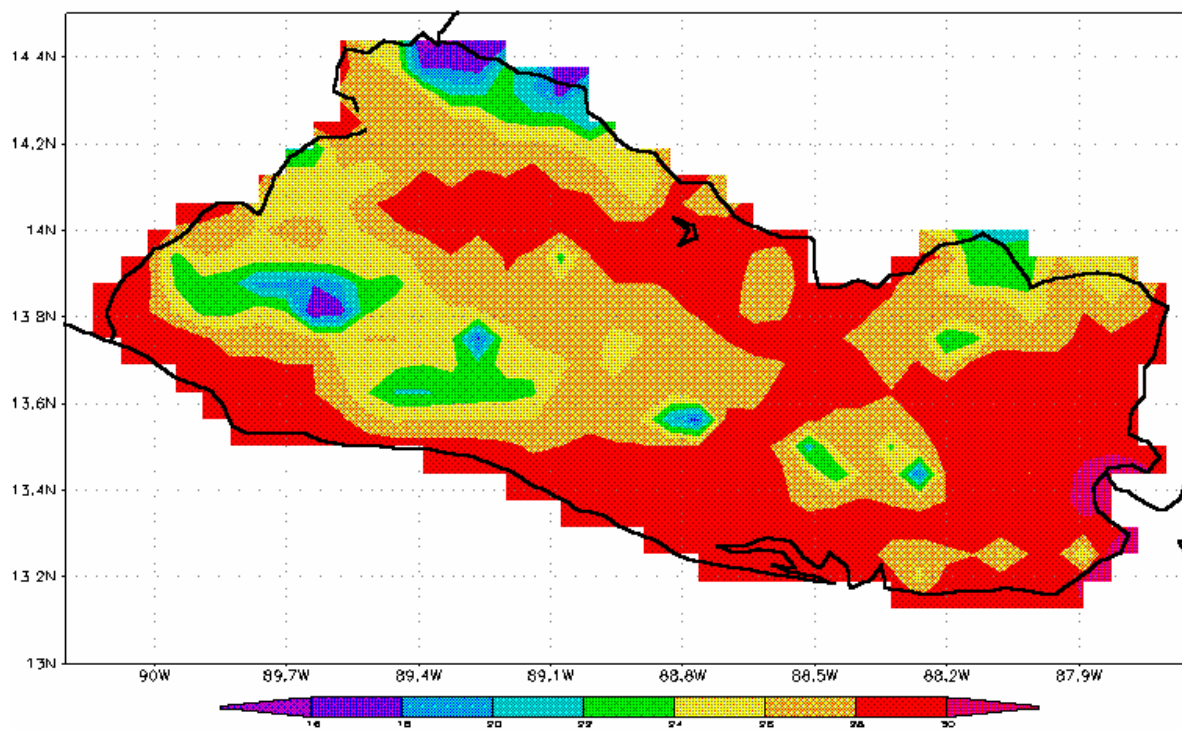


Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO PARA LA EVALUACION DE LOS IMPACTOS EN EL SALVADOR



Temperatura media anual en el año 2050 según el modelo HADCM2

Editado por
Abel Centella Artola
Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología de Cuba

San Salvador, agosto de 1998



1. Introducción

El acelerado crecimiento económico y demográfico mundial, experimentado en los últimos 100 años, ha colocado a la humanidad en una situación ambiental bastante crítica. Hoy se impone el reto de garantizar el desarrollo y de reducir la pobreza sin destruir el ambiente mundial, es decir garantizar que el desarrollo sea sostenible.

El cambio climático mundial es un claro ejemplo de este desafío. Las actividades industriales y agrícolas incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, los que aumentan sus concentraciones atmosféricas a niveles que pueden producir un cambio en el balance energético del sistema tierra-atmósfera y por ende del clima terrestre. Si se quieren reducir los niveles de emisiones de esos gases, habrá que modificar radicalmente las formas de producción actuales. De esta forma se necesitan políticas que lleven de la mano el crecimiento económico y la protección del medio ambiente.

La creciente preocupación por el cambio climático, cuyo carácter es verdaderamente mundial, hizo que fuera necesario un llamado urgente para el establecimiento de un tratado global con miras a abordar el problema. En 1990, la Asamblea General de la Naciones Unidas inició un proceso que resultó en la aprobación y presentación de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). La Convención se abrió a la firma en la Cumbre para la Tierra de Río de Janeiro en 1992 y entró en vigor el 21 de marzo de 1994.

Entre otras cuestiones importantes, el texto de la Convención compromete a las Partes a " *Cooperar en los preparativos para la adaptación a los impactos del cambio climático; desarrollar y elaborar planes apropiados e integrados para la gestión de las zonas costeras, los recursos hídricos ...*" (Artículo 4 (e)). De acuerdo con esos compromisos, las Partes deberán elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes, los resultados de sus evaluaciones. Inicialmente, las Partes deben preparar y enviar a la Secretaría de la Convención, una comunicación inicial (Comunicación Nacional) que incluirá los resultados de las evaluaciones de los posibles impactos del cambio climático y de las medidas de adaptación que se proponen adoptar.

La evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático tiene el objetivo de asegurar el uso óptimo de los recursos climáticos disponibles. Primero, midiendo los impactos positivos y negativos; y segundo, evaluando las medidas de adaptación para dar respuesta a los impactos, obteniendo ventajas de los positivos y minimizando los negativos (Parry y Carter, 1998). Para llevar a cabo estas evaluaciones es necesario obtener una representación cuantitativa de los cambios en el clima, es decir realizar una proyección de los patrones temporales y espaciales del clima futuro.

Actualmente existe gran confianza en que el incremento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEIs) puede producir un incremento de la temperatura global. Sin embargo, la estimación de cómo las altas concentraciones de esos gases pueden afectar los climas regionales tiene una confianza muy baja y está acompañada de numerosas incertidumbres. También es incierto como los cambios climáticos podrían variar (IPCC 1990, 1992) y cómo serán las futuras condiciones socioeconómicas y ambientales. Por todo esto, aun no existe la posibilidad de realizar predicciones confiables de los cambios climáticos a escala regional.

A pesar de la dificultad anterior, resulta necesario ofrecer una idea de cómo podrían verse afectados los ecosistemas actuales, la vida humana o la economía, ofreciendo un poco de claridad a los tomadores de decisiones, para los cuales, la componente científica de este problema resulta a veces tan compleja y oscura, que puede tornarse irrelevante. Así, en lugar de predicciones, se utilizan representaciones del clima futuro, las cuales se pueden utilizar para determinar cuando un sector específico es potencialmente vulnerable al cambio climático, o para identificar los límites, en que los impactos se hacen negativos o severos. A tales representaciones del clima futuro se les ha denominado escenarios de cambio climático y según Viner y Hulme (1992) pueden definirse como: *“Una representación del clima futuro que es internamente consistente, que ha sido construida empleando métodos basados en principios científicos y que puede ser utilizada para comprender las respuestas de los sistemas medio ambientales y sociales ante el futuro cambio climático”*.

Existe una gran variedad de métodos para crear los escenarios de cambio climático y según Carter et al (1993), se pueden agrupar en: escenarios sintéticos (también conocidos como incrementales), análogos, y aquellos que pueden construirse a partir de las salidas de los modelos de circulación general (MCG). Entre esos grupos, la variante más utilizada hasta el momento ha sido la de los MCG, debido a que ellos constituyen la mejores herramientas científicas para proyectar el clima futuro (Benioff et al, 1996). Los MCG son representaciones numéricas tridimensionales, que se emplean para simular el comportamiento del sistema climático global (incluyendo la atmósfera, los océanos, la biosfera, la criosfera y la superficie terrestre).

Los resultados de los experimentos desarrollados con MCG pueden ser combinados con las salidas de modelos climáticos más simples para poder evaluar los resultados de los primeros, bajo una gran variedad de supuestos sobre las futuras emisiones de gases de efecto invernadero. Esta idea, fue utilizada por Viner y Hulme (1993) para desarrollar escenarios de cambio climático regional en Europa utilizando el STUGE (Sea-level and Temperature Greenhouse Effect). Más recientemente, la Unidad de Investigación del Clima de la Universidad de East Anglia del Reino Unido creó dos programas de computadora (MAGICC y SCENGEN), que utilizando un principio similar, pueden ser empleados en la construcción de escenarios.

MAGICC (*Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change*), es un modelo climático unidimensional que ofrece estimaciones internamente consistentes de las concentraciones de gases de efecto invernadero, temperatura media global y elevación del nivel del mar entre los años 1990 y 2100. SCENGEN (SCENario GENerator) combina los resultados de MAGICC y los de un grupo de MCG para producir escenarios de cambio climático regional tomando en cuenta un grupo de variables climáticas.

En este documento se presentan los escenarios de cambio climático desarrollados para la República de El Salvador, utilizando la técnica de combinar los resultados de los MCG y los MCS. Se explican los pasos seguidos y los supuestos asumidos para la creación de los escenarios de cambio climático y se describen los resultados sobre las proyecciones del clima en El Salvador, para diferentes períodos de años en el próximo siglo, incluyendo algunos resultados sobre las proyecciones del incremento del nivel del mar. Finalmente, se presentan las conclusiones derivadas de este estudio.

Al documento se le adicionan tres anexos que contienen: Las tablas con los resultados de las proyecciones; una descripción de la base de datos que contiene los escenarios y algunas recomendaciones a los usuarios; y un glosario de términos técnicos.

2. Creación de los escenarios de cambio climático

La creación de los escenarios de cambio climático es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de vulnerabilidad, pues de ellos depende la dirección de los resultados de la evaluación. De esta manera, la selección de los escenarios debe ser una decisión balanceada y cuidadosamente planeada.

