

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA REGIÓN LITORAL-MESOPOTAMIA (ARGENTINA)

Raúl Pedraza, Ma. del Valle Morresi, Graciela Pusineri y Mónica D'Elía

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral
Ciudad Universitaria, 3000 Santa Fe, Argentina
rpedraza@fich.unl.edu.ar

Resumen: La región Litoral-Mesopotamia argentina (LM) es la zona más rica del país en cuanto a sus recursos hídricos. El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos del Cambio Climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos de la región, con un horizonte temporal hasta la década 2081-2090.

Para evaluar tales efectos, se aplicó un modelo de balance hídrico mensual en 22 estaciones representativas de la región, para el año medio del período de referencia 1981/1990, representativo de la situación actual, y para el año medio del período 2081/2090, considerando para este último dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, A2 y B2, definidos por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A tal efecto, se utilizaron datos observados de precipitación y temperatura mensuales en dichas estaciones, así como datos sintéticos de esas variables calculados con el Modelo Climático Regional del Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA).

Los resultados obtenidos indican una drástica disminución de los excesos y un aumento generalizado del déficit hídrico en la región, siendo más severos los efectos para el Escenario A2. Estos cambios se producirían, fundamentalmente, por aumento de la evapotranspiración, debido al aumento de la temperatura del aire.

Los cambios implicarían una reducción tanto de la escorrentía directa como de la recarga subterránea. Los cursos autóctonos, cuya escorrentía se genera por lluvias caídas dentro de la región en estudio, verían reducidos sus caudales medios, lo que implicaría un cambio en la tendencia de aumento registrada en las últimas 3 décadas.

Se identifican sectores de la región donde el severo aumento del déficit podría generar dificultades para el abastecimiento de agua para consumo humano y la posible extinción o modificación de ecosistemas. Se concluye en la necesidad de planificar medidas de adaptación para mitigar los efectos del cambio climático en la región.

INTRODUCCIÓN

Este estudio se desarrolló en el marco del Proyecto "Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos en el Litoral – Mesopotamia (LM)" (FICH, 2006), desarrollado como parte de las "Actividades Habilitantes para la 2a. Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático - TF 51287/AR".

El objetivo del proyecto fue evaluar el impacto sobre el clima y los recursos hídricos de la región LM que producirá el Cambio Climático, con un horizonte temporal hasta la década 2081-2090.

Para ello se consideraron los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, A2 y B2, definidos por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2000). Estos escenarios no representan condiciones extremas, sino condiciones medias altas y medias bajas de emisión de dióxido de carbono, respectivamente, y se muestran en la Figura 1.

La familia de escenarios A2 supone un mundo heterogéneo cuyas características más distintivas son: a) la preservación de las identidades locales, b) una alta tasa de crecimiento poblacional, c) un desarrollo económico regional y d) un desarrollo económico menor que en otras líneas narrativas.

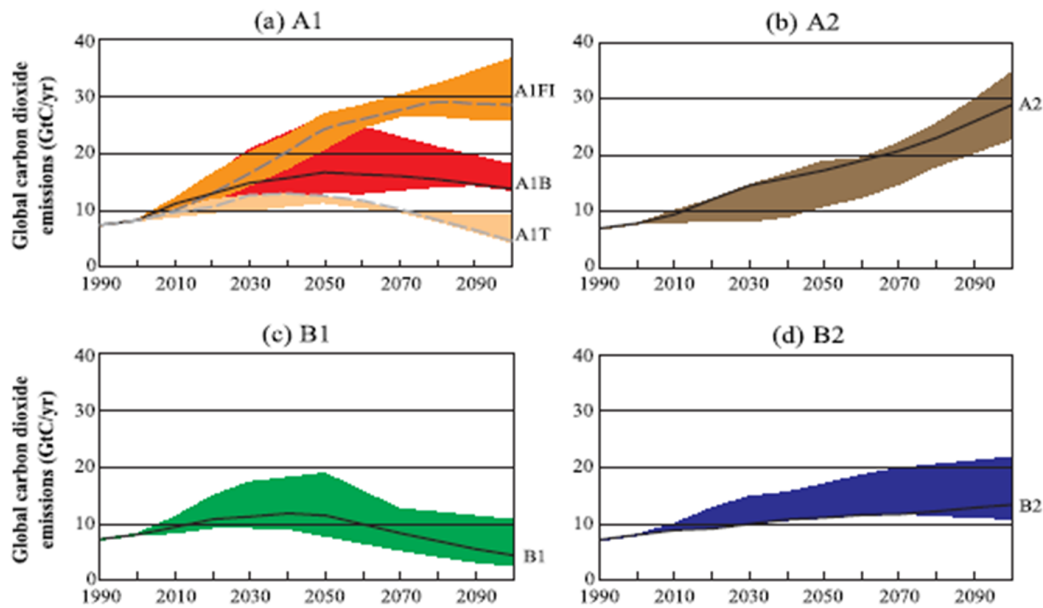
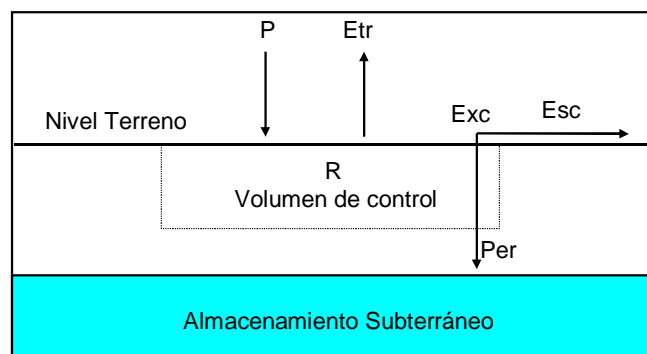


Figura 1. Escenarios de Emisiones de CO₂ (fuente: IPCC, 2000)



P: precipitación, Etr: evapotranspiración real, Exc: exceso de agua (Exc = Esc + Per), R: reserva de agua utilizable por las plantas, Esc: escorrentía directa, Per: percolación al acuífero

Figura 2. Esquema del volumen de control y variables consideradas en el balance hídrico

La familia de escenarios B2 supone un mundo con énfasis en las soluciones locales cuyas características más importantes son: a) un aumento menor de la población que en A2 y b) niveles intermedios de desarrollo económico.

OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio fue evaluar los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en la región LM, con un horizonte temporal hasta la década 2081-2090. Los objetivos particulares fueron evaluar los efectos sobre la distribución areal de excesos y déficit hídricos en la región.

