

**Incertidumbre en la producción de agua:
Efectos del cambio climático en la generación
hidroeléctrica**

ING. JOSÉ MIGUEL PÉREZ GODOY

Mayo 2015

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	EL IPCC CUARTO INFORME DE EVALUACIÓN (4AR).....	2
2.1	El cambio climático en la actualidad.....	2
2.2	El cambio climático en el futuro.....	2
3	ESCENARIOS CLIMÁTICOS PREVISTOS PARA 2000-2100.	3
3.1	Familia de escenarios A2.....	4
3.2	Escenarios globales y regionales de clima.	4
4	PROYECCIONES DE CAMBIOS FUTUROS EN EL CLIMA.	5
5	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CARONI.....	11
5.1	Variables a Considerar.....	11
5.2	Resultados los Modelos GCM en el 4AR.....	11
5.2.1	Fuente de datos.....	11
5.2.2	Descripción de las simulaciones para el IPCC AR4	11
5.2.3	Presentación de la data.	11
5.2.4	Proyecciones de la temperatura de los modelos GCM del IPCC 4AR basados en el Escenario A2 del SRES.....	12
5.2.5	Proyecciones de la Precipitación de los modelos GCM del IPCC 4AR basados en el Escenario A2 del SRES.....	19
6	CONCLUSIONES.....	26
6.1	Sobre los modelos GCM.....	26
6.2	Sobre la adaptabilidad de los modelos GCM a la cuenca.....	26
6.3	Sobre los modelos regionales RCM.	27
6.4	Importantes conclusiones del IPCC AR 5 (Nov 2014).....	27
6.	BIBLIOGRAFIA.....	29

1 INTRODUCCIÓN.

El objetivo de este estudio es evaluar los efectos del cambio climático sobre las variables que podrían afectar el patrón de escurrimiento en la cuenca del río Caroní y sus efectos en la producción de energía. Las principales variables que pueden afectar la estimación de los caudales de aportes a las centrales del Bajo Caroní debido al cambio climático son la temperatura y la precipitación, aunque no las únicas, hasta el año 2100. Estas serían las principales variables a considerar en futuras valoraciones de los cambios en el escurrimiento de la cuenca y en su potencial de generación hidroeléctrica, según los resultados de los modelos globales presentados en el 4AR.

La comunidad científica ha llegado a un amplio acuerdo en torno a la idea de que el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre está provocando alteraciones en el clima. De hecho, diversos estudios evidencian que las variaciones en la concentración atmosférica de algunos gases de efecto invernadero han estado asociadas a profundos cambios climáticos en el pasado.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas como consecuencia de las actividades humanas han sido muy intensas a partir de la revolución industrial. Así, la concentración de estos gases en la atmósfera se ha incrementado a una velocidad mucho más rápida que en cualquier periodo histórico precedente, lo que puede dar lugar a alteraciones en el clima desconocidas hasta la fecha.

A partir de estos hechos, la comunidad científica ha realizado un gran esfuerzo para desarrollar modelos que permitan simular el sistema climático y que sean capaces de reproducir el cambio observado para, finalmente, determinar los factores que contribuyen al mismo. Para ello, se han desarrollado modelos físico-matemáticos del clima que simulan la dinámica de sus componentes, principalmente la atmósfera y el océano, en función de los distintos forzamientos del sistema. Estos modelos han puesto de manifiesto el origen antropogénico del cambio debido, principalmente, al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero y también han permitido obtener las primeras estimaciones de la tendencia futura de estos cambios.

Las nuevas tendencias para el siglo XXI incluidas en el Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC WG1 AR4) presentadas en la conferencia de París en Febrero de 2007, señalan que las temperaturas globales seguirán subiendo, el nivel del mar experimentará ascensos significativos y la frecuencia de los fenómenos climáticos extremos aumentará.

Aunque las consecuencias del cambio climático son inciertas, los estudios realizados señalan, entre sus efectos previsibles, el aumento de las inundaciones y las sequías, la reducción de la productividad agrícola en determinadas regiones terrestres o alteraciones en los sistemas naturales.

Debido al fenómeno del cambio climático se prevén impactos significativos en aspectos tan dispares como las actividades productivas, la salud humana o determinados sectores financieros. Los países menos desarrollados son más vulnerables, ya que tienen menos posibilidades para adaptarse a los cambios.

Una comprensión básica del balance energético de la Tierra permite concluir que es posible estimar cuantitativamente y en forma general los valores medios mundiales de algunas variables, pero para obtener estimaciones más precisas de las retroacciones y los detalles regionales es imprescindible utilizar modelos climáticos más elaborados. La complejidad de los procesos que forman parte del sistema climático no permite recurrir a la extrapolación de tendencias anteriores o a la aplicación de técnicas estadísticas u otras técnicas puramente empíricas para hacer proyecciones.

2 EL IPCC CUARTO INFORME DE EVALUACIÓN (4AR).

El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (4AR) del Grupo de Trabajo II (WG II): “El Cambio Climático 2007: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad”, confirma y refuerza muchos de los mensajes claves del Tercer Informe de Evaluación (TAR) del IPCC, aportando numerosas evidencias de efectos que ya están afectando a muchos sistemas naturales y mejorando las anteriores evaluaciones regionales de impactos del cambio climático.

El 4AR incorpora e integra toda esta nueva corriente de conocimiento y facilita su comprensión, proporcionando orientaciones para identificar potenciales vulnerabilidades clave junto a niveles y tasas de cambio climático que pueden dar lugar a una interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático.

Se presentan a continuación las principales conclusiones y efectos climáticos actuales y de largo alcance detectados por el IPCC 4AR en diferentes áreas de actividad.

2.1 El cambio climático en la actualidad.

Existe un nivel muy alto de confianza en que muchos sistemas naturales a lo largo de todo el planeta (en todos los continentes y en algunos océanos) están siendo afectados por el cambio climático, particularmente por los incrementos de temperatura.

El calentamiento global provoca cambios en la criósfera que están afectando a sistemas naturales, y provocan efectos tales como aumento e incremento de los lagos glaciares, con el consiguiente riesgo de rupturas bruscas de morrenas e inundaciones repentinas, y aumento de la inestabilidad en áreas de montaña con deslizamientos de ladera.

El sistema hidrológico, con un alto grado de confianza, está siendo también afectado por el cambio climático, por ejemplo, intensificándose y adelantándose los picos de crecida en las cuencas de carácter nival y con alteraciones en la calidad de las aguas y la estructura térmica de numerosos lagos y ríos en distintas regiones.

Los sistemas biológicos también experimentan cambios y alteraciones en sus ciclos anuales, sus distribuciones territoriales y su estructura y funcionamiento.

Con un alto grado de confianza, la componente antropogénica del calentamiento global tiene una influencia discernible en muchos sistemas naturales físicos y biológicos.

Diversos sistemas gestionados por el hombre muestran evidencias de efectos debidos a cambios climáticos regionales, por ejemplo:

- Algunas zonas costeras están afectadas por el aumento del nivel del mar.
- Se observan efectos en sistemas agrícolas y forestales, como el desplazamiento en el tiempo de las labores agrosilvopastorales.
- Determinados aspectos de salud humana se ven afectados por el cambio climático (mortalidad por olas de calor, enfermedades transmitidas por vectores, alergias...)
- Determinados sectores turísticos ven limitado su período de actividad.

2.2 El cambio climático en el futuro.

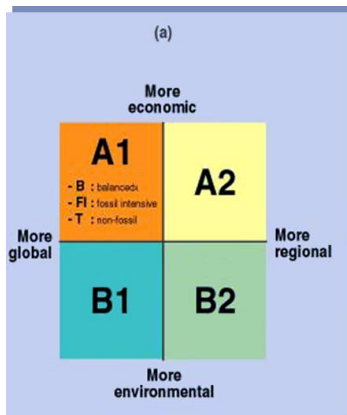
Los siguientes puntos resumen, en general con un nivel de confianza alto o muy alto, los impactos que se proyectan sobre distintos sistemas y sectores, asumiendo que no se aplica ninguna medida de

mitigación y que la capacidad de adaptación tampoco se refuerza. Las cifras relativas a aumentos térmicos se refieren a cambios respecto a 1990.

- La disponibilidad de agua aumentará en las latitudes más altas y en algunas áreas del trópico húmedo, y disminuirá en gran parte de las latitudes medias y el trópico seco.
- Los eventos extremos de sequías y precipitaciones intensas probablemente aumentarán en frecuencia e intensidad.
- Para un incremento térmico global superior al rango 1,5 - 2,5 °C, los ecosistemas experimentarán importantes cambios en su estructura y composición, funcionamiento y distribución geográfica, teniendo estos cambios consecuencias predominantemente negativas en la provisión de los bienes y servicios ambientales que proporcionan a las sociedades humanas.
- Los ecosistemas terrestres pasarán, en la segunda mitad del siglo XXI, a ser fuentes netas de emisión de carbono.
- Los ecosistemas especialmente vulnerables al cambio climático son y serán la tundra, el bosque boreal, los sistemas de montaña, el ecosistema mediterráneo, humedales costeros, manglares, etc.
- Para un incremento térmico global superior al rango 1 – 3 °C, el rendimiento potencial de las cosechas en altas latitudes aumentará; más allá de este calentamiento el efecto será negativo.
- La agricultura más vulnerable será aquella localizada en regiones de baja latitud, debido a la reducción de las disponibilidades hídricas.
- El incremento de las sequías y las inundaciones afectará negativamente las producciones agrícolas locales.
- Los arrecifes de coral se verán seriamente impactados por efecto del calentamiento global; otros sistemas como humedales costeros y manglares también se verán negativamente afectados.
- Cientos de millones de personas que habitan en áreas costeras bajas y pequeñas islas son especialmente vulnerables al aumento del nivel del mar por efecto del cambio climático.
- Los costos y beneficios del cambio climático variarán mucho según regiones y localidades, pero en conjunto, el balance agregado será fuertemente negativo.
- Las industrias y sociedades más vulnerables serán aquellas asentadas en zonas costeras y llanuras de inundación y dependientes de recursos primarios ligados al clima.
- Olas de calor, inundaciones, tormentas, incendios y sequías serán causa de mayores enfermedades y muertes.
- Se incrementará la frecuencia de enfermedades cardio-respiratorias debido a las mayores concentraciones de ozono a nivel del suelo y se modificarán las áreas de distribución de determinados vectores transmisores de enfermedades.

3 ESCENARIOS CLIMÁTICOS PREVISTOS PARA 2000-2100.

Para facilitar la investigación de impactos y el desarrollo de experimentos de modelización climática, el IPCC ha elaborado tres generaciones de “escenarios” no climáticos de emisiones y concentraciones de gases de invernadero. Los escenarios de concentraciones sirven para calcular los escenarios de forzamientos radiativos y estos, a su vez, para realizar los experimentos de modelización citados. Los



resultados así obtenidos, permiten aplicar técnicas diversas de estudio de impactos que son comparables entre sí.

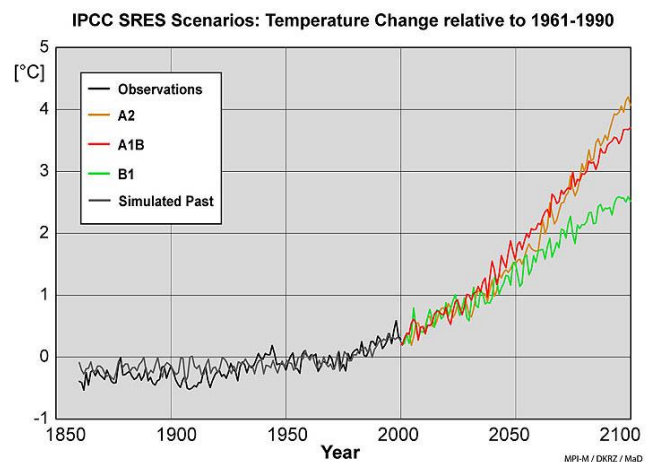
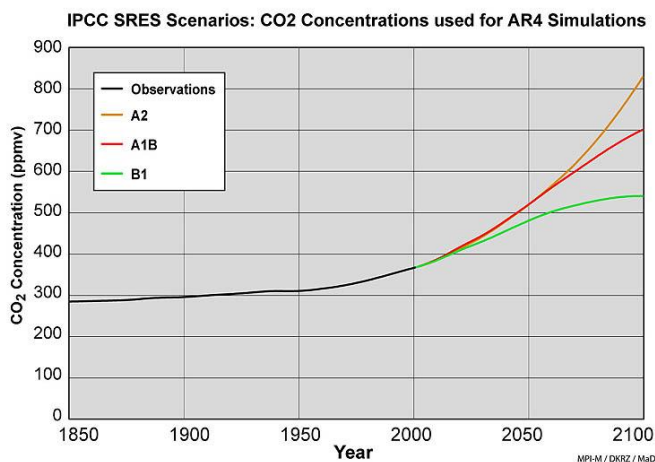
La última generación de escenarios, denominada SRES (Special Report on Emission Scenarios), ha propuesto 40 escenarios agrupados en cuatro grandes familias, A1, A2, B1 y B2, cada una de las cuales tiene a su vez tres grupos (A1FI, A1B y A1T). Los escenarios están desarrollados a partir de hipótesis sobre el desarrollo económico, la evolución de la población y las pautas de consumo de energía, que son los factores determinantes de las emisiones futuras.

3.1 Familia de escenarios A2.

La familia de escenarios A2 está caracterizada por:

- Un mundo de naciones independientes, autosuficientes.
- Población en crecimiento continuo.
- Desarrollo económico regionalmente orientado.
- Cambios tecnológicos lentos y más fragmentados y mejoras en el ingreso per capita.

Los gráficos siguientes muestran los cambios previstos por los diferentes escenarios en las concentraciones de CO₂ y los cambios de temperatura, donde se puede observar como el escenario A2 representa las condiciones más adversas para el planeta.



3.2 Escenarios globales y regionales de clima.

Los escenarios globales de clima se realizan con modelos climáticos de muy diversos tipos, que conforman lo que conocemos como jerarquía de modelos climáticos y que incluye desde modelos de dimensión cero (la tierra es un punto para el que se establecen balances de energía) hasta modelos de clima muy complejos, basados en la simulación de las circulaciones generales de la atmósfera y el océano, cuya resolución es del orden de los 300 km (entre 1° y 4°).

