



Comite Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

---

## ESTUDIO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA HIDROLOGIA DE LA CUENCA DE LA CENTRAL DE ITAIPU

Autor/es: **JOSÉ MIGUEL RIVAROLA SOSA**, Ingeniero civil, Magister Scientiae en Planificación de Recursos Hídricos  
Empresa o entidad: ITAIPU BINACIONAL-UNIVERSIDAD CATOLICA Paraguay

### **Resumen**

Las consecuencias hidrológicas del cambio climático tienen especial importancia para la Central de ITAIPU, la mayor hidroeléctrica del mundo en producción de energía (potencia instalada 14.000 MW), una empresa binacional desarrollada conjuntamente entre Paraguay y Brasil, debido a que su principal “combustible” es el agua.

La cuenca hidrológica de Itaipu está formado por el río Paraná compartido por Paraguay y Brasil y localizado en la Cuenca del Plata (América del Sur). Los impactos hidrológicos fueron estudiados en la cuenca regulada denominada “cuenca incremental” ubicada próxima a la ITAIPU, con 147.000 km<sup>2</sup> de área de drenaje, 20% de la cuenca total.

Escenarios de cambio climático fueron generados a partir de salidas (de frecuencia diaria) del modelo CGCM2 (Coupled Global Climate Model) del “Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis” para el escenario “A2” de emisión de gases invernadero del IPCC/SRES.

Downscaling estadístico fue realizado usando el modelo LARS-WG para generar series estocásticas diarias para el escenario base (1980-2006) y para los escenarios de cambio climático (2010-2040 y 2070-2100); obteniendo así series estocásticas diarias de precipitación media espacial de los 29 segmentos de la cuenca incremental. Luego, el modelo hidrológico Sacramento fue usado para estimar los cambios en la escorrentía.

Con la metodología usada y con los escenarios de cambio climático se detectaron algunas tendencias en la precipitación: leve tendencia de disminución variando a lo largo de la estación; para el verano y la primavera tendencia de aumento y para el otoño tendencia de disminución.

Con respecto a la escorrentía, se encontró que en promedio tiene una tendencia de disminución, especialmente en el otoño. Los valores máximos disminuyen, particularmente en la margen izquierda del río Paraná y principalmente en otoño (época de crecidas). Esta tendencia es casi nula para el escenario 2070-2100. Valores extremos mínimos también tienen tendencia de disminución.

### **PALABRAS CLAVE**

Cambio climático, recursos hídricos, modelos hidrológicos, modelo hidrológico Sacramento

José Miguel Rivarola Sosa- Tel (595)(61)599 2563 - e-mail: jmriva@itaipu.gov.py



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

## 1. Introducción

La cuenca hidrológica de la Central hidroeléctrica de ITAIPU está formada por el río Paraná, desde la región sudeste del Brasil y hasta la región sur de este país y región este de Paraguay, con 820.000 km<sup>2</sup> de área de drenaje. El río Paraná es el río más importante de la Cuenca del Plata, región de mayor desarrollo de América del Sur. Sus recursos hídricos son la base de la agricultura y de su potencial energético, fundamental para los países que comparten la cuenca (Brasil, Paraguay, Argentina, otros). Consecuentemente es de vital importancia conocer el impacto del cambio climático sobre la hidrología, el potencial hidroeléctrico, y sobre los eventos extremos (máximos y mínimos).

Así, buscando predecir el futuro de por sí incierto, el uso de “Escenarios” es recomendado. Estos, incluso, deberían ser escenarios contrastantes con la finalidad de explorar las incertidumbres de los impactos futuros. Específicamente, en este estudio fueron usados algunos escenarios de cambio climático del modelo climático CGCM. Más adelante, podrían ser desarrollados una mayor gama de escenarios para estudiar mejor los posibles impactos sobre la agricultura y la hidroelectricidad.

El principal objetivo de este estudio es usar escenarios de cambio climático en la región de la Central de ITAIPU para verificar sus impactos en la disponibilidad de agua, cambios en la escorrentía promedio y de su variabilidad, cambios estacionales y cambios de los eventos extremos (máximos y mínimos).

## 2. Area de estudio

La Central Hidroeléctrica de ITAIPU está localizada sobre el río Paraná, en la región trifronteriza entre Paraguay y Brasil.

La cuenca alta está fuertemente regulada por otras represas. La cuenca baja, desde la CHI Porto Primavera y la CHI Rosana hasta la CHI Itaipu no está regularizada y representa el 20% de la cuenca total, (Figura No 1); siendo llamada “cuenca incremental” con área de drenaje de 147,000 km<sup>2</sup>.

El area de estudio es la “cuenca incremental de ITAIPU” en el cual los dos ríos más importantes son los ríos Ivai y Piquirí, situados en la margen izquierda del río Paraná. Los caudales de la margen derecha son de menor importancia relativa por ser poco significativos.



Figura 1: Ubicación de la CHI Itaipu y el área de estudio (Cuenca incremental de Itaipu-Figura ovalada).