MODELO DE BALANCE HÍDRICO APLICADO

Para evaluar los efectos mencionados, se aplicó un modelo de balance hídrico mensual en estaciones representativas de la región, para el año medio del período de referencia 1981/1990, representativo de la situación actual y para el año medio del período 2081/2090, considerando para este último los escenarios A2 y B2.

El modelo aplica la ecuación de continuidad a un volumen de control ubicado en la subzona de evapotranspiración de la zona no saturada del suelo, comprendida entre la superficie del terreno y la profundidad radicular media. Figura 2 muestra un esquema del volumen de control y las variables consideradas en el balance hídrico.

La ecuación de continuidad aplicada al volumen de control en un intervalo de tiempo Δt es:

$$P = Etr + Exc + \Delta R \quad (1)$$

donde ΔR es la variación de la reserva de agua utilizable por las plantas.

Deben cumplirse las siguientes restricciones:

$$Etr \leq Etp \quad (2)$$

$$0 \leq R \leq R_{m\acute{a}x} \quad (3)$$

donde Etp es la evapotranspiración potencial y $R_{m\acute{a}x}$ la reserva de agua máxima utilizable por las plantas. El valor de $R_{m\acute{a}x}$ se calcula:

$$R_{m\acute{a}x} = W_{cc} - W_{pmp} \quad (4)$$

donde W_{cc} es la capacidad de campo del suelo y W_{pmp} el punto de marchitez permanente.

Para este estudio se adoptó un intervalo de tiempo de cálculo mensual. Teniendo como datos los valores mensuales de Etp y P , para cada mes se calcularon los valores de Etr , R , Exc y $Déf$. De acuerdo a la relación entre P y Etp en cada mes, se consideraron 2 situaciones:

- $P < Etp$ ($P - Etp < 0$): no se satisface Etp con P , el almacenamiento suministra agua para satisfacerla y disminuye la reserva (ΔR negativo). R tiene un límite mínimo igual a cero. Cuando la reserva se agota y aún no se ha satisfecho Etp , se produce un déficit ($Déf$).
- $P \geq Etp$ ($P - Etp \geq 0$): se satisface Etp ($Etr = Etp$) y el sobrante de agua aumenta la reserva de agua útil (ΔR positivo). Si se completa $R_{m\acute{a}x}$ y sigue existiendo sobrante, éste pasa a ser exceso (escorrentía directa más percolación).

Por tratarse el año medio de un ciclo cerrado, se aplicó un procedimiento de cálculo iterativo. Para un mes genérico i , se calculó ΔR como se describe a continuación:

- Si $(P - Etp)_i < 0$:

$$\text{Si } |P - Etp|_i = R_{i-1} \Rightarrow \Delta R_i = (P - Etp)_i \quad (5)$$

$$\text{Si } |P - Etp|_i > R_{i-1} \Rightarrow \quad (6)$$

- Si $(P - Etp)_i = 0$:

$$\begin{aligned} \text{Si } (P - Etp)_i &= (R_{m\acute{a}x} - R_{i-1}) \Rightarrow \Delta R_i \\ &= (P - Etp)_i \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Si } (P - Etp)_i &> (R_{m\acute{a}x} - R_{i-1}) \Rightarrow \Delta R_i \\ &= R_{m\acute{a}x} - R_{i-1} \quad (8) \end{aligned}$$

En cualquiera de estos casos, se actualizó el valor de R al final del mes i con:

$$R_i = R_{i-1} + \Delta R_i \quad (9)$$

Finalmente, se calcularon los valores de Exc , Etr y $Déf$ del mes i :

$$\text{Si } (P - Etp)_i = 0 \Rightarrow Exc_i = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Si } R_i &= R_{m\acute{a}x} \text{ y } (P - Etp)_i > 0 \Rightarrow Exc_i \\ &= (P - Etp)_i - \Delta R_i \quad (11) \end{aligned}$$

$$\text{Si } (P - Etp)_i < 0 \Rightarrow Etr_i = P_i + |\Delta R_i| \quad (12)$$

$$\text{Si } (P - Etp)_i = 0 \Rightarrow Etr_i = Etp_i \quad (13)$$

$$D\acute{e}f_i = Etp_i - Etr_i \quad (14)$$

Los valores de Etp se calcularon en base a los datos mensuales de temperatura del aire, aplicando el método de Thornthwaite (Thornthwaite y Holzman, 1942). Estos autores correlacionaron valores de temperatura del aire medias mensuales con valores de Etp determinados por balance hídrico en cuencas de la costa Este central de EUA (zona húmeda), con pasturas bajas. Sus resultados fueron obtenidos bajo condiciones en las que la tasa de evaporación no estaba influenciada por advección de aire húmedo o seco (Thornthwaite y Mather, 1955). Debido a que estas condiciones se cumplen en la mayor parte de la región LM y dado que no se dispuso de datos simulados a futuro de otras variables meteorológicas, como heliofanía, velocidad del viento y humedad relativa, se adoptó el método mencionado.

APLICACIÓN DEL MODELO AL PERÍODO DE REFERENCIA 1981/1990

A efectos de determinar una distribución areal de excesos y déficit hídricos en la región LM, representativa de la situación actual, se aplicó el modelo de balance hídrico en 22 estaciones de la región (Figura 3), en base a datos de precipitación y temperatura observados para el año medio del período de referencia 1981/1990.

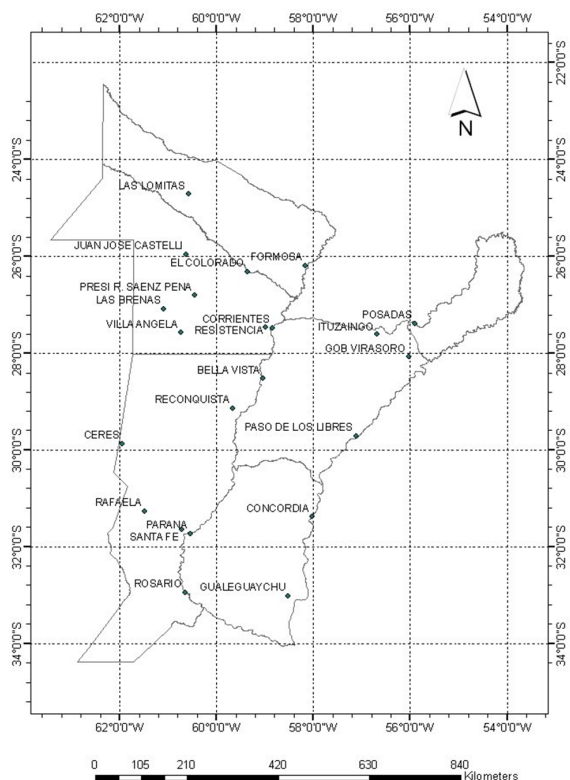


Figura 3. Ubicación de estaciones utilizadas para el balance hídrico

Para cada estación, se estimó el valor del parámetro $R_{m\acute{a}x}$. Para ello, se determinó la textura dominante (superficial y subsuperficial) en cada estación a partir del Atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1995), a escala 1:500.000.