La simulación del clima reciente a partir de estos modelos globales acoplados de circulación océano-atmósfera (MGC-OA), es relativamente satisfactoria en las escalas hemisféricas y continentales. Sin

embargo en las escalas regionales (10^4 - 10^7 km²) este tipo de modelos presentan desviaciones muy importantes respecto a los valores observados y variaciones entre unas regiones y otras, que se observan claramente en los proyectos de comparación disponibles (IPCC, 2001).

Como consecuencia de lo anterior, los resultados de experimentos realizados con modelos globales, para estudiar la respuesta del clima ante los incrementos de GEI previsibles hasta el 2100, resultan inadecuados para describir las circulaciones a escala local y los comportamientos de los elementos climatológicos más comunes en escalas regionales.

En particular, resultan insuficientes para afrontar uno de los objetivos más importantes en la estrategia de adaptación ante el cambio climático, como es la evaluación de los impactos potenciales de un cambio de clima en los sistemas humanos de gestión de recursos hídricos, agrícolas o energéticos y en los sistemas naturales.

Este problema adquiere una importancia especial en el caso de los escenarios de precipitación o del viento, dada la influencia de las condiciones orográficas regionales y locales sobre la misma y la sensibilidad de los resultados de la precipitación ante las distintas hipótesis utilizadas en los experimentos de simulación, tanto en lo que se refiere a los escenarios no climáticos, que determinan los forzamientos radiativos, como en lo que se refiere al tratamiento de las realimentaciones dinámicas consideradas en cada esquema de modelización.

Para superar este problema, en la última década se han desarrollado diversos enfoques, que pueden considerarse como complementarios entre sí: el aumento de la resolución de los modelos globales para periodos de tiempo definidos (“time slices”) y el desarrollo de modelos de rejilla variable. La mejora de la resolución se ha acometido mediante la utilización de modelos de área limitada, denominados modelos climáticos regionales (downscaling dinámico) y, por último, la mejora de la resolución de resultados de modelos globales mediante el desarrollo de algoritmos empíricos y estadísticos que relacionen el comportamiento de la circulación general en diversos niveles, considerados como “predictores”, con los comportamientos de las variables climáticas junto a la superficie, consideradas como “predictandos”, en el área regional en estudio (downscaling empírico/estadístico). También se ha abordado el problema mediante técnicas mixtas dinámico-estadísticas y mediante la interpolación directa de los valores de origen, con métodos de complejidad variable. Esta última técnica se utiliza todavía en el caso de estudios de impacto sobre variables en las que resulta difícil otro tipo de “escalamiento”, como son la humedad relativa o variables radiativas.

En cualquier caso, debe observarse que todos los enfoques tienen como factor común los resultados de experimentos con modelos globales y que la comparación de su efectividad y de su adecuación para estudios de impactos debe hacerse desde dos puntos de vista: la validación de resultados frente a la observación y el análisis de su consistencia física. Adicionalmente a estos enfoques persisten, las prácticas de obtención de escenarios mediante “composites” de varios experimentos basados en hipótesis comunes

4 PROYECCIONES DE CAMBIOS FUTUROS EN EL CLIMA.

El mayor avance de esta evaluación de las proyecciones de cambio climático es el amplio número de simulaciones disponibles, de un rango de modelos más amplio. Tomados conjuntamente con información adicional de observaciones, éstos aportan una base cuantitativa para la estimación de probabilidades para muchos aspectos del cambio climático futuro. Las simulaciones con modelos cubren un rango de posibles futuros, incluyendo suposiciones de emisiones o concentraciones idealizadas.

Éstas incluyen las proyecciones de escenarios indicativos del IE-EE14 para el periodo 2000-2100 y experimentos con modelos con concentraciones gases de efecto invernadero y aerosoles que se mantienen constantes después del año 2000.

Desde la publicación del TAR, se ha efectuado un esfuerzo sin precedentes para hacer disponibles los nuevos resultados para escrutinio de los científicos fuera de los centros de investigación. Dieciocho grupos modeladores ejecutaron un conjunto coordinado, de experimentos estandarizados y los resultados analizados por cientos de científicos alrededor del mundo, forman la base para muchos de los resultados de evaluación del IPCC. Los beneficios de estos esfuerzos coordinados incluyen aumento de la intercomunicación de los grupos modeladores, identificación más rápida y corrección de errores, la creación de patrones estandarizados de cálculo y un archivo completo y sistemático del progreso de las modelaciones.

Muchos avances en la modelación han ocurrido desde la publicación del TAR, especialmente en los 23 AOGCM (Atmospheric/Ocean General Circulation Models) utilizados ampliamente en el 4AR y mostrados en la tabla anexa. Las mejoras en los modelos pueden ser agrupadas dentro de tres categorías. Primera, los núcleos dinámicos (advección, etc.) han sido mejorados y la resolución horizontal y vertical de muchos modelos ha sido incrementada. Segundo, se han incorporado más procesos dentro de los modelos, en particular en la modelación de aerosoles, y de los procesos de tierra superficial y hielo del mar. Tercero, la parametrización de los procesos físicos ha sido mejorada.

La tabla siguiente muestra los modelos considerados y analizados en el 4AR y los resultados de las variables de cambio de temperatura y precipitación en el periodo de análisis de los mismos serán los utilizados para evaluar el impacto del cambio climático en la cuenca del río Caroní.

El siguiente gráfico muestra de una manera didáctica las diferencias en las resoluciones, tanto en el tope de la altura en la atmósfera de los modelos, así como un ejemplo comparativo de una resolución de 3.75x3.75 grados de la cuadrícula de cálculo con respecto al tamaño de la cuenca del río Caroní; que pueden visualizarse para cada modelo en la columna “Atmosphere Top Resolution References” de la Tabla 1.

Tabla 1 Características de los modelos AOGCMs.

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References	Sea Ice Dynamics, Leads References	Coupling Flux Adjustments References	Land Soil, Plants, Routing References
1: BCC-CM1, 2005	Beijing Climate Center, China.	top = 25 hPa T63 (1.9° x 1.9°) L16 Dong et al., 2000; CSMD, 2005; Xu et al., 2005	1.9° x 1.9° L30 depth, free surface Jin et al., 1999	no rheology or leads Xu et al., 2005	heat, momentum Yu and Zhang, 2000; CSMD, 2005	layers, canopy, routing CSMD, 2005
2: BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research, Norway.	top = 10 hPa T63 (1.9° x 1.9°) L31 Déqué et al., 1994	0.5°–1.5° x 1.5° L35 density, free surface Bleck et al., 1992	rheology, leads Hibler, 1979; Harder, 1996	no adjustments Furevik et al., 2003	Layers, canopy, routing Mahfouf et al., 1995; Douville et al., 1995; Oki and Sud, 1998
CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research, USA.	top = 2.2 hPa T85 (1.4° x 1.4°) L26 Collins et al., 2004	0.3°–1° x 1° L40 depth, free surface Smith and Gent, 2002	rheology, leads Briegleb et al., 2004	no adjustments Collins et al., 2006	layers, canopy, routing Oleson et al., 2004; Branstetter, 2001
CGCM3.1(T47), 2005	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis, Canada.	top = 1 hPa T47 (~2.8° x 2.8°) L31 McFarlane et al., 1992; Flato, 2005	1.9° x 1.9° L29 depth, rigid lid Pacanowski et al., 1993	rheology, leads Hibler, 1979; Flato and Hibler, 1992	heat, freshwater Flato, 2005	layers, canopy, routing Verseghy et al., 1993
CGCM3.1(T63), 2005		top = 1 hPa T63 (~1.9° x 1.9°) L31 McFarlane et al., 1992; Flato 2005	0.9° x 1.4° L29 depth, rigid lid Flato and Boer, 2001; Kim et al., 2002	rheology, leads Hibler, 1979; Flato and Hibler, 1992	heat, freshwater Flato, 2005	layers, canopy, routing Verseghy et al., 1993
6: CNRM-CM3, 2004	Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, France.	top = 0.05 hPa T63 (~1.9° x 1.9°) L45 Déqué et al., 1994	0.5°–2° x 2° L31 depth, rigid lid Madec et al., 1998	rheology, leads Hunke-Dukowicz, 1997; Salas-Mélia, 2002	no adjustments Terray et al., 1998	layers, canopy, routing Mahfouf et al., 1995; Douville et al., 1995; Oki and Sud, 1998

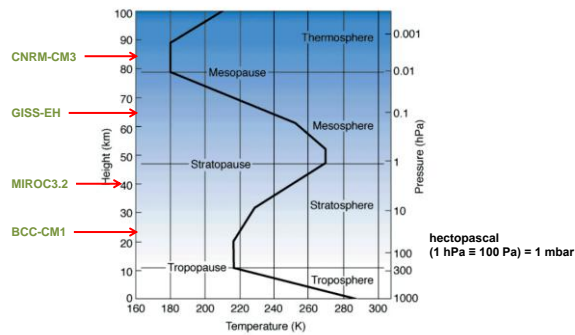
Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References	Sea Ice Dynamics, Leads References	Coupling Flux Adjustments References	Land Soil, Plants, Routing References
CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) Atmospheric Research, Australia.	top = 4.5 hPa T63 (~1.9° x 1.9°) L18 Gordon et al., 2002	0.8° x 1.9° L31 depth, rigid lid Gordon et al., 2002	rheology, leads O'Farrell, 1998	no adjustments Gordon et al., 2002	layers, canopy Gordon et al., 2002
ECHAM5/MPI-OM, 2005	Meteorology, Germany.	T63 (~1.9° x 1.9°) L31 Roeckner et al., 2003	depth, free surface Marsland et al., 2003	Hibler, 1979; Semtner, 1976	Jungclaus et al., 2005	Hagemann, 2002; Hagemann and Dümenil-Gates, 2001
9: ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research. Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, Germany/Korea.	top = 10 hPa T30 (~3.9° x 3.9°) L19 Roeckner et al., 1996	0.5°–2.8° x 2.8° L20 depth, free surface Wolff et al., 1997	rheology, leads Wolff et al., 1997	heat, freshwater Min et al., 2005	bucket, canopy, routing Roeckner et al., 1996; Dümenil and Todini, 1992
10: FGOALS-g1.0, 2004	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/Institute of Atmospheric Physics, China.	top = 2.2 hPa T42 (~2.8° x 2.8°) L26 Wang et al., 2004	1.0° x 1.0° L16 eta, free surface Jin et al., 1999; Liu et al., 2004	rheology, leads Briegleb et al., 2004	no adjustments Yu et al., 2002, 2004	layers, canopy, routing Bonan et al., 2002
11: GFDL-CM2.0, 2005	U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA.	top = 3 hPa 2.0° x 2.5° L24 GFDL GAMDT, 2004	0.3°–1.0° x 1.0° depth, free surface Gnanadesikan et al., 2004	rheology, leads Winton, 2000; Delworth et al., 2006	no adjustments Delworth et al., 2006	bucket, canopy, routing Milly and Shmakin, 2002; GFDL GAMDT, 2004
12: GFDL-CM2.1, 2005		top = 3 hPa 2.0° x 2.5° L24 GFDL GAMDT, 2004 with semi-Lagrangian transports	0.3°–1.0° x 1.0° depth, free surface Gnanadesikan et al., 2004	rheology, leads Winton, 2000; Delworth et al., 2006	no adjustments Delworth et al., 2006	bucket, canopy, routing Milly and Shmakin, 2002; GFDL GAMDT, 2004

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References	Sea Ice Dynamics, Leads References	Coupling Flux Adjustments References	Land Soil, Plants, Routing References
13: GISS-AOM, 2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/ Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA	top = 10 hPa 3° x 4° L12 Russell et al., 1995; Russell, 2005	3° x 4° L16 mass/area, free surface Russell et al., 1995; Russell, 2005	rheology, leads Flato and Hibler, 1992; Russell, 2005	no adjustments Russell, 2005	layers, canopy, routing Abramopoulos et al., 1988; Miller et al., 1994
14: GISS-EH, 2004		top = 0.1 hPa 4° x 5° L20 Schmidt et al., 2006	2° x 2° L16 density, free surface Bleck, 2002	rheology, leads Liu et al., 2003; Schmidt et al., 2004	no adjustments Schmidt et al., 2006	layers, canopy, routing Friend and Kiang, 2005
16: INM-CM3.0, 2004	Institute for Numerical Mathematics, Russia.	top = 10 hPa 4° x 5° L21 Alekseev et al., 1998; Galin et al., 2003	2° x 2.5° L33 sigma, rigid lid Diansky et al., 2002	no rheology or leads Diansky et al., 2002	regional freshwater Diansky & Volodin, 2002; Volodin and Diansky, 2004	layers, canopy, no routing Alekseev et al., 1998; Volodin & Lykosoff, 1998
17: IPSL-CM4, 2005	Institut Pierre Simon Laplace, France.	top = 4 hPa 2.5° x 3.75° L19 Hourdin et al., 2006	2° x 2° L31 depth, free surface Madec et al., 1998	rheology, leads Fichefet and Morales Maqueda, 1997; Goosse and Fichefet, 1999	no adjustments Marti et al., 2005	layers, canopy, routing Krinner et al., 2005
18: MIROC3.2 (hires), 2004	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan.	top = 40 km T106 (~1.1° x 1.1°) L56 K-1 Developers, 2004	0.2° x 0.3° L47 sigma/depth, free surface K-1 Developers,	rheology, leads K-1 Developers, 2004	no adjustments K-1 Developers, 2004	layers, canopy, routing K-1 Developers, 2004; Oki and Sud, 1998
19: MIROC3.2 (medres), 2004		top = 30 km T42 (~2.8° x 2.8°) L20 K-1 Developers, 2004	0.5°–1.4° x 1.4° L43 sigma/depth, free surface K-1 Developers, 2004	rheology, leads K-1 Developers, 2004	no adjustments K-1 Developers, 2004	layers, canopy, routing K-1 Developers, 2004; Oki and Sud, 1998
20: MRI-CGCM2.3.2, 2003	Meteorological Research	20: MRI-CGCM2.3.2, 2003	Meteorological Research	20: MRI- CGCM2.3.2, 2003	Meteorological Research	20: MRI-CGCM2.3.2, 2003

Model ID, Vintage	Sponsor(s), Country	Atmosphere Top Resolution References	Ocean Resolution Z Coord., Top BC References	Sea Ice Dynamics, Leads References	Coupling Flux Adjustments References	Land Soil, Plants, Routing References
21: PCM, 1998	National Center for Atmospheric Research, USA	top = 2.2 hPa T42 (~2.8° x 2.8°) L26 Kiehl et al., 1998	0.5°–0.7° x 1.1° L40 depth, free surface Maltrud et al., 1998	rheology, leads Hunke and Dukowicz 1997, 2003; Zhang et al., 1999	no adjustments Washington et al., 2000	layers, canopy, no routing Bonan, 1998
22: UKMO-HadCM3, 1997	Hadley Centre for Climate Prediction and Research Met Office, UK.	top = 5 hPa 2.5° x 3.75° L19 Pope et al., 2000	1.25° x 1.25° L20 depth, rigid lid Gordon et al., 2000	free drift, leads Cattle and Crossley, 1995	free drift, leads Cattle and Crossley, 1995	layers, canopy, routing Cox et al., 1999
23: UKMO-HadGEM1, 2004		top = 39.2 km ~1.3° x 1.9° L38 Martin et al., 2004	0.3°–1.0° x 1.0° L40 depth, free surface Roberts, 2004	rheology, leads Hunke and Dukowicz, 1997; Semtner, 1976; Lipscomb, 2001	no adjustments Johns et al., 2006	layers, canopy, routing Essery et al., 2001; Oki and Sud, 1998

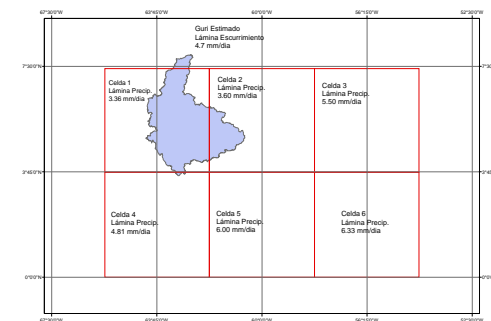
Modelos climáticos y sus características

Espesor de la atmósfera



PRESENTACIÓN DE LA DATA

Celdas del Modelo CGCM2 Control. (3.75° x 3.75°)
Precipitaciones simuladas por CGCM2 Control



5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CARONI.