Los escenarios de cambio climático deben ser seleccionados para brindar información que sea: fácil de obtener o derivar; suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto; representativa del rango de incertidumbres de las proyecciones y; físicamente consistente en el sentido espacial (Parry y Carter, 1998). En la práctica, sin embargo, es difícil poder reunir todas esas características en un escenario, pues la representación de ellas depende, en buena medida, del método que se emplee en la creación del escenario.

Para crear los escenarios de cambio climático en El Salvador se utilizó el mismo método empleado por Hulme (1996) y por Centella et al (1998a). En este método se combinan los resultados de los MCS para reproducir las salidas de los MCG bajo diferentes supuestos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero o de sensibilidad climática.

Este método fue seleccionado atendiendo a las siguientes consideraciones:

- Los MCG son la única herramienta que posee la ciencia actual para obtener resultados creíbles de la simulación de los procesos físicos que determinan el clima global.
- El empleo de los MCG para realizar la proyección del clima futuro requiere de grandes recursos de cómputo y tiempo, los cuales son directamente proporcionales a la resolución temporal y espacial con que los MCG realizan las simulaciones. Así, la posibilidad de evaluar varios supuestos sobre las futuras emisiones de gases de efecto de invernadero, y abarcar un amplio rango de las incertidumbres asociadas a ellos, se ve muy limitada con esta herramienta.
- Como los MCS incorporan representaciones simplificadas de los procesos físicos involucrados en el sistema climático, resultan más eficientes desde el punto de vista computacional y pueden ser utilizados para investigar las repercusiones de diferentes escenarios de emisiones futuras y de otros elementos como la sensibilidad climática.
- Los MCS son capaces de reproducir con bastante habilidad los resultados de los MCG a nivel global (IPCC, 1997) y los mismos incluyen los conocimientos más avanzados sobre complejos procesos, como las retroalimentaciones debidas al efecto de fertilización del CO₂, o el forzamiento radiativo negativo de los aerosoles de sulfato, entre otros (IPCC, 1992 y 1996).
- Considerar los resultados de los MCG para varios escenarios de emisiones y sensibilidad climática, entre otros supuestos, permite tomar en cuenta un amplio rango de incertidumbres. Estas incertidumbres pueden ser evaluadas dentro de los estudios de impacto.

Debe notarse que, aun cuando los MCG y los MCS sean herramientas bastante creíbles para simular el comportamiento del sistema climático global, sus proyecciones no deben considerarse como predicciones en el mismo sentido que las de los modelos utilizados en la predicción del tiempo. Esta es una de las razones por la que no resulta adecuado que sus resultados sean vistos como pronósticos del clima futuro.

El proceso de creación de los escenarios de cambio climático utilizando la combinación de los resultados de los MCG y de los MCS involucra tres etapas fundamentales, ellas son: i) definir el escenario global de emisión de gases de efecto invernadero que será utilizado; ii) convertir las emisiones en proyecciones de calentamiento global e incremento del nivel del mar; y iii) combinar las proyecciones globales con los patrones climáticos regionales. En los epígrafes siguientes se describen cada una de estas etapas.

2.1. Escenarios de emisión

La definición de los escenarios de emisiones de GEI (EE) es una etapa muy importante, pues del nivel de las emisiones dependerá, en buena medida, el forzamiento que reciba el sistema y por lo tanto, los resultados que se obtengan en cuanto a temperatura y nivel del mar a escala global.

Del conjunto de EE definidos por el IPCC (Leggett et al, 1992), para este estudio se seleccionaron los escenarios de emisión IS92a, IS92c y IS92f. Estos escenarios representan las proyecciones futuras de gases de efecto invernadero considerando diferentes supuestos sobre el crecimiento de la población mundial, el crecimiento global de la economía, el desarrollo tecnológico, las limitaciones en el uso de recursos energéticos a partir de combustibles fósiles y el desarrollo de la agricultura, entre otros. Así, el IS92a es un escenario de proyección intermedia de las futuras emisiones de GEI y considera sólo una moderada intervención de políticas. De todo el conjunto de EE IS92 (exceptuando el IS92e), el IS92c y el IS92f, por su parte, reflejan las proyecciones más bajas y altas de las futuras emisiones de GEI, respectivamente.

A pesar de que existen otros EE, estos tres escenarios fueron adoptados, después de realizar algunas consideraciones, las cuales coinciden, en parte, con las realizadas en otros trabajos (e. g. Centella et al, 1998a). Algunas de esas consideraciones son:

1. El escenario IS92a ha sido utilizado como referencia por el Comité Internacional de Negociación de la CNUCC.
2. El IS92a ha sido ampliamente utilizado en los estudios de evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático, por lo que su empleo facilita la comparación de los resultados.
3. Como los escenarios IS92c e IS92f representan condiciones extremas, ellos permiten tomar en cuenta el amplio rango de incertidumbres asociadas a las futuras emisiones de GEI.
4. Estos escenarios aparecen bien documentados en la literatura científica (e. g. Leggett et al, 1992; IPCC, 1996).

La evolución de los niveles de emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O aparece en las Figuras 1-3, respectivamente. Note que sólo el escenario IS92c refleja una tendencia decreciente de las emisiones.

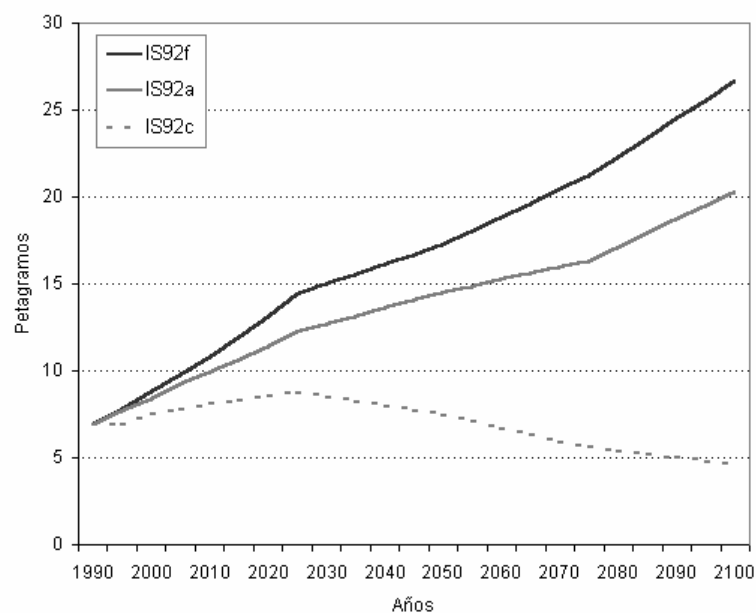


Figura 1. Evolución de las emisiones de CO_2 para los escenarios de emisión IS92a, IS92c e IS92f.

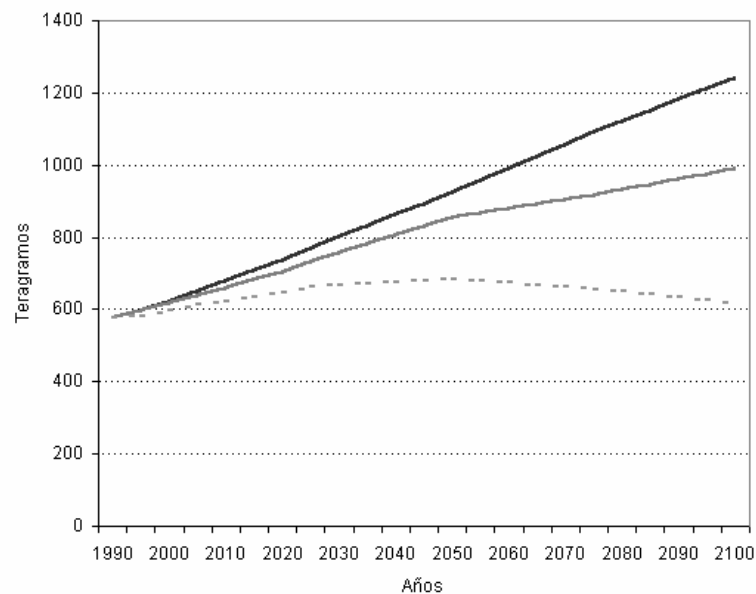


Figura 2. Evolución de las emisiones de CH_4 para los escenarios de emisión IS92a, IS92c e IS92f. Las líneas se definen como en la Figura 1.

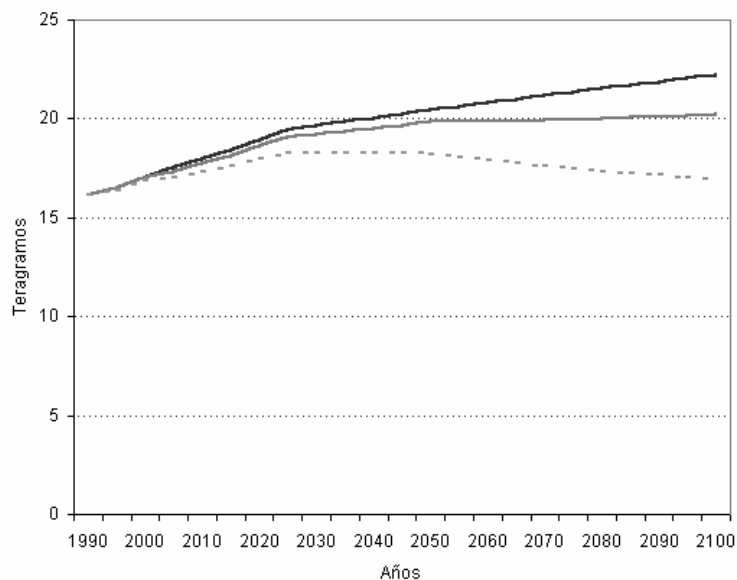


Figura 3. Evolución de las emisiones de N_2O para los escenarios de emisión IS92a, IS92c e IS92f. Las líneas se definen como en la Figura 1.