En base a la textura del suelo en cada estación, se obtuvieron de tablas los límites inferior y superior del rango posible de $R_{m\acute{a}x}$, para una profundidad estándar de 1 m (Grassi, 1998). El valor de $R_{m\acute{a}x}$ en cada estación, para la situación actual de los suelos, se adoptó igual al promedio entre los límites inferior y superior sugeridos.

Tabla 1 muestra un listado de las estaciones consideradas en el estudio, los valores de $R_{m\acute{a}x}$ adoptados y las fuentes de datos de precipitación y temperatura medias mensuales.

Los valores medios anuales de precipitación y temperatura y los valores de exceso y déficit anuales calculados con el modelo se muestran en la Tabla 2.

A modo comparativo, también se aplicó el modelo con los datos sintéticos de precipitación y temperatura medias mensuales generados con el modelo CIMA (CIMA, 2005) para el mismo período.

Estación	Provincia	$R_{m\acute{a}x}$ [mm]	Fuente de datos de P y T
Bella Vista	Corrientes	190	Bella Vista INTA (*1).
Ceres	Santa Fe	190	Ceres Aero SMN (*1).
Concordia	Entre Ríos	80	Concordia Aero SMN (*1).
Corrientes	Corrientes	190	Corrientes Aero SMN (*1).
El Colorado	Formosa	190	P: DPAYs, T: interpoladas entre Formosa y Pres. R. S. Peña.
Formosa	Formosa	190	Formosa Aero SMN (*1).
Gob. Virasoro	Corrientes	190	P: Est. Las Marías, T: interpoladas entre Posadas y Bella Vista.
Gualeguaychú	Entre Ríos	230	Gualeguaychú Aero SMN (*1).
Ituzaingó	Corrientes	190	P: EVARSA, T: interpoladas entre Posadas y Bella Vista.
J. J. Castelli	Chaco	190	P: APA, T: interpoladas entre Las Lomitas y Pres. R. S. Peña.
Las Breñas	Chaco	190	Las Breñas INTA (*1).
Las Lomitas	Formosa	80	Las Lomitas SMN (*1).
Paraná	Entre Ríos	230	Paraná INTA (*1).
Paso de los Libres	Corrientes	230	Paso de los Libres Aero SMN (*1).
Posadas	Misiones	190	Posadas Aero SMN (*1).
Pres. R. S. Peña	Chaco	190	Pres. R.S. Peña INTA (*1).
Rafaela	Santa Fe	230	Rafaela INTA (*1).
Reconquista	Santa Fe	186	Reconquista Aero SMN (*1).
Resistencia	Chaco	230	Resistencia Aero SMN (*1).
Rosario	Santa Fe	190	Rosario Aero SMN (*1).
Santa Fe	Santa Fe	230	P: FICH, T: Sauce Viejo Aero SMN (*1).
Villa Ángela	Chaco	190	Villa Angela SMN (*1).

P: precipitaciones medias mensuales, T: temperaturas medias mensuales, INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, SMN: Servicio Meteorológico Nacional, DPAYs: Dirección Provincial de Agua y Saneamiento de Formosa, EVARSA: Evaluación de Recursos S.A., APA: Administración Provincial del Agua del Chaco, FICH: Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (*1): Estadísticas Climatológicas 1981/1990 (SMN)

Tabla 1. Listado de estaciones, valores del parámetro $R_{m\acute{a}x}$ y fuentes de datos hidrometeorológicos utilizados en el balance hídrico

Estación	Balance con datos P y T Observados				Balance con datos P y T Modelo CIMA				Errores relativos			
	P [mm]	T [C]	Exc [mm]	Déf [mm]	P [mm]	T [C]	Exc [mm]	Déf [mm]	P [%]	T [%]	Exc [%]	Déf [%]
Bella Vista	1465.4	20.8	419.0	0.0	1418.5	20.8	362.6	0.0	-3.2	0.2	-13.5	0.0
Ceres	941.0	19.0	0.0	2.9	965.3	19.7	0.0	23.5	2.6	4.0	0.0	718.5
Concordia	1308.0	18.9	388.9	21.0	1350.8	18.8	426.3	6.6	3.3	-0.5	9.6	-68.8
Corrientes	1645.6	21.2	565.9	0.0	1500.3	21.5	396.1	0.0	-8.8	1.4	-30.0	0.0
El Colorado	1282.5	21.9	143.8	0.0	1352.3	21.9	222.3	0.0	5.4	-0.4	54.5	0.0
Formosa	1498.4	22.1	342.3	0.0	1522.2	22.1	376.0	0.0	1.6	-0.2	9.8	0.0
Gob. Virasoro	1935.1	21.1	857.9	0.0	1990.4	21.1	920.7	0.0	2.9	-0.2	7.3	0.0
Gualeguaychú	1195.5	17.8	309.2	0.0	1171.2	17.8	288.8	0.0	-2.0	0.3	-6.6	0.0
Ituzaingó	1854.9	21.3	766.8	0.0	1902.1	21.4	805.4	0.0	2.5	0.6	5.0	0.0
J. J. Castelli	1065.5	21.6	0.0	45.6	1128.5	22.0	0.0	12.0	5.9	1.5	0.0	-73.6
Las Breñas	1079.4	20.8	31.7	0.0	1196.0	21.3	98.9	0.0	10.8	2.7	211.8	0.0
Las Lomitas	941.9	22.6	0.0	268.1	932.0	22.7	0.0	284.5	-1.1	0.6	0.0	6.1
Paraná	1075.0	18.2	178.4	0.0	1060.6	18.7	127.8	0.0	-1.3	3.0	-28.3	0.0
P. de los Libres	1611.3	19.7	617.6	0.0	1650.7	19.8	662.2	0.0	2.4	0.3	7.2	0.0
Posadas	1947.7	21.5	847.9	0.0	1934.3	21.0	888.0	0.0	-0.7	-2.5	4.7	0.0
Pres. R. S. Peña	1189.0	20.7	155.4	0.0	1270.8	21.5	167.9	0.0	6.9	3.8	8.1	0.0
Rafaela	1018.7	17.8	141.7	0.0	993.9	19.0	48.9	0.0	-2.4	6.6	-65.5	0.0
Reconquista	1380.1	19.9	379.5	0.0	1276.8	20.3	251.1	0.0	-7.5	1.8	-33.8	0.0
Resistencia	1556.7	21.0	487.4	0.0	1489.0	21.5	382.6	0.0	-4.3	2.3	-21.5	0.0
Rosario	933.2	17.3	68.8	0.0	985.9	17.8	100.4	0.0	5.6	3.1	45.9	0.0
Santa Fe	1051.8	18.9	105.3	0.0	1053.9	18.8	118.0	0.0	0.2	-0.5	12.1	0.0
Villa Ángela	1170.5	20.9	103.8	0.0	1255.4	21.0	185.4	0.0	7.2	0.6	78.6	0.0
Promedio									1.2	1.3	11.6	26.5

P: precipitación anual, T: temperatura media anual, Exc: exceso anual, Déf: déficit anual

Tabla 2. Valores de excesos y déficit anuales calculados con el modelo de balance para el período 1981/1990

Los valores anuales de precipitación y temperatura simulados con el modelo CIMA se aproximan a los respectivos valores observados, con errores relativos de hasta $\pm 10\%$.