5.1 Variables a Considerar.

En un principio y a los efectos de los alcances de este informe, los principales efectos a evaluar consisten básicamente en los cambios en las temperaturas y en las precipitaciones en la cuenca del río Caroní por efecto del cambio climático y según los resultados de los modelos globales presentados en el 4AR.

Evidentemente, existe un grupo numeroso de otras variables que podrían ser analizadas y estudiados sus efectos, pero estas serían las principales variables causante de los cambios en el escurrimiento de la cuenca y en su potencial de generación hidroeléctrica.

El estudio y análisis de otras variables sería un aspecto importante a considerar cuando se evalúen modelos más completos de escurrimiento o cuando se evalúen otros aspectos relacionados con la afectación socio-ecológica de la cuenca.

5.2 Resultados los Modelos GCM en el 4AR.

5.2.1 Fuente de datos.

La fuente principal de la data para el análisis de los cambios climáticos es la página de datos del IPCC 4AR, cuya dirección electrónica es la siguiente: [IPCC Data Distribution Centre: http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html](http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html).

Antes de acceder a la página es preciso registrarse y obtener un *user name* y un *password*. Una vez que se obtiene acceso a la página, se decide primeramente con cual escenario se va a trabajar y luego se escogen las variables cuyo efecto se quiere estudiar. A través de una interfase de usuario, se llega hasta la base de datos de interés para cada modelo, uno por uno.

5.2.2 Descripción de las simulaciones para el IPCC AR4

A continuación se resumen las condiciones de cada uno de los experimentos realizados por el IPCC, mostrando sus principales características. Los principales modelos homologados por el IPCC y sus resultados como la data disponible para cada uno de los escenarios de emisión considerados.

De los numerosos escenarios presentados en el AR4, se ha seleccionado para este trabajo el escenario A2, ya que representa en general las condiciones más extremas en términos de las emisiones de gases de efecto invernadero y consecuentemente mayores cambios esperados en las temperaturas y otras variables climatológicas.

5.2.3 Presentación de la data.

La base de datos suministra la información de la variable considerada para cada modelo de una manera global sobre todo el globo terráqueo, sobre una cuadrícula con resolución vertical y horizontal que es diferente para cada modelo y para el periodo de estudio.

Adicionalmente, la data puede ser obtenida bajo diferentes resoluciones temporales las cuales pueden variar desde varias horas en algunos casos, pero en su mayor parte desde

días hasta años. Para este estudio se ha considerado representativa del cambio climático, la serie de valores mensuales para las variables consideradas ya que se analizan los cambios a largo plazo, hasta el año 2100.

Aunque la mayoría de los modelos GCM presentan resoluciones con cuadrículas que van desde 1° hasta los 5°, y siendo la cuenca del río Caroní bastante extensa, en la mayoría de los casos se requieren varias cuadrículas del modelo para cubrir la totalidad de la cuenca. Siendo la cuenca sumamente variable en su fisiografía, topografía, suelos y vegetación, no se puede decir que un sector de la misma sea representativo de la misma. En algunos modelos dada su resolución espacial, la cuenca queda circunscrita a una sola celda de la grilla. En otros modelos, la resolución espacial es más fina, con lo cual se tendrá que la cuenca queda enmarcada dentro de varias de ellas. Para solventar esta situación, en cada uno de los modelos que muestran esta particularidad, se ha tomado la data de todas las grillas que están sobre la cuenca y se presentan todos los valores, adicionalmente, se han promediado los valores y se presentan como una serie única.

En el apartado siguiente se presentan de una manera gráfica los resultados para cada uno de los modelos, para las series anuales de las variables de temperatura superficial y precipitación. En estos gráficos se ha colocado una curva de tendencia con adaptación de una curva de tipo lineal y su ecuación. Se muestran también los gráficos de las distribuciones mensuales promedio, así como la distribución del primer y último año de las series.

5.2.4 Proyecciones de la temperatura de los modelos GCM del IPCC 4AR basados en el Escenario A2 del SRES.

Los dos gráficos siguientes presentan de una manera global las variaciones de las temperaturas según las simulaciones de los 18 modelos presentes en Informe del IPCC AR4, según el escenario A2 del SRES.

De una manera general se puede observar que todos los modelos, sin excepción, presentan incrementos de la temperatura sobre la cuenca del río Caroní. El rango de variación esperado de la temperatura oscila entre 2.3 °C hasta 6.7 °C. El valor medio de incremento considerando los valores estimados por todos los modelos en conjunto es de 4.42 °C. Estos incrementos de la temperatura son significativos por lo que es de esperar que se generen multiplicidad de efectos en la climatología y ecología de la cuenca.

Se debe recordar que la temperatura media anual de la cuenca es de 24.3°C, con variaciones importantes de acuerdo con los pisos latitudinales existentes, así la temperatura media anual en el Alto Caroní es de 22.1°C, mientras que la temperatura media anual en el Bajo Caroní es de 26.5°C.

En el Gráfico 1 se presentan los cambios estimados por cada modelo con indicación de las temperaturas del año inicial, la temperatura media del año final en el periodo de simulación y el incremento obtenido. En el Gráfico 2, se presentan los resultados de las simulaciones donde, los incrementos obtenidos se muestran de una manera ordenada de menor a mayor y donde es apreciable la banda de variaciones de la temperatura.

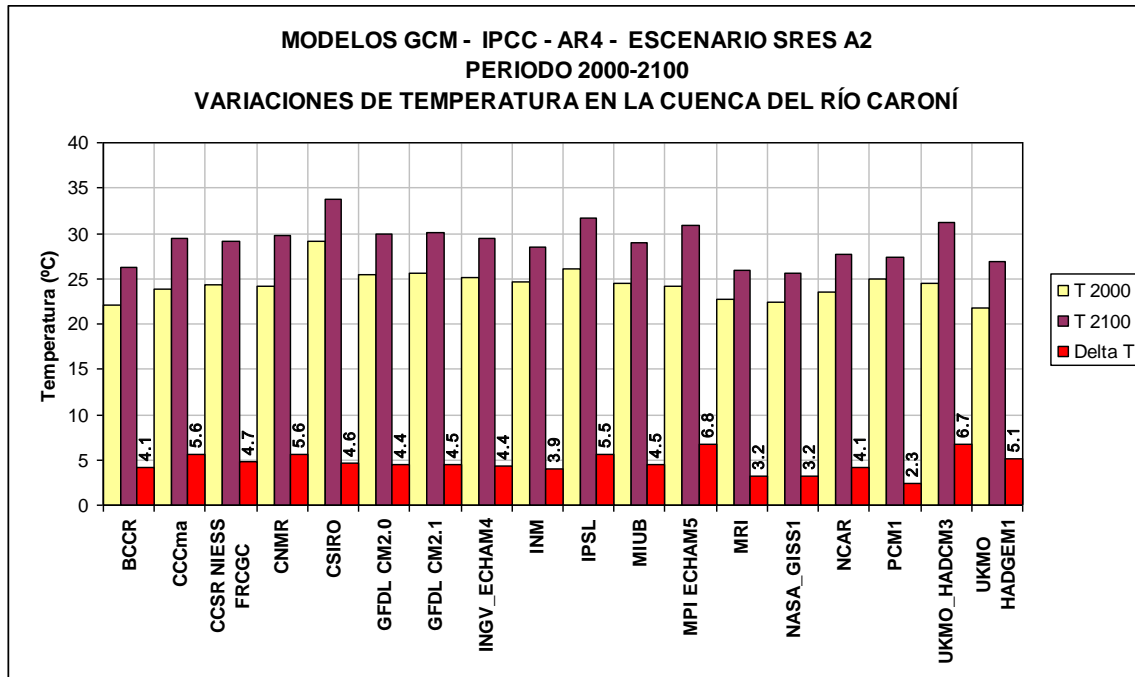


Gráfico 1 Variaciones de temperatura en la cuenca del río Caroní.

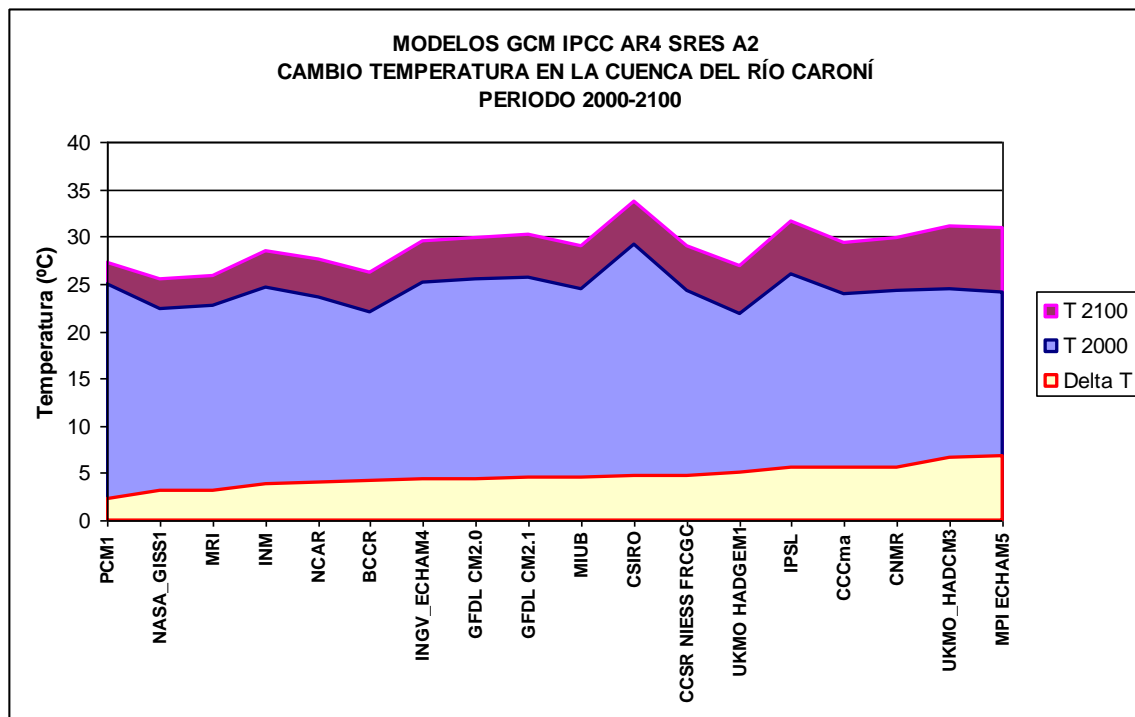


Gráfico 2 Incremento de temperatura en la cuenca del río Caroní.

5.2.4.1 Comportamiento de la temperatura media anual.

El comportamiento de la temperatura media anual sobre la cuenca, resultado de aplicar el escenario de cambio climático SRES-A2 en cada uno de los modelos del 4AR, permite determinar la tendencia originada por el mismo, indicando cuanto es el aumento esperado de la temperatura en el periodo de 100 años analizado.

Los dos aspectos más importantes de apreciar en estos gráficos es la diferencia tan marcada en las condiciones del año inicial y en las diferentes tendencias que muestra cada modelo en el periodo de 100 años, cuyos valores van desde 21.8 °C para el modelo UKMO HADGEM1 hasta algo más de 29.1°C para el modelo CSIRO. De los 18 modelos examinados, siete tienen el año inicial en el entorno de 24 °C que se corresponde con el observado en la cuenca, que son los siguientes: MPI_ECHAM5, CNMR, CCSR_NIESS_FRCCGC, UKMO_HADCM3, MIUB, INM y PCM1.