## 3. Metodología y datos utilizados

### a. Metodología

La metodología utilizada fue la siguiente:

- Colecta y consistencia básica de datos meteorológicos diarios del área de estudio,
- Selección del periodo del escenario base, en función a la disponibilidad de los datos. Y selección de los periodos de escenarios de cambio climático,
- Cálculo de la precipitación media areal diaria para cada sub-cuenca,
- Evaluación de desempeño del modelo hidrológico sobre la cuenca de estudio,

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

- Para cada subcuenca, generación de la serie estocástica de precipitaciones media areales para el escenario base, a través del uso del LARS-WG (obtención de las características estadísticas de la serie observada y generación de la serie sintética),
- Generación de la serie estocástica de precipitaciones medias diarias para los escenarios de cambio climático: Selección del escenario socioeconómico del IPCC y obtención de los resultados del modelo de cambio climático canadiense CGCM, Generación de las características estadísticas de los resultados del CGCM, Cálculo de los parámetros de cambio, Generación de las series sintéticas de precipitación media areal para cada subcuenca, a través del uso del LARS-WG,
- Para cada escenario, perturbación de los datos observados de precipitación,
- Con el uso del modelo hidrológico y las series estocásticas, cálculo de la escorrentía (runoff), para todos los escenarios,
- Cálculo de cambio de la escorrentía a una escala mensual.

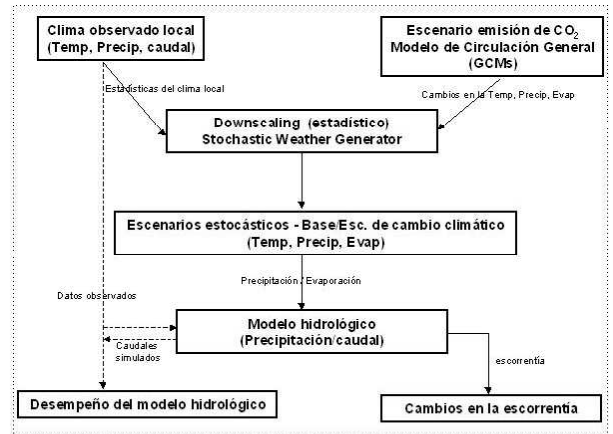


Figura 2: Esquema de la metodología utilizada

**b. Datos utilizados**

Se utilizó datos de una red pluviométrica con 51 pluviómetros, siendo las entidades fuentes: Itaipu Binacional, DINAC (Paraguay) y Simepar IAPAR y ANA del Brasil.

Los criterios considerados para seleccionar los pluviómetros fueron: formar parte de la red operativa de la Itaipú (40 estaciones), mejorar la distribución espacial (11 estaciones).

Se realizó una consistencia básica con dichos datos, eliminando los “datos basura” identificados por una inspección visual y con el uso de filtros según lo siguiente:  $P > \text{“límite máximo”}$  (usados 250 mm, 200 mm y 150 mm) y todos los valores negativos.

En 6 estaciones fueron realizados completamiento de datos faltantes (a través de estaciones vecinas): Dourados, Ponta Pora, Cantagalo, Cascavel, Marquinhos y Santa Maria.

Además, se revisó expeditivamente un análisis de no estacionalidad de los datos, encontrándose que la serie diaria presentaba una tendencia despreciable, con lo cual no fue relatado en este informe.



Figura 3: Ubicación de las estaciones pluviométricas (51 estaciones con datos diarios disponibles)



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

c. **Modelo climático**

Existen diversos modelos climáticos globales (GCMs-global climate model) que podrían ser usados en este estudio: Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HadCM3), Australia’s Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO-mk2, Max Planck Institute fur Meteorologie, ECHAM4, National Centre for Atmospheric Research, NCAR-PCM, Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, CGCMs.

El modelo utilizado, en este estudio, fue el CGCM2 (Coupled global Climate Model) del Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, por disponer resultados a escala diaria de datos meteorológicos. Siendo el escenario usado el IPCC SRES "A2" (descrito más adelante). Se tienen simulaciones de la atmósfera desde el año 1990 con resultados diarios disponibles en el periodo 1961-2100.

Los resultados son presentados en una malla gaussiana de 97x48, con una resolución aproximada de 3.75° lat x 3.75° long. Se utilizaron: Screen (2m) Temperature (°C), daily maximum and minimum screen temperature, precipitation rate (mm/día) y evaporation (mm/día).

Existen tres puntos de la malla que están próximos al área de estudio: sobre Mato Grosso (Brasil), región este de Paraguay y sobre el estado de Paraná (Brasil), los cuales fueron considerados para el estudio y denominados como “MG”, “PY” y “PR”.

Con el objetivo de conocer las características principales del área de estudio se presenta en la Figura 4 la topografía y en la Figura 5 las principales estadísticas climáticas.

Debe considerarse que las estadísticas de cada uno de los puntos de la malla no son directamente comparables con los datos puntuales de las estaciones de superficie y que los modelos climáticos intentan representar las características climáticas de gran escala, así sus resultados pueden ser usados para estudiar la variabilidad climática y el cambio climático.