Sin embargo, los valores de exceso y déficit anuales calculados con el modelo a partir de los datos sintéticos tienen errores relativos mayores al $\pm 20\%$ en algunas estaciones, con respecto a los valores obtenidos con el mismo modelo pero en base a datos observados (por ej. en Las Breñas, Villa Ángela, Rafaela, El Colorado, Rosario, Reconquista, Corrientes y Resistencia). Esto es debido a que el modelo de balance es no lineal; esto es, no existe proporcionalidad entre las variables de entrada y de salida.

Se encontró que pequeños errores en las variables de entrada originan errores mayores en las variables de salida; es decir, se amplifican los errores. Teniendo en cuenta esto, los resultados obtenidos con el modelo en base a los datos observados del período de referencia se adoptaron como representativos de la situación actual y fueron utilizados en posteriores comparaciones con los escenarios futuros.

Las Figuras 4 y 5 muestran las isolíneas de excesos y déficit medios anuales, respectivamen-

te, calculados con el modelo para el período 1981/1990.

Los resultados obtenidos muestran la existencia de excesos hídricos anuales en la mayor parte de la región en estudio, con un gradiente de aumento hacia el Noreste, en concordancia con la variación areal de la precipitación anual media. También se observa un déficit anual nulo en la mayor parte de la región, con excepción de los sectores ubicados al Oeste de las provincias de Formosa, Chaco y Santa Fe.

Los excesos medios anuales obtenidos con el modelo son compatibles con los escurrimientos medios anuales medidos en cursos de la región (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2004).

APLICACIÓN DEL MODELO AL PERÍODO 2081/2090 – ESCENARIO A2

Para cada estación considerada, se calcularon las diferencias entre los valores medios mensuales de precipitación simulados con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario A2 y 1981/1990. De manera similar, se calcularon las diferencias entre los valores medios mensuales de temperatura del aire (Tablas 3 y 4).

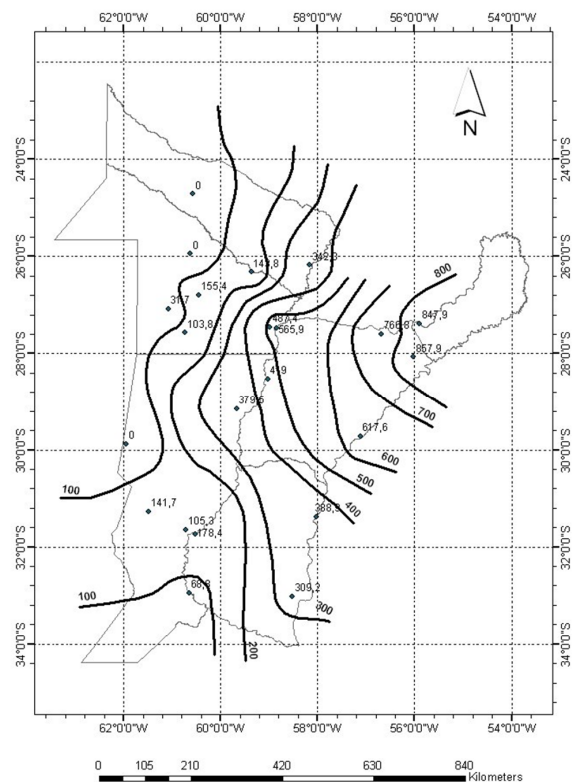


Figura 4. Excesos medios anuales calculados para el período 1981/1990 [mm]

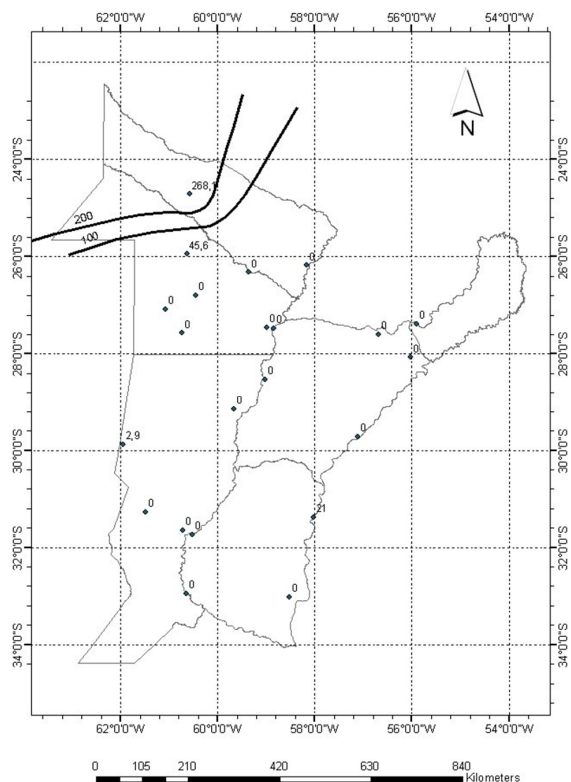


Figura 5. Déficit medios anuales calculados para el período 1981/1990 [mm]