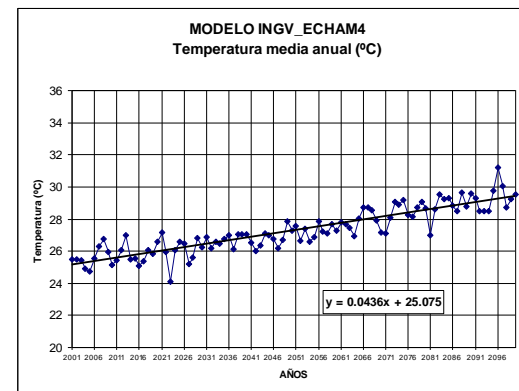
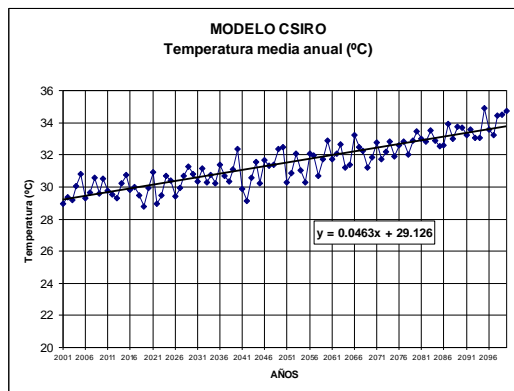
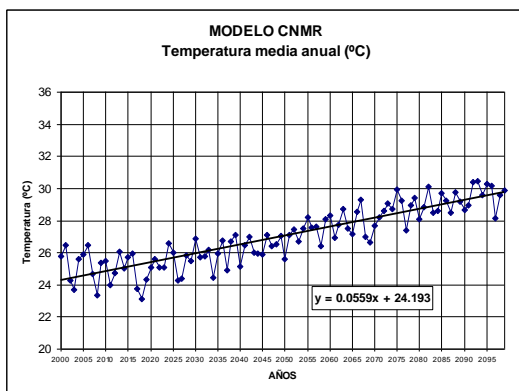
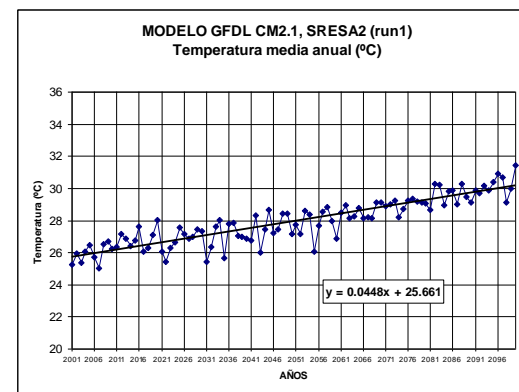
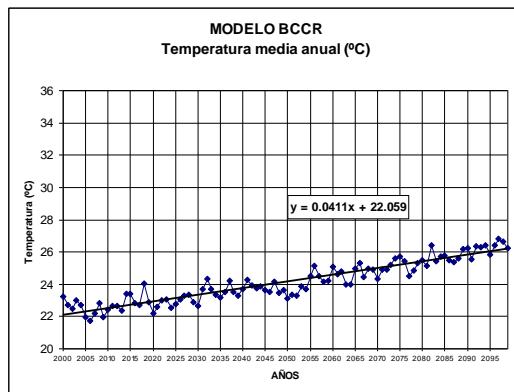
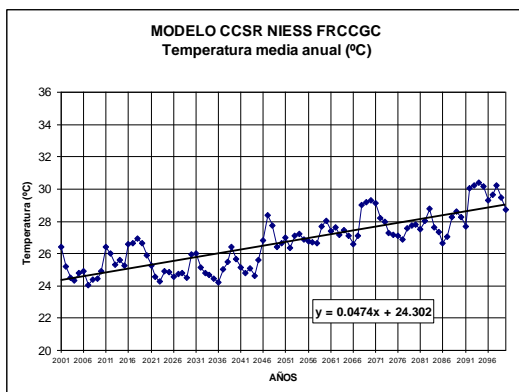
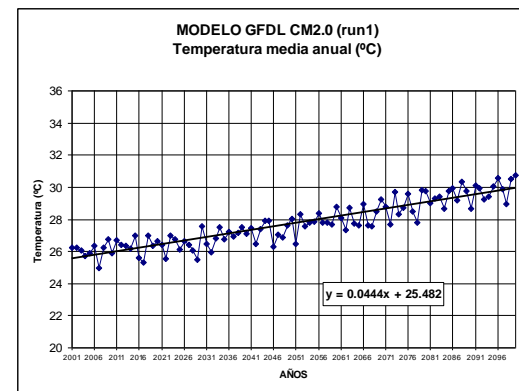
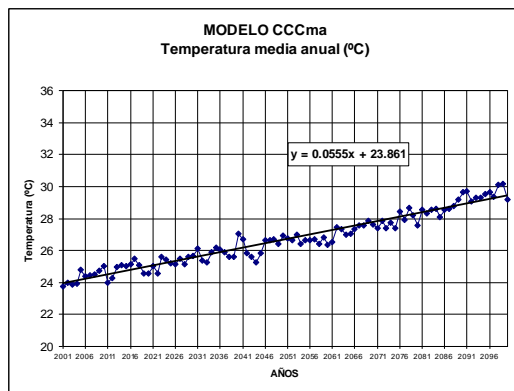
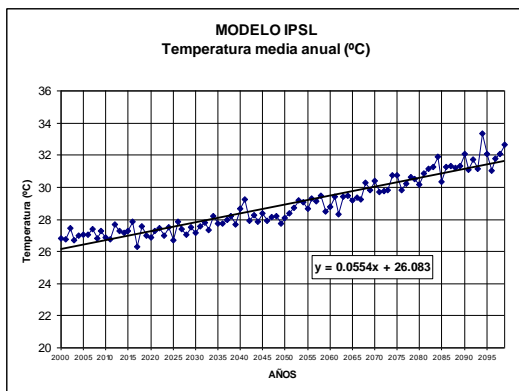
El segundo aspecto es que en todos los modelos la temperatura tiende a aumentar en el periodo de 100 años, pronosticando cambios desde 2.3 °C (modelo PCM1) a un máximo de 6.8 °C pronosticado por el modelo MPI ECHAM5. El promedio de cambio de temperatura es de 4.5 °C.

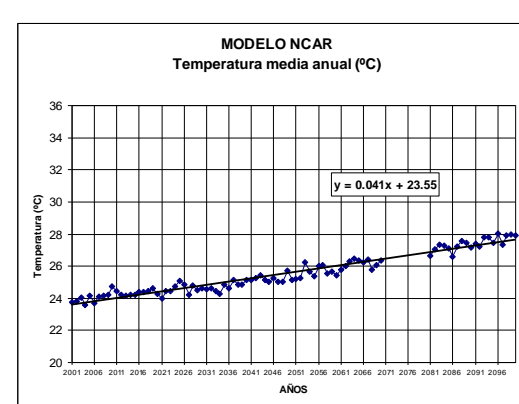
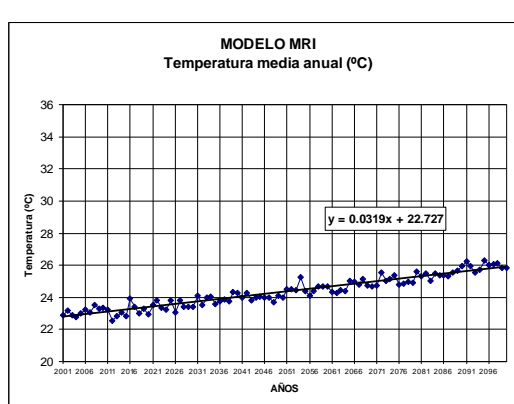
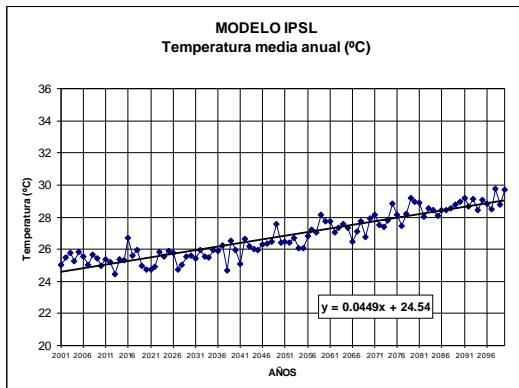
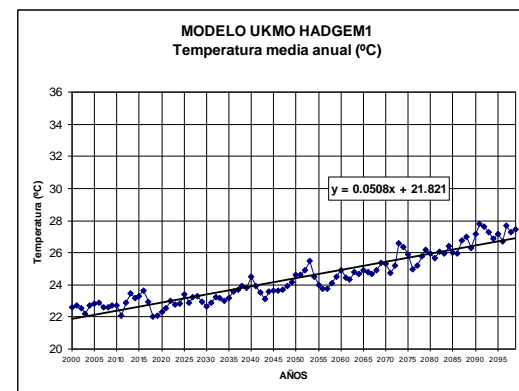
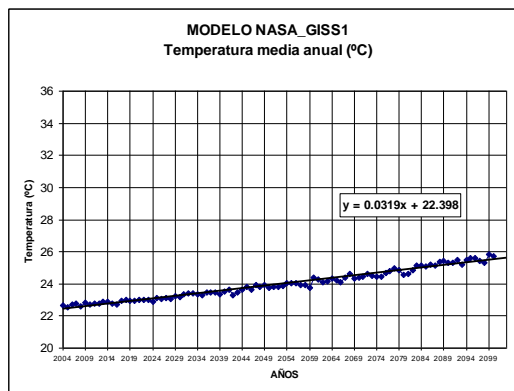
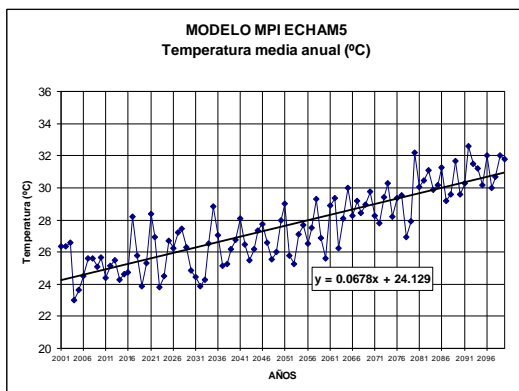
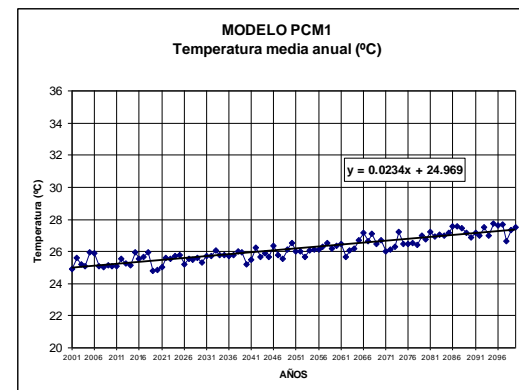
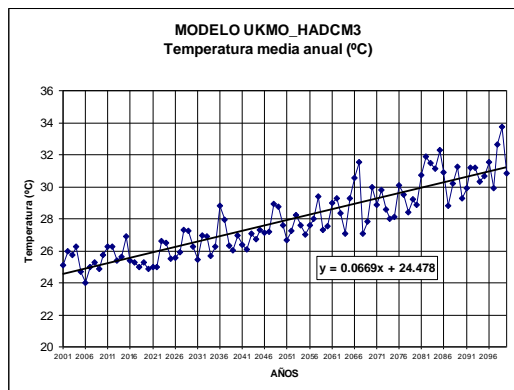
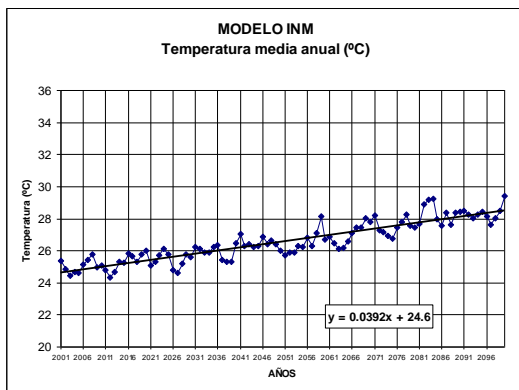
5.2.4.2 Distribución mensual de la temperatura.

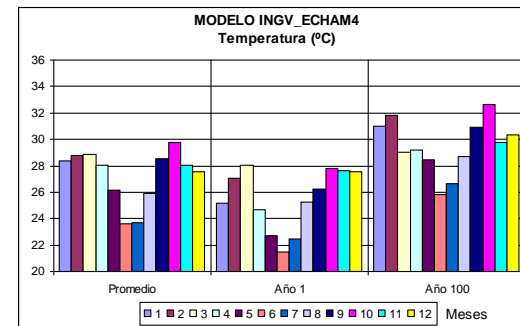
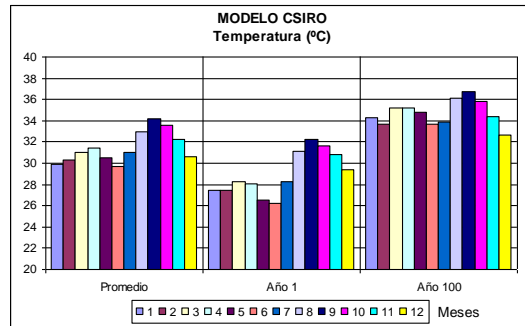
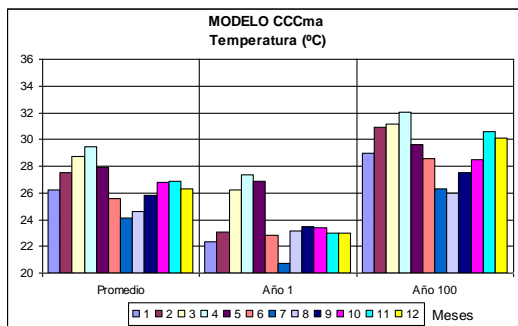
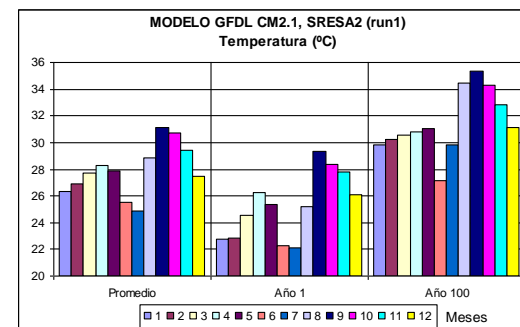
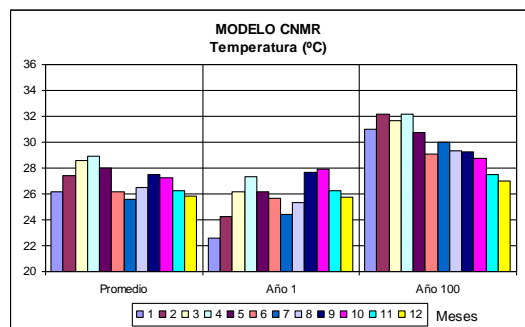
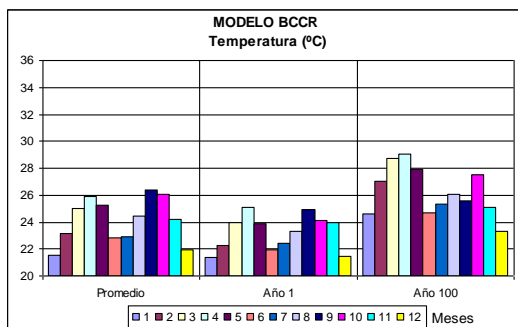
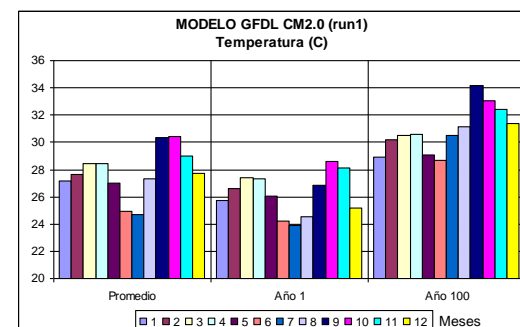
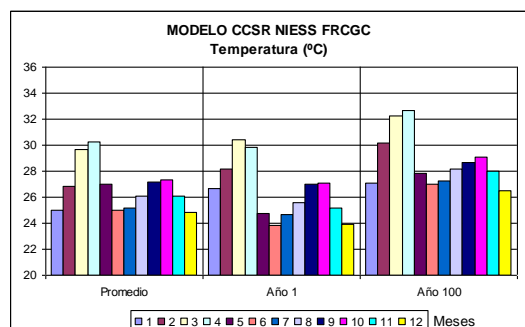
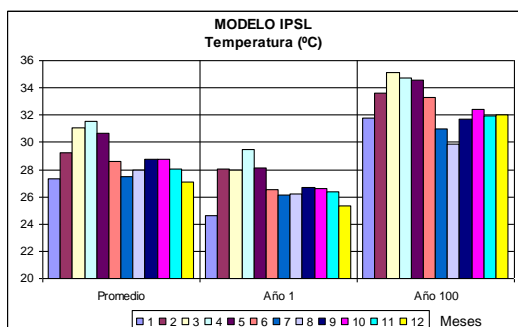
La distribución mensual de las proyecciones del comportamiento de la temperatura permite detectar que los modelos representan en forma correcta las variaciones estacionales de la temperatura en la cuenca del río Caroní. En los gráficos siguientes se muestra para los diferentes modelos, la distribución promedio de las temperaturas mes a mes para el periodo de 2000-2100 y las distribuciones para el año inicial y para el año final.