2.2. Proyecciones globales de temperatura e incremento del nivel del mar

Para obtener las proyecciones globales de temperatura (TG) e incremento del nivel del mar (MG) para un EE determinado, es necesario convertir las emisiones en concentraciones atmosféricas. Después se estima el forzamiento radiativo, del cual depende entonces el calentamiento global. Visto de esta manera, el proceso pudiera resultar extremadamente simple y obvio, pero no es así. En realidad, durante todo este proceso intervienen complejos análisis y simulaciones, que se realizan a través de un grupo de modelos diferentes.

En este estudio las proyecciones de TG y MG, para cada uno de los EE propuestos, se obtuvieron empleando la versión 2.3 del MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change). MAGICC es un programa de computadora desarrollado por la Unidad de Investigación del Clima de la Universidad (UIC) de East Anglia del Reino Unido, que está constituido por un conjunto de modelos, los cuales son descritos brevemente por Wigley (1994).

Para estimar TG y MG, MAGICC convierte las emisiones en concentraciones utilizando varios modelos que simulan el ciclo de los principales GEI. Esas concentraciones son empleadas más tarde para estimar el forzamiento radiativo, mediante los modelos de transferencia radiativa. Finalmente, el forzamiento radiativo medio global es utilizado para correr un modelo climático unidimensional de balance de energía/difusión-afloramiento.

Dentro de MAGICC, hay varios parámetros que determinan los valores de TG y MG. El parámetro más importante es la sensibilidad climática (ΔT_{2x}), el cual es una medida del cambio de la temperatura media global para un forzamiento radiativo determinado (véase IPCC, 1995 e IPCC, 1997, para una descripción más detallada de la sensibilidad climática). Utilizando $\Delta T_{2x} = 2.5^\circ\text{C}$, 1.5°C y 4.5°C (los cuales son el mejor estimado y los límites bajo y alto de los valores de sensibilidad considerados por el IPCC, respectivamente) se estimaron, para cada EE, los valores de TG y MG con respecto al período 1961-1990 y al año 1990, respectivamente. En las Figuras 4-6 se muestran los resultados de las estimaciones de TG, mientras que las Figuras 7-9 reflejan las estimaciones de MG. Nótese que aún para el EE IS92c, se produce un incremento de la temperatura media global.

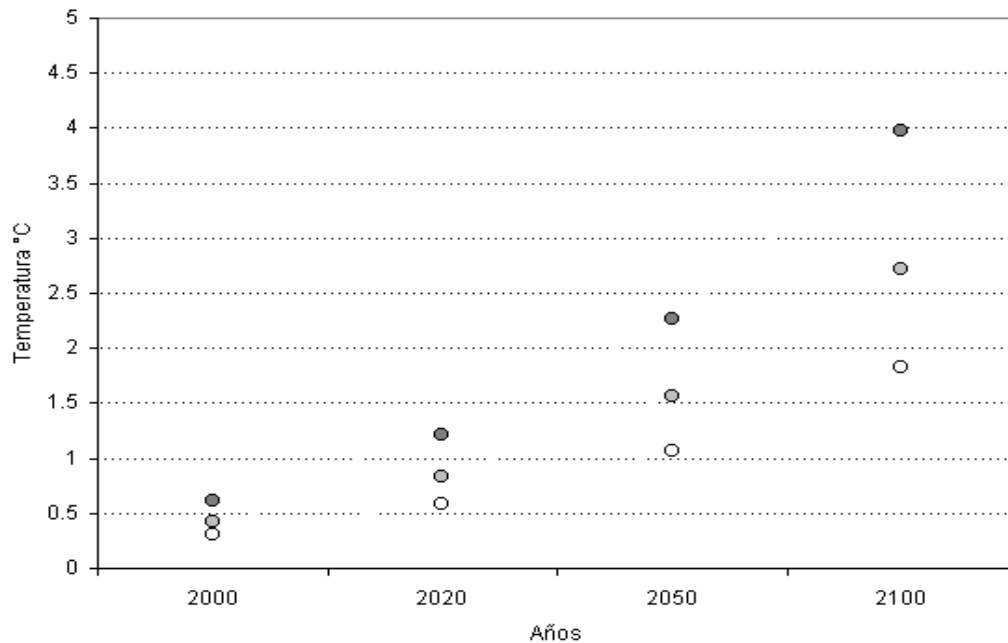


Figura 4. Calentamiento global proyectado bajo el escenario de emisión IS92a. Los círculos en blanco, gris claro y gris oscuro se asocian con valores de sensibilidad climática de 1.5°C , 2.5°C y 4.5°C , respectivamente.

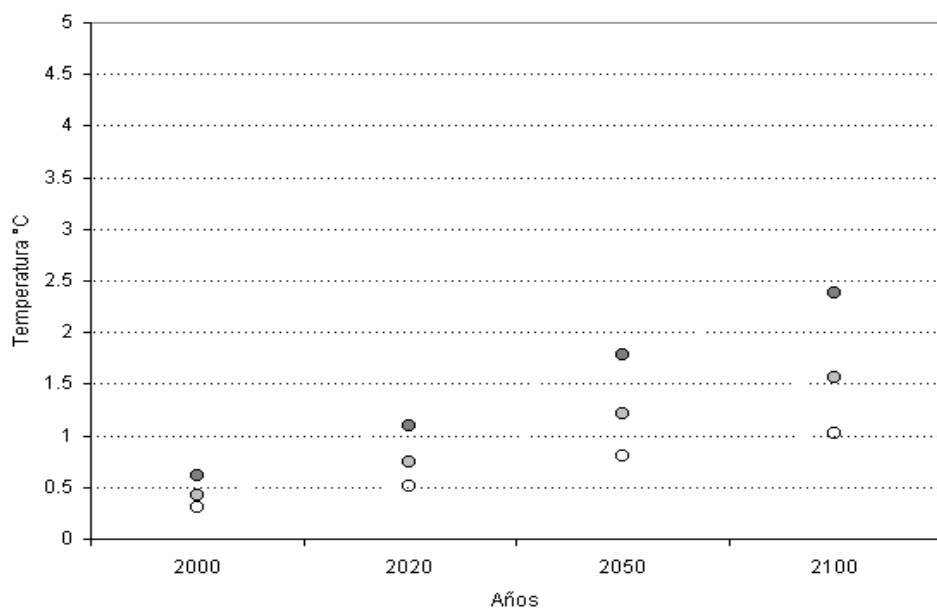


Figura 5. Como la Figura 4, para el escenario de emisiones IS92 c.