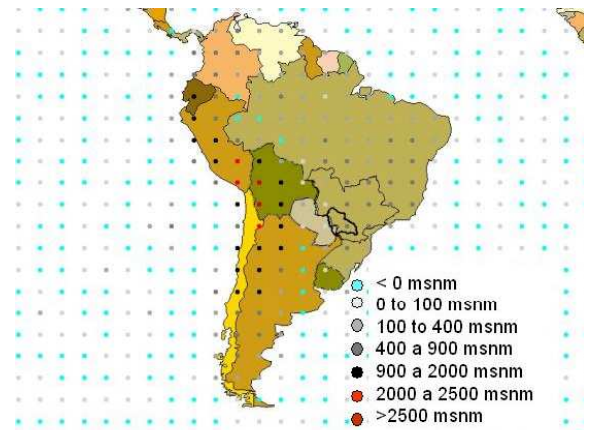


Figura 4: Topografía del CGCM en Sudamerica

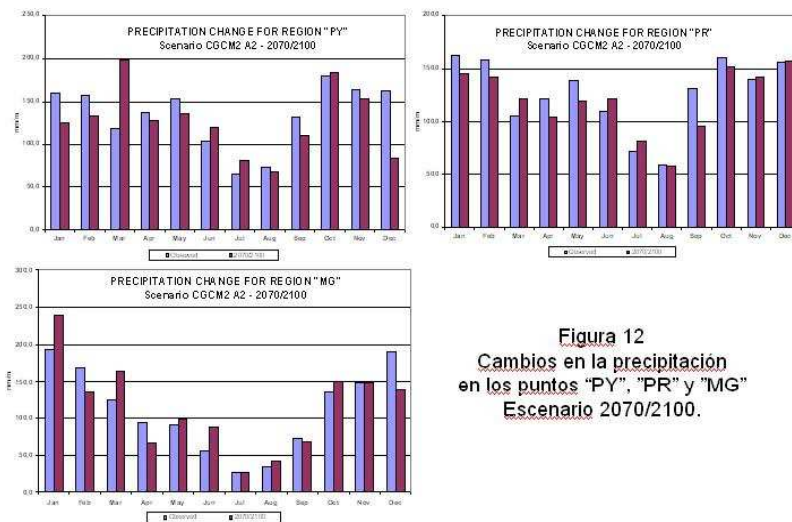


Figura 12  
Cambios en la precipitación  
en los puntos “PY”, “PR” y “MG”  
Escenario 2070/2100.



**d. Técnicas de “Downscaling”**

Es necesario transferir señales del cambio climático desde la escala global de los modelos climáticos (GCMs) a la escala local o regional requerido por el modelo hidrológico. Así, fue realizado un “downscaling” utilizando técnicas estadísticas.

El proceso desarrollado, usando el software LARS-WG, para generar las precipitaciones medias espaciales para cada una de las cuencas fue:

- Proceso de calibración: Determinar las características estadísticas observadas.
- Validación: determinar existencia de alguna significancia estadística entre los datos observados y estocásticos.
- Generación de series estocásticas: Generación de series diarias estocásticas para el escenario base y los dos escenarios de cambio climático. Para el escenario base, series estocásticas diarias son generadas usando las mismas estadísticas de las series observadas. Para los escenarios de cambio climático, las series estocásticas son generadas usando características estadísticas perturbadas. Es decir, los parámetros de cambio de las estadísticas son obtenidos a partir de los cambios obtenidos de las características estadísticas de los resultados del modelo climático global (CGCM), para cada uno de los tres puntos de mallas considerados. Cada serie de una subcuenca es perturbada según el punto de la malla más proximo, “PY”, “PR” o “MG”.

**e. Modelo hidrológico**

**Modelo precipitación-caudal**

En este estudio fue utilizado el modelo hidrológico ‘Sacramento’ para estimar los cambios hidrológicos de los diferentes escenarios de cambio climático.

El modelo Sacramento es un modelo determinístico, conceptual y semi-distribuido, simulando el balance del ciclo del agua (Peck, 1976 (Figura 6); Georgakakos *et al*, 1988; Gan and Burges, 1990). Fue originalmente desarrollado por Burnash *et al.* en 1973, en el National Weather Service Sacramento. En este estudio fue utilizado una versión holandesa, disponible en el software Hymos y en un ejecutable, operado por la ITAITU con paso de calculo diario.



Figura 6: El ciclo del agua por el U.S. Geological Survey.

Específicamente se determinó el volumen de escorrentía para cada uno de los escenarios simulados.

En la Figura 7 se muestra con mayor detalle como la modelación del ciclo hidrológico es simulada.

El modelo es considerado semi-distribuido justamente porque la cuenca de estudio es subdividida en segmentos o subcuencas para mejorar la representatividad espacial.

Los parámetros del modelo son determinados a partir de un proceso de calibración en el cual se busca que los caudales simulados y observados sean similares.

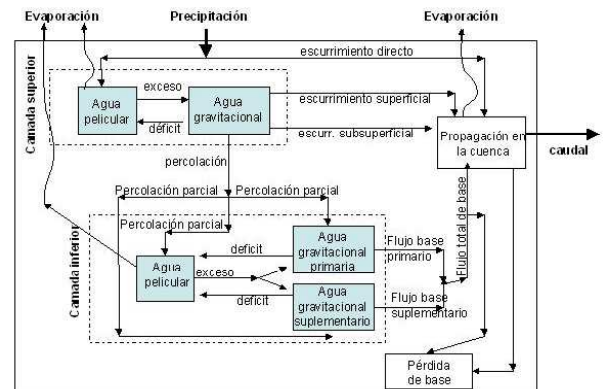


Figura 7: Proceso precipitación-caudal en cada subcuenca del modelo Sacramento.



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

El modelo Sacramento ya fue aplicado a diversos campos de la hidrología (análisis de caudales extremos e incluso en otros estudios de cambio climático). En este estudio, fue utilizado para determinar solamente la escorrentía de cada subcuenca descartando los procesos de propagación en canales teniendo en cuenta que las series estocásticas de precipitación, sobre cada subcuenca, fueron generadas en forma independiente, despreciándose así la interdependencia espacial de las precipitaciones (característica necesaria para obtener caudales de los ríos).

