

ESCENARIOS HIDROLÓGICOS FUTUROS EN LA REGIÓN DE LOS ESTEROS DEL IBERÁ EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Natalia B. Montroull¹, Ramiro I. Saurral^{1,2}, Inés A. Camilloni^{1,2}, Anna Sörensson¹, Claudio Menendez^{1,2} y Romina Ruscica¹

¹Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA), UMI IFAECI/CNRS, Buenos Aires, Argentina

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN, UBA), Buenos Aires, Argentina

(Manuscrito recibido el 27 de septiembre de 2011, en su versión final el 22 de febrero de 2012)

RESUMEN

Los esteros del Iberá son el segundo humedal más grande del mundo y en él habitan cientos de especies vegetales y animales. La disponibilidad hídrica de la región es consecuencia del balance entre precipitación, evapotranspiración y escurrimiento siendo esta área altamente sensible a modificaciones en dicho balance. En este trabajo se presenta la calibración del modelo hidrológico distribuido VIC a la región de los esteros del Iberá en base a observaciones de temperatura, precipitación y viento en superficie. Asimismo se analiza la habilidad del modelo climático regional RCA3-E para simular el clima presente de la región y la capacidad del modelo VIC para representar el ciclo hidrológico del humedal cuando es forzado con los resultados de las simulaciones de RCA3-E. Se encontró que existen errores en el modelo climático que deterioran notablemente las simulaciones hidrológicas y que estas últimas pueden ser mejoradas si se aplica previamente al modelo regional un esquema de corrección de errores sistemáticos. Por último, y con el fin de determinar un potencial escenario futuro de disponibilidad hídrica en la región del Iberá, se forzó al modelo hidrológico con las simulaciones provistas por RCA3-E para finales del siglo XXI luego de aplicar el esquema de corrección y considerando un escenario intermedio de emisiones de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos si bien constituyen una primera aproximación en la generación de escenarios hidrológicos futuros para la región muestran que no es de esperarse un déficit hídrico a pesar del aumento de las temperaturas proyectadas en la región, probablemente debido a que el incremento de precipitación compensaría la mayor evapotranspiración y esto daría lugar a un aumento en el caudal del principal río de la región del Iberá.

FUTURE HYDROLOGICAL SCENARIOS IN THE IBERÁ REGION IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

ABSTRACT

The Iberá region is the second largest wetland in the world and hosts hundreds of plants and animal species. Water availability in the region is the result of the balance between precipitation, evapotranspiration and runoff, and the region is highly sensitive to changes in this balance. In this paper the VIC hydrologic distributed

model is calibrated over the Iberá region using observed temperature, precipitation and surface wind data. This study also examines the ability of the RCA3-E regional climate model to simulate the present climate and the skill of VIC to represent the hydrologic cycle of the wetland when forced by RCA3-E output data. It was found that errors in the climate model significantly affect hydrological simulations and this can be improve if a correction scheme for systematic errors is applied. Finally, in order to determine a potential future scenario of water availability in the Iberá region, the hydrologic model is forced with simulations provided by the RCA3-E by the end of the present century for an intermediate greenhouse gases emissions scenario after correcting the identified systematic errors. The results show that, although the regional climate model projects an increase in both precipitation and mean temperature, rainfall changes could compensate the rise in evapotranspiration given the increase in temperatures and this would lead to larger streamflows of the Iberá region's main river.

1. INTRODUCCIÓN

Los esteros del Iberá constituyen uno de los humedales de agua dulce más importantes de Argentina y el segundo más grande del mundo, sólo superado en extensión por el Pantanal. Se ubican en la provincia de Corrientes dentro de la cuenca del río Corriente, al noreste del país aproximadamente entre 56°W - 58°W y 27°S - 29°S (Figura 1) cubriendo una extensión que fluctúa entre 7.800 y 12.000 km² de acuerdo con el balance entre precipitación y evapotranspiración (Neiff 1997). Cientos de especies animales y vegetales habitan en esta área y su distribución y abundancia dependen fuertemente de su comportamiento hidrológico (Neiff y otros, 1994). Forman parte de una región de particular interés científico debido a que se encuentran en el sudeste de Sudamérica y más precisamente en la cuenca del Plata, una de las áreas donde se han observado tendencias significativas en la precipitación de los últimos 40 años. Castañeda y Barros (1994) encontraron que entre 1916 y 1991 se dieron tendencias positivas significativas en la precipitación sobre la región sur de Sudamérica al este de los Andes, mostrando los mayores incrementos a partir de fines de los '50 con un aumento promedio del 10% y algunas regiones alcanzando incluso el 30%. García y Vargas (1998) vincularon estos incrementos en la precipitación con aumentos en los caudales

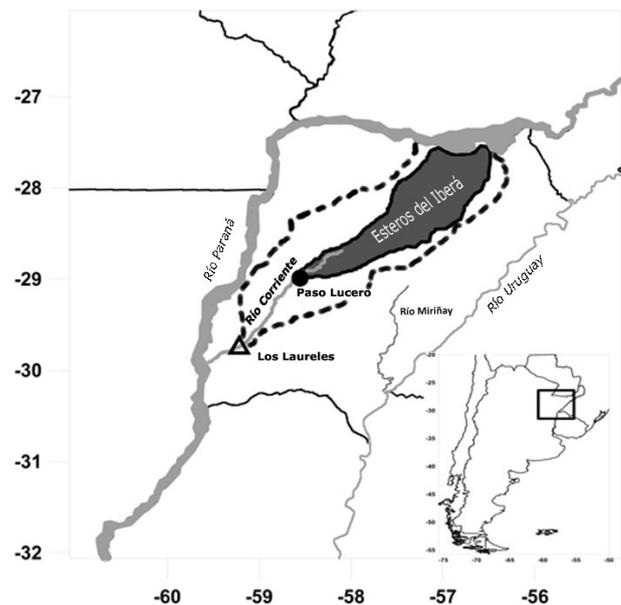


Figura 1: Ubicación geográfica de los esteros del Iberá en la provincia de Corrientes, del río Corriente y de los dos puntos de cierre considerados: Paso Lucero y Los Laureles. En línea punteada se muestra la cuenca del río Corriente.

de los principales ríos de la cuenca del Plata, en tanto que otros trabajos hallaron cambios también en variables relacionadas con la circulación como la presión al nivel del mar (por ejemplo, Di Luca y otros, 2006). Camilloni y Barros (2003) mostraron que 12 de los 16 caudales mensuales más altos del río Paraná durante todo el siglo XX ocurrieron después de 1970 y características

similares se encontraron sobre el río Paraguay (Barros y otros, 2004) y el Uruguay (Camilloni, 2005). Asimismo, Doyle y otros (2011) mostraron que las tendencias crecientes en la precipitación del sudeste de Sudamérica se explican principalmente por un incremento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremadamente altas (por encima del percentil 90).

En el contexto de los cambios observados en las condiciones climáticas a nivel regional -y considerando que los mismos podrían mantenerse e incluso acentuarse en décadas futuras-, resulta de especial interés estimar las modificaciones en el ciclo hidrológico que tendrían lugar sobre la región de los esteros del Iberá debido a que alteraciones en los regímenes futuros de precipitación y/o en la temperatura y por lo tanto en la evaporación pueden inducir cambios en los caudales y en los patrones de biodiversidad y el funcionamiento ecológico del humedal. En consecuencia, el objetivo principal de este trabajo consiste en cuantificar los posibles cambios en el comportamiento hídrico de la región de los esteros del Iberá en el contexto del cambio climático asociado al incremento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero. Con esta finalidad se calibró el modelo hidrológico distribuido VIC (por sus siglas en inglés Variable Infiltration Capacity, o Capacidad de Infiltración Variable en castellano) sobre la región de estudio en base a datos de temperatura y precipitación observados y simulados por el modelo climático regional RCA3-E (CIMA-Rossby Center/SMHI). Asimismo, se elaboró un escenario hidrológico futuro para el río Corriente para finales del siglo XXI utilizando las simulaciones provistas por el modelo climático.

El trabajo se organiza del siguiente modo: en la sección 2 se presenta una descripción hidroclimática de la región de estudio, del modelo hidrológico empleado y algunas generalidades del modelo climático regional. La sección 3 muestra los resultados de la calibración y validación del modelo hidrológico a partir de la comparación de los caudales medios mensuales simulados para el río Corriente utilizando información

meteorológica observada y provista por el modelo climático RCA3-E. Debido a la presencia de los errores sistemáticos asociados al modelo climático, se presenta además una metodología de corrección de los mismos y se comparan los resultados obtenidos con el modelo hidrológico al utilizar las simulaciones climáticas corregidas. Finalmente, la sección 4 incluye una discusión de resultados y conclusiones.