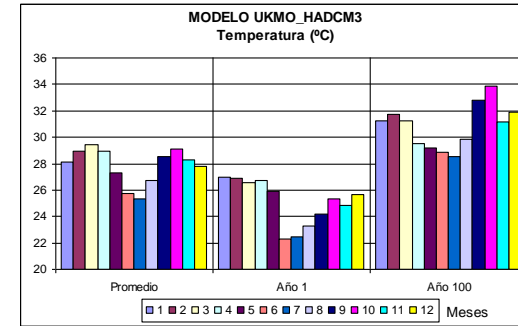
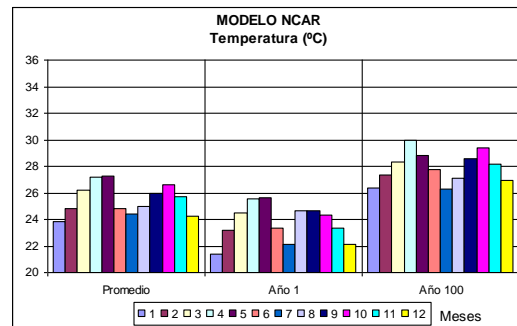
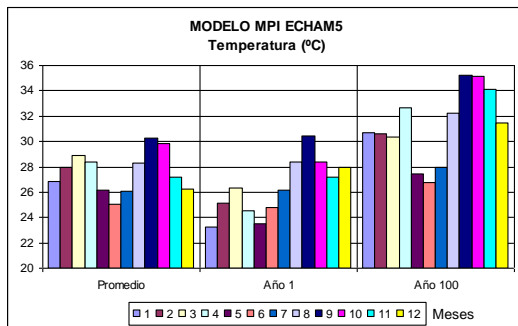
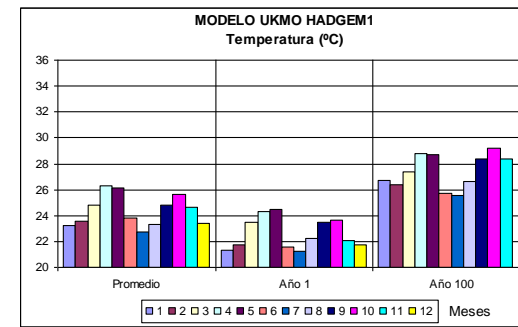
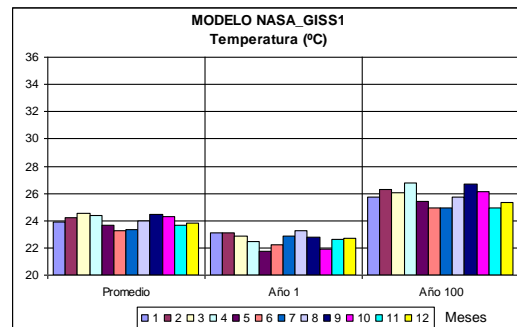
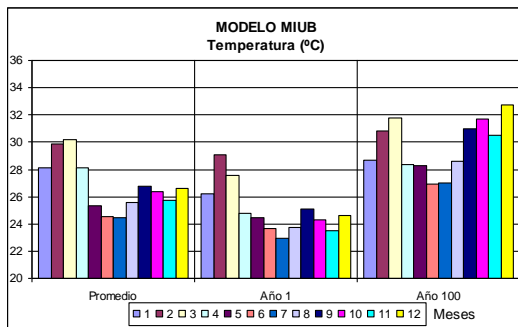
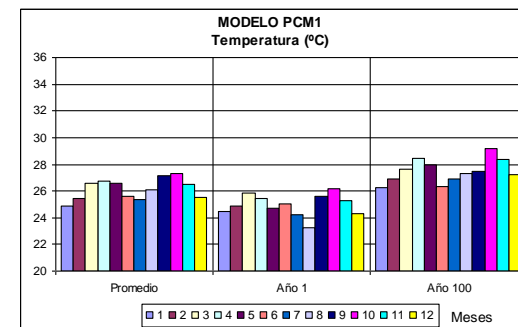
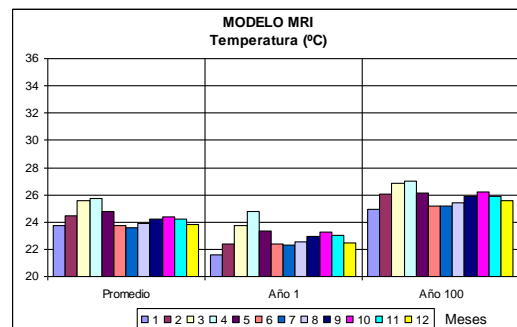
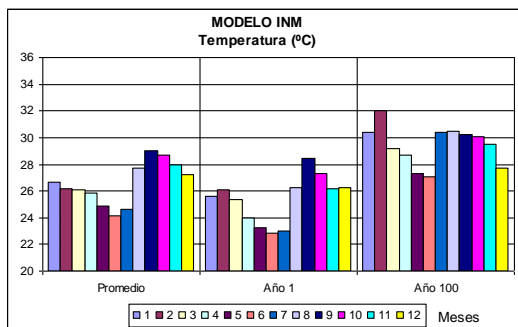
En general, todos los modelos tienen una distribución bimodal, con dos máximos centrados en el mes de abril y en el mes de septiembre respectivamente, lo que se corresponde con las características de la cuenca, excepto que siete modelos de los 18 (BCCR, GFDL_CM2.0, CSIRO, INGV_ECHAM, INM, MPI_ECHAM5 y PCM1) muestran mayor temperatura en los meses de septiembre-octubre que en los meses de marzo-abril contrario al patrón estacional de la zona.

Los gráficos muestran el cambio en la distribución mensual entre el primer año y el último, notándose que no hay un cambio importante en el patrón estacional debido al cambio climático solamente reflejan un aumento en la magnitud de la temperatura, excepto en el modelo CNMR donde la temperatura del periodo septiembre-octubre no vuelve a incrementarse como es lo usual.









5.2.5 Proyecciones de la Precipitación de los modelos GCM del IPCC 4AR basados en el Escenario A2 del SRES.

Se ha analizado la data correspondiente a las proyecciones de precipitación sobre la cuenca del río Caroní de 18 modelos presentados en el IPCC 4AR sobre los escenarios A2 del SRES.

A diferencia de las proyecciones de temperatura sobre la cuenca, que muestran unánimemente un incremento del fenómeno sostenido, las proyecciones de precipitación presentan bastantes disimilitudes. En principio, y en esto sí coinciden la mayoría de los modelos GCM, las estimaciones de base de la precipitación está bastante subestimada. Los cálculos efectuados sobre la precipitación de la cuenca, corroboradas por calibraciones y comprobaciones de balance de masas efectuadas a partir de las descargas del embalse de Gurí, estiman una precipitación media cercana a los 8.0 mm/día.

Solamente el modelo NASA-GISS1 tiene un valor que alcanza 8.5 mm/día y el modelo MRI llega a un valor algo inferior a los 6 mm/día, el resto los modelos arrancan en valores tan bajos como 1 mm/día. Esta es una condición que puede tener efectos significativos en el resto de las variables consideradas en el modelo y en el manejo de los diferentes procesos que se desarrollan como parte de los ciclos hidrometeorológicos.

En algunas ocasiones se recomienda utilizar un escalamiento lineal para aproximar a las condiciones reales de la cuenca, pero es algo conocido que el comportamiento de la mayoría de los procesos físicos y termodinámicos que se pretenden simular no sigue este patrón de comportamiento. Adicionalmente, no todos los modelos representan bien el ciclo anual o la estacionalidad de la precipitación, donde se tiene una época lluviosa entre los meses de mayo a octubre y una temporada seca entre noviembre y abril. Esta situación es particularmente notable en los modelos CCCma, INM, MIUB y MPI_ECHAM5.

Es probable que esta discrepancia obedezca en cierta forma a las características de la cuenca donde una proporción importante de la precipitación es de origen convectivo, lo cual requiere para una simulación aproximada que los modelos tenga una resolución que permita incorporar con un buen grado de refinamiento las características fisiográficas de la cuenca. Dada la resolución gruesa con que traban los modelos GCM, esta condición no siempre queda bien representada.

De los 18 modelos analizados, solamente seis muestran incrementos a largo plazo de la precipitación, con valores que oscilan entre +2.21% y +30.35%, llevado a valores reales de la precipitación sobre la cuenca, esto representa entre +0.17 y +2.43 mm/día. Los doce modelos restantes muestran variaciones negativas de la precipitación, en un rango que oscila entre -5.58% hasta -47.94%. Puesto en valores reales de la precipitación sobre la cuenca, esto representa una disminución a largo plazo entre 0.45 mm/día y 3.83 mm/día.

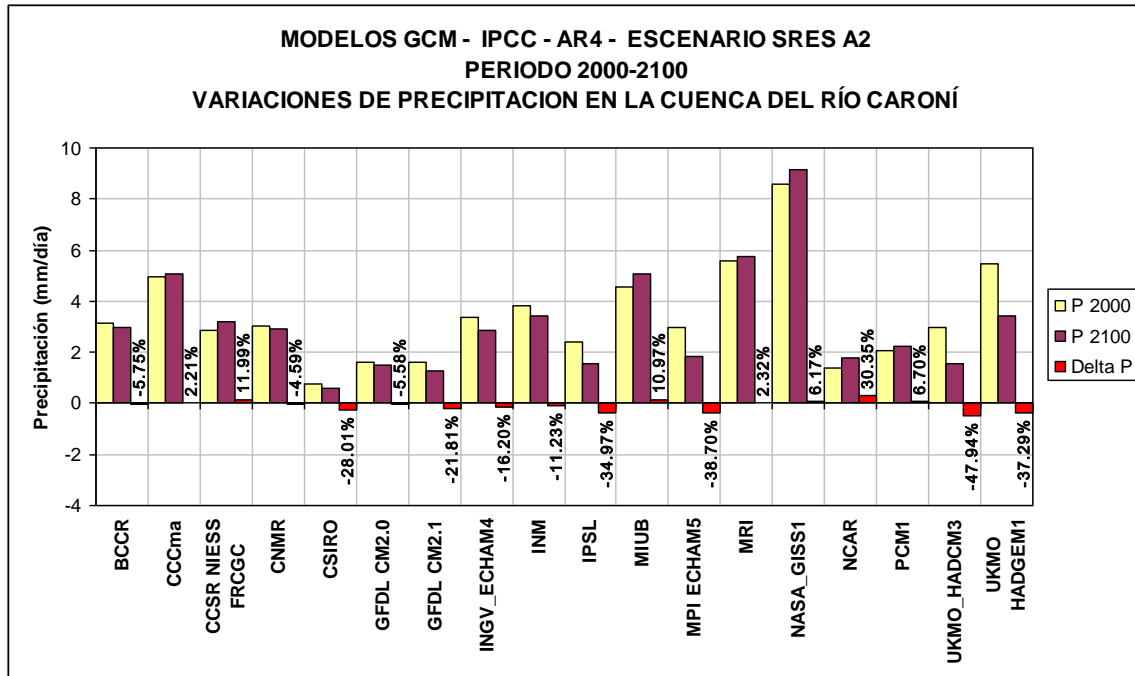


Gráfico 3 Variaciones de precipitación en la cuenca del río Caroní.

5.2.5.1 Comportamiento de la precipitación media anual.

El comportamiento de la precipitación resultado de aplicar el escenario de cambio climático SRES-A2, permite determinar la tendencia originada por el mismo, indicando cuando la serie de precipitación pronosticada tenderá a aumentar o a disminuir en el periodo de 100 años analizado.

No hay una conclusión definitiva en cuanto al efecto del cambio climático sobre la precipitación, once modelos muestran una tendencia a disminuir mientras que siete modelos muestran tendencia al crecimiento.

Uno de los dos aspectos más importantes de apreciar en estos gráficos es la diferencia tan marcada en las condiciones del año inicial, cuyos valores van desde 1 mm/día para el modelo CSIRO hasta algo más de 8 mm/día para el modelo NASA_GISS1, el cual es el único cuyo año inicial coincide con el rango de valores observados en la cuenca.