**Aplicación en el área de estudio**

La cuenca incremental, de 147.000 km<sup>2</sup> de área de drenaje, fue dividida en 29 sub-cuencas (o segmentos), buscando representar mejor los ríos más importantes de la cuenca incremental (en especial los ríos Piquirí e Ivai), como muestra la Figura 8.



Figura 8: Sub-cuencas de la cuenca incremental de Itaipu, utilizadas en el modelo precipitación-caudal(29 segmentos). Cuadrado rojo representa la precipitación media espacial.

Para cada segmento o subcuenca se necesita como dato de entrada la precipitación media areal y la evaporación. La precipitación media areal fue determinada a través del método de Thiessen (1911) utilizando un software desarrollado dentro de la Itaipu Binacional.

**Desempeño del modelo hidrológico aplicado**

Un periodo de 27 años con caudales diarios fueron utilizados para determinar el desempeño del modelo hidrológico (Ver Figura 9). Se presentan los resultados (observados vs simulados) de la sumatoria de los caudales en 5 estaciones de los principales ríos de la Cuenca incremental : Porto Paraíso do Norte (río Ivai) y Balsa Santa Maria (río Piquiri) hacia la margen izquierda del río Paraná, e Ivinheima (río Ivinheima), Florida (río Amambai) e Iguatemi (río Iguatemi) en la margen derecha del río Paraná. En la tabla de la Figura 9 se muestran los coeficientes de correlación para cada estación mencionada.

Se puede visualizar que el desempeño es aceptable para el caudal total y también para las estaciones de la margen izquierda (ríos Ivai y Piquirí). Pero en la margen derecha (ríos Ivinheima, Amambai e Iguatemi) el desempeño es bajo. Esto último debido a la baja densidad de las estaciones pluviométricas y la menor subdivisión en subcuencas.

Sin embargo, se considera aceptable teniendo en cuenta que el modelo hidrológico será utilizado para obtener el **cambio** de la escorrentía en los diferentes escenarios.

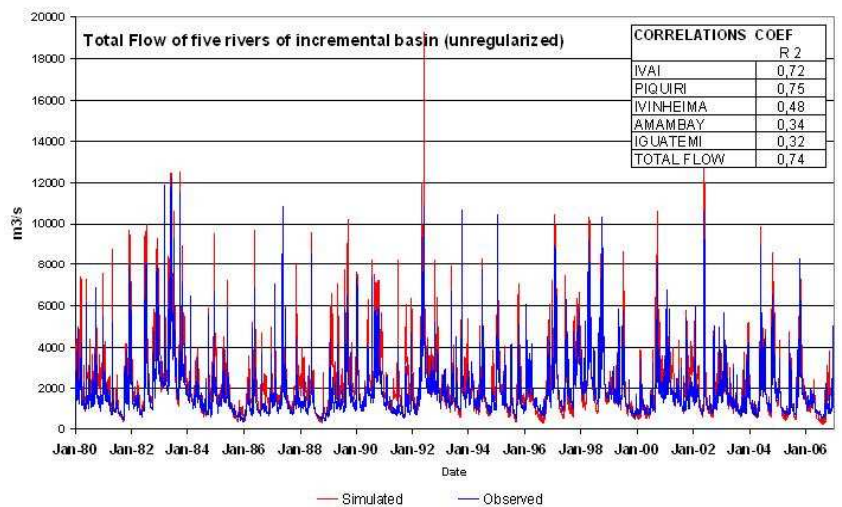


Figura 9: Desempeño del modelo Sacramento. Figura: Sumatoria de caudales de 5 ríos principales. Tabla: cuadrado del coeficiente de correlación.



#### 4. Escenarios de cambio climático

##### a. Escenarios socioeconomicos del IPCC

###### Escenarios de emisión de gases de invernadero del IPCC/SRES

El “Special Report on Emission Scenarios (SRES)” fue un informe preparado por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) para el tercer informe de evaluación, en escenarios futuros de emisión de gases de invernadero y aerosoles, a ser usados en los modelos atmosféricos de circulación global con el objetivo de generar escenarios de cambio climático. Como las proyecciones de cambio climático dependen fuertemente de las actividades humanas futuras, los modelos climáticos son corridos para diferentes escenarios (con diferentes hipótesis de polución de gases de invernadero, uso de la tierra, etc (<http://en.wikipedia.org>)).

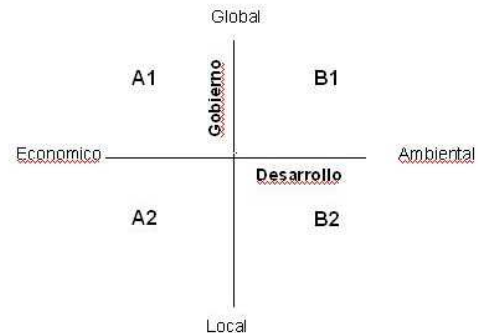


Figura 10: Dimensiones de los escenarios del SRES/IPCC

Los escenarios son agrupados en familias con 4 grupos produciendo: Alta (A1), media alta (A2), media baja (B1) y baja (B2) emisión antropogénica de gases de invernadero y aerosoles, en función al desarrollo técnico, conciencia ambiental y social, desarrollo demográfico, cooperación entre países (Figura 10).