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Bella Vista	13.3	4.8	-4.3	12.6	25.1	-46.5	-18.8	-14.9	-7.8	-24.5	-29.1	-28.8	-118.9
Ceres	28.7	2.3	3.4	24.6	17.2	-13.7	1.5	-11.0	-2.3	-12.3	-30.4	-22.8	-14.9
Concordia	10.5	4.5	-36.7	27.9	37.7	-42.3	-10.7	2.8	-17.4	-14.4	-17.1	-18.9	-74.1
Corrientes	-16.3	1.3	7.4	12.5	16.6	-57.9	-19.6	-13.1	-3.9	-20.6	-5.7	-25.1	-124.5
El Colorado	-21.8	7.7	15.9	19.1	10.3	-38.4	-10.6	-8.7	-12.9	-9.9	-0.2	1.2	-48.4
Formosa	-26.2	8.5	36.0	8.5	12.7	-40.5	-6.6	-12.1	-26.9	-0.4	-8.2	3.0	-52.2
Gob. Virasoro	-51.6	-14.3	2.3	15.5	24.0	-61.3	-14.8	-16.9	-12.6	-16.7	-22.0	-21.8	-190.3
Guaquaychú	-6.2	8.4	5.8	22.2	35.0	-18.2	1.5	-8.5	0.7	-20.5	-9.6	-8.4	2.4
Ituzaingó	-42.0	-20.2	8.1	15.6	28.1	-64.8	-11.3	-17.6	-12.4	-25.4	-18.6	-21.7	-182.1
J. J. Castelli	-26.0	30.7	-11.3	15.5	10.7	-22.1	-10.3	-6.7	-4.1	-6.5	4.0	3.1	-23.1
Las Breñas	-33.7	13.8	-14.6	20.2	9.4	-22.8	-9.5	-8.1	-4.2	-25.1	-6.1	-6.3	-86.9
Las Lomitas	-33.2	13.3	41.2	4.6	-10.6	-20.2	-9.5	-8.9	-13.2	8.8	11.4	29.0	12.6
Paraná	12.2	7.3	4.9	27.5	21.9	-15.4	4.1	-4.9	-5.4	-12.4	-6.3	8.3	41.9
P.d. los Libres	-5.4	20.8	-9.0	-8.3	12.6	-71.5	-21.6	-11.0	-16.5	-24.5	-16.3	-27.3	-177.9
Posadas	-30.6	-14.0	13.6	11.6	32.2	-47.4	-10.5	-17.2	-18.4	-20.8	-17.9	-8.8	-128.2
P. R. S. Peña	-40.3	31.3	5.9	17.9	2.5	-32.4	-13.6	-8.5	-3.8	-25.1	-2.4	-18.0	-86.7
Rafaela	29.2	6.8	-6.2	18.7	20.8	-14.1	4.8	-6.5	-5.8	-9.3	-19.1	2.8	22.0
Reconquista	7.1	3.9	-15.4	26.9	24.6	-31.4	-8.5	-2.6	-7.8	-16.2	-24.5	-36.8	-80.7
Resistencia	-13.3	-3.0	6.3	12.8	15.8	-57.6	-18.3	-12.5	-3.9	-20.8	-14.5	-24.0	-132.9
Rosario	9.6	15.7	-9.4	40.2	15.2	-6.2	9.5	-4.7	-8.3	-4.6	-6.0	2.1	53.0
Santa Fe	13.5	4.8	1.9	28.4	21.0	-15.1	4.0	-4.6	-4.6	-12.2	-7.0	9.0	39.0
Villa Ángela	-20.1	-1.4	-1.4	29.1	14.0	-25.4	-8.6	-9.2	-4.6	-22.9	-10.0	-22.5	-83.2

Tabla 3. Diferencias entre precipitaciones medias mensuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario A2 y 1981/1990 [mm]

La Figura 6 muestra la variación entre las precipitaciones medias anuales simuladas con el mo-

delo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario A2 y 1981/1990.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Bella Vista	13.3	4.8	-4.3	12.6	25.1	-46.5	-18.8	-14.9	-7.8	-24.5	-29.1	-28.8	-118.9
Ceres	28.7	2.3	3.4	24.6	17.2	-13.7	1.5	-11.0	-2.3	-12.3	-30.4	-22.8	-14.9
Concordia	10.5	4.5	-36.7	27.9	37.7	-42.3	-10.7	2.8	-17.4	-14.4	-17.1	-18.9	-74.1
Corrientes	-16.3	1.3	7.4	12.5	16.6	-57.9	-19.6	-13.1	-3.9	-20.6	-5.7	-25.1	-124.5
El Colorado	-21.8	7.7	15.9	19.1	10.3	-38.4	-10.6	-8.7	-12.9	-9.9	-0.2	1.2	-48.4
Formosa	-26.2	8.5	36.0	8.5	12.7	-40.5	-6.6	-12.1	-26.9	-0.4	-8.2	3.0	-52.2
Gob. Virasoro	-51.6	-14.3	2.3	15.5	24.0	-61.3	-14.8	-16.9	-12.6	-16.7	-22.0	-21.8	-190.3
Guauguaychú	-6.2	8.4	5.8	22.2	35.0	-18.2	1.5	-8.5	0.7	-20.5	-9.6	-8.4	2.4
Ituzaingó	-42.0	-20.2	8.1	15.6	28.1	-64.8	-11.3	-17.6	-12.4	-25.4	-18.6	-21.7	-182.1
J. J. Castelli	-26.0	30.7	-11.3	15.5	10.7	-22.1	-10.3	-6.7	-4.1	-6.5	4.0	3.1	-23.1
Las Breñas	-33.7	13.8	-14.6	20.2	9.4	-22.8	-9.5	-8.1	-4.2	-25.1	-6.1	-6.3	-86.9
Las Lomitas	-33.2	13.3	41.2	4.6	-10.6	-20.2	-9.5	-8.9	-13.2	8.8	11.4	29.0	12.6
Paraná	12.2	7.3	4.9	27.5	21.9	-15.4	4.1	-4.9	-5.4	-12.4	-6.3	8.3	41.9
P.d. los Libres	-5.4	20.8	-9.0	-8.3	12.6	-71.5	-21.6	-11.0	-16.5	-24.5	-16.3	-27.3	-177.9
Posadas	-30.6	-14.0	13.6	11.6	32.2	-47.4	-10.5	-17.2	-18.4	-20.8	-17.9	-8.8	-128.2
P. R. S. Peña	-40.3	31.3	5.9	17.9	2.5	-32.4	-13.6	-8.5	-3.8	-25.1	-2.4	-18.0	-86.7
Rafaela	29.2	6.8	-6.2	18.7	20.8	-14.1	4.8	-6.5	-5.8	-9.3	-19.1	2.8	22.0
Reconquista	7.1	3.9	-15.4	26.9	24.6	-31.4	-8.5	-2.6	-7.8	-16.2	-24.5	-36.8	-80.7
Resistencia	-13.3	-3.0	6.3	12.8	15.8	-57.6	-18.3	-12.5	-3.9	-20.8	-14.5	-24.0	-132.9
Rosario	9.6	15.7	-9.4	40.2	15.2	-6.2	9.5	-4.7	-8.3	-4.6	-6.0	2.1	53.0
Santa Fe	13.5	4.8	1.9	28.4	21.0	-15.1	4.0	-4.6	-4.6	-12.2	-7.0	9.0	39.0
Villa Ángela	-20.1	-1.4	-1.4	29.1	14.0	-25.4	-8.6	-9.2	-4.6	-22.9	-10.0	-22.5	-83.2