El segundo aspecto importante son las diferentes tendencias en el periodo de 100 años, los siete modelos que indican una tendencia al crecimiento de la precipitación muestran generalmente una pendiente relativamente muy suave desde 0.11% hasta un máximo de 0.53% para el modelo NASA_GISS1. En cambio, de los once modelos que muestran tendencia a la disminución de la precipitación siete tienen pendientes del mismo rango, es decir entre -0.09% hasta un máximo de -0.55%; mientras que cuatro modelos tienen pendientes bastantes fuertes entre -0.84% hasta un máximo de -2.03% en el modelo UKMO_HADGEM1. Sin embargo, el cambio porcentual absoluto más alto corresponde al modelo UKMO_HADCM3 con -47.9%, como se muestra en el Gráfico 3.

Se observa también la dispersión de los valores anuales de los diferentes modelos, con un rango de dispersión bastante variable desde 1 hasta 3 mm/día.

Estudios y mediciones efectuadas en la cuenca del río Caroní, corroborados por calibraciones y modelos de masa sobre el embalse de Gurí, demuestran que la precipitación media es de 2900 mm por año, equivalentes a 7.95 mm/día.

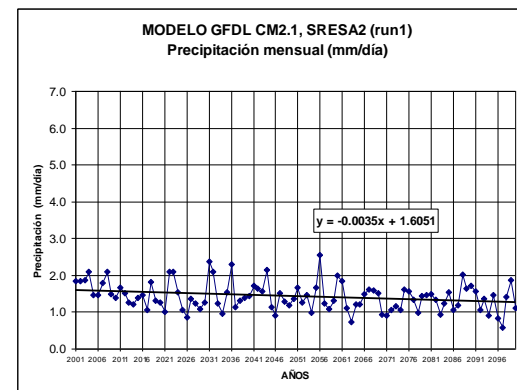
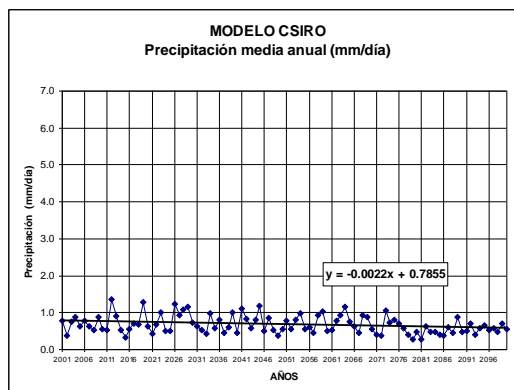
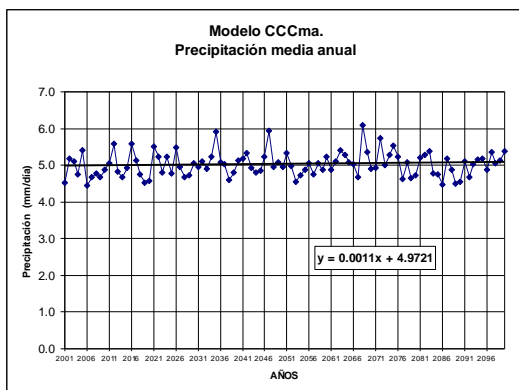
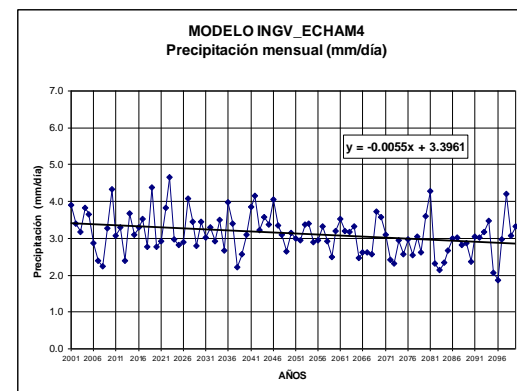
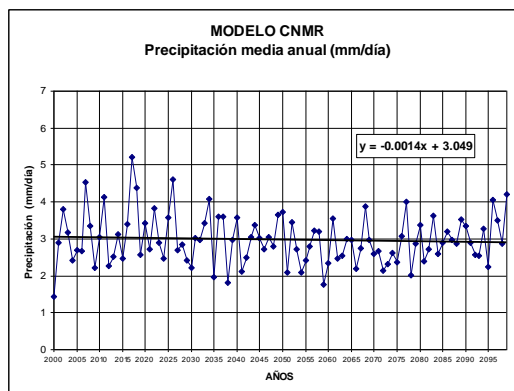
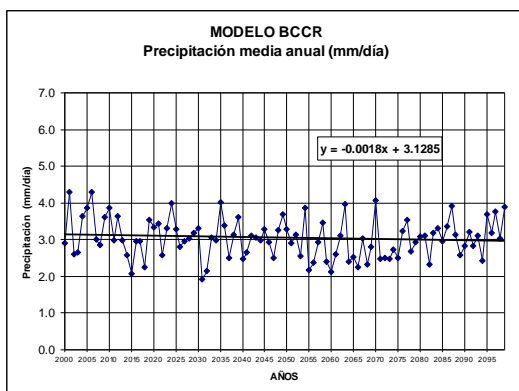
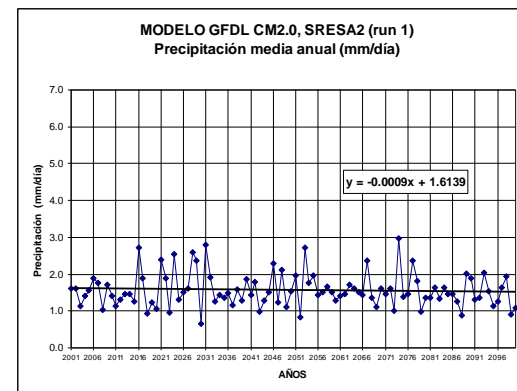
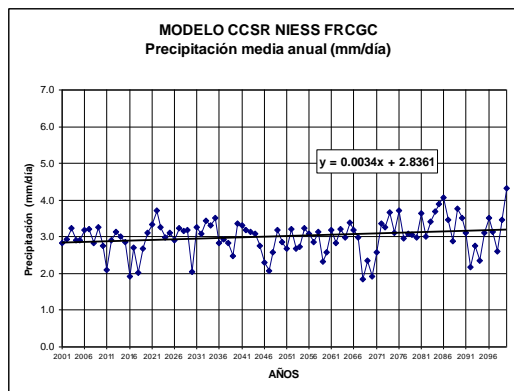
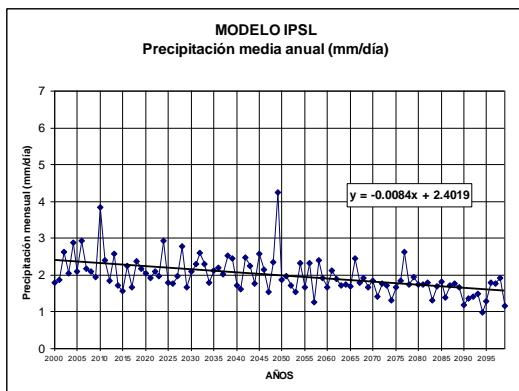
5.2.5.2 Distribución mensual de la precipitación.

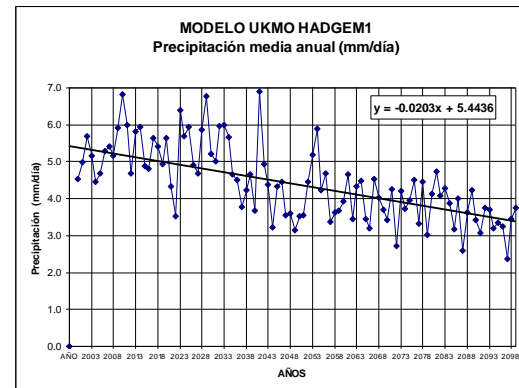
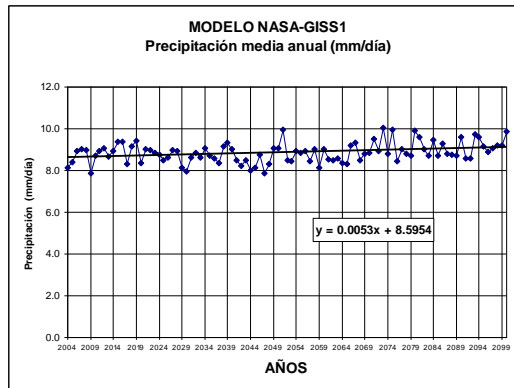
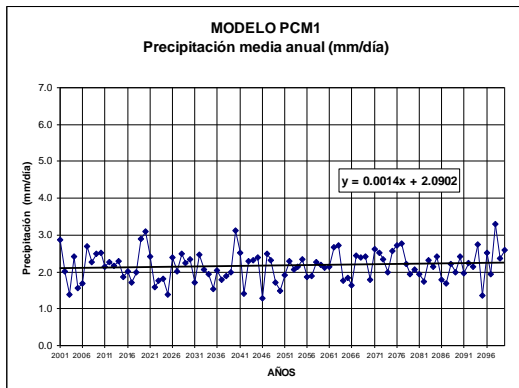
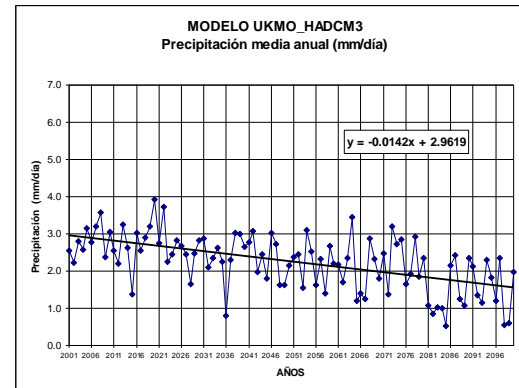
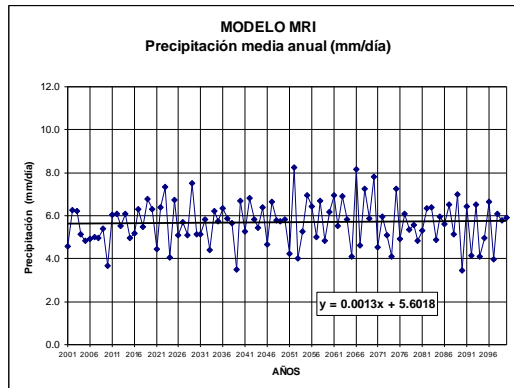
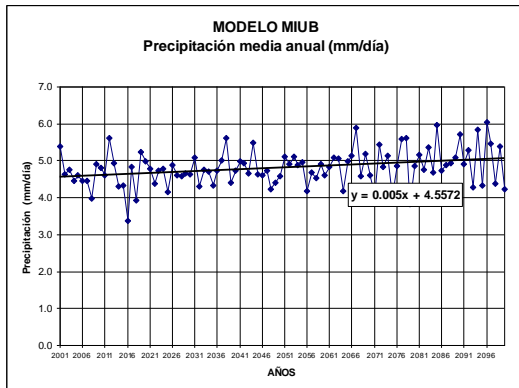
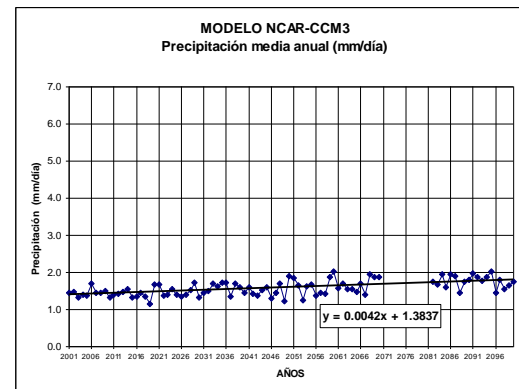
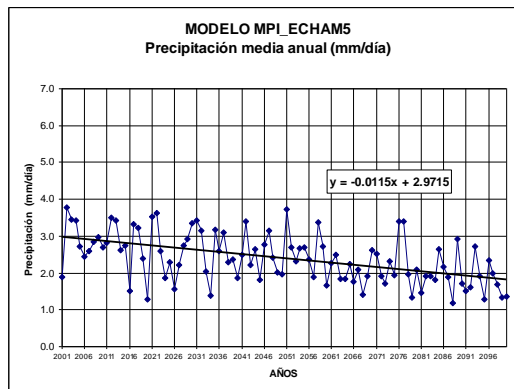
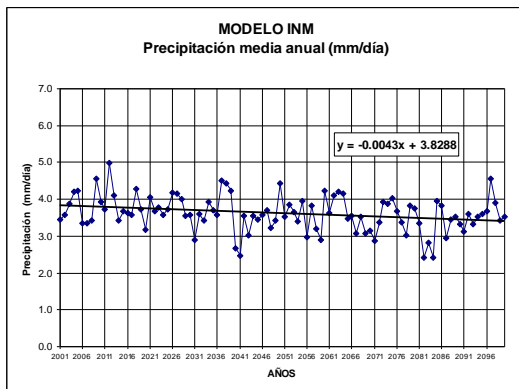
La distribución mensual de las proyecciones del comportamiento de la precipitación para los diferentes modelos se ilustra en los gráficos siguientes, donde se muestra la distribución promedio para el periodo de 100 años y las distribuciones para el año inicial y para el año final.