2. DATOS Y METODOLOGÍAS

2.1. Características hídricas y climáticas de la región de estudio

El Iberá se alimenta fundamentalmente por aportes pluviales de la región que son del orden de 1500 mm anuales. La cuarta parte de la precipitación recibida en el humedal drena en forma permanente en el río Corriente para finalmente desaguar en el Paraná y, transitoriamente y en casos de inundación, por el río Miriñay, que desemboca en el Uruguay (Figura 1). La mayor parte de la precipitación restante es evaporada (Ferrati y otros, 2003). El relieve de la región es de llanura, con altura sobre el nivel del mar de aproximadamente 60 metros. La escasa pendiente del terreno y los obstáculos naturales que dificultan el drenaje de las aguas hacia su única salida por el río Corriente hacen que la dinámica hídrica sea predominantemente vertical, es decir que las principales transferencias de agua se realizan a través de los procesos de precipitación y evapotranspiración, siendo muy importantes el almacenamiento y la memoria del sistema (Ferrati y otros, 2003).

La región que comprende los esteros del Iberá posee un clima subtropical, con una temperatura media de verano que varía entre 25°C en el sur y 27°C en el norte y con inviernos en los que las temperaturas medias oscilan entre 14°C y 17°C en ambos extremos de la región. En la Figura 2 se presenta la distribución media mensual de caudales del río Corriente en la estación Los Laureles, cuya ubicación se indica en la Figura 1, para el período 1990-2007 junto con el ciclo anual de la precipitación media pa-

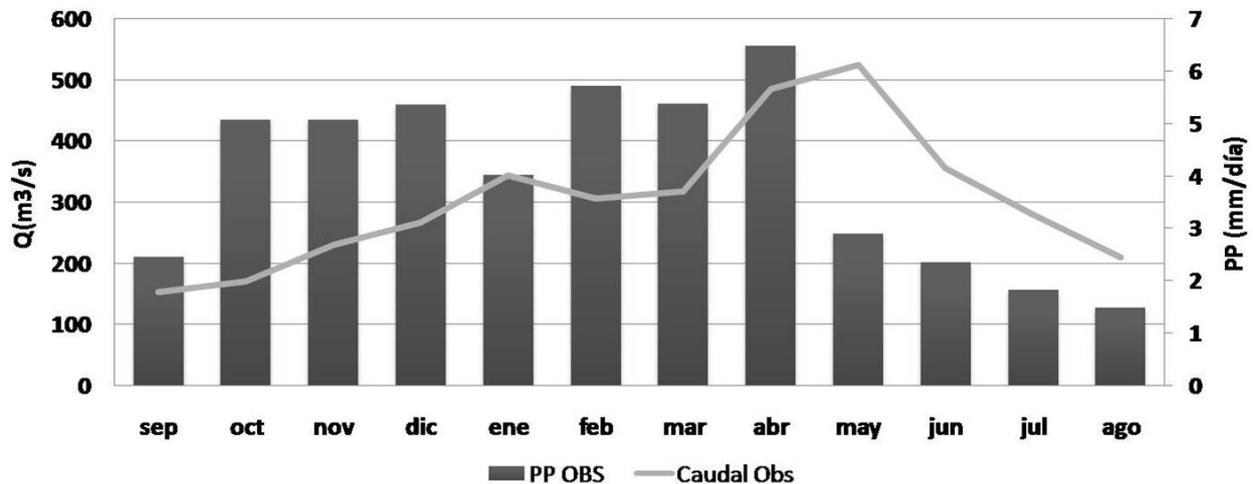


Figura 2: Régimen de precipitación media mensual para la cuenca del río Corriente en barras, y caudal medio mensual para Los Laureles en línea llena gris en el período 1990-2007. Las unidades son mm mes^{-1} y $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivamente.

ra toda la cuenca y para el mismo período. El caudal medio es de $332,5 \text{ m}^3/\text{s}$ con un máximo absoluto en mayo de $461,1 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo relativo en enero. El mínimo absoluto en el caudal ocurre en el mes de septiembre con un valor de $189 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que en los meses de febrero y marzo se puede observar mínimos relativos. Por su parte, la precipitación tiene máximos en las estaciones de transición (otoño y primavera), con un mínimo absoluto en invierno y uno relativo en verano. Los máximos de precipitación anticipan a los máximos en los caudales y de la misma forma se observa que los mínimos en la precipitación anteceden a los mínimos en el caudal, con un desfase de aproximadamente un mes.

2.2. El modelo hidrológico

El modelo hidrológico VIC (Liang y otros, 1994, 1996; Nijssen y otros, 1997) fue desarrollado en la Universidad de Washington, Estados Unidos. Es conceptual, distribuido y de gran escala y resuelve los balances de energía y de agua en una red utilizando información meteorológica y de tipos de suelo y cubierta vegetal. Su eficiencia en estudios de variabilidad hídrica ya fue proba-

da en una gran cantidad de cuencas alrededor del mundo (Mattheussen y otros, 2000; Cherkauer y Lettenmaier, 1999; Leung y otros, 1999) y particularmente sobre Sudamérica fue empleado para estudios hidrológicos sobre la cuenca del Plata tanto a nivel regional (Su y otros, 2008, 2009, 2011) como así también sobre cuencas específicas, como la del río Uruguay (Saurral y otros, 2008). El modelo VIC requiere información diaria o subdiaria de cuatro variables meteorológicas que pueden ser elegidas por el usuario en función de su disponibilidad. En este trabajo se emplearon datos diarios de temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación y velocidad del viento en el período comprendido entre el 1/1/1990 y el 30/11/2007. El área de trabajo considerada para realizar las simulaciones es la comprendida entre 26°S y 32°S y 61°W y 55°W (Figura 1). Esta región incluye los esteros del Iberá y la cuenca del río Corriente. La razón por la cual se tomó esta área bastante más extensa que la zona específica de estudio es que permite incluir una mayor cantidad de datos de temperatura y precipitación y de esta forma obtener una red con información más precisa y más representativa de la región de interés. En total se contó con informa-

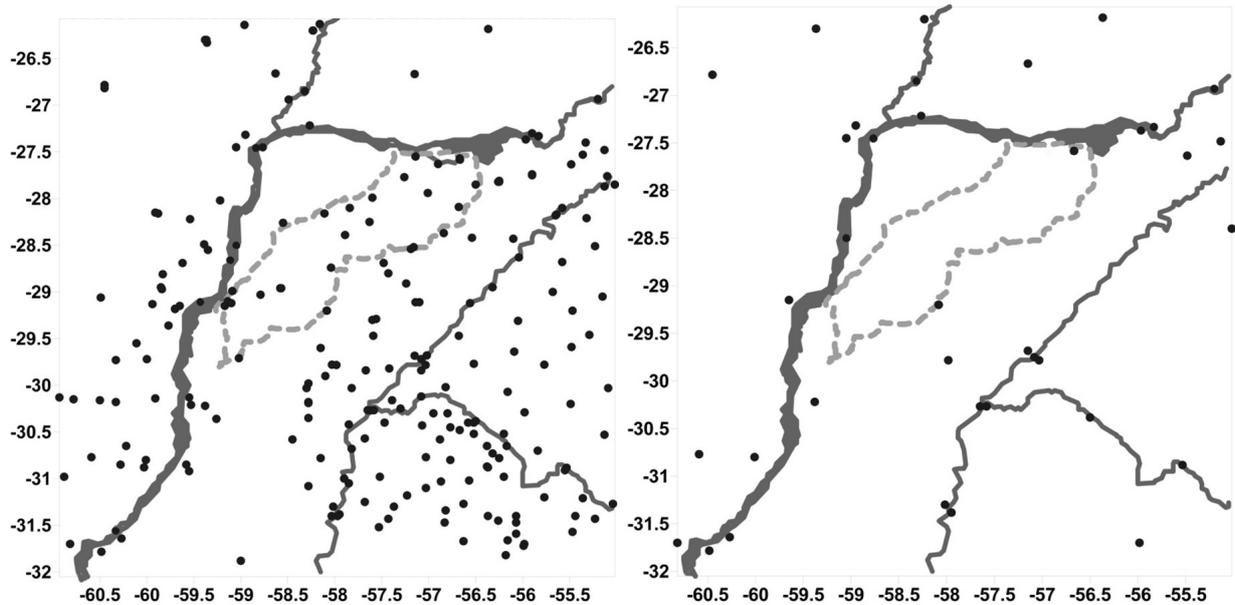


Figura 3: Distribución espacial de las estaciones pluviométricas (a) y de temperatura (b). En línea punteada se muestra la cuenca del Río Corriente.