##### b. Escenario seleccionado

Recordemos que en este estudio fueron usados resultados del CGCM2, del Centro Canadiense “Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis” (que contienen salidas a escala diaria para los escenarios “A2” y “B2” SRES/IPCC), correspondiente a los escenarios “A2”.

Los resultados del CGCM2-A2 tienen disponibles salidas a escala diaria para el periodo 1961 a 2100. Normalmente la “línea base” del clima que representa el “presente” tiene un periodo de 30 años (adoptado por el WMO), desde 1961 a 1990, pero en este estudio fue utilizado entre 1980-2006 (27 años) debido a que en dicho periodo se tiene mayor disponibilidad de datos y más consistentes.

Los escenarios de cambio climático seleccionados fueron: a) escenario CGCM2-A2 periodo 2010/2040 (escenario 2010/2040) y b) escenario CGCM2-A2 periodo 2070/2100 (escenario 2070/2100).

Las series estocásticas de precipitación media areal (para cada subcuenca) fueron generadas para el escenario “presente” y los de cambio climático utilizando el software LARS-WG, utilizando el proceso ya explicado más arriba (técnicas de downscaling).

#### 5. Impactos hidrológicos del cambio climático

##### a. Precipitación

El cambio de la precipitación es analizada a partir de la climatología mensual en tres puntos de la malla del CGCM2 (“PY”, “PR” y “MG”), calculadas promediando las precipitaciones medias mensuales de las estaciones agrupadas según la proximidad a cada punto (escenario base) y perturbando estas climatologías en función al cambio relativo de las precipitaciones simuladas del CGCM2-A2. Así, se obtuvo:

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

**Escenario 2010/2040**

En la Figura 11 puede verse que los cambios de las precipitaciones mensuales son bajos y dispersos. En las regiones "PR" y "MG" y durante otoño (AMJ) se observa tendencia de disminución y durante la primavera de aumento.

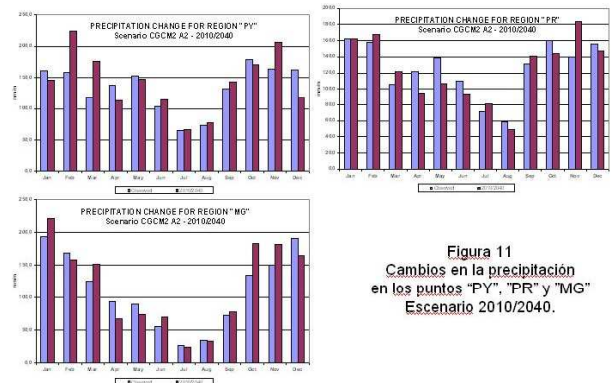


Figura 11  
Cambios en la precipitación  
en los puntos "PY", "PR" y "MG"  
Escenario 2010/2040.

**Escenario 2070/2100**

De la misma manera, en la Figura 12 se puede ver que el cambio en la precipitación mensual, en este escenario, tiene una tendencia de descenso, principalmente en el verano y el otoño. En la primavera la tendencia de descenso es bastante débil.

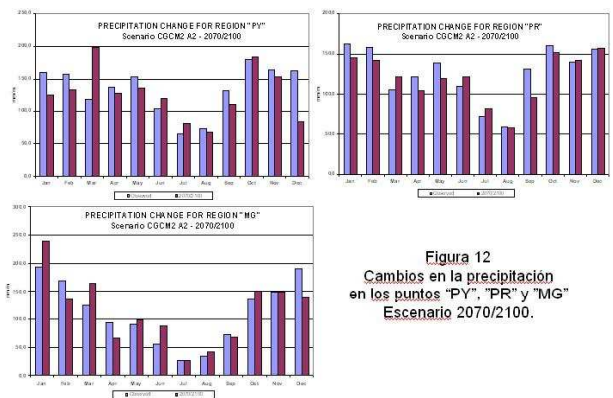


Figura 12  
Cambios en la precipitación  
en los puntos "PY", "PR" y "MG"  
Escenario 2070/2100.

**b. Escorrentía(runoff)**

Para iniciar el análisis de los cambios en la escorrentía es importante conocer los caudales medios mensuales observados (del escenario base) para el área de estudio (cuenca incremental).

La Figura 13 muestra las medias, máximas, mínimas y los terciles 33 y 66%, pudiendo caracterizar de esta forma las disponibilidades medias, los periodos de eventos extremos, periodos secos (mínimos y q33%) y periodos húmedos(máximos y q66%).

Los caudales medios tienen poca variación durante el año. Los eventos húmedos son generalmente en mayo o junio (otoño) y en octubre (primavera) (deducido de los máximos y q66%). Eventos secos pueden observarse en cualquier mes del año, pero es más usual durante Agosto (invierno) (deducido de los mínimos y q33%).

Así, con el objetivo de conocer el cambio en la escorrentía, se evaluará la escorrentía media anual y por estación del año (en cada subcuenca). Los eventos extremos húmedos son evaluados solamente el promedio anual y de la estación otoñal (periodo de mayor escorrentía). Los eventos secos son evaluados solamente el promedio anual y de la estación del invierno teniendo en cuenta que en esta estación se predominan los eventos más secos.