Tabla 4. Diferencias entre precipitaciones medias mensuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario A2 y 1981/1990 [mm]

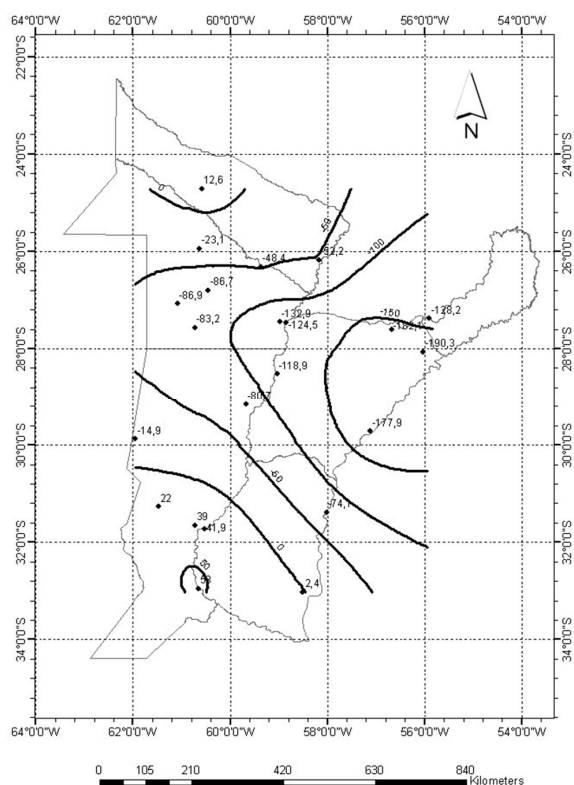


Figura 6. Variación entre las precipitaciones medias anuales del período 2081/2090 - A2 y del período 1981/1990 [mm]

Se observa que para el período 2081/2090 - Escenario A2 se espera una leve disminución de las lluvias en gran parte de la región, en relación al período de referencia. Las principales reduc-

ciones se ubican al Este de Corrientes, de hasta 190 mm/año. Son excepciones a esta reducción, los sectores Centro y Sur de la Prov. de Santa Fe y Sureste de Entre Ríos. En estos sectores, las precipitaciones anuales se mantendrían sin cambios o aumentarían ligeramente respecto a las actuales, hasta en 50 mm/año.

La Figura 7 muestra la variación entre las temperaturas medias anuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario A2 y 1981/1990.

Se observa un aumento generalizado significativo de la temperatura media anual del aire, con incrementos de 3.0 °C al Sur y de 4.1 °C al Norte de la región.

Para cada estación, se calcularon las precipitaciones medias mensuales del período 2081/2090 - Escenario A2 como suma de las precipitaciones medias mensuales observadas en el período de referencia más las diferencias mensuales de la Tabla 3. De manera similar, para cada estación se calcularon las temperaturas medias mensuales del período 2081/2090 - Escenario A2 como suma de las temperaturas medias mensuales observadas en el período de referencia más las diferencias de la Tabla 4.

Se aplicó el modelo de balance a cada estación, considerando como datos de entrada los valores de precipitación y temperatura media mensual del período 2081/2090 - Escenario A2 obtenidos como se ha descrito en el párrafo anterior.

Estación	$R_{m\acute{a}x}$ [mm]	Exc [mm]	Déf [mm]	ΔExc [%]	ΔExc [mm]	$\Delta D\acute{e}f$ [mm]
Bella Vista	160	20.9	243.8	-95	-398.1	243.8
Ceres	160	0.0	354.2	0	0.0	351.3
Concordia	60	189.5	238.9	-51	-199.5	217.9
Corrientes	160	145.4	276.8	-74	-420.5	276.8
El Colorado	160	11.8	545.8	-92	-132.0	545.8
Formosa	160	11.3	402.0	-97	-331.0	402.0
Gob. Virasoro	160	419.7	332.2	-51	-438.2	332.2
Galeguaychú	200	79.3	4.3	-74	-229.9	4.3
Ituzaingó	160	297.7	326.9	-61	-469.1	326.9
J. J. Castelli	160	0.0	654.2	0	0.0	608.6
Las Breñas	160	0.0	556.8	-100	-31.7	556.8
Las Lomitas	60	0.0	961.5	0	0.0	693.4
Paraná	200	0.0	30.2	-100	-178.4	30.2
Paso de los Libres	200	147.5	152.3	-76	-470.1	152.3
Posadas	160	351.0	254.2	-59	-496.9	254.2
Pres. R. S. Peña	160	0.0	429.2	-100	-155.4	429.2
Rafaela	200	0.0	79.0	-100	-141.7	79.0
Reconquista	156	8.2	153.4	-98	-371.2	153.4
Resistencia	200	76.4	277.1	-84	-411.0	277.1
Rosario	160	0.0	79.7	-100	-68.8	79.7
Santa Fe	200	0.0	148.3	-100	-105.3	148.3
Villa Ángela	160	0.0	498.5	-100	-103.8	498.5
Promedio				-73	-234.2	302.8

Exc: excesos medios anuales, Déf: déficit medios anuales, ΔExc y $\Delta D\acute{e}f$: variación de los excesos y déficit medios anuales del período 2081/2090 - Escenario A2 respecto del período 1981/1990

Tabla 5. Resultados obtenidos para el período 2081/2090 - Escenario A2

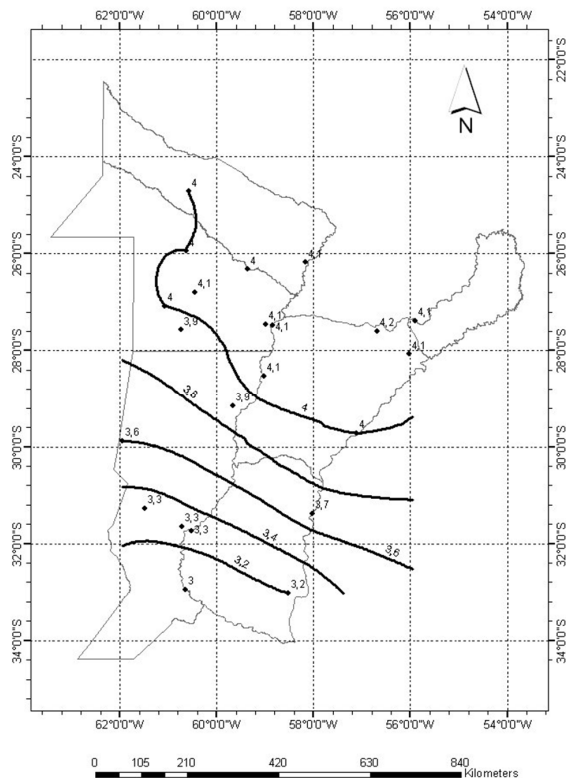


Figura 7. Variación entre las temperaturas medias anuales del período 2081/2090 - A2 y del período 1981/1990 [mm]