ción proveniente de 239 estaciones pluviométricas obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, de la base de datos mantenida por el National Climate Data Center de la NOAA (NCDC/NOAA), del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria argentino (INTA), de la empresa EVARSA (Evaluación de Recursos S.A.), de la Dirección de Meteorología e Hidrología de Paraguay y de la Entidad Binacional Yacyretá (EBY). En cuanto a la temperatura, los datos se obtuvieron del NCDC/NOAA, del INTA y de Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina, disponiéndose de un total de 37 estaciones. Los datos de velocidad de viento en superficie se obtuvieron de los reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay y otros, 1996) en su resolución original de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Las Figuras 3a y 3b muestran la ubicación de las estaciones de precipitación y temperatura consideradas, respectivamente. Las estaciones pluviométricas presentan una distribución homogénea a través de la cuenca del río Corriente, en tanto que las de temperatura -menos abundantes- se ubican mayormente fuera de ella y en los alrededores. De todos modos, y teniendo en cuenta que en esta región del noreste ar-

gentino la topografía es escasa y el terreno es mayormente plano, no son esperables variaciones espaciales significativas de la temperatura a diferencia de lo que podría ocurrir con la precipitación. La información de tipos de suelo se obtuvo de la FAO (Food and Agriculture Organization) a través del Mapa de Suelos del Mundo elaborado por la UNESCO, en tanto que los datos de cubierta vegetal se tomaron de la clasificación llevada a cabo por la Universidad de Maryland en base a información satelital disponible en una retícula de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ (Hansen y otros, 2000).

Las simulaciones con el modelo VIC se realizaron considerando una resolución horizontal de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ (la más alta permitida por el modelo) y tres niveles verticales. De esta forma se obtuvieron 2401 puntos de retícula en todo el dominio a los que fueron referenciados los datos meteorológicos por medio del método Kriging. Por cada punto, el modelo VIC calcula diferentes variables en escala diaria, entre las cuales se encuentra la escorrentía, la evaporación y el flujo base. Para poder evaluar la habilidad del modelo VIC para simular los caudales en puntos de cierre de la cuenca del río Corriente se aplicó a las

salidas un esquema de ruteo (Lohmann y otros, 1996) que integra el escurrimiento generado en todos los puntos corriente arriba de los puntos de cierre considerados en este estudio: Paso Lucero y Los Laureles (Figura 1). De esta forma los caudales simulados pueden ser comparados con los observados. Si bien el modelo hidrológico provee caudales en diferentes escalas temporales (diaria y mensual), el análisis se realizó sólo a nivel mensual.

Para calibrar el modelo hidrológico se consideró el período 1991-1998, en tanto que la validación se llevó a cabo empleando los datos del período 1999-2005. La calibración se realizó ajustando parámetros específicos del modelo VIC asociados especialmente con la capacidad de infiltración y con el espesor de las capas de suelo. La habilidad del modelo para representar los caudales medios derivados de las observaciones se determina calculando parámetros estadísticos, entre los cuales para este trabajo se consideró el índice E propuesto por Nash y Sutcliffe (1970) definido en la Ecuación 1.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (1)$$

donde Q_o representa los caudales mensuales observados y Q_m , los obtenidos mediante las simulaciones. Santhi y otros (2001) determinaron que el ajuste es aceptable en los casos en que E supera 0,5.

2.3. El modelo climático regional RCA3-E

RCA es un modelo climático regional hidrostático y en puntos de retícula desarrollado en el Rossby Centre. En este trabajo se emplea la versión más reciente del modelo (RCA3-E), la cual incluye mejoras en el tratamiento de la superficie al incluir la base de datos ECOCLIMAP (Champeaux y otros, 2005) y cambios en algunas parametrizaciones físicas de modo de mejorar la representación del clima en regiones tropicales y subtropicales (Sörensson 2010). El modelo para-

metriza los procesos asociados a la convección siguiendo el esquema de Kain y Fritsch (1993) con modificaciones propuestas por Jones y Sánchez (2002) y la microfísica en base al esquema de Rasch y Kristjánsson (1998). Los procesos radiativos son resueltos mediante los esquemas de Savijärvi (1990), Sass y otros (1994) y Räisänen y otros (2000), en tanto que el esquema de suelo empleado es el propuesto por Samuelsson y otros (2006) y por Champeaux y otros (2005). El modelo resuelve las ecuaciones primitivas en un dominio limitado con una resolución horizontal de $0,5^\circ$ y empleando 24 niveles verticales. Estudios climáticos previos sobre Sudamérica han empleado RCA3-E: Sörensson y otros (2010a) y Sörensson y Menéndez (2011) analizaron los procesos de retroalimentación y acople entre el suelo y la precipitación durante la época activa del monzón sudamericano. Sörensson y otros (2010b) estudiaron la respuesta de promedios estacionales y extremos diarios de precipitación en Sudamérica en un escenario de cambio climático. Menéndez y otros (2010a y 2010b) emplearon este modelo en diferentes ensambles de modelos climáticos regionales.

Para este trabajo se utilizaron las salidas diarias del modelo RCA3-E de las variables precipitación, temperatura mínima y máxima y velocidad del viento sobre la región de los esteros del Iberá en dos períodos: 1980-1999 y 2080-2099. En ambos casos, las simulaciones climáticas fueron llevadas a cabo forzando al modelo RCA3-E con condiciones de borde obtenidas de las salidas del modelo climático global ECHAM5-MPI/OM. Para el clima futuro se consideró el escenario de emisiones intermedio A1B (ver más detalles en Solomon y otros, 2007).

Con el fin de remover los errores sistemáticos del modelo climático, se aplicó un esquema de corrección a las variables precipitación y temperatura máxima y mínima. Para la velocidad del viento en superficie no se aplicó ninguna corrección dado que la diferencia anual entre las simulaciones del modelo RCA3-E y los reanálisis NCEP son inferiores al 10% para el período 1990-1999 (Figura no mostrada).

El esquema utilizado para precipitación y temperatura remueve los errores sistemáticos de estas variables meteorológicas con un paso de tiempo mensual y fue utilizado en varios trabajos hidrológicos previos (por ejemplo, Saurral, 2010). El mismo consiste en calcular primero las medias mensuales de los datos observados y modelados en el período 1980-1999 para cada punto de retícula en la región de estudio. Los datos de temperatura máxima y mínima son corregidos sumando a estos datos diarios la diferencia entre las medias mensuales observadas y modeladas. Este procedimiento se resume de la siguiente forma:

$$T_{corr}(i, j) = T_{mod}(i, j) + \bar{T}_{obs}(j) - \bar{T}_{mod}(j) \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 12$$

donde T_{corr} es la temperatura diaria corregida para el período 1980-1999, T_{mod} es la temperatura diaria provista por el modelo regional para el mismo período, \bar{T}_{obs} es la temperatura media mensual observada para el período 1980-1999 y \bar{T}_{mod} es la temperatura media mensual modelada para el mismo período.

El esquema de corrección para la precipitación puede ser descrito por la siguiente fórmula:

$$P_{corr}(i, j) = P_{mod}(i, j) \frac{\bar{P}_{obs}(j)}{\bar{P}_{mod}(j)} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, 31; j = 1, 2, \dots, 12$$

donde P_{corr} es la precipitación diaria corregida para el período 1980-1999, P_{mod} es la precipitación diaria provista por el modelo regional para el mismo período, \bar{P}_{obs} es la precipitación media mensual observada para el período 1980-1999 y \bar{P}_{mod} es la precipitación media mensual modelada para el mismo período.

3. RESULTADOS

3.1. Calibración y validación del modelo hidrológico

La calibración y validación del modelo hidrológico se llevó a cabo en los puntos de cierre Paso Lucero y Los Laureles, los cuales determinan subcuencas que incluyen un total de 89 y 144

puntos de retícula, respectivamente. Para la calibración del modelo se ajustaron los siguientes parámetros: la fracción de la velocidad máxima del flujo base donde comienza el flujo no lineal (D_s), la capacidad de infiltración (b) y el espesor de cada capa de suelo. Se llevaron a cabo simulaciones variando, de a uno por vez, el parámetro D_s (asignándole valores de 10-3, 10-4 y 10-5), el b (igual a 10-4, 10-3, 10-2, 10-1 y 2.10-1) y el espesor de cada una de las tres capas de suelo consideradas por el modelo VIC. A medida que aumenta el valor de D_s , el flujo base será mayor para un contenido menor de agua en la capa inferior del modelo. El parámetro b define la forma de la curva de la Capacidad de Infiltración Variable. Un valor alto de b se traduce en infiltraciones bajas y en consecuencia en escorrentías superficiales mayores. Las variaciones de D_s y b se consideraron siguiendo valores sugeridos obtenidos previamente en la calibración del VIC en cuencas de latitudes medias y altas del hemisferio norte (ver por ejemplo Liang et al., 1994).