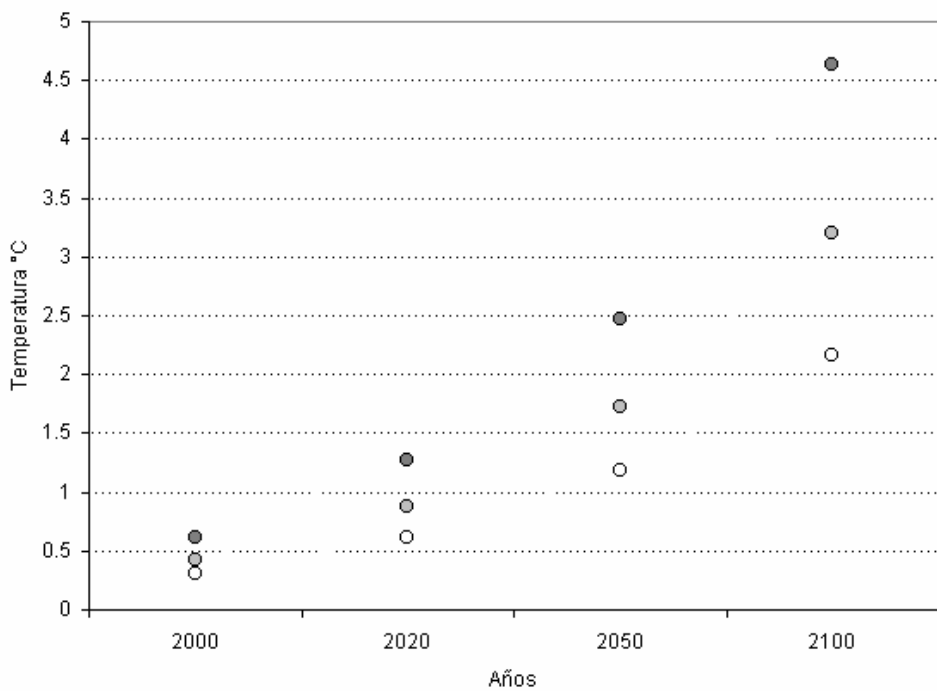


Figura 6. Como la Figura 4, para el escenario de emisión IS92f

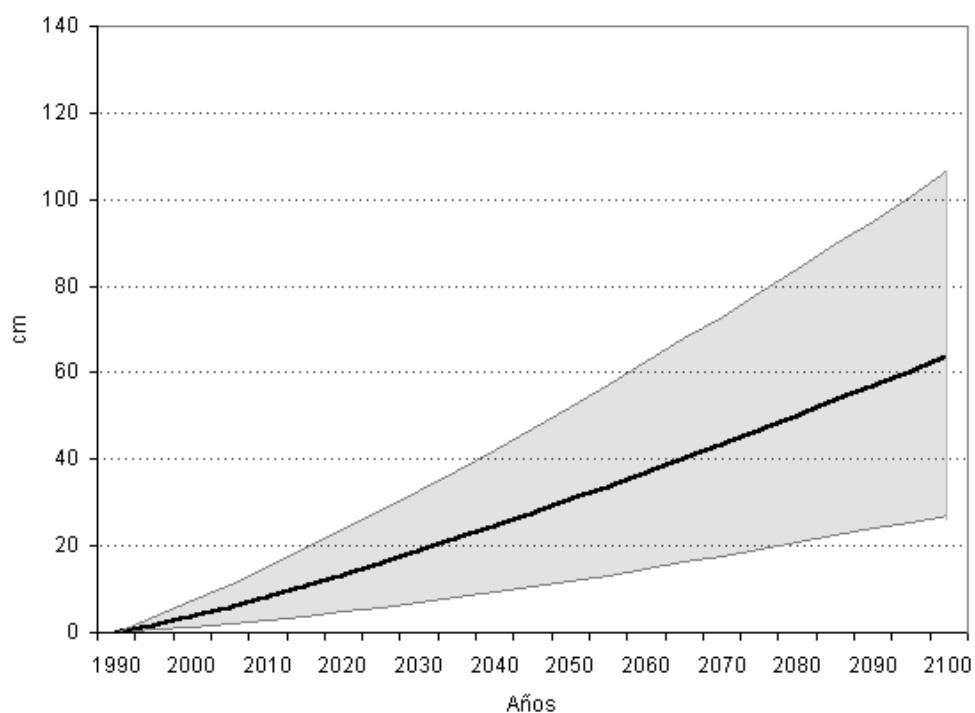


Figura 7. Proyección del incremento del nivel del mar bajo el escenario de emisión IS92a. La línea se asocia con la proyección considerando una sensibilidad climática media ($\Delta T_{2x}=2.5^\circ\text{C}$). El área sombreada indica el rango de estimados considerando los valores extremos de ΔT_{2x} (1.5°C y 4.5°C).

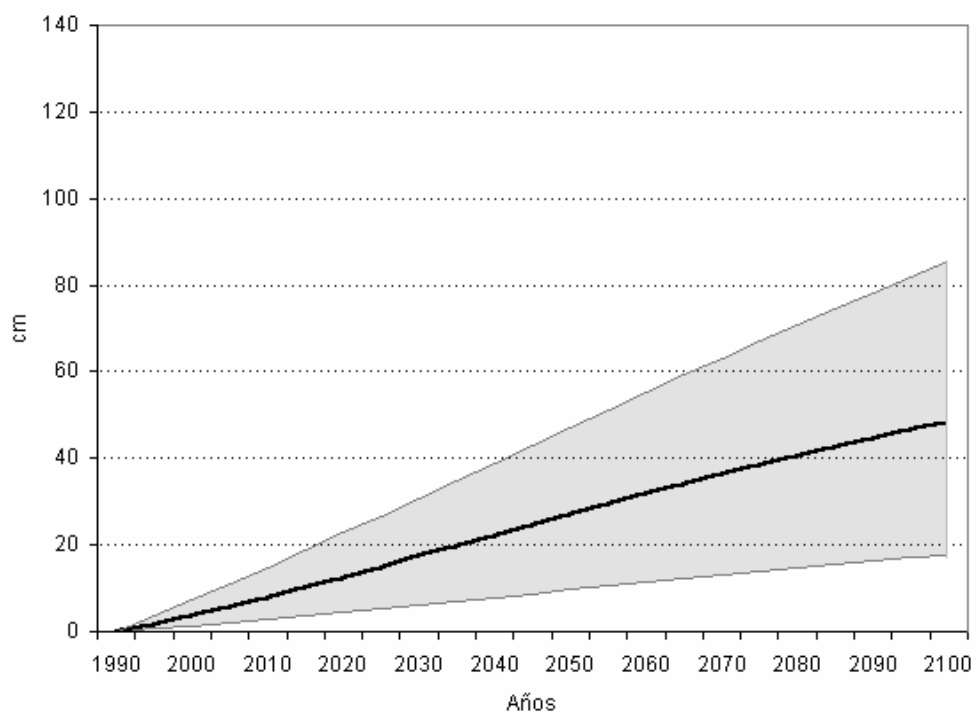


Figura 8. Similar a la Figura 7, para el escenario de emisión IS92c.

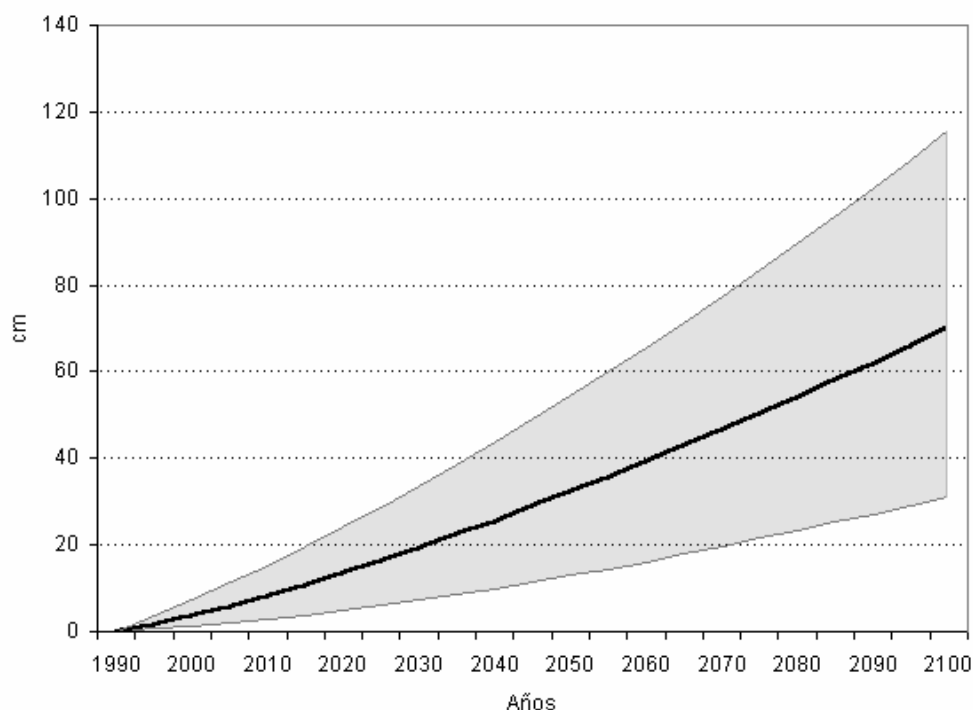


Figura 9. Similar a la Figura 7, para el escenario de emisión IS92f.

2.3. Proyección de los patrones de cambio climático en El Salvador.

La última etapa en la creación de los escenarios climáticos es la combinación de los resultados de los MCS (MAGICC) con los de las salidas de los MCG.

Como ya se mencionó, los MCS poseen la habilidad de reproducir los resultados de los MCG y por ello pueden ser utilizados con bastante confianza. Sin embargo, los MCS no pueden utilizarse directamente para proyectar los patrones de cambio regional, pues ellos solamente proporcionan resultados sobre la temperatura y el incremento del nivel del mar a escala global. Por otra parte, aunque los MCG producen sus resultados sobre rejillas uniformes, las cuales sí pueden utilizarse directamente en la proyección de los patrones regionales, sus salidas no están disponibles para una diversidad de supuestos sobre futuras emisiones de GEI. Así pues, es necesario combinar los resultados globales de los primeros con las rejillas de los segundos.

La combinación de los resultados se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- I. Se obtienen los valores de cambio de una variable climática en cada punto de rejilla del MCG, a partir de la diferencia entre las simulaciones perturbada ($2XCO_2$) y la de control ($1XCO_2$). Esto se realiza para cada una de las variables climáticas de interés, cuyos resultados son proyectados por el MCG.
- II. Los valores de cambio son divididos (estandarizados) por el calentamiento global del MCG en cuestión, para producir una magnitud que representa el cambio de cualquier variable por grado de calentamiento global. Debe notarse que en el caso de los MCG de equilibrio (por ejemplo el modelo UKHI), por definición, los valores de ΔT_{2x} y calentamiento global son los mismos; sin embargo, para los MCG de respuesta transitoria, estos parámetros sólo son iguales si los resultados de la simulación fueron extraídos para el momento en que se produjo la duplicación de las concentraciones de CO_2 .
- III. Finalmente, los valores estandarizados son reescalados nuevamente, al multiplicarlos por el calentamiento global obtenido de la salida del MCS.

De acuerdo con Centella et al (1998a), este proceso puede ser representado mediante:

$$\Delta V_{i,año} = \Delta T_{año} MCS * \Delta V_i / \Delta T_{MCG}$$

donde: ΔV_i es la diferencia $2XCO_2 - 1XCO_2$ en el punto de rejilla i , para la variable V ; ΔT_{MCG} es el calentamiento global dado por el MCG; $\Delta T_{año} MCS$ es el cambio de temperatura global para un año específico con relación al período 1961-1990 obtenido por el MAGICC y $\Delta V_{i,año}$ es el cambio en la variable V para un año determinado en el punto de rejilla i .

En este trabajo, un programa de computadora llamado SCENGEN (desarrollado también por la UIC) fue empleado para estandarizar los valores de las variables climáticas producidas por los MCG y reescalar los mismos, considerando los resultados de calentamiento global obtenidos por MAGICC para los períodos de 30 años centrados en el 2020, 2050 y 2100 (en adelante se referirán como 2020,2050 y 2100, solamente), bajo los EE y valores de ΔT_{2x} seleccionados.