Para cada estación, se tuvo en cuenta una disminución del parámetro $R_{m\acute{a}x}$ respecto del va-

lor actual. El escenario futuro A2 está asociado con intensas prácticas agrícolas, las que originarán una degradación de la estructura del suelo, por disminución de materia orgánica y compactación. Esta degradación producirá una menor velocidad de infiltración en el horizonte superficial, una menor conductividad hidráulica de los horizontes subsuperficiales y una disminución del agua útil. Por esta razón, para cada estación se adoptó el límite inferior del rango posible de $R_{m\acute{a}x}$ recomendado en la literatura.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Las Figuras 8 y 9 muestran las isótopos de excesos y déficit medios anuales, respectivamente, calculados con el modelo de balance hídrico para el período 2081/2090 - Escenario A2.

Se observa una drástica disminución de los excesos hídricos en la región. Si bien los excesos medios anuales calculados conservan un gradiente de aumento hacia el Noreste, similar al período de referencia, el área con excesos se reduce y los montos anuales son significativamente menores a los de aquél período. El exceso anual máximo es de 400 mm/año y se ubica en la Prov. de Misiones, mientras que los sectores al Oeste y Centro de las provincias de Formosa, Chaco y Santa Fe y sector Este de Entre Ríos tienen un exceso nulo.

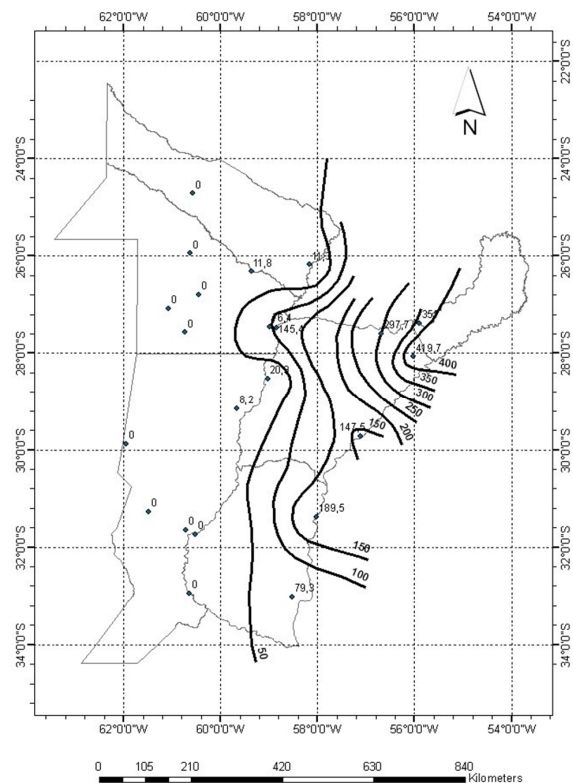


Figura 8. Excesos medios anuales calculados para el período 2081/2090 - A2 [mm]

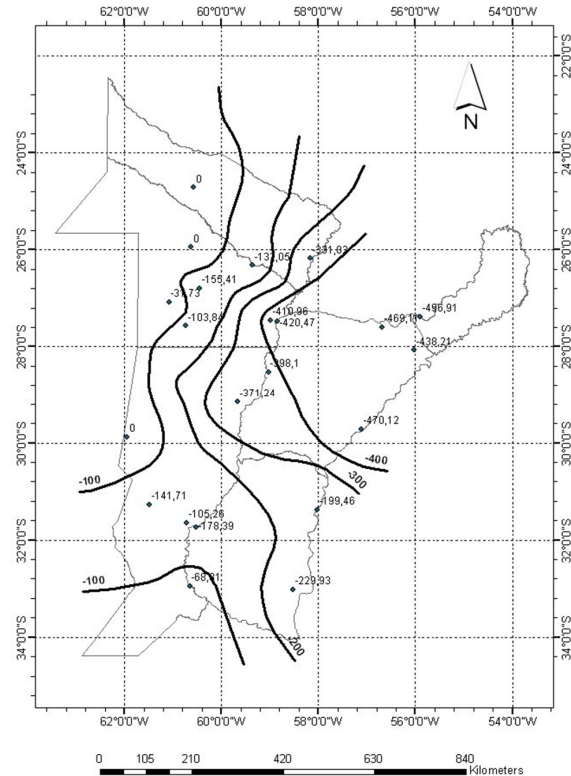


Figura 10. Variación entre los excesos medios anuales del período 2081/2090 - A2 y del período 1981/1990 [mm]

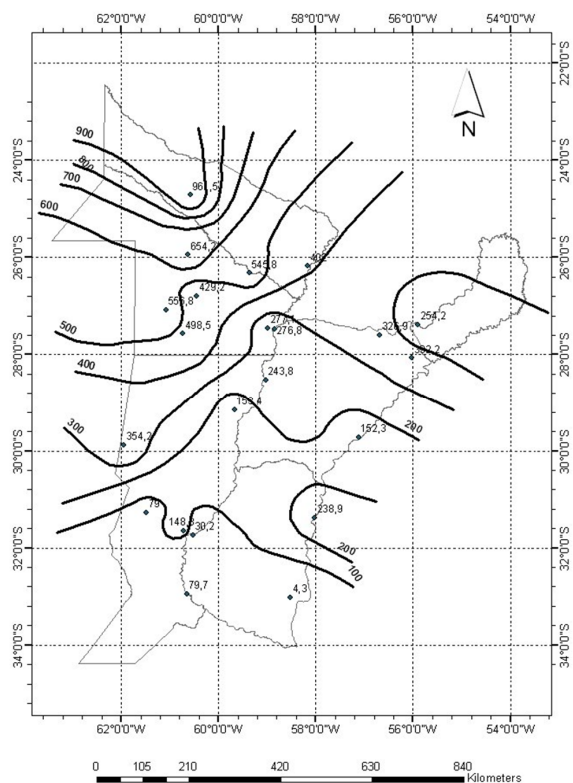


Figura 9. Déficit medios anuales calculados para el período 2081/2090 - A2 [mm]

También se observa que prácticamente toda la región pasa a tener déficit hídrico, con un gradiente de aumento hacia el Noroeste. A diferencia de la situación actual, donde los sectores con déficit hídricos se limitan a la zona Oeste de las provincias de Formosa, Chaco y Santa Fe, para el escenario A2 aún los sectores ubicados en el Centro y Este de la región pasan a tener déficits estacionales, durante meses de primavera-verano.