Por defecto, la capa superficial tiene un espesor vertical de 10 cm, la capa intermedia de 30 cm y la inferior, de 100 cm, por lo que se llevaron a cabo pruebas aumentando en 10 cm el espesor de cada una de las mismas. Los resultados de la etapa de calibración mostraron que el mejor ajuste para el caso de Paso Lucero se obtiene considerando un valor de $b=0,01$ y un valor de $D_s=0,001$, en tanto que para el caso de Los Laureles estos valores son $b=0,1$ y $D_s=0,001$. En ambos casos, los valores más altos del estadístico E se obtuvieron al incrementar en 10 cm el espesor de cada una de las tres capas de suelo (llevando los espesores de cada una de las tres capas a 20, 40 y 110 cm respectivamente) y fueron de 0,703 en el caso de Paso Lucero y de 0,672 para Los Laureles. En la Figura 4 se muestran los caudales mensuales observados y simulados durante la etapa de calibración para ambos puntos de cierre donde puede observarse que el modelo es capaz de representar adecuadamente la variabilidad intermensual de los caudales del río Corriente. Se identifican algunas sobreestimaciones por parte del modelo, como

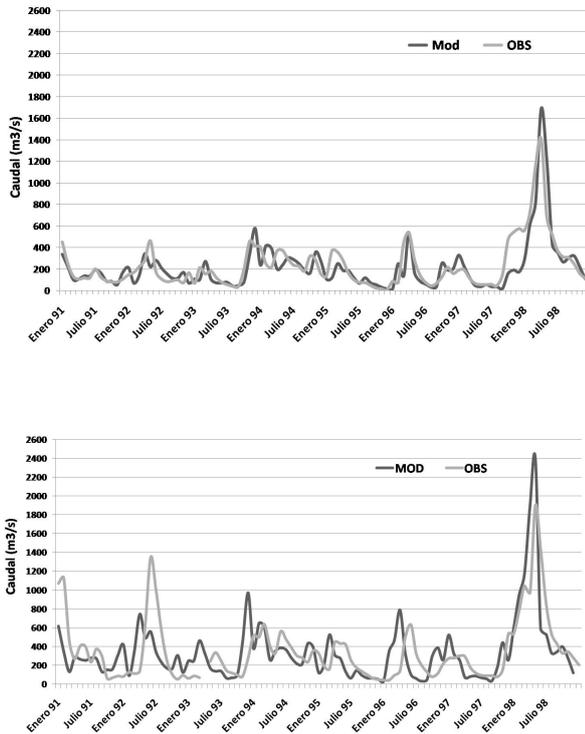


Figura 4: Caudales medios mensuales simulados (en línea gris oscura) y observados (en línea gris clara) en a) Paso Lucero, y b) Los Laureles en el período de calibración (1991-1998). Las unidades son $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

en el caso del invierno de 1998 en ambos puntos de cierre, y subestimaciones de caudales como el registrado a mediados de 1992, en especial en la estación Paso Lucero. Al validar la calibración con el período 1999-2005 se observa que el modelo hidrológico representa en forma adecuada la variabilidad de los caudales en ambos puntos de cierre (Figura 5). En esta etapa nuevamente se encuentra que los valores del estadístico E están por encima del umbral de 0,5, sugiriendo así que la calibración efectuada es aceptable ya que E alcanza un valor de 0,605 en Paso Lucero e igual a 0,675 en Los Laureles. Al considerar el período completo (1991-2005), se encuentra que la onda anual de caudal del río Corriente es bien representada en ambos puntos. En la Figura 6 se muestran la distribución media mensual del

caudal observado y simulado del río Corriente en Paso Lucero y Los Laureles, donde se encuentra que el modelo VIC representa adecuadamente el momento y la magnitud del mínimo de caudal observado a finales del invierno en ambas estaciones. Se representa también en forma adecuada el posterior aumento de caudales acompañando el comienzo de la temporada en que se incrementan las precipitaciones, salvo en la estación Los Laureles donde se observa un desfase de un mes en la representación del pico de caudal. Para el caso de la estación Paso Lucero, el caudal medio anual observado para este período es de $204,5 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el modelado es de $196,4 \text{ m}^3/\text{s}$. La diferencia en el caudal medio anual es aún menor si se considera la estación Los Laureles, donde el caudal medio observado para el período 1990-2005 es de $302,8 \text{ m}^3/\text{s}$ y el modelado de $309,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

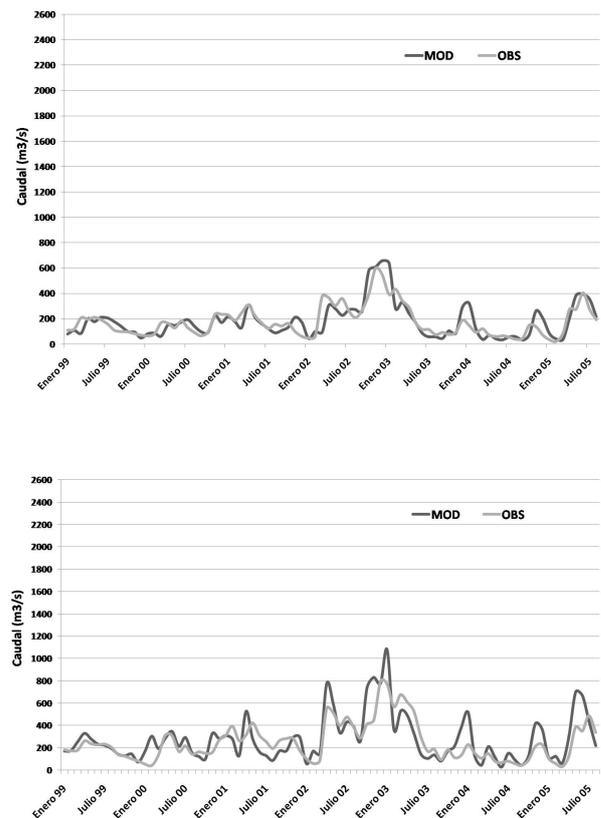


Figura 5: Como en la Figura 4 pero para la etapa de validación (1999-2005).

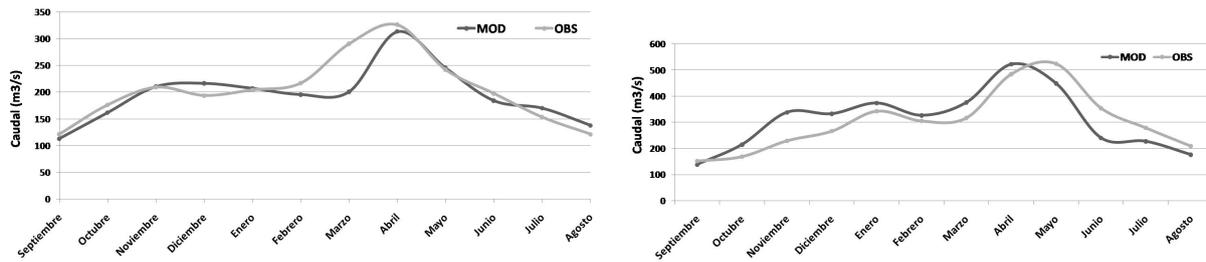


Figura 6: Caudales medios mensuales simulados (en línea gris oscura) y observados (en línea gris clara) en a) Paso Lucero, y b) Los Laureles considerando el período completo (1991-2005). Las unidades son $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