SCENGEN contiene una base de datos con los resultados de 14 MCG, los cuales fueron previamente interpolados en una rejilla de 5° latitud/longitud (Hulme et al, 1995). De todos estos modelos se escogieron las salidas del HADCM2, del ECHAM3TR (Kattenburg et al, 1996) y del UKHI (Mitchell et al, 1990). Esta selección se realizó atendiendo a los siguientes criterios:

- De acuerdo con las magnitudes del coeficiente de correlación, que mide el grado de relación entre los valores reales y simulados de las precipitaciones medias mensuales globales (Hulme, 1995), los modelos HADCM2, UKHI y ECHAM3TR, clasifican como el primero, tercero y quinto, respectivamente, entre los 14 MCG disponibles en SCENGEN. Debe notarse que el coeficiente de correlación de las precipitaciones es un indicador de la capacidad que tienen los MCG de reproducir el patrón anual de las precipitaciones a escala global, bajo condiciones de clima actual. Esto no significa, sin embargo, que de estos resultados se pueda concluir que un modelo es mejor que otro
- Si se consideran los resultados de estos tres modelos se puede abarcar un amplio rango de incertidumbres asociadas a las proyecciones de todos los MCG. Esto es particularmente válido en el caso de la precipitación, para la cual se producen las mayores discrepancias en los resultados (mientras unos modelos proyectan un incremento de las precipitaciones otros indican una reducción).
- Los resultados del HADCM2 y ECHAM3TR pertenecen a simulaciones recientes. De acuerdo con Parry y Carter (1998) los experimentos realizados recientemente probablemente sean mejores, dado que se basan en el conocimiento más actualizado sobre diferentes procesos del sistema climático.
- Los resultados del HADCM2 comienzan a ser considerados en diferentes estudios de impacto de los cambios climáticos, ofreciendo así la posibilidad de realizar comparaciones.

3. Proyecciones del clima futuro para El Salvador.

3.1. Temperatura y precipitación.

De acuerdo con los resultados de los tres MCG, extraídos de la rejilla del SCENGEN dentro de la cual se localiza El Salvador (Figura 10) y considerando el escenario de emisión IS92a con una sensibilidad climática media, el cambio climático proyectado para El Salvador (Figura 11) indica un incremento de la temperatura que varía desde 0.8°C a 1.1°C en el año 2020 hasta 2.5°C a 3.7°C en el 2100. Para la precipitación, como se había mencionado antes, los resultados tienen mayor incertidumbre, pues las proyecciones abarcan rangos desde -11.3% a 3.5% en el 2020 hasta -36.6% a 11.1% en el 2100. Si se toman en cuenta los otros EE (Figuras 12 y 13), el patrón que se obtiene es similar y sólo se observan cambios en la magnitud de los valores, los cuales, como es lógico, son el resultado de las diferencias existentes en el forzamiento asociado a cada escenario de emisión.

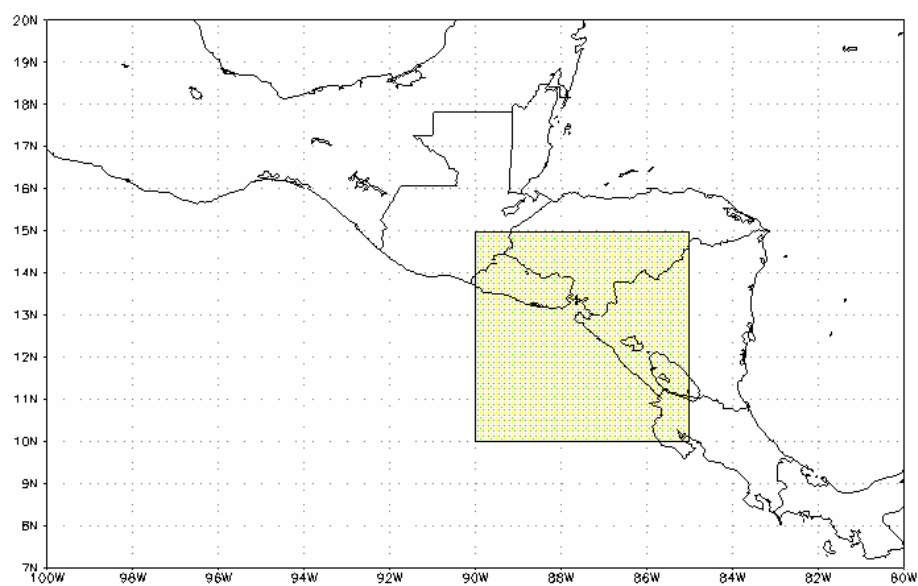


Figura 10. Rejilla del SCENGEN que cae sobre El Salvador, para la cual fueron extraídos los valores de cambio de temperatura y precipitación.

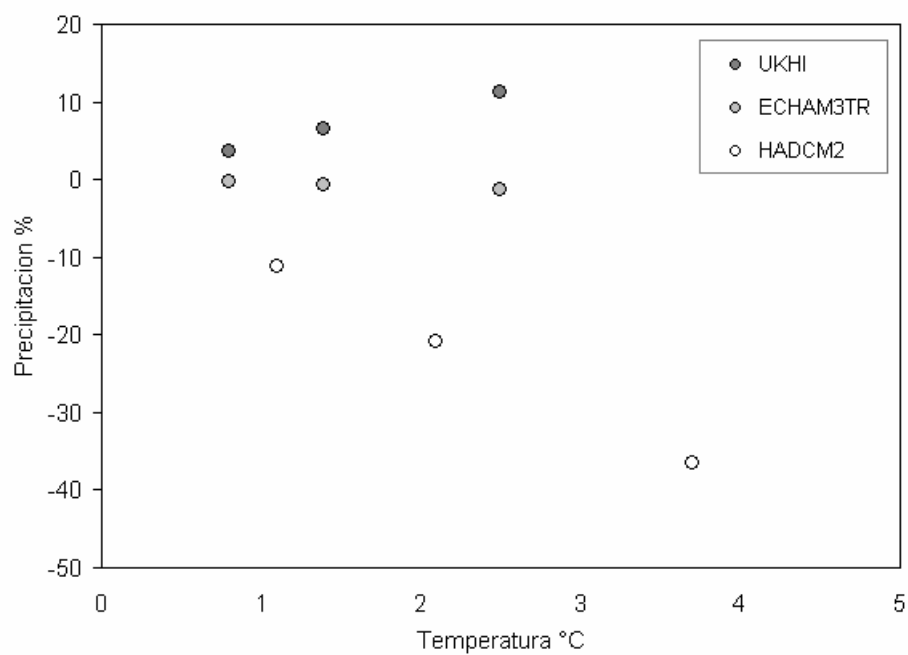


Figura 11. Cambio de temperatura y precipitación para los tres MCG en los años 2020, 2050 y 2100 (de izquierda a derecha, respectivamente), considerando el escenario de emisión IS92a y $\Delta T_{2x}=2.5^{\circ}\text{C}$.

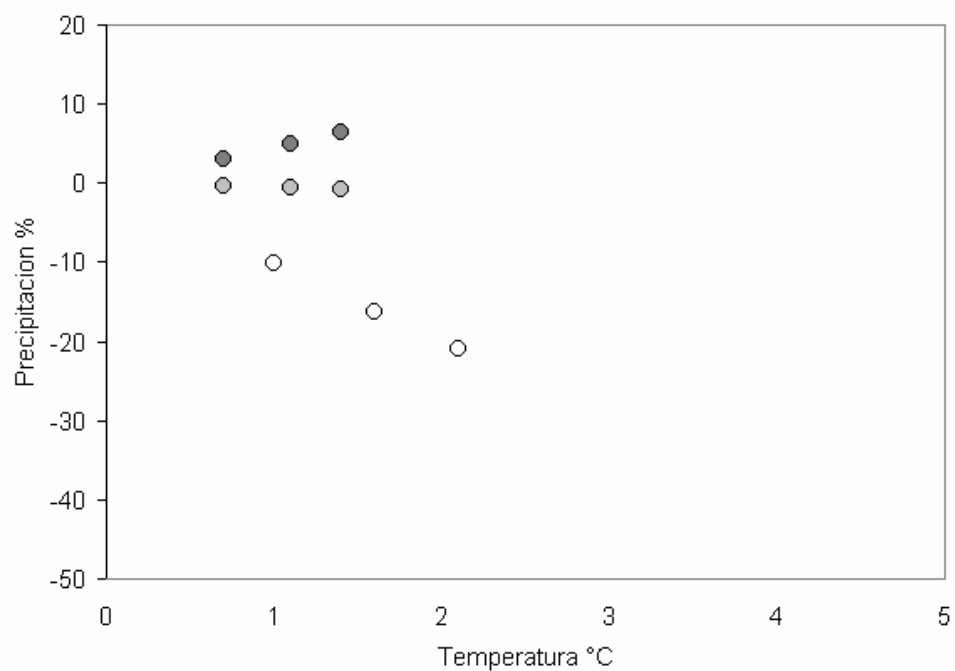


Figura 12. Similar a la Figura 11, para el escenario de emisión IS92c.