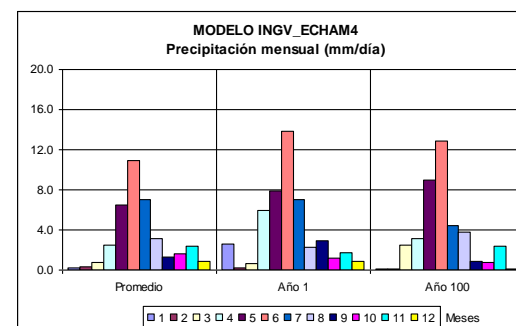
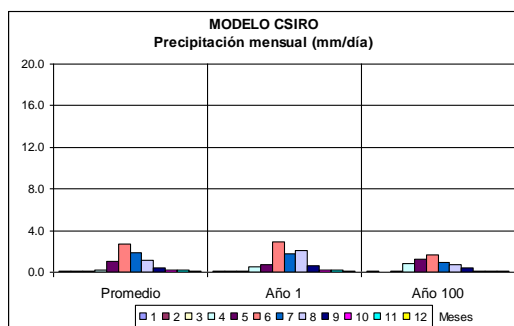
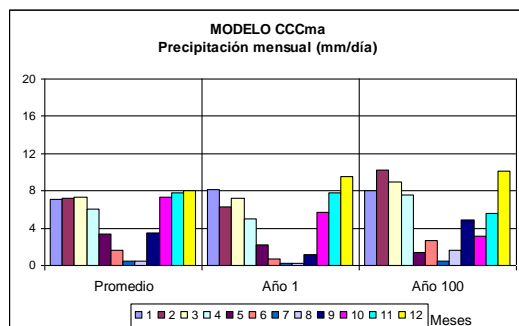
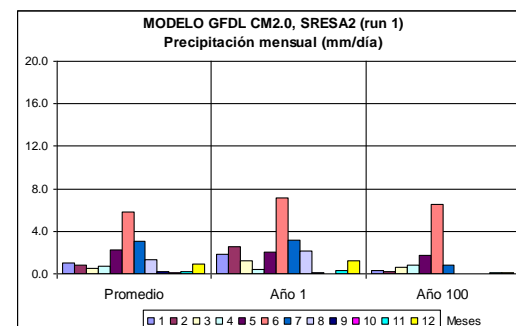
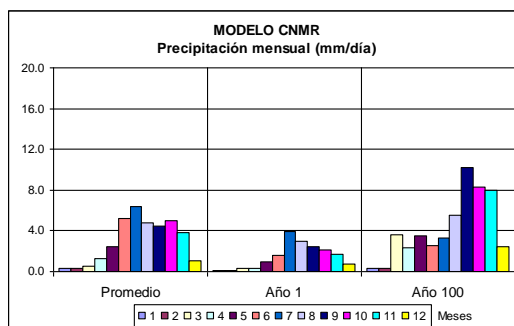
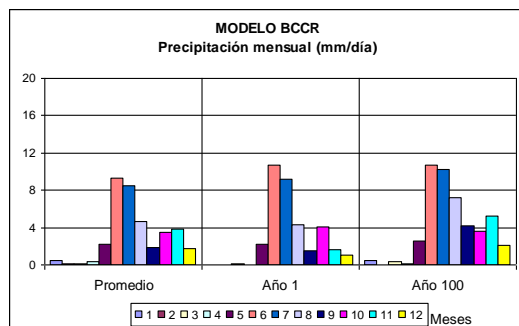
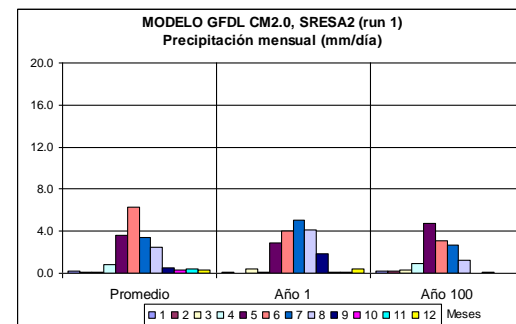
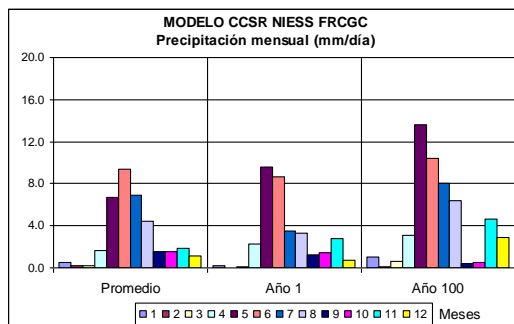
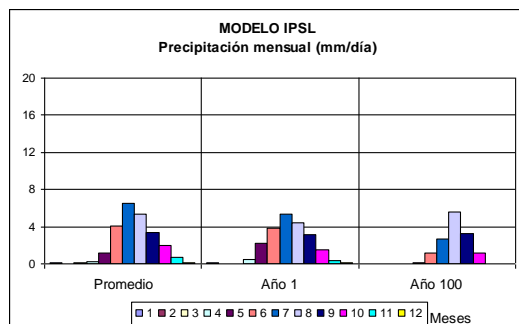
En general, todos los modelos tienen una distribución con el máximo centrado en el mes de junio, lo que no se corresponde con las características de la cuenca (julio-agosto). El modelo CCCma no se asemeja en ninguna forma al patrón estacional de la zona, mientras que los modelos MIUB y INM tiene el máximo de precipitación concentrado en el mes de mayo completamente diferente a las características de la cuenca.

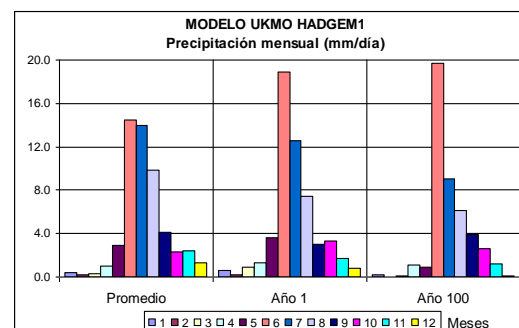
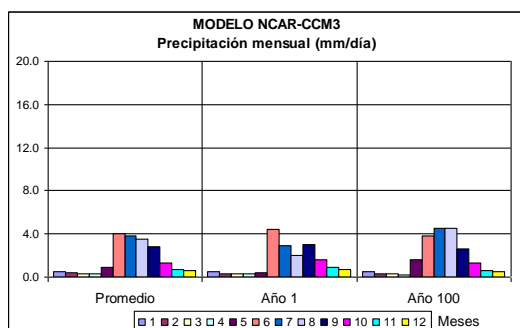
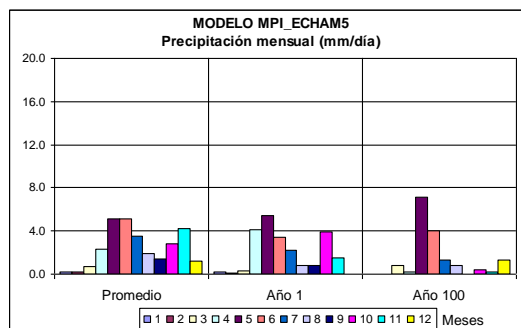
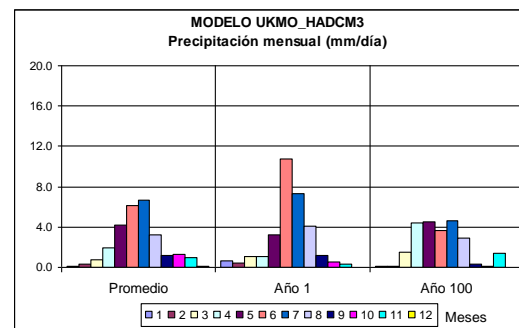
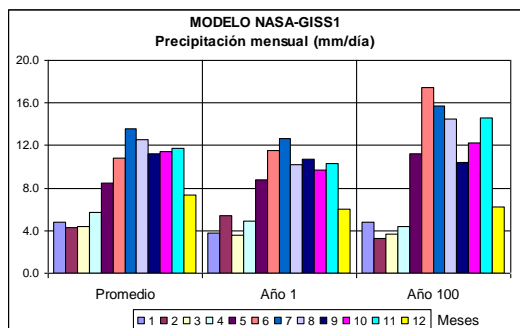
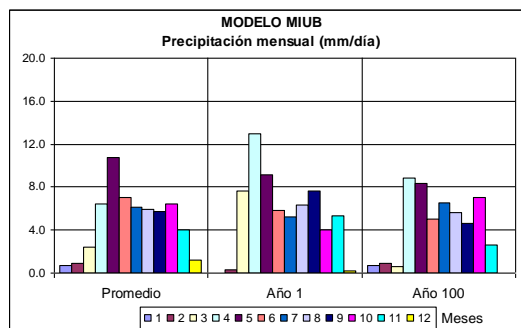
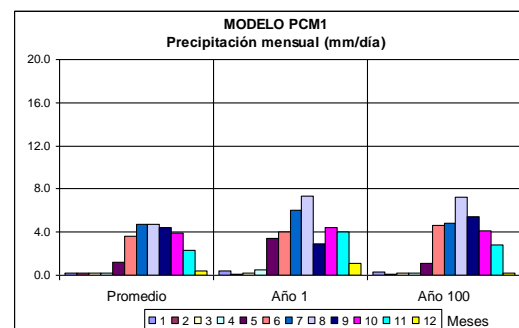
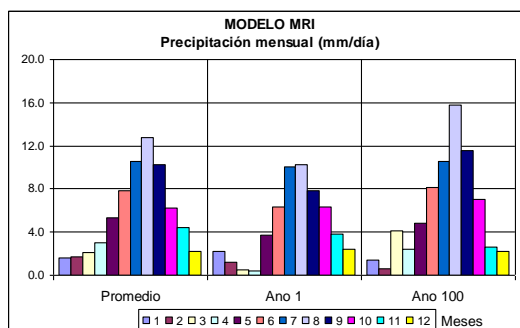
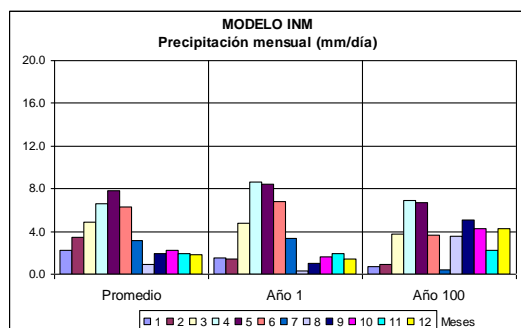
El modelo CNMR es el único donde la distribución mensual de la precipitación se modifica en el año final de la simulación.

Los gráficos muestran el cambio en la distribución mensual entre el primer año y el último. Es importante aclarar que estos valores son el promedio de las cuadrículas que cubren la cuenca, dependiendo de la resolución de cada modelo pueden ser desde cuatro cuadrículas hasta una sola.









6 CONCLUSIONES.

6.1 Sobre los modelos GCM.

Del análisis de los modelos climáticos del tipo GCM presentes en el IPCC AR4, se pueden establecer las siguientes conclusiones generales:

1. Los modelos climáticos del tipo GCM presentes en el IPCC AR4 presentan a nivel global de una manera clara y sistemática un incremento sostenido de la temperatura.
2. Los efectos de este incremento se han hecho evidentes a través de múltiples manifestaciones climáticas, aumentos en el nivel del mar, cambios en los patrones climáticos, derretimiento de los casquetes polares, variaciones en los patrones de radiación solar, variaciones en los ecosistemas, etc.
3. Ha quedado claramente establecido que el origen del incremento de la temperatura es antrópico.
4. A pesar de las mejoras incorporadas en los modelos como son resoluciones más finas y la utilización de ecuaciones que definen de una mejor manera los fenómenos físicos y termodinámicos de los procesos atmosféricos siguen existiendo inexactitudes e incongruencia entre la mayoría de los modelos GCM.
5. Los fenómenos convectivos aún permanecen como una materia de difícil explicación y modelación. En cuencas con una fisiografía y paisajes tan cambiantes como la del río Caroní y donde la lluvia convectiva juega un papel preponderante, causa abundante discrepancias.

6.2 Sobre la adaptabilidad de los modelos GCM a la cuenca.

Del análisis de las variables de temperatura y precipitación resultante de las simulaciones de los modelos climáticos del tipo GCM para el periodo 2000-2100, y con el fin de establecer si se adaptan razonablemente a las características climáticas de la cuenca del río Caroní especialmente en los valores de inicio del periodo y en la representatividad del ciclo estacional; se pueden establecer las siguientes conclusiones generales:

1. Todos los modelos presentes en el IPCC 4AR, cuya data fue accesible, presentan un incremento de temperatura sobre la cuenca del río Caroní hasta el año 2100. Estos incrementos oscilan entre 2 y 5 °C.
2. El gradiente de temperatura de todos los modelos es lineal. Algunos modelos presentan un cambio positivo de este gradiente lineal a partir del año 2050.
3. No todos los modelos simulan bien el ciclo estacional de la temperatura sobre la cuenca.
4. No se puede establecer una conclusión contundente en cuanto a la tendencia futura de la precipitación sobre la cuenca. Algunos modelos predicen una reducción de hasta el 47% de la precipitación hasta el año 2100, mientras que otros presentan un incremento de hasta el 10% de la precipitación.
5. Los modelos, en general, subestiman la precipitación media sobre la cuenca, especialmente al inicio del periodo. Esta sub-valoración puede alcanzar hasta un 75% de la lluvia media en la cuenca.

6. Existen variaciones importantes en la representación del ciclo anual de la precipitación, algunos modelos tienen el ciclo invertido del verano por el invierno.
7. Es posible que tanto la subestimación de la lluvia media histórica al inicio del periodo, como la indicada por la predicción, sea producto de la falta de información básica histórica en la zona, de la resolución gruesa de la grilla de los modelos o de la falta de una mejor definición de los fenómenos convectivos sobre la cuenca.

6.3 Sobre los modelos regionales RCM.

La tendencia a mejorar la resolución de los modelos climáticos globales indica que los modelos regionales RCM representan una alternativa válida para el estudio de los efectos del cambio climático a menor escala donde se pueden representar los fenómenos locales y la convectividad de una mejor manera. De los modelos regionales analizados se pueden establecer las siguientes conclusiones generales:

1. Los modelos RCM siguen reproduciendo en alto grado las tendencias de los GCM de los cuales toman las condiciones iniciales y de borde, por esta razón es importante seleccionar un modelo que discrimine entre sus grillas internas y la condición de borde en forma adecuada.
2. En el medio científico especializado se han desarrollado múltiples modelos RCM, los cuales adoptan condiciones particulares de la agencia que los desarrolla.
3. No todos los modelos del tipo RCM son públicos, accesibles o adaptables a las condiciones particulares de todas las cuencas y algunos representan determinados fenómenos o procesos mejor que otros.
4. Hasta ahora, no ha habido un análisis sistemático comparativo que conduzca a establecer una correspondencia o evaluación de los diferentes modelos disponibles, por tanto desde el punto de vista teórico es difícil establecer una comparación apropiada entre los modelos ya que algunos tienen mejores resoluciones, otros presentan mayor número de niveles verticales y coordenadas verticales del tipo seguidoras de terreno, otros presentan diferentes análisis de las condiciones y fenómenos físicos y otros presentan diferentes análisis para la convectividad.
5. La utilización de RCM para estudios de evaluación de impactos climáticos como producto del cambio global requiere de la disponibilidad de computadores con multiprocesadores y con una alta capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos para las condiciones iniciales y de borde como para los datos generados por el propio modelo.