3.2. Climatología de la temperatura y la precipitación en los esteros del Iberá en el modelo RCA3-E

Como paso previo a la realización de las simulaciones hidrológicas forzadas con las salidas provistas por el modelo climático regional RCA3-E, se llevó a cabo una comparación entre las climatologías derivadas de las observaciones y del modelo regional. Con esta finalidad, se empleó el período 1991-1999 dado que en él se dispone de la mayor cantidad de observaciones de temperatura y precipitación (dando lugar así a una climatología más confiable). En la Figura 7 se muestran las diferencias porcentuales entre la precipitación simulada por RCA3-E y la observada, para los trimestres diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA). En ambos casos puede apreciarse que sobre la región de los esteros el modelo subestima la precipitación observada en un rango que oscila entre el 30 y el 50%. Sobre esa área en particular no se observan diferencias notorias entre DEF y JJA, siendo la magnitud de la subestimación muy similar para ambas estaciones. Este error es similar al representado por el modelo global ECHAM5-MPI/OM (Vera y otros, 2006; Saurral, 2010) del cual el RCA3-E obtiene las condiciones de borde. Saurral (2010) realizó una comparación entre las climatologías observada y derivadas de un conjunto con 5 modelos climáticos globales y encontró que el ECHAM5-MPI/OM simula condiciones ligeramente más cálidas que las observadas (aunque con diferencias, a nivel anual, no superiores a los 2°C) y más secas, con

diferencias porcentuales en la lluvia anual de la región de los esteros del orden del 20%. Esto sugiere que: (i) errores en el forzante sinóptico (dado por el modelo global) podrían afectar la calidad de la simulación regional, y/o (ii) ambos modelos no logran capturar adecuadamente ciertos procesos o interacciones importantes necesarias para simular la precipitación en el sudeste de Sudamérica. Más aún, la subestimación de la precipitación en la región es común a varios modelos globales y regionales (Christensen y otros 2007). En términos de temperatura, en la Figura 8 se muestran las diferencias del campo de temperatura media máxima en DEF y JJA entre el modelo RCA3-E y las observaciones mientras que en la Figura 9 se presenta el mismo campo pero para la temperatura media mínima. En ambas estaciones y variables se encuentra que RCA3-E presenta sobreestimaciones importantes de las temperaturas sobre la región de estudio del orden de los 4°C . Al igual que para la precipitación, no se identifica una marcada estacionalidad en el campo de diferencias como así tampoco entre ambas variables. A nivel regional se observa una migración del núcleo de máximas diferencias desde el sudoeste de la región en verano hacia el noroeste de la misma durante el invierno.

3.3. Escenario futuro de temperatura y precipitación en los esteros del Iberá en el modelo RCA3-E

En la Figura 10 se muestran los campos de variaciones porcentuales de la precipitación en el

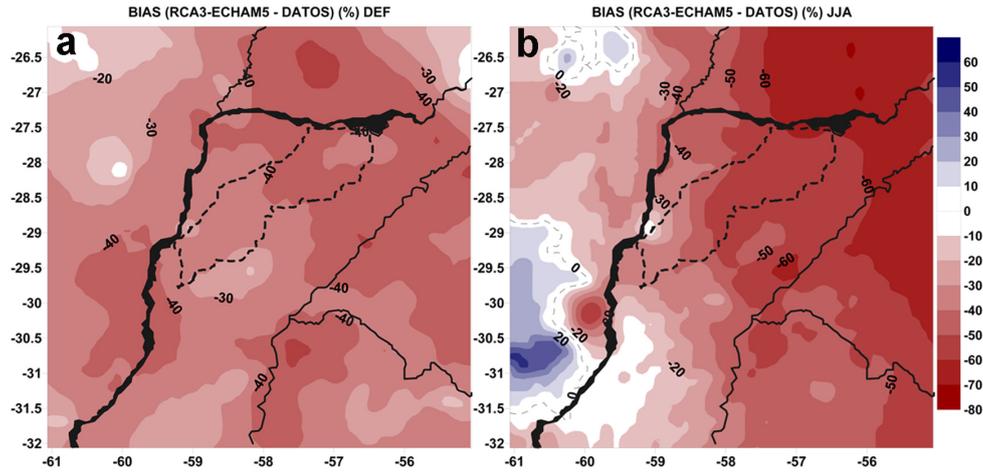


Figura 7: Diferencia porcentual de la precipitación simulada por el modelo RCA respecto de la observada en DEF (izq.) y JJA (der.) en el período 1991-1999.

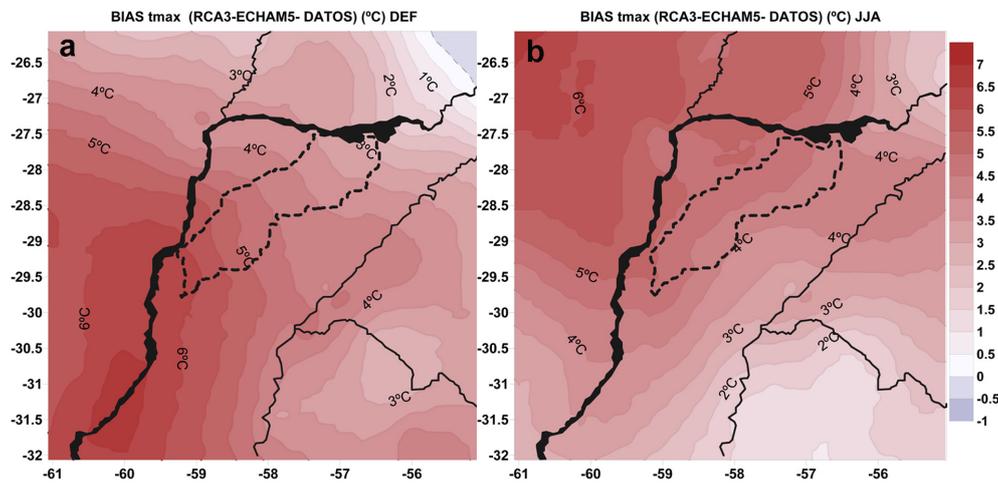


Figura 8: Diferencias en la temperatura media máxima en el modelo RCA respecto de la observada en DEF (izq.) y JJA (der.) en el período 1991-1999. Las unidades son °C.

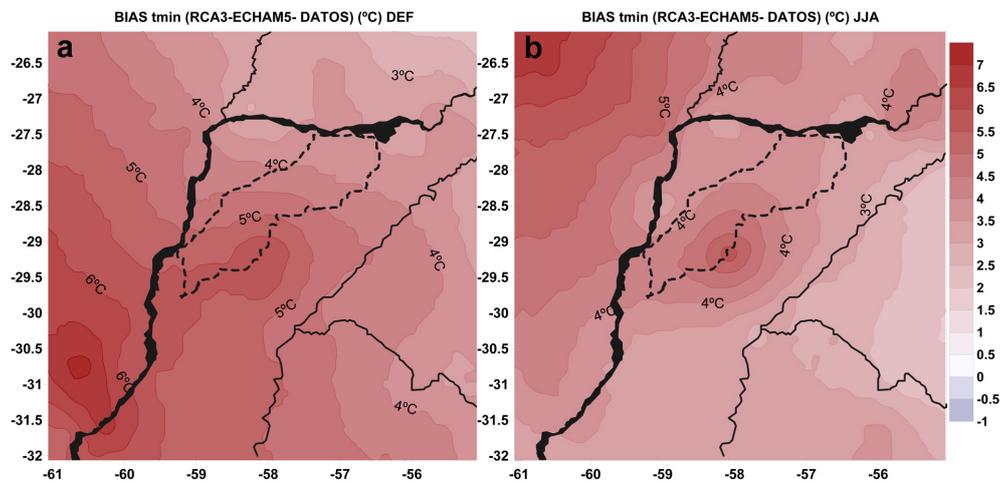


Figura 9: Como en la Figura 8 pero para la temperatura mínima.