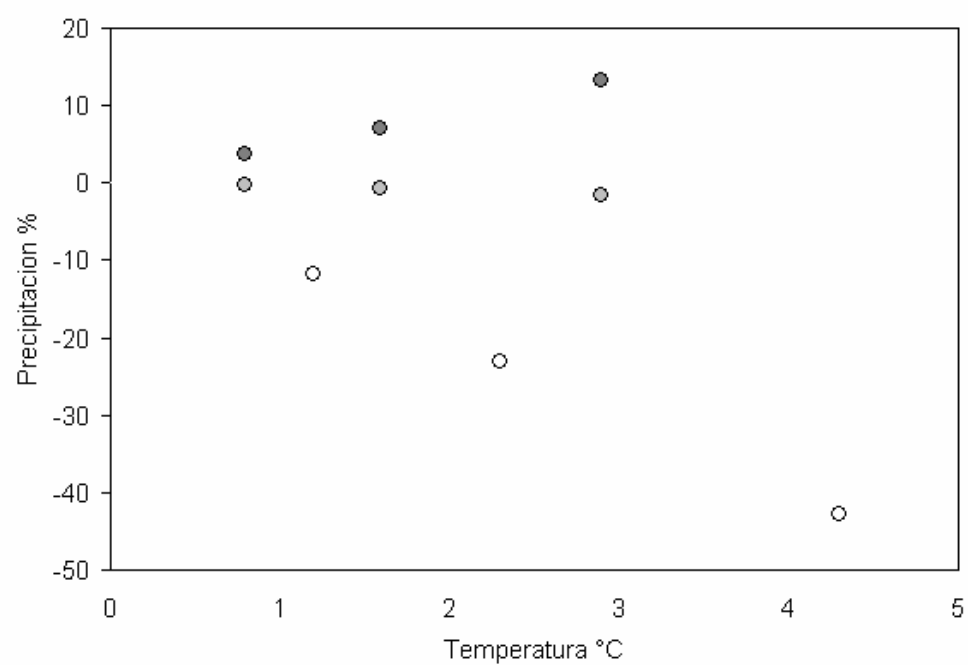


Figura 13. Similar a la Figura 11, para el escenario de emisión IS92f.

Como se puede apreciar en las Figuras citadas anteriormente, las proyecciones del modelo HADCM2 indican una notable reducción de las precipitaciones, con un nivel de calentamiento mayor. El modelo UKHI, por el contrario, tiende a proyectar un incremento en los valores de la precipitación con un menor calentamiento. Para el modelo ECHAM3TR, la proyección de la precipitación es intermedia.

Las proyecciones mensuales del cambio de temperatura y precipitación, tomando en cuenta los diferentes supuestos sobre futuras emisiones y una sensibilidad climática media (Figuras 14-16, como ejemplos de proyecciones en el año 2050), pueden ser combinados con el escenario climático de referencia o climatología, para obtener las condiciones climáticas futuras en la República de El Salvador. El escenario climático de referencia utilizado aquí se corresponde con los promedios de temperatura y precipitación para el período 1961-1990, interpolados sobre una rejilla uniforme de 5 minutos latitud/longitud (ver Centella et al, 1998b, para una descripción detallada de la climatología).

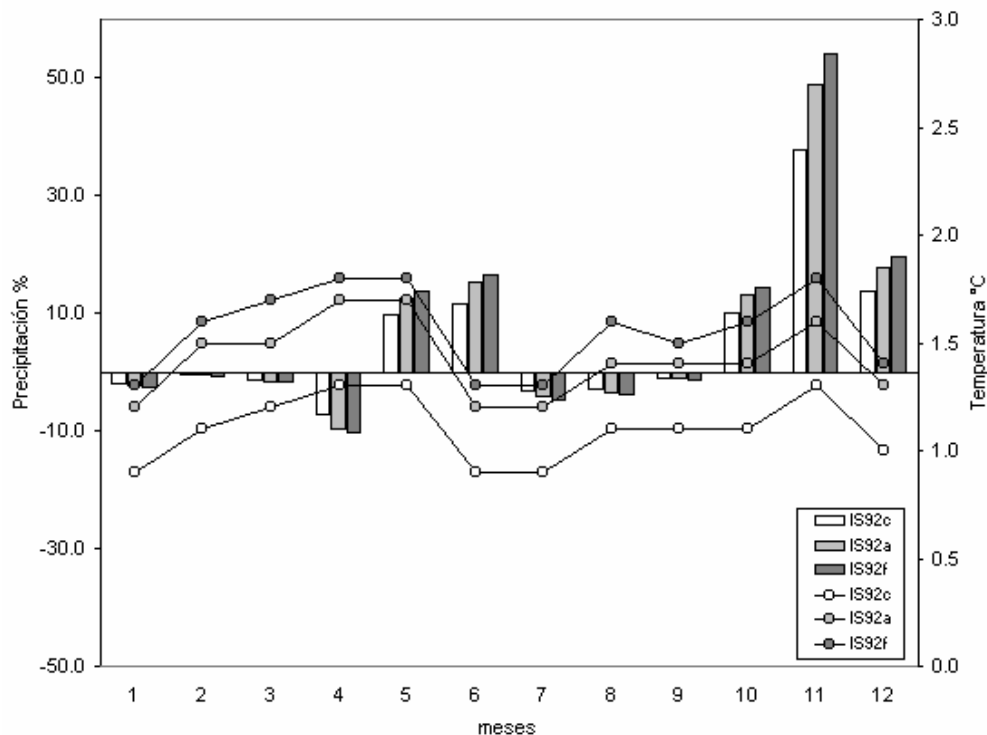


Figura 14. Patrón de variación anual del cambio de temperatura (líneas) y precipitación (barras) para diferentes escenarios de emisión, a partir de los resultados del modelo UKHI.

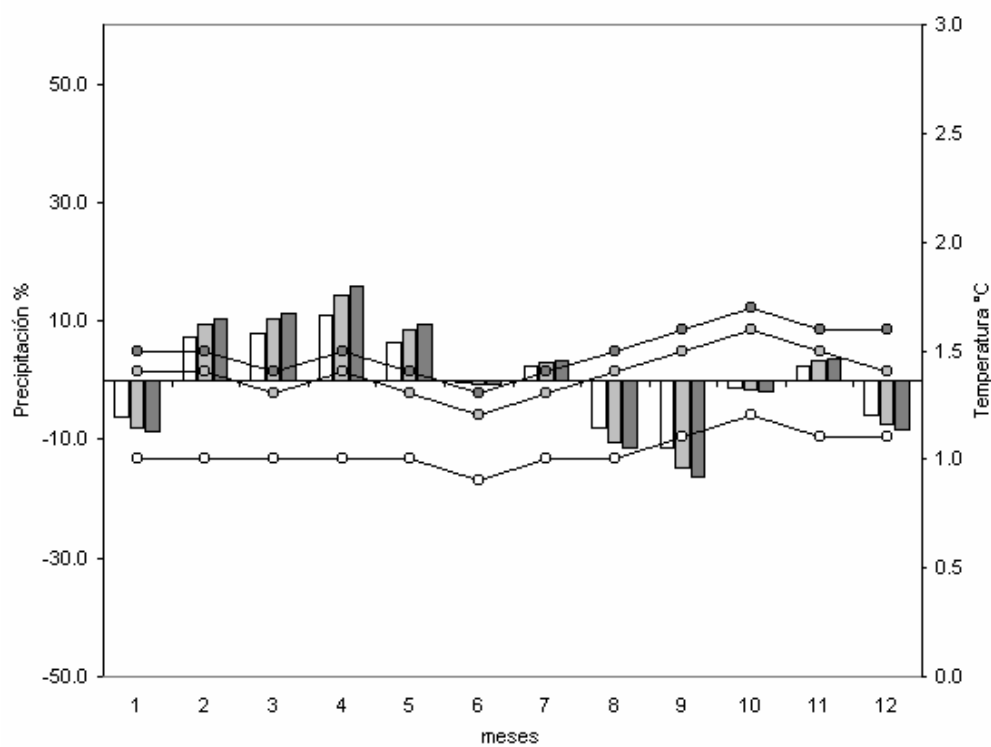


Figura 15. Similar a la Figura 14, para el modelo ECHAM3TR..

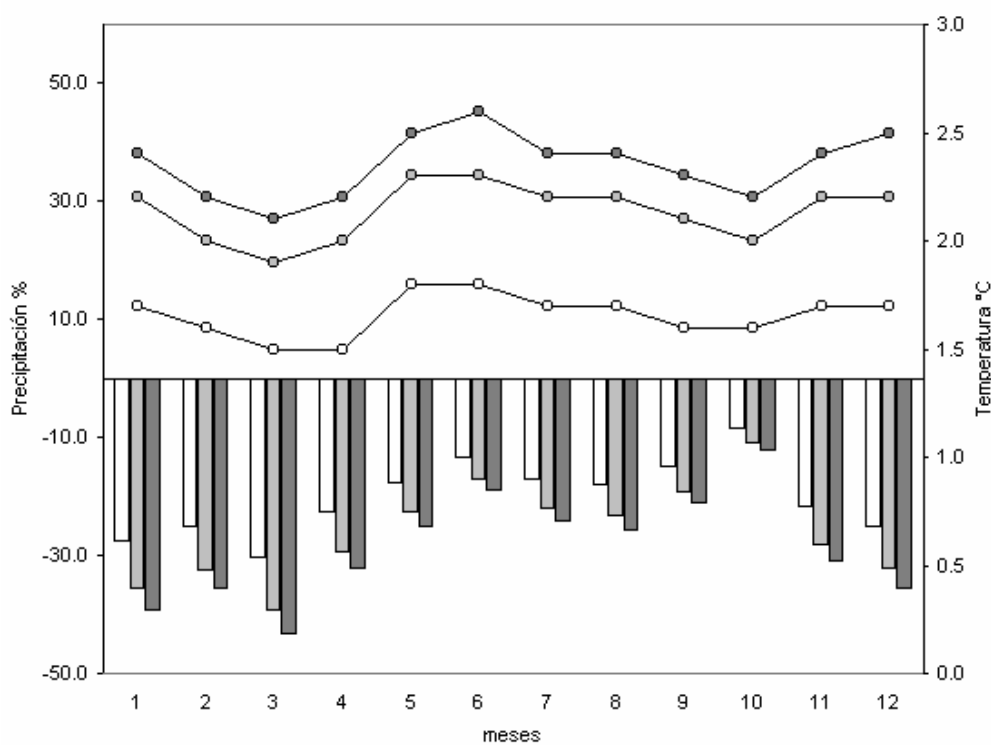


Figura 16. Similar a la Figura 14, para el modelo HADCM2.