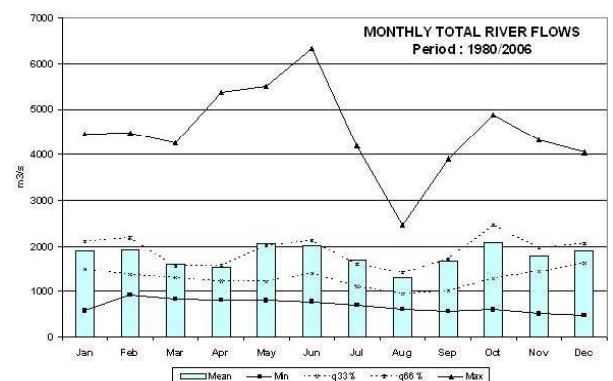


Figura 13: Estadística mensual de los rios de la cuenca incremental (Sumatoria de caudales de P. P. do Norte, B.S. Maria, Invinheima, Florida y E. Iguatemi).



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

El análisis de la escorrentía es mostrado por sub-cuenca aisladamente porque las series estocásticas de precipitación no tienen correlación espacial en la escala diaria, descartandose la agregación de la escorrentía para cuencas principales o el uso de caudales en los ríos.

La escala cualitativa adoptada para el análisis de los resultados es: sin tendencia, tendencias bajas, medias o altas. Tanto para cambios positivos (incremento de la escorrentía) como para negativos (disminución de la escorrentía).

**Escenario 2010/2040**

Cambios de la escorrentía promedio

La Figura 14 muestra que la escorrentía promedio tiene tendencia de disminución en la margen izquierda del río Paraná, en contrario, existe tendencia de aumento en la margen derecha.

En el verano hay una tendencia de aumento en la mayoría de las subcuencas aunque se observan algunos resultados dispersos (Figura 15). En otoño hay una tendencia de disminución en la margen izquierda mientras que en la margen derecha la tendencia es de aumento hacia el sur de esta parte (influenciado por la tendencia del punto "PY"). En invierno hay una tendencia de disminución en la margen izquierda, mientras que en la margen derecha es de aumento. En la primavera hay una tendencia de aumento en la mayoría de las subcuencas pero también se observan algunas dispersiones en algunas subcuencas.

Cambios en los eventos extremos

La Figura 16 muestra que la escorrentía máxima mensual tiene tendencia de descenso en la margen izquierda del río Paraná, siendo en la margen derecha de aumento (se observan de nuevo dispersiones). Analizando para el otoño, estación en el cual predominan las crecidas, se observa que se tiene tendencia de disminución en la mayoría de las subcuencas (se observa de nuevo dispersión en algunas subcuencas)

De la misma forma, la Figura 17 muestra que los valores mínimos tienen tendencia de descenso en la margen izquierda pero de aumento para la margen derecha, de nuevo con algunas dispersiones en los resultados. En invierno se observa la misma tendencia.

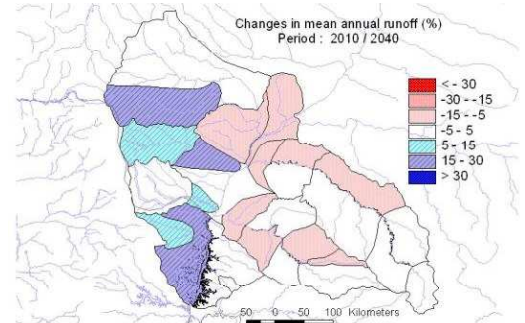


Figura 14: Cambios de la escorrentía media anual por subcuenca. Escenario CGCM2-A2 2010/2040

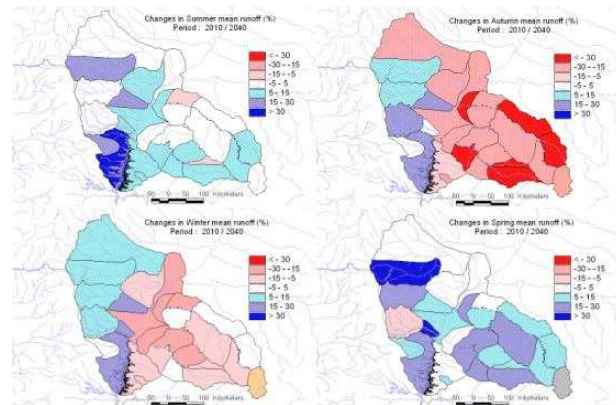


Figura 15: Cambios de la escorrentía media anual por estación. Escenario CGCM2-A2 2010/2040

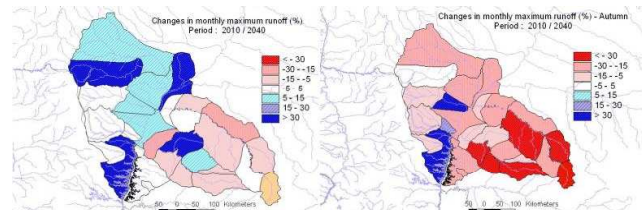


Figura 16: Cambios de la escorrentía máxima mensual por subcuenca. Escenario CGCM2-A2 2010/2040

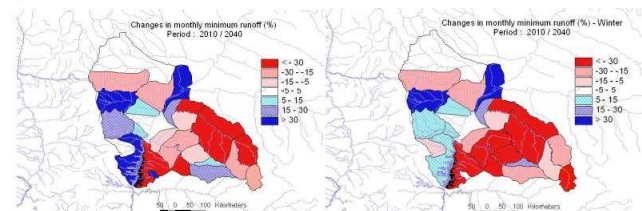


Figura 17: Cambios de la escorrentía mínima mensual por subcuenca. Escenario CGCM2-A2 2010/2040

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

La dispersión de los resultados podría explicarse por la estocasticidad de las series de precipitación que fueron generadas espacialmente independientes entre las subcuencas; no puede descartarse tampoco eventuales inconsistencias en los datos.