6.4 Importantes conclusiones del IPCC AR51 (Nov 2014)

Finalmente y a manera de ilustración se mencionan las diez conclusiones más importantes contenidas en el quinto informe del IPCC que reflejan las tendencias en cuanto al impacto del cambio climático en nuestro mundo.

1. *La principal causa del cambio climático es el hombre.*

¹ <http://350.org/es/10-importantes-conclusiones-extraidas-de-los-informes-del-ipcc>

2. *El cambio climático está tomando velocidad.*
3. *El cambio climático afecta a los fenómenos extremos.*
4. *Nadie está a salvo del impacto del cambio climático.*
5. *El cambio climático está afectando negativamente a la producción agrícola y los expertos vaticinan un empeoramiento de la situación.*
6. Al ritmo actual de emisión de gases de efecto invernadero, la temperatura global habrá aumentado entre 2,6 y 4,8°C a finales de siglo.
7. *La solución para llevar a cabo la transición hacia una economía baja en carbono son las energías renovables.*
8. *Mantener el calentamiento por debajo del umbral de los 2 °C es práctico y asequible.*
9. *El crecimiento económico será MAYOR si invertimos en energías limpias y MENOR si decidimos no hacerlo.*
10. *Nos encontramos en una encrucijada de capital importancia. Tomar el sendero de las energías limpias.*

6. BIBLIOGRAFIA.

RegCM Version 3.1 User's Guide. Nellie Elguindi, Xunqiang Bi, Filippo Giorgi, Badrinath Nagarajan, Jeremy Pal, Fabien Solmon, Sara Rauscher, and Ashraf Zakey Trieste, Italy. May 2006.

RegCM3 regional climatologies for South America using reanalysis and ECHAM global model driving fields. Anji Seth, Sara A. Rauscher, Suzana J. Camargo, Jian-Hua Qian, J. S. Pa. Clim Dyn (2007) 28:461–480 DOI 10.1007/s00382-006-0191.

Regcm3 Simulations Nested In The Hadley Center Model Over South America: The Present Day Climate. Rosmeri Porfírio Da Rocha, Tércio Ambrizzi, Santiago Vianna Cuadra, Simone E. T. Ferraz, J.P.R Fernández. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE.

Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations. L. E. Hay, M. P. Clark, R. L. Wilby, W. J. Gutowski, Jr. G. H. Leavesley, Z. Pan, R. W. Arritt, And E. S. Takle. American Meteorological Society. October 2002.

The Sensitivity of Regional Climate Model (Regcm3) for Domain Size and Horizontal Resolution. E-Hyung Park, Won-Tae Kwon, Eun-Soon Im. Ichw. 2004.

Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. L. O. Mearns, F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, M. Lal. DDC of IPCC TGCIA Final Version - 10/30/03.

Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. J.M. Gutiérrez & M.R. Pons. Revista de Cuaternario y Geomorfología, 20 (3-4), 15-28. (2006).

A Brief Description of the Finite Volume General Circulation Model (fvGCM). Implemented by CRCES. R. Iacovazzi, Jr., C. Fayos, Y. Sud1, and G. Walker. The Center for Research on the Changing Earth System Publication 2004-03 June, 2004.

Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. Jeremy S. Pal, Filippo Giorgi. Bulletin of the American Meteorological Society. March 2006.

Climate change over North America simulated by a regional climate model for double CO2. Ming Cheng. WRF/MM5 Users Workshop. June 2005.

Simulation of Southeast Asia Rainfall using RegCM3 and Problems. Kieu Thi Xin, Le Duc & Ho Thi Minh Ha. Vietnam National University of Hanoi.

RegCM3 regional climatologies for South America using reanalysis and ECHAM global model driving fields. Anji Seth, Sara A. Rauscher, Suzana J. Camargo, Jian-Hua Qian, J. S. Pal. Clim Dyn DOI 10.1007/s00382-006-0191-z.

Domain choice in an experimental nested modeling prediction system for South America. S. A. Rauscher, A. Seth, J.-H. Qian, and S. J. Camargo. Theor. Appl. Climatol. (2006) DOI 10.1007/s00704-006-0206-z.

Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models. Part II: A comparison between 1997=1998 El Niño and 1998=1999 La Niña events. J. P. R. Fernandez, S. H. Franchito, and V. B. Rao. Theor. Appl. Climatol. (2006) DOI 10.1007/s00704-005-0213-5.

Two models for the climate change related development of sea levels in the North Sea—a comparison. F. Kauker, H. Langenberg. CLIMATE RESEARCH. Vol. 15: 61–67, 2000.

Atmospheric regional climate models (RCMs): A multiple purpose tool? Report of the "Joint WGENE/WGCM ad hoc Panel on Regional Climate Modelling. February 2002.

The surface climatology of the eastern Mediterranean region obtained in a three-member ensemble climate change simulation experiment. S. O. Krichak, P. Alpert, K. Bassat, and P. Kunin. Adv. Geosci., 12, 67–80, 2007.

Transferability Experiments Using Two Regional Climate Models. Julio Pablo Reyes Fernández, Rosemeri Porfirio da Rocha, Daniel Martinez and Yamina Silva.

Sensitivity Studies of the Regcm3 Simulation of Summer Precipitation, Temperature and Local Wind Field in the Caribbean Region. D. Martinez-Castro. Theor. Appl. Climatol. (2006) DOI 10.1007/s00704-005-0201-9.

Escenarios regionales de cambio climático en Cantabria. Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación. Universidad de Cantabria. 2007.

Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española De Cambio Climático. Ministerio De Medio Ambiente. España.

Statistical Properties Of Precipitation In The Regional Climate Model CLM - And Sensitivity To Initial Conditions And Parameterizations. Susanne Bachner, Kerstin Ebell, Alice Kapala and Clemens Simmer Meteorological Institute, University of Bonn. Nato-SfP Project Meeting, 13-15 May 2006, Odessa.

The Internal variability of the regional climate model RegCm3 over South Africa. Mary Jane Morongwa kगतube. Dissetatio on partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Meteorology). University of Pretoria . August 2006.

Seasonal Precipitation Prediction over South America with the Etaclim. Julio Pablo Reyes Fernández, Igor A. Pisnichenko and Tatiana A. Tarasova Center for Weather Forecasting and Climate Studies – CPTEC/National Institute for Space Research - INPE, Brazil.

Regional Biodiversity Impact Assessments for Climate Change: A Guide for Protected Area Managers. Lee Hannah, Ph.D. Center for Applied Biodiversity Science, Conservation International. Aug. 2003.

Climate, Hydrology & Fluvial Systems Climate change scenarios. H. Middelkoop Room: 102. Tel: 2532167 E-mail: h.middelkoop@geo.uu.nl.

Climate Change: Are Greenhouse Gas Emissions from Human Activities Contributing to a Warming of the Planet? Roni Avissar, Civil and Environmental Engineering, Duke University (avissar@duke.edu).

Adaptation of NCEP RSM Model for Long-range Forecasting. T.W. Hui, K.H. Yeung and W.L. Chang, Hong Kong Observatory, 134A, Nathan Road, Hong Kong. Email: dtwhui@hko.gov.hk.

Cambio climático: planteamientos y análisis Desde una perspectiva multidisciplinar. Ana Yábar Sterling. Catedrática de Economía Aplicada. Universidad Complutense de Madrid.

Estimación de escenarios regionales de cambio climático mediante el uso de modelos climáticos regionales. 2da Comunicación Nacional de Cambio Climático, Proyecto GEF. BIRF PF 51286 AR. CIMA/CONICET B-9 Modelos Climáticos Regionales. Argentina.

Technical Description of the community Land Model (CLM). Keith W. Olsen et al. NCAR/TN-461+STR. May. 2004.

Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales. The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South América. J. A. Marengo, T. Ambrizzi. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, p. 291-296.

Cambio climático y sus impactos en la Amazonía. Foreign & Commonwealth Office. Jose A. Marengo. CPTEC/INPE. marengo@cptec.inpe.br. www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas.

El enfoque de Brasil para la generación de escenarios de cambio climático. Jose A. Marengo. CPTEC/INPE, São Paulo, Brazil. (marengo@cptec.inpe.br).

Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. L. O. Mearns, F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, M. Lal. DDC of IPCC TGCIA. Final Version - 10/30/03.

The Atmospheric general circulation model ECHAM5. Model description. E. Roeckner, G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch_M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner1, L. Kornblueh_E. Manzini2, A. Rhodin3, U. Schlese, U. Schulzweida, A. Tompkins4. Hamburg, November 2003. ISSN 0937 – 1060.

Consequences of climate change for runoff and soil erosion: coupled simulation at the seasonal and extreme event scales. J.P. Nunes (1), J. Seixas (1), N.R. Pacheco (1), N. Carvalhais (1). Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 09100, 2006.

El calentamiento global. Mario Molina. Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente Seminario: Cambio Climático: El Caso de México. ACADEMIA DE INGENIERIA. Palacio de Minería. Septiembre de 2007.

Climate Change Scenarios and Impact on Catchment and Rainfall Runoff Response. Bjoern Elsaesser, Adrian K. Bell, Grace Glasgow, RPS Consulting Engineers, Belfast. National Hydrology Seminar 2006.

Ensemble Methods for Seasonal Limited Area Forecasts. Raymond W. et al. Acknowledgments. NOAA GAPP/PACS programs. National Science Foundation ATM-9969650.

Evaluación de modelos y construcción de Capacidades para la evaluación de la Vulnerabilidad al cambio climático. Víctor Orlando Magaña Rueda. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. Diciembre 2004.

Evaluation of RSM-Simulated Precipitation during CEOP. I. Meinke, J. Roads & M. Kanamitsu. Journal of the Meteorological society of Japan. Vol 85A. 2007.

Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS. Global Environment Facility • Energy and Environment Group • Bureau of Development Policy 304 East 45th St • New York, NY 10017, USA • Tel: 1-212-906 5044 • Fax: 1-212-906 6998 • Web: www.undp.org/cc/, www.undp.org/cc/COP9.htm. bo.lim@undp.org.

Overview of the IPCC WG1 4AR Model Output Database. Robert Drach. Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison. Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-PRES-212663. GO-ESSP workshop 2005.

Technical report 06-17. The HIRHAM Regional Climate Model Version 5 (β). Ole Bøssing Christensen, Martin Drews, and Jens Hesselbjerg Christensen. Danish Climate Centre, DMI Klaus Dethloff, Klaus Ketelsen, Ines Hebestadt, and Anette Rinke Potsdam Research Unit, Alfred Wegener Institute Foundation for Polar and Marine Research. Copenhagen 2007.

Impacts of Climate Change in South America: Mean Fields and Variability. Alice Marlene, Angela Akie Natori. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE, p. 269-274.

An Evaluation of the NCEP RSM for Regional Climate Modeling. SONG-YOU HONG. Environmental Modeling Center, National Centers for Environmental Prediction, Washington, D.C. ANTS LEETMAA. Climate Prediction Center, National Centers for Environmental Prediction, Washington, D.C. April 1998. Journal of Climate. Volume 12.

An Analysis of the Review of the IPCC 4AR WG I Report. John McLean. Originally Written August 2007. Published by Science & Public Policy Institute. September 2007.

Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the IPCC AR4 Multi-Model Ensemble. V. V. Kharin and F. W. Zwiers, CCCma, MSC 4th Conference on Extreme Value Analysis, Gothenburg, August 2005.

Temporal Disaggregation of Daily Precipitation Data in a Changing Climate. Karen M. Wey. M.S. Thesis University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada, 2006.

Regional Climate Simulation: A Mesoscale Modeler's Perspective. Bill Kuo (National Center for Atmospheric Research) and Ruby Leung (Pacific Northwest National Laboratory). 2001 ESIG/NCAR.

Conditions for use of the Rossby Centre regional climate model system, or parts thereof, for scientific or technical non-commercial research purposes. Rossby Centre, the Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SE-601 76 Norrköping, Sweden.

Assessment of Dynamical Climate Downscaling Methodologies Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. Jeff Chun-Fung Lo, Zong-Liang Yang and Roger A. Pielke Sr. Submitted to Journal of Geophysical Research–Atmospheres.

Modelos climáticos regionales. Jesús Fernández (Grupo de Meteorología Aplicada UCINM). jesus.fdez@unican.es.

Cloud representation in General Circulation Models over the Northern Pacific Ocean: A EUROCS intercomparison study. A. P. SIEBESMA et al. January 2004. Q. J. R. Meteorol. Soc.

Project to Intercompare Regional Climate Simulations (PIRCS). William Gutowski. Iowa State University. <http://rcmlab.agron.iastate.edu>.

Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. Aiguo Dai. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. Journal of Climate. Volume 19. Sept 2006.

Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS. Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J. and Mitchell, J.F.B. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp. April 2004.

Planetary boundary layer energetics simulated from a regional climate model over Europe for present climate and climate change conditions. E. Sánchez, C. Yague, and M. A. Gaertner. Geophysical Research Letters, VOL. 34, L01709, doi:10.1029/2006GL028340, 2007.

El proyecto PRUDENCE. Miguel Ángel Gaertner. Facultad de Ciencias del Medio Ambiente. Universidad de Castilla-La Mancha. <http://prudence.dmi.dk>.

RAMS 2001: Current status and future directions. W. R. Cotton et al. Published online: November 21, 2002 # Springer-Verlag 2002. Meteorol Atmos Phys 82, 5–29 (2003). DOI 10.1007/s00703-001-0584-9.

El enfoque de España para la generación de escenarios de cambio climático. Madrid, 18-20 oct. 2006.

Theory Manual. Regional Simulation Model (RSM). South Florida Water Management District (SFWMD). Office of Modeling (OoM). 3301 Gun Club Road. West Palm Beach, FL 33406. May 2005.

Installing and using the Hadley Centre regional climate modeling system, PRECIS. Simon Wilson, David Hassell, David Hein, Richard Jones and Ruth Taylor. Version 1.5.1. precis.meto_ce.com. August 2007.

Tropical Intraseasonal Variability in 14 IPCC AR4 Climate Models. Part I: Convective Signals. JIA-LIN LIN et al. Journal of Climate. Volume 19. Sept 2006.

Uso del método de escalado de patrones con distintos generadores de escenarios climáticos aplicados sobre la península Ibérica. Ernesto Rodríguez Camino. INM, P.O. Box 285, 28071 Madrid. e.rodriguez@inm.es.

Calentamiento Global, según el IPCC. Ing. Met. Gabriela Rosas. SENAMHI. Febrero 2007.