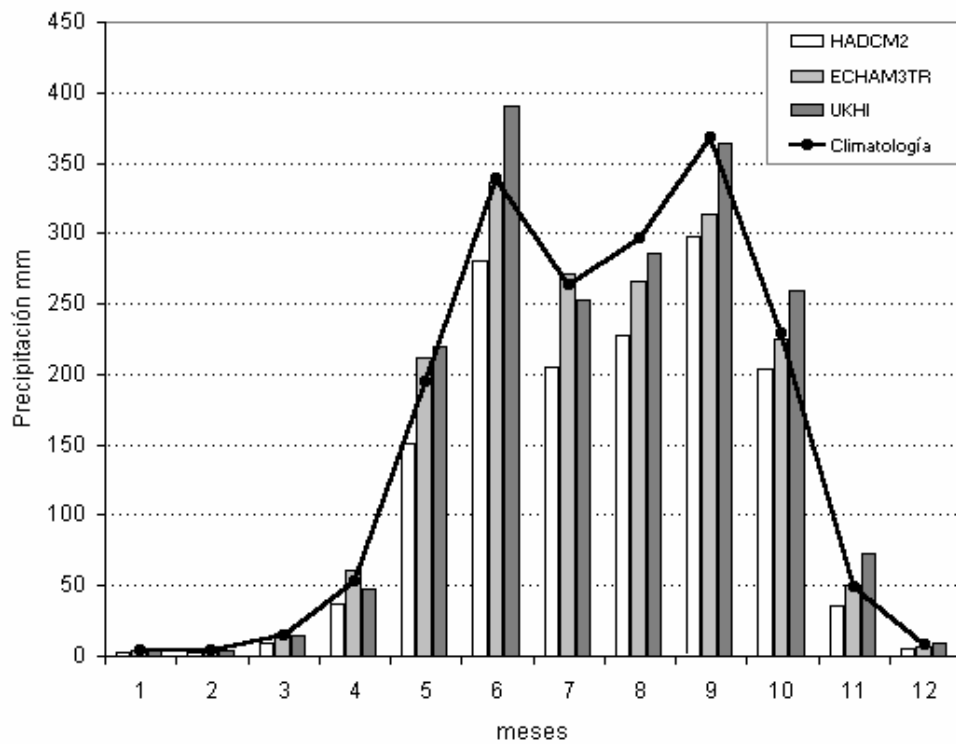


Figura 17. Patrón de variación anual de la precipitación para el año 2050, de acuerdo con la salida de los tres MCG y considerando el escenario de emisión IS92a.

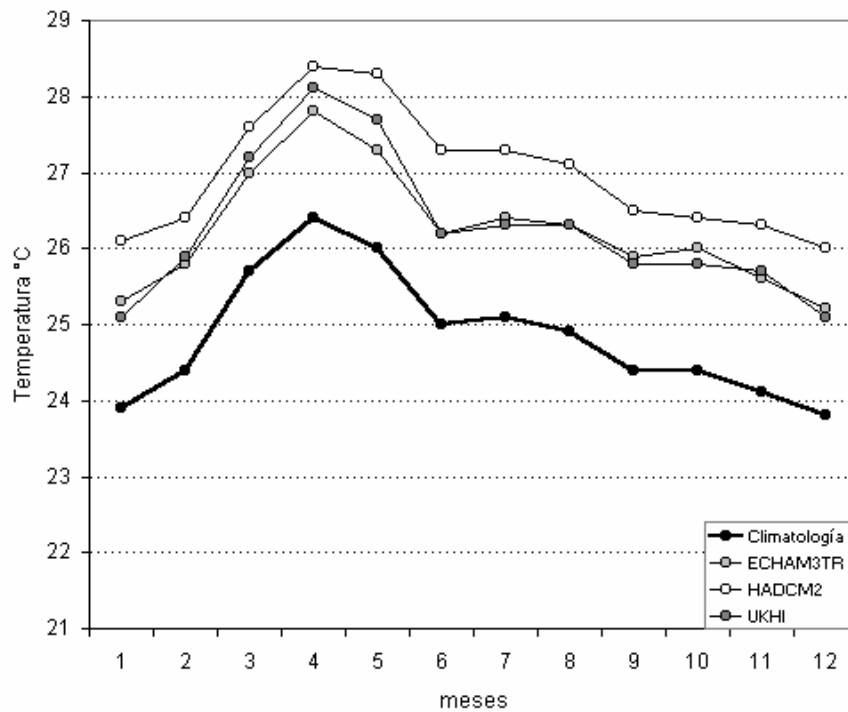


Figura 18. Similar a la Figura 17, para la temperatura.

En
ter

y la
CG,

con una sensibilidad climática media y tomando en cuenta el escenario IS92a. Una característica importante, reflejada en los patrones de la precipitación, es la tendencia a la intensificación de la canícula o veranillo, aun bajo las proyecciones del modelo UKHI. Este hecho, apreciado en las proyecciones bajo todos los escenarios de emisiones futuras de GEI, podría tener implicaciones en diferentes sectores relacionados con la producción de alimentos o el aprovechamiento de los recursos hídricos, por lo cual debe ser profundamente considerado en las evaluaciones de impacto. En el caso de la temperatura, las proyecciones de los tres modelos manifiestan una clara tendencia al incremento de sus magnitudes en todos los meses, sin que se aprecien cambios importantes en la estructura del patrón de variación anual. Debe aclararse que los resultados discutidos arriba reflejan solamente condiciones medias para un período de tiempo (en este caso 30 años centrados en el 2050), por lo que no toman en cuenta aquellas variaciones relacionadas con la variabilidad climática interanual.

Mediante la combinación de las proyecciones de cambio con la climatología, también se pueden producir los patrones espaciales de temperatura y precipitación mensual, estacional y anual; un ejemplo de ello aparece en la Figura 19. Debe tenerse en cuenta que la estructura de estos campos está totalmente influenciada por la de la climatología, pues el cambio es común para todo el país (Figura 10). Indudablemente, esto representa una desventaja de los métodos de generación de escenarios climáticos que, como éste, se basan en la aplicación directa de las salidas de los MCG.

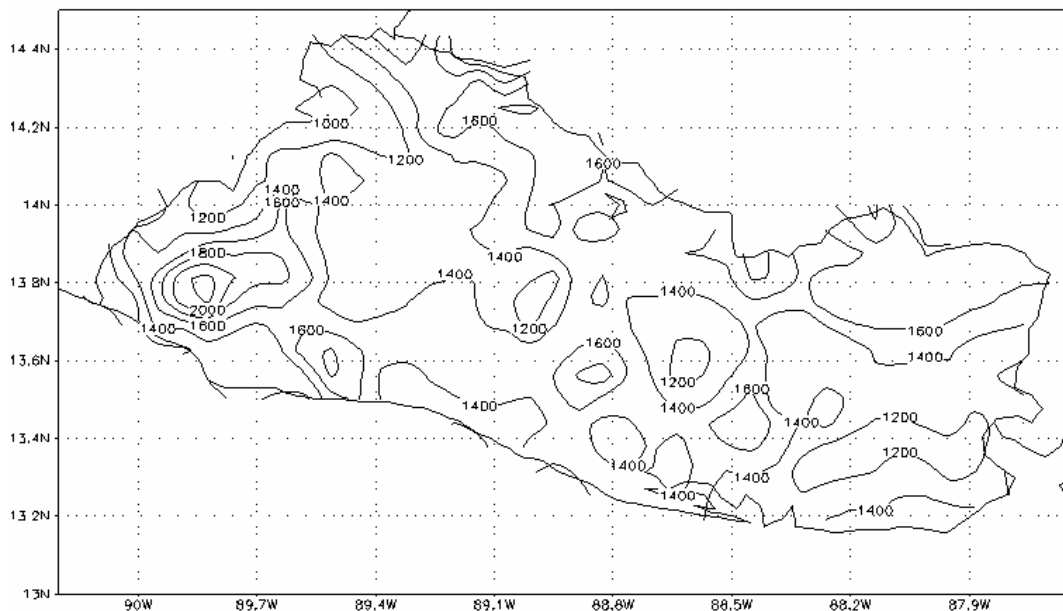


Figura 19. Distribución espacial de la precipitación anual (mm) en El Salvador para el año 2050, de acuerdo a la proyección del modelo HADCM2 y asumiendo una sensibilidad climática media, bajo el escenario de emisión IS92a.

Otra desventaja del método utilizado en la creación de los escenarios de cambio climático para El Salvador es que el mismo supone la existencia de una relación lineal entre el clima global y el clima regional, lo cual resulta poco probable, aun bajo las condiciones del clima actual.

A pesar de las desventajas mencionadas arriba, la metodología utilizada presenta la ventaja de poder considerar un amplio rango de posibilidades en cuanto a escenarios de emisiones o valores de sensibilidad climática, permitiendo, de este modo, que la evaluación de los impactos pueda ser desarrollada tomando en consideración diferentes posibilidades y determinando el grado o nivel de sensibilidad de las unidades de exposición, bajo dichas condiciones.

Es importante mencionar que la rejilla de SCENGEN que fue utilizada no considera a la pequeña porción de territorio salvadoreño que se extiende más allá de los 90°W. Sin embargo, a los efectos de este estudio se consideró que todo el país quedaba situado dentro de la rejilla seleccionada. En realidad las diferencias entre las proyecciones para la rejilla escogida y su vecina fueron muy pequeñas.

Otro elemento importante es que en las proyecciones realizadas para el clima de El Salvador durante el próximo siglo no se consideró el efecto de los aerosoles de sulfato, debido a que para estos compuestos, cuyas concentraciones están muy relacionadas con la ubicación y nivel de emisión de las fuentes que los generan, los resultados muestran que el forzamiento radiativo resulta bastante pequeño en la región donde se encuentra El Salvador (IPCC, 1994).