**Escenario 2070/2100**

Cambios de la escorrentía promedio

La Figura 18 muestra que la escorrentía promedio tiene tendencia de disminución en la mayoría de las subcuencas, pero en dos de ellas se observan resultados dispersos.

En el verano hay una tendencia de disminución en la mayoría de las subcuencas (Figura 19). En otoño hay una tendencia de disminución en la margen izquierda mientras que en la margen derecha la tendencia es de aumento hacia el sur de esta parte (influenciado por la tendencia del punto "PY"). En invierno hay una tendencia de disminución en la mayoría de las subcuencas, En la primavera hay una tendencia de disminución en la mayoría de las subcuencas pero con una señal muy baja para la margen izquierda. Se observan dispersiones en algunas subcuencas en todas las estaciones del año.

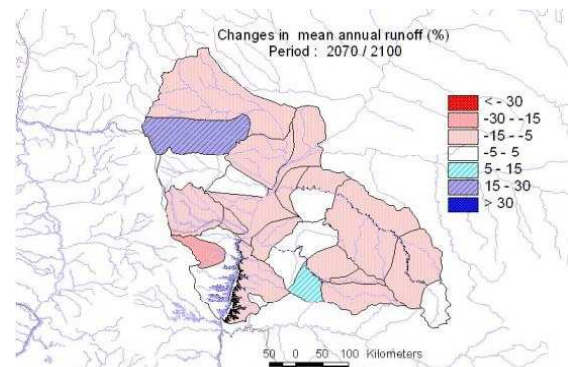


Figura 18: Cambios de la escorrentía media anual por subcuenca. Escenario CGCM2-A2 2070/2100

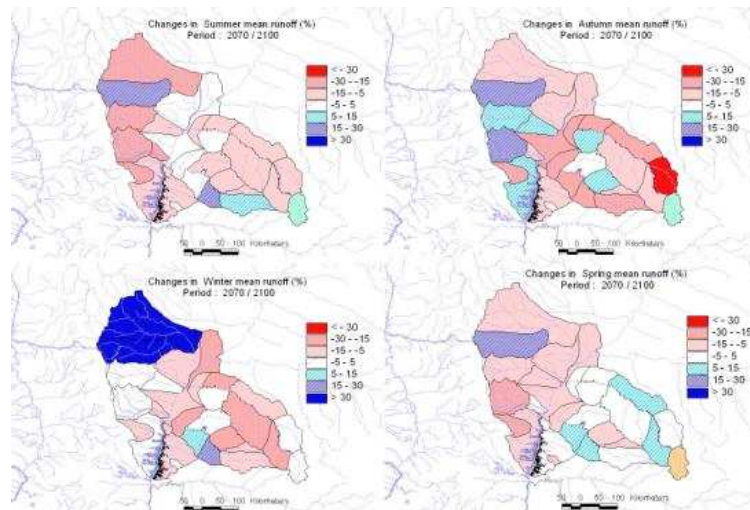


Figura 19: Cambios de la escorrentía media anual por estación. Escenario CGCM2-A2 2070/2100

Cambios en los eventos extremos

La Figura 20 muestra que la escorrentía máxima mensual tiene tendencia de descenso en la margen izquierda del río Paraná, siendo en la margen derecha de aumento (se observan de nuevo dispersiones). Para el otoño no se observa tendencia definida.

De la misma forma, la Figura 21 muestra que los valores mínimos tienen tendencia de descenso en la mayoría de

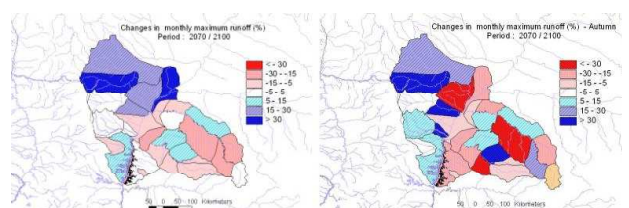


Figura 20: Cambios de la escorrentía máxima mensual por subcuenca. Escenario CGCM2-A2 2070/2100

## VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ 29, 30 y 31 de Octubre de 2008

las subcuencas. En invierno se observa la misma tendencia. Algunas subcuencas muestran resultados dispersos.

Recordemos que la dispersión de los resultados podría explicarse por la estocasticidad de las series de precipitación generadas espacialmente independientes entre las subcuencas.

### Curva de frecuencia mensual

Con respecto a la frecuencia mensual de la escorrentía, ya expresado en caudal total (m<sup>3</sup>/s), de la cuenca incremental, la Figura 22 muestra que se tiene una tendencia de descenso.

Para los escenarios de cambio climático, el promedio y la moda se desplazan hacia la izquierda, es decir disminuyen.

Los valores máximos de la escorrentía también tienen tendencia de disminución en magnitud y en frecuencia. Lo mismo se observa para los valores mínimos.

### 6. Resumen y conclusiones

Algunos resultados encontrados fueron dispersos. De ahí se recomienda ampliar el análisis de no estacionalidad de los datos, especialmente cuando es usado un método estadístico de “downscaling”.