período 2080-2099 respecto al clima simulado para el período 1980-1999 a nivel anual y considerando por separado los trimestres de verano (DEF) e invierno (JJA). A nivel anual el modelo RCA3-E forzado con ECHAM5-MPI/OM y considerando el escenario A1B simula un incremento de precipitación de entre el 20 y el 30 % sobre la región de los esteros, con un marcado gradiente este-oeste que determina variaciones inferiores al 10 % sobre el oeste del dominio y cambios superiores al 40 % al este, sobre la región del sur de Brasil. A nivel estacional, los cambios más marcados se observan durante la estación invernal, con aumentos de la precipitación del orden del 50-60 % sobre la región de estudio y variaciones superiores al 70 % al este de la región. En tanto, durante la época estival, se pueden apreciar aumentos simulados cercanos al 20-25 % sobre los esteros del Iberá. En materia de temperaturas, el modelo RCA3-E simula para finales del siglo XXI incrementos tanto en la mínima media como en la máxima. Estos resultados sugieren aumentos de la máxima de entre 1 y 2°C, mientras que en el caso de la mínima los incrementos son algo mayores, entre 2,5 y 3,5°C (Figura no mostrada). Estos patrones de cambio presentan algunas variaciones entre estaciones: por ejemplo las temperaturas máximas aumentan tanto en verano como en invierno, pero los cambios son mayores durante el trimestre cálido con diferencias de entre 2 y 3°C respecto del período de referencia. En la época invernal, las simulaciones con el modelo RCA3-E para el período futuro muestran variaciones positivas de entre 0,5 y 1°C (Figura no mostrada). En el caso de las temperaturas mínimas, también se estiman incrementos mayores en la época de verano (de entre 2,5 y 4°C sobre la región del Iberá) que en la de invierno, donde los cambios serían del orden de 2 a 3,5°C. Por otro lado, los patrones de cambio de velocidad del viento en la región muestran diferencias muy pequeñas entre el presente y el futuro sobre la cuenca del río Corriente (Figura no mostrada), lo que no representaría un impacto significativo sobre el caudal. Por ende, los cambios futuros de temperatura y precipitación serían los más relevantes para la región de los esteros del Iberá en cuanto

a su impacto hidrológico mostrando dos patrones contrapuestos: por un lado el incremento en las precipitaciones daría lugar a un aumento en los caudales del río Corriente, pero por el otro lado, la mayor temperatura podría incrementar la evapotranspiración sobre la región en el caso de una atmósfera no saturada, lo cual redundaría en una reducción de los caudales. Para analizar el peso relativo de las distintas variaciones en el campo hidrológico, a continuación se presentan los resultados de las simulaciones con el modelo VIC forzado con el clima presente y con el posible estado futuro.

3.4. Simulaciones hidrológicas forzadas con el modelo RCA3-E

En la Figura 11 se presenta la distribución media mensual del caudal observado del río Corriente en Los Laureles en el período 1991-1999 junto con la simulada por el modelo VIC forzado con las salidas diarias con y sin corrección de errores sistemáticos, en el mismo período, provistas por el modelo climático regional RCA3-E. Como puede verse en el caso de las simulaciones realizadas sin las correcciones de errores sistemáticos, el hecho que el modelo climático representa menor precipitación y mayor temperatura media de las observadas determina simulaciones hidrológicas muy pobres. Se observa que prácticamente no existe variabilidad intermensual, con valores de caudales medios mensuales en Los Laureles que varían entre 20 y 100 m³/s y observándose un máximo absoluto en el mes de diciembre y un mínimo en el mes de agosto. Como puede verse en la figura, esto difiere notablemente de las observaciones en las cuales el máximo se registra en el mes de mayo. El mínimo observado en el mes de septiembre, en tanto, es algo más acorde con los resultados de las simulaciones forzadas por el modelo RCA3-E. Sin embargo las diferencias entre el valor del caudal medio anual observado y simulado sin correcciones es grande: 323,81 m³/s y 57,02 m³/s respectivamente. Al aplicar el esquema de remoción de errores, en tanto, los resultados de los caudales mensuales corregidos para el período 1991-1999 en el punto de cierre Los Laureles muestran una

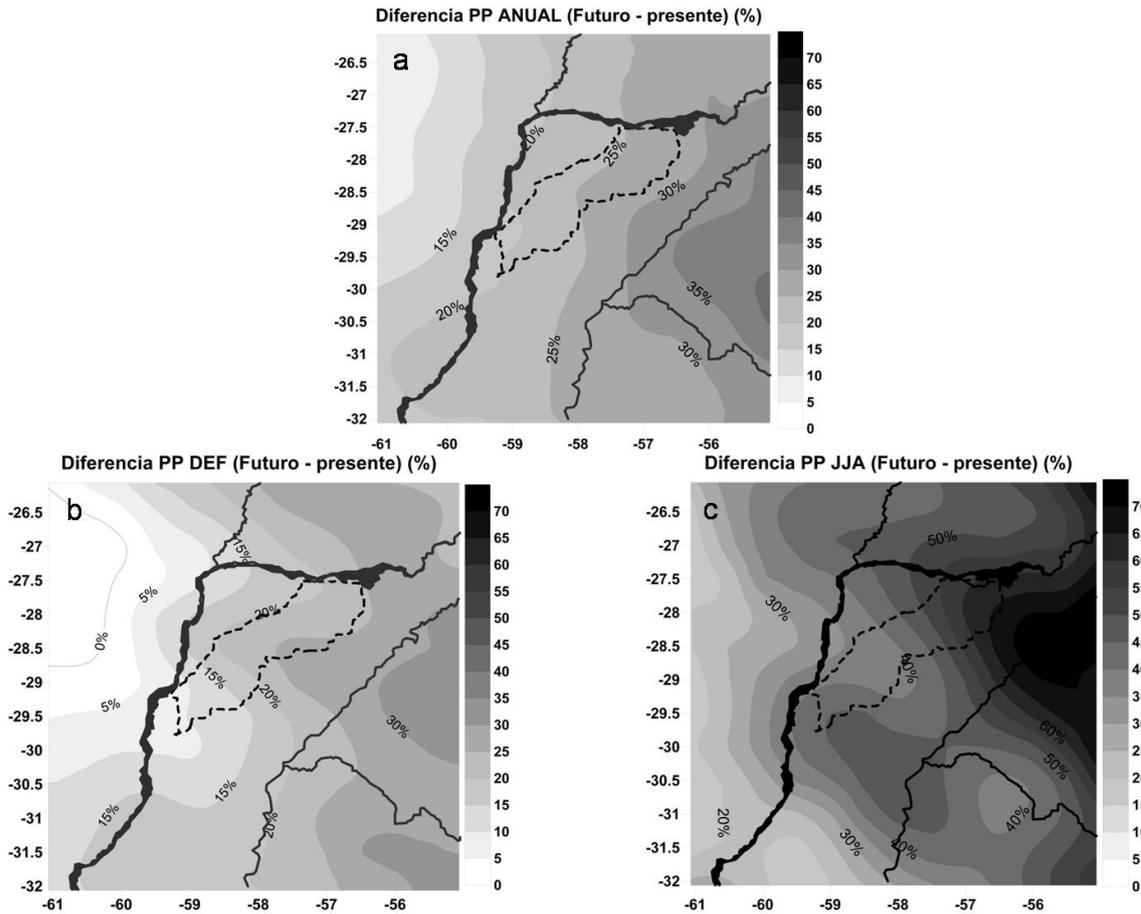


Figura 10: Cambios porcentuales en la precipitación media en el período 2080-2099 respecto del período de referencia 1980-1999 a) a nivel medio anual; b) en el trimestre DEF; y c) en el trimestre JJA.

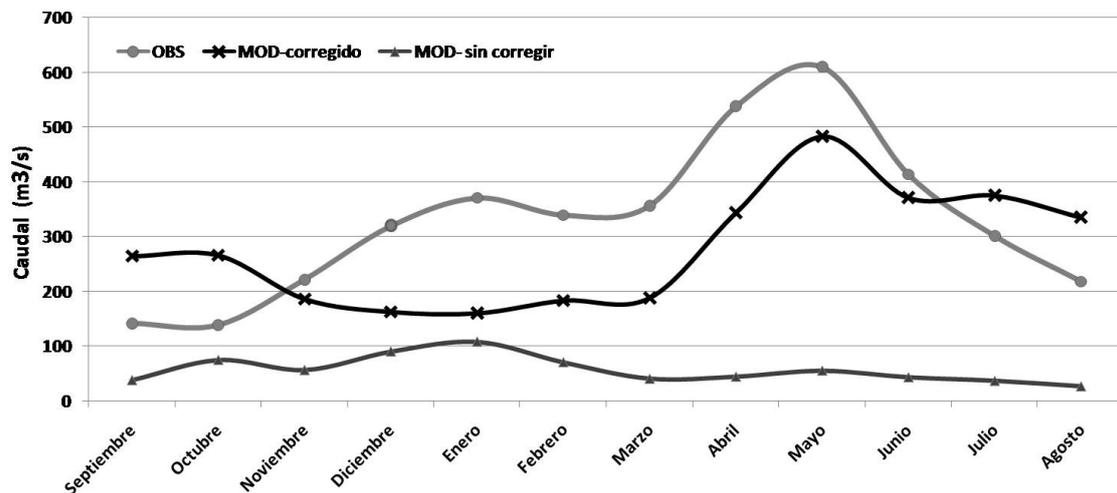


Figura 11: Distribución media mensual del caudal observado (línea gris clara) y simulado por el modelo VIC forzado con las salidas diarias del modelo climático RCA3 corregidos (línea negra) y sin corregir (línea gris oscura) para el clima presente (1991-1999) en el punto de cierre Los Laureles. Las unidades son $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

mejora considerablemente. A diferencia de las simulaciones realizadas sin las correcciones, el modelo logra representar el pico en el caudal en el mes de mayo y aunque todavía no se logra un buen ajuste para el mínimo en septiembre y el máximo secundario en enero, la mejora es notable. La diferencia entre el caudal medio anual observado y modelado para el caso corregido es de 28,8 %, mientras que para el caso sin realizar una corrección previa es de 82,4 %.