Es evidente que los resultados descritos anteriormente pueden variar en dependencia de cuan sensible sea el clima a un forzamiento determinado, ocurriendo más temprano o más tarde si la sensibilidad es mayor o menor, respectivamente. Por ejemplo, si utilizamos una sensibilidad climática de 4.5 °C (muy sensible) las proyecciones que aparecen en las Figuras 17 y 18 podrían ocurrir entonces alrededor del 2030. Alternativamente, si el clima fuera poco sensible a los cambios en el forzamiento radiativo ($\Delta T_{2x}=1.5^{\circ}\text{C}$), entonces dichos cambios no se realizarían hasta los años cercanos al 2082.

Las proyecciones mensuales, estacionales y anuales del cambio de temperatura y precipitación, asociadas a cada MCG, para diferentes escenarios de emisión y niveles de sensibilidad climática, aparecen en el Anexo I.

3.2. Algunas consideraciones sobre las proyecciones del incremento del nivel mar.

A diferencia del epígrafe anterior, aquí no se realizará una discusión detallada de los resultados obtenidos. Más bien se abordan algunos elementos que pueden ser importantes para utilizar las proyecciones de MG en la evaluación de los impactos del cambio climático en el país.

Primero debe tenerse muy en cuenta que los resultados de MG son globales y que no es probable que dicho incremento sea homogéneo en todo el planeta. En este sentido se pueden producir variaciones espaciales en dependencia de la razón de calentamiento en diferentes partes del océano mundial y de las variaciones espaciales de la presión atmosférica sobre el océano, entre otros elementos. Esto hace que el empleo de estimaciones globales en la evaluación del impacto regional se convierta en una fuente adicional de incertidumbres.

Un elemento básico a la hora de considerar estas proyecciones es la dinámica de la tectónica reciente en la región de estudio. En este documento, sin embargo, este elemento no es considerado, pues no estuvo disponible ningún tipo de información que permitiera realizar una estimación de los movimientos relativos entre la superficie terrestre y el océano en la zona costera salvadoreña. Este aspecto debe ser profundamente analizado en el marco de los estudios de evaluación de los impactos del cambio climático, para que las proyecciones que hoy se presentan, puedan ser corregidas en función de los elementos ya explicados.

4. Conclusiones.

Un conjunto de escenarios climáticos ha sido generado para El Salvador, combinando las salidas de un modelo climático simple con las de tres modelos de circulación general. Los resultados obtenidos se basan en tres escenarios de emisiones futuras de gases de efecto invernadero y toman en cuenta el mejor estimado y los valores extremos de sensibilidad climática del IPCC. De acuerdo con estos supuestos, el conjunto de escenarios de cambio climático, cuyos resultados se han descrito en este documento, reflejan un amplio rango de las incertidumbres asociadas con este tipo de proyecciones. De esta forma se cumple uno de los objetivos de este estudio.

En sentido general, las proyecciones indican un incremento de la temperatura, que variará entre 0.8 °C en el 2020 hasta 3.7°C en el 2100, en dependencia del MCG que se utilice y de los demás supuestos que se consideren. Con el transcurso del tiempo las diferencias entre las magnitudes del cambio de

temperatura se hacen mayores, lo cual es una muestra de la incertidumbre relacionada con las proyecciones a muy largo plazo. En el caso de la precipitación los resultados fueron divergentes, pues cuando un modelo indicaba incrementos en esta variable, otro sugería notables decrementos. Los resultados del modelo HADCM2 fueron los más extremos, indicando una fuerte tendencia al incremento de la temperatura y a la reducción de la precipitación.

El análisis de los patrones de variación anual del cambio de precipitación permitió detectar que, a pesar de las divergencias en los resultados de diferentes MCG, bajo todas las proyecciones se observó una tendencia a la reducción de las precipitaciones durante los meses de julio a septiembre, lo cual puede estar asociado a una intensificación de la canícula o sequía intraestival. Este elemento debe ser considerado con profundidad a la hora de evaluar el impacto de los cambios en el clima en diferentes sectores de la vida social y económica de El Salvador.

El conjunto de escenarios generado puede ser combinado con la nueva climatología 1961-1990, con vistas a poder estudiar las repercusiones de los cambios en sectores de pequeña escala espacial. De hecho, la climatología desarrollada por Centella et al (1998b), tiene una resolución espacial aceptable para lograr estos propósitos.

Debe notarse que el método utilizado para desarrollar los escenarios de cambio climático posee varias desventajas, las que están en función de los supuestos que realiza para combinar las salidas de los MCS con las de los MCG. Sin embargo, como bien se explicó en el cuerpo del informe, la metodología utilizada presenta la enorme ventaja de que permite que un amplio espectro de supuestos pueda ser revisado y de esta manera, poder considerar una variada gama de incertidumbres asociadas con las proyecciones del clima futuro. Téngase en cuenta que ninguno de los métodos utilizados actualmente para desarrollar escenarios de cambio climático está libre de desventajas, incluso aquellos que son más sofisticados. En cualquier caso, las desventajas han sido claramente expuestas para impedir que se hagan conclusiones erróneas en el proceso de evaluación de impactos.

Además de las proyecciones de temperatura y precipitación para diferentes horizontes temporales, fueron obtenidos resultados sobre el incremento del nivel del mar para los mismos escenarios de emisión y valores de sensibilidad climática. Es importante mencionar que estos resultados están referidos a nivel global y su empleo exige que al menos sean combinados con otros elementos como son los movimientos tectónicos recientes en la zona bajo estudio. Si esto no es realizado, poca ventaja se podrá sacar de este tipo de información.

5. Agradecimientos.

Este trabajo ha sido realizado con el financiamiento proveniente del Proyecto PNUD/GEF/ELS/97/G32. Nuestro agradecimiento a las autoridades de la Universidad de El Salvador por el apoyo y la ayuda brindada durante el desarrollo de todas las actividades relacionadas con este estudio; en especial a la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática y a sus escuelas de Física y Matemática por facilitarnos el equipamiento disponible para llevar a cabo el procesamiento de la información. Un agradecimiento muy especial a la Lic. Yvette Mungía de Aguilar, coordinadora del Proyecto, por su constante preocupación y apoyo al desarrollo del estudio; gracias también por su confianza. Hacemos extensivo nuestra gratitud a la Lic. Aida Simón de Betancourt, Directora de la Unidad Social del Ministerio de Relaciones Exteriores, por su decisivo y efectivo aporte a la realización de este estudio. Finalmente, agradecemos la ayuda recibida de la Dirección General de Recursos Naturales y Renovables del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

6. Referencias.

Benioff, R., S. Guill and J. Lee, eds., 1996: Vulnerability and adaptation assessments: An international Handbook. Dordrecht, The Neatherlands, Kluwer Academic Publishers, 320 pp.

Carter, T., E. Holopainen y M. Kannien, 1993: Techniques for developing regional climatic scenarios for Finland. Publications of the Academy of Finland 2/93, Painatuskeskus, Helsinki, 63 pp.

Centella A., T. Gutiérrez, M. Limia and R. Rivero, 1998a: Climate change scenarios for impact assessment in Cuba. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, Cuba, 21 pp.

Centella A., L. Castillo y A. Aguilar, 1998b: Escenarios climáticos de referencia para la República de El Salvador. Reporte Técnico, Proyecto PNUD/GEF/ELS/97/32, San Salvador, 21 pp.

Hulme M, 1996: Climate Change and Southern Africa: an exploration of some potential impacts and implications in the SADC region. Breckland Print Limited, Norfolk, UK. 104 pp.

Hulme M., Jiang T. And Wigley T, 1995: A climate change scenario generator: a user manual, Climate Research Unit, UEA, Norwich, UK, 38 pp.

IPCC, 1990: Climate Change: The IPCC scientific assessment. (eds.) Houghton J. T., Jenkins G. J. And Ephraums J. J. Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 364 pp.

IPCC, 1992: Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment (eds.) Houghton J. T., Callander B. A. and Varney S. K. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 pp.

IPCC, 1995: Climate Change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 339 pp.

IPCC ,1996: Climate change 1995: The science of climate change (eds.) Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A., Harris M., Kattenburg A. and Maskell K. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572 pp.

IPCC, 1997: An introduction to the simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report. (eds.) Houghton J. T., Meira Filho L. G., Griggs D. J. And Maskell K. IPCC Technical Report II. 47 pp.

Kattenburg A., F. Giorgi, H. Grassl, G. Meehl, J. Mitchell, R. Stoufer, T. Tokioka, A. Weaver and T. Wigley ,1996: In Climate change 1995: The science of climate change (eds.) Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A., Harris M., Kattenburg A. and Maskell K. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp.285-358.

Leggett J., Pepper W. J. and Swart R. J., 1992: Emissions scenarios for the IPCC: an update pp. 75-95. In Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment (eds.) Houghton J. T., Callander B. A. and Varney S. K. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 200 pp.

Mitchell, J. F. B., Manabe, S., Meleshko, V. and Tokioka T., 1990: Equilibrium climate change and its implication for future. In J. T. Houghton Jenkins G. J. And Ephraums J. J. Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 131-164.

Parry, M. y T. Carter, 1998: Climate impact and adaptation assessment. A guide to the IPCC approach. Earthscan Publication, London, 166 pp.

Vinner D. and Hulme M., 1992: Climate change scenarios for Impact studies in the U. K. Climatic Research Unit, UEA, UK.

Vinner D. y Hulme M, 1998: Construction of climate change scenarios by linking GCM and STUGE output. Technical Note No. 2, Climate Impacts LINK Project, Climate Research Unit, University of East Anglia, 20 pp.

Wigley, T.M.L. 1994: MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change): User's Guide and Scientific Reference Manual. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.