El modelo hidrológico Sacramento tiene desempeño aceptable en la margen izquierda del río Paraná, pero desempeño bajo en la margen derecha, probablemente por la baja densidad de estaciones con datos disponibles.

Es recomendable realizar un análisis de desempeño de diversos modelos climáticos sobre la cuenca de estudio, principalmente en la representación espacial y temporal. En este aspecto debe tenerse en cuenta que lo más importante es el desempeño cualitativo teniendo en cuenta que los resultados son utilizados solamente para deducir los parámetros de cambio climático.

La generación de series estocásticas, independientemente entre subcuencas, produce series sin correlación espacial. Esto ya ha sido dado énfasis por Wendy Merritt como “Es evidente que existe una oportunidad para desarrollar, o dar énfasis, modelos estocásticos capaces de realizar interpolación espacial de las series sintéticas climáticas considerando la correlación espacial entre las mismas” (Merritt et al, 2001).

Con la metodología y los escenarios utilizados (CGCM2-A2), algunas tendencias, de posibles impactos del cambio climático, fueron encontradas en la escorrentía de la cuenca incremental de Itaipú:

- La tendencia de disminución de la precipitación media es muy baja,
- En el verano y la primavera, se tiene una tendencia de aumento de las precipitaciones,
- En el otoño se tiene una tendencia de disminución de las precipitaciones,
- La escorrentía promedio tiene tendencia de disminución, especialmente en el otoño,
- Eventos de máximas de la escorrentía disminuyen, especialmente en la margen izquierda del río Paraná,
- En otoño, estación en el cual predominan los eventos de máximos, la escorrentía disminuye, diluyendo su indicación para el escenario 2070-2100,
- Eventos de mínimas de la escorrentía disminuyen.

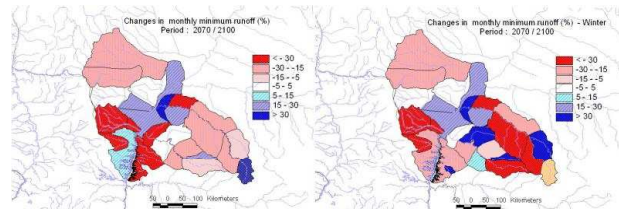


Figura 21: Cambios de la escorrentía mínima mensual por subcuenca Escenario CGCM2-A2 2070/2100

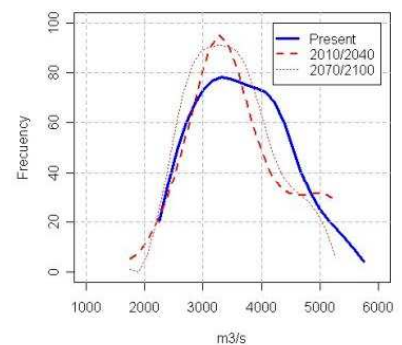


Figura 22: Curvas de frecuencia del caudal total mensual para la cuenca incremental por escenario





Comite Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

---

Este estudio fue desarrollado con escenarios climáticos usando un modelo climático en un proceso de aprendizaje de la técnica. Consecuentemente, se recomienda utilizar diversos escenarios incluso contrastantes para explorar con amplitud la incertidumbre de las consecuencias futuras.

### **Agradecimientos**

Este estudio fue desarrollado gracias a una beca del proyecto ICONE, "Impact of Climate Change on agricultural and natural ecosystem" del "Programa  $\alpha$ LFA".

Agradezco a la Itaipú Binacional y a la Universidad Católica del Paraguay, quienes hicieron posible mi viaje a Italia.

Igualmente, agradezco a la Itaipú Binacional, DINAC (Paraguay), Simepar (Brasil), IAPAR (Brasil) y ANA(Brasil) por disponibilizar datos meteorológicos de la cuenca de estudio.

Finalmente, un sincero reconocimiento a el DISAT, Department of Agronomy and Land Management University of Florence, de la Universidad de Florencia-Italia.

### **Referencias**

Merritt, W.S., Alila, Y., Barton, M. Taylor, B, Cohen S. (2001) Exploring impacts of climate change on the hydrology of the Okanagan Basin. Department of Forest Resources management. University of British Columbia and others Institute, Canada.

Richardson, C.W., and Wright, D.A. (1981) WGEN: A model for generating daily weather variables. Department of Agriculture Research Service, Washington USA.

Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. and Richardson, C.W. (1998) Comparison of th WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. Climate Research 10.

Semenov, M.A., and Barrow, E.M. (2002) LARS-WG. A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. Version 3.0. User manual. Rothamsted Research, Harpenden, UK.

Nguyen, V.T.V. (2005), Downscaling methods for evaluating the impacts of climate change and variability on hydrological regime at basin scale. McGill University, Department of Civil Engineering and Applied mechanics, Montreal. Canada.

Wilby, R.L., Dawson, C.W., and Barrow, E.M. (2002) SDSM – a decision support tool the assessment of regional climate change impacts. Environmental Modelling & Software, 17.  
Comparison of th WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. Climate Research 10.

Wilby, R.L., Conway, D., and Jones, P.D. (2002) Prospect for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. Hydrological Processes 16.

Enlaces de Internet:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Special\\_Report\\_on\\_Emissions\\_Scenarios/](http://en.wikipedia.org/wiki/Special_Report_on_Emissions_Scenarios/)

[http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/eng\\_index.shtml](http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/eng_index.shtml)

<http://www.itaipu.gov.py/>

<http://hidroweb.ana.gov.br/>