Debido a que las simulaciones hidrológicas forzadas con el modelo climático regional sin realizar correcciones son deficientes para el clima presente, las posibles inferencias que pudieran hacerse al llevar a cabo simulaciones forzadas directamente con las salidas del clima futuro del modelo regional serían, como mínimo, de dudosa calidad. Por ende, para llevar adelante un análisis del potencial cambio futuro en el comportamiento del río Corriente y de la disponibilidad hídrica en la región de los esteros del Iberá, y como paso previo al forzamiento del modelo hidrológico, se llevó a cabo la corrección de los errores sistemáticos de los datos diarios del modelo regional RCA para el clima futuro (período 2080-2099) considerando las diferencias entre el clima del modelo en el presente y el clima real observado (período 1980-1999). La Figura 12 muestra las variaciones mensuales porcentuales en los caudales medios en el período 2080-2099 respecto de la simulación hecha con datos del período de referencia para la estación Los Laureles. Como puede observarse, el incremento en los caudales se registra en todos los meses del año, con un máximo durante el mes de abril del orden del 120 %. La variación mínima, en cambio, se aprecia durante el mes de junio y es del orden del 30 %.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se implementó el modelo hidrológico distribuido VIC sobre la región de los esteros del Iberá. Los resultados obtenidos a partir de la calibración y validación realizadas sugieren que el modelo puede aplicarse a una cuenca de área limitada como la del río Corriente

y obtener simulaciones aceptables. Asimismo, la validación de la climatología del modelo climático RCA3-E para el clima presente (1980-1999) sobre la región de los esteros mostró que el modelo tiende a simular condiciones más secas y más cálidas que las observadas sobre el noreste de Argentina lo cual es cualitativamente similar a lo que presentan las simulaciones correspondientes al modelo climático global ECHAM5-MPI/OM, del cual RCA3-E obtiene las condiciones de borde. Esto indicaría que tanto errores en el forzante sinóptico del modelo global, como la inadecuada representación de distintos procesos importantes para la generación de precipitación en ambos modelos, afectan la calidad de las simulaciones. Por otra parte, la combinación entre la sobreestimación en las temperaturas -con la consiguiente posible sobreestimación en la evapotranspiración- y la subestimación en los montos de precipitación determina que las simulaciones hidrológicas realizadas forzando el modelo VIC con las salidas diarias del modelo regional RCA3-E (sin aplicar la corrección de los errores sistemáticos) presenten grandes diferencias respecto a los caudales observados. De manera de reproducir el ciclo anual medio del río Corriente en forma más realista, se aplicó un método de corrección de errores sistemáticos a las simulaciones de precipitación y temperatura máxima y mínima. Las simulaciones realizadas con estos nuevos conjuntos de datos lograron representar más adecuadamente la onda media anual en Los Laureles. Estos resultados ponen de manifiesto la sensibilidad del modelo VIC a los errores sistemáticos en estas variables y la necesidad de aplicación de esquemas de corrección de los mismos para mejorar la calidad de las simulaciones provistas por modelos climáticos regionales para su utilización en modelos hidrológicos.

El patrón de cambio en las condiciones medias mostrado por el modelo RCA3-E para finales del siglo XXI considerando el escenario A1B, se caracteriza por un aumento en las temperaturas medias y en las precipitaciones anuales. Para estimar los potenciales cambios futuros en el caudal del río Corriente se llevó a cabo una simula-

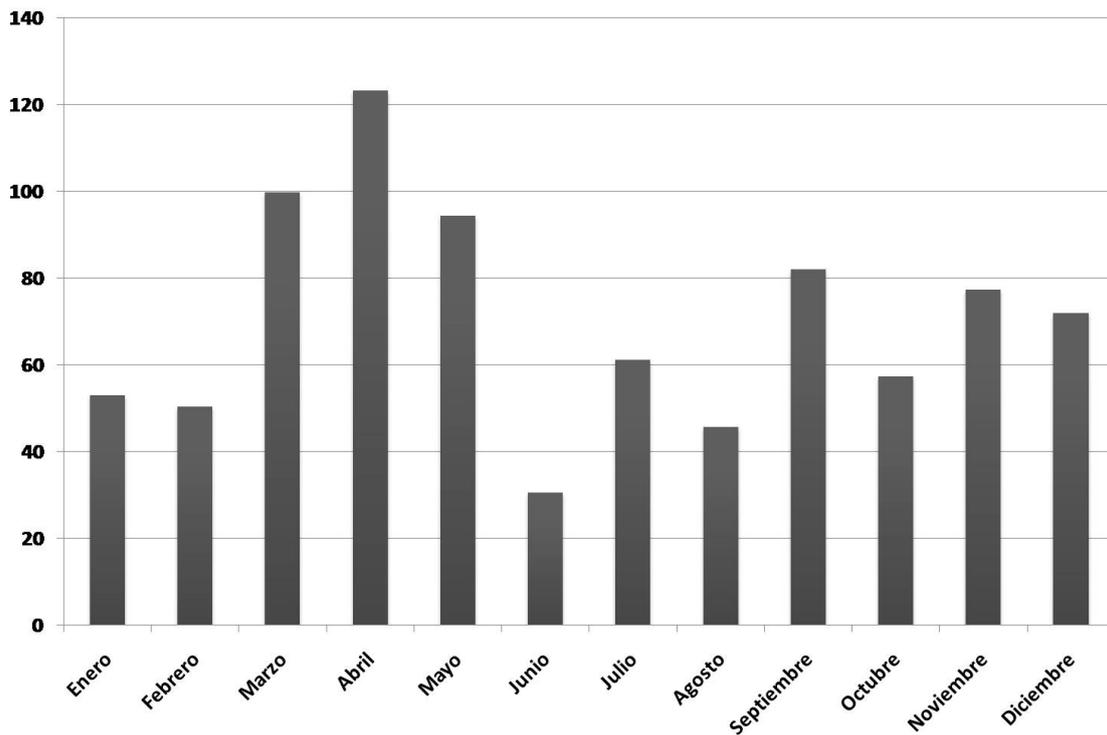


Figura 12: Diferencias porcentuales mensuales en el caudal del río Corriente en Los Laureles en el período 2080-2099 respecto al período de referencia 1980-1999.

ción con el modelo VIC forzado con los escenarios futuros del RCA3-E luego de que se le removieran los errores sistemáticos en los campos de precipitación y temperatura. La simulación efectuada con los datos “corregidos” mostró que podría tener lugar un aumento en el caudal del río hacia finales del presente siglo debido a que el incremento en las precipitaciones compensaría el aumento en la evapotranspiración asociado al aumento en las temperaturas en el caso de una atmósfera no saturada.

El cambio climático es reconocido como uno de los problemas ambientales globales más complejos y que mayores desafíos presenta a la sociedad, a la comunidad científica y técnica y a las autoridades políticas. En particular, la cuantificación de los posibles impactos sobre sistemas naturales constituye un insumo necesario para evaluar su vulnerabilidad y establecer medidas de adaptación adecuadas. Los humedales son ecosistemas muy sensibles a cambios hidrológicos ya que las lagunas de poca profundidad que

los conforman responden muy rápidamente a cambios climáticos locales. En este trabajo se demuestra que la generación de escenarios hidrológicos futuros para los esteros del Iberá tiene incertidumbres asociadas al modelo hidrológico y a los modelos climáticos considerados. No obstante ello y en el marco de las mencionadas incertidumbres, los resultados obtenidos indican que no habría un déficit hídrico significativo en la región de los esteros del Iberá hacia finales del presente siglo, y que por el contrario podría tener lugar un incremento del caudal río Corriente mostrando un impacto positivo en las comunidades que dependen de la disponibilidad hídrica de la región para su subsistencia. Finalmente, es importante señalar que este trabajo constituye una primera aproximación a la generación de escenarios hidrológicos para los esteros del Iberá en el contexto del cambio climático. Es de esperar que en el futuro tanto las simulaciones con el modelo hidrológico como las provistas por los modelos climáticos puedan ser más precisas a partir de mejores bases de datos observaciona-

les y parametrizaciones de procesos no resueltos en forma explícita por los modelos climáticos así como también a través de la utilización de diferentes esquemas de remoción de errores sistemáticos que contribuyan a mejorar los ajustes.