La Figura 10 muestra las isolíneas de variación (negativa) entre los excesos medios anuales del período 2081/2090 - Escenario A2 y del período de referencia.

La Figura 11 muestra las isolíneas de variación (positiva) de déficit medios anuales entre el período 2081/2090 - Escenario A2 y el período de referencia.

La disminución de excesos y el aumento de déficit se producirían fundamentalmente por aumento de la evapotranspiración, debido al aumento de la temperatura del aire.

Los cambios implicarían una reducción tanto de la escorrentía directa como de la recarga subterránea. Los cursos autóctonos, cuya escorrentía se genera por lluvias caídas dentro de la región en estudio, verían reducidos sus caudales medios, lo que implicaría un cambio en la ten-

dencia de aumento registrada en las últimas 3 décadas.

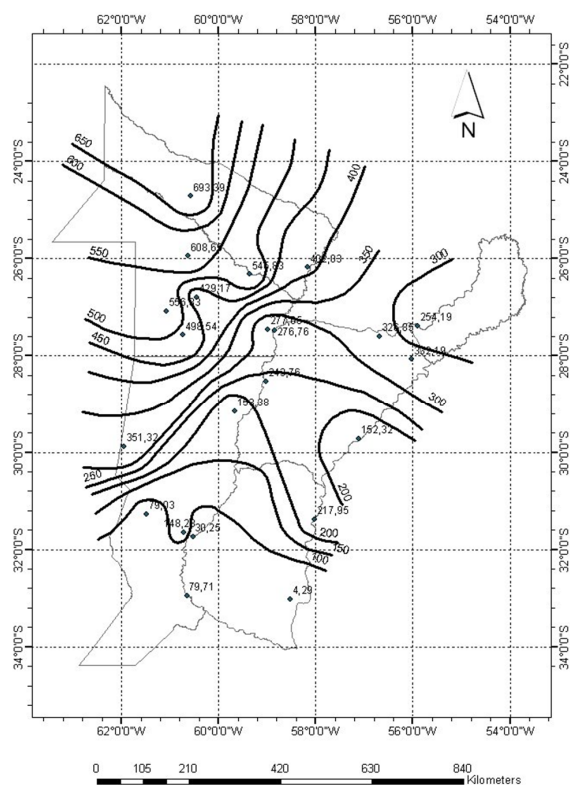


Figura 11. Variación entre los déficit medios anuales del período 2081/2090 - A2 y del período 1981/1990 [mm]

Los principales impactos del aumento de déficit hídrico serían: i) necesidad de incorporar o aumentar el abastecimiento de agua para riego en la región durante meses de primavera-verano, ii) dificultad para sostener la producción agrícola y el abastecimiento de agua para consumo humano con recurso hídrico local en los sectores Centro-Oeste de las provincias de Formosa y Chaco, iii) posible extinción o modificación de ecosistemas en estos sectores, debido a la magnitud y permanencia de déficit hídrico durante casi todo el año.

Los resultados obtenidos son compatibles con otras investigaciones realizadas en la Cuenca del Plata (Saurral *et al.*, 2006 y Barros, 2008). Estos autores aplicaron un modelo hidrológico sencillo a las principales subcuencas del Río de La Plata. Ajustaron el modelo con valores de precipitación, temperatura y caudales observados en las últimas 4 décadas. Para fin del siglo XXI consideraron cambios pequeños en la precipitación, no mayores a 100 mm anuales en promedio sobre la cuenca. Encontraron que los efectos de la

mayor evaporación por el aumento de la temperatura producirían reducciones considerables en los caudales. Para un escenario de calentamiento de 2 °C, los caudales se reducirían a valores similares a los anteriores a la década de 1970, mientras que para un escenario de aumento de 5 °C las consecuencias serían catastróficas, con una reducción de los caudales de la Cuenca del Plata del orden del 50 %.

APLICACIÓN DEL MODELO AL PERÍODO 2081/2090 – ESCENARIO B2

Para cada estación considerada, se calcularon las diferencias entre los valores medios mensuales de precipitación simulados con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090-Escenario B2 y 1981/1990 (Tabla 6). De manera similar, se calcularon las diferencias entre los valores medios mensuales de temperatura del aire (Tabla 7).

La Figura 12 muestra la variación entre las precipitaciones medias anuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario B2 y 1981/1990.

Se observa que para el período 2081/2090 - Escenario B2 se espera una leve disminución de las lluvias en gran parte de la región, en relación al período de referencia. Las principales reducciones se ubican al Noreste de Corrientes, de hasta 110 mm/año. Son excepciones a esta reducción, los sectores Centro y Sur de la Prov. de Santa Fe, Centro y Sur de Entre Ríos, Centro Norte de Formosa y Misiones. En estos sectores, las precipitaciones anuales se mantendrían sin cambios o aumentarían ligeramente respecto a las actuales, hasta en 70 mm/año.

La Figura 13 muestra la variación entre las temperaturas medias anuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - Escenario B2 y 1981/1990.

Se observa un aumento generalizado de la temperatura media anual del aire, aunque algo más atenuado que para el Escenario A2, con incrementos de 2.0 °C al Sur y 3.0 °C al Norte de la región.

Para cada estación, se calcularon las precipitaciones medias mensuales del período 2081/2090 - Escenario B2 como suma de las precipitaciones medias mensuales observadas en el período de referencia más las diferencias mensuales de la Tabla 6. De manera similar, para cada estación se calcularon las temperaturas medias mensuales del período 2081/2090 - Escenario B2 como suma de las temperaturas medias mensuales observadas en el período de referencia más las diferencias de la Tabla 7.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Bella Vista	4.9	-24.1	-3.2	-2.8	-5.5	-19.7	-1.5	-3.1	0.5	-11.2	-40.8	4.9	-101.6
Ceres	-6.3	19.9	-1.3	30.6	26.4	6.0	4.4	-10.4	-1.2	-7.5	-23.6	-8.8	28.2
Concordia	-28.4	31.0	-30.1	11.2	21.4	-28.4	12.7	-1.1	-6.7	-4.7	-15.0	0.7	-37.5
Corrientes	14.6	-28.9	-7.0	0.1	-22.3	-35.1	-1.5	-6.7	-9.2	-14.2	-29.7	27.1	-112.8
El Colorado	-9