Agradecimientos: El presente trabajo fue financiado por los siguientes proyectos: UBACYT-X033, UBACYT- 20020100100803, ANPCYT-PICT07-00400, CONICET-PIP444, PIP-CONICET 112-200801-01788, European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement N° 212492: CLARIS LPB "A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin..A.A. Sörensson posee una beca postdoctoral del proyecto CRN-II (2008-2011) del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI). Los autores agradecen a Ángel Menéndez y a un revisor anónimo por sus valiosas sugerencias que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

- Barros, V., Chamorro, L., Coronel, G. y Baez, J., 2004. The major discharge events in the Paraguay River: magnitudes, source regions, and climate forcings. *J. Hydrometeor.*, 5, 1161-1170.
- Camilloni, I. 2005. Extreme flood events in the Uruguay River of South America. *VAMOS Newsletter*, 2, 23-25.
- Camilloni, I. y Barros, V., 2003. Extreme discharge events in the Paraná River. *J. Hydrology*, 278, 94-106.
- Castañeda, M.E. y Barros, V., 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al este de los Andes. *Meteorológica*, 19, 23-32.
- Champeaux, J. L., Masson, V. y Chauvin, F., 2005: ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution. *Meteorol. Appl.*, 12, 29-32.
- Cherkauer, K. A. y Lettenmaier, D. P., 1999. Hydrologic effects of frozen soils in the Upper Mississippi basin. *J. Geophys. Res.*, 104 (16), 15599-15610.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. y Whetton, P., 2007: Regional climate projections. In: *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon; D. Qin; M. Manning; Z. Chen; M. Marquis; K.B. Averyt; M. Tignor; H.L. Miller, Ed., Cambridge, UK, and New York, NY: Cambridge University Press, 847-940.
- Di Luca, A., Camilloni, I. y Barros, V., 2006. Sea-level pressure patterns in South America and the adjacent oceans in the IPCC AR4 Models. Preprints 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology & Oceanography. Foz do Iguassu, Brasil.
- Doyle, M., Saurral, R. y Barros, V., 2011. Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the La Plata Basin. *International Journal of Climatology* (en prensa).
- Ferrati, R., Canziani, G. y Ruiz Moreno, D., 2003: Caracterización hidrométrica e hidrológica del sistema Iberá, en: *El manejo Sustentable de Humedales del Mercosur*. Canziani, G., C. Rossi, S. Loiselle y R. Ferrati (Eds), Los Esteros del Iberá, Informe del Proyecto , Buenos Aires, Fundación Vida Silvestre Argentina , 83-102.
- García, N. y Vargas, W. M., 1998. The temporal climatic variability in the 'Río de la Plata' basin displayed by the river discharges. *Clim. Change*, 38, 359-379.
- Hansen, M., R. DeFries, J. R. G. Townshend y P. Sohlberg, 2000. Global land cover classification at 1 km resolution using a decision tree classifier. *Int. J. Remote Sensing*, 21, 1331-1364.
- Jones, C. G. y Sanchez, E., 2002. The representation of shallow cumulus convection and associated cloud fields in the Rossby Centre Atmospheric Model. *HIRLAM newsletter* 41, SMHI, SE-60176. Norrköping, Suecia, 91-106.

- Kain J. y Fritsch, J., 1993. Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. En: Emanuel, K. A. y Raymond, D. J. (Eds): The representation of cumulus convection in numerical models. American Meteorological Society, Boston, 165–170.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Leung, L. R., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. y Kumar, A., 1999: Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the Pacific Northwest Columbia River basin. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80 (11), 2313-2329.
- Leung, L. R., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. y Burges, S. J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs. *J. Geophys. Res.*, 99 (D7), 14415-14428.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P. y Wood, E. F., 1996. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer Variable Infiltration Capacity model. *J. Geophys. Res.*, 101 (D16), 21403-21422.
- Lohmann, D., R. Nolte-Holube, and E. Raschke, 1996: A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus*, 48A, 708-721.
- Mattheussen, B., Kirschbaum, R. L., Goodman, I. A., O'Donnell, G. M. y Lettenmaier, D. P., 2000. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). *Hydrol. Process.*, 14, 867-885.
- Menéndez C. G., de Castro, M., Sörensson, A. y Boulanger, J.-P., 2010a. CLARIS Project: towards climate downscaling in South America using RCA3. *Meteor. Z.*, 19, 357-362.
- Menéndez, C.G, M. de Castro, A.A. Sörensson, y J.-P., Boulanger, 2010b, CLARIS Project: towards climate downscaling in South America, *Meteor. Z.*, 19, No. 4, 357-362.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *J. Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Neiff, J.J. y Poi de Neiff, A., 1997. El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica. En: Tópicos sobre grandes humedales sudamericanos. Malvárez, A.I., y Kandus, P. (eds.), ORCYT-MAB (UNESCO), Montevideo, Uruguay. 106 p.
- Neiff, J.J., Iriondo, M.H. y Carignan, R., 1994. Large Tropical South American Wetlands: An Overview. Proceedings of the International Workshop on The Ecology and Management of Aquatic-Terrestrial: Ecotones: MAB-UNESCO-IHP Center for Streamside Studies. Seattle, 56-165
- Nijssen, B. N., Lettenmaier, D. P., Liang, X., Wetzel, S. W. y Wood, E. F., 1997. Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resour. Res.*, 33, 711-724.
- Räisänen, P., Rummukainen, M. y Räisänen, J., 2000. Modification of the HIRLAM radiation scheme for use in the Rossby Centre regional atmospheric climate model. Department of Meteorology, Report No 49, University of Helsinki, 71 pp.
- Rasch, P. J. y Kristjánsson, J. E., 1998. A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. *J. Climate*, 11, 1587–1614
- Samuelsson P., Gollvik, S. y Ullerstig, A., 2006. The land-surface scheme of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). Report in meteorology 122, SMHI SE-601 76. Norrköping, Suecia.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R. y Hauck, L.M., 2001. Validation of the SWAT Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37, 1169-1188.
- Sass, B. H., Rontu, L., Savijärvi, H. y Räisänen, P., 1994. HIRLAM-2 Radiation scheme: documentation and tests. Hirlam technical report no 16, SMHI. SE-601 76 Norrköping, Suecia, 43 pp.

- Saurral, R. I., Barros, V. R. y Lettenmaier, D. P., 2008. Land use impact on the Uruguay River discharge. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12401, doi: 10.1029/2008GL033707.
- Saurral, R. I., 2010. The hydrologic cycle of the La Plata Basin in the WCRP-CMIP3 multimodel dataset. *J. Hydrometeor.*, 11, 1083-1102.
- Savijärvi, H., 1990. A fast radiation scheme for mesoscale model and short-range forecast models. *J. Appl. Met.*, 29, 437-447.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., Miller Jr., H. L. y Chen, Z., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Sciences Basis*. Cambridge University Press, 996 pp.
- Sörensson, A. A. 2010. Análisis de retroalimentaciones suelo-atmósfera en América del Sur empleando un nuevo modelo climático regional, tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires.
- Sörensson, A. A. y Menéndez, C.G., 2011. Summer soil-precipitation coupling in South America, *Tellus A*, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00468.x
- Sörensson, A. A., Menéndez, C.G., Ruscica R., Alexander P., Samuelsson P. y Willén U., 2010b. Projected precipitation changes in South America: a dynamical downscaling within CLARIS, *Meteor. Z.*, 19, No. 4, 347-355.
- Sörensson, A. A., Menéndez, C. G., Samuelsson, P., Willén, U., y Hansson, U., 2010a. Soil-precipitation feedbacks during the South American Monsoon as simulated by a regional climate model. *Climatic Change*, 98, 429-447.
- Su, F., Gao, H., Huffman, G. J. y Lettenmaier, D. P., 2011. Potential utility of the real-time TMPA-RT precipitation estimates in stream-flow prediction. *J. Hydrometeor.*, 12, 444-455.
- Su, F., Hong, Y. y Lettenmaier, D. P., 2008. Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *J. Hydrometeor.*, 9, 622-640.
- Su, F., y Lettenmaier, D. P., 2009. Estimation of surface water budget of La Plata Basin. *J. Hydrometeor.*, 10, 981-998.
- Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B. y González, P., 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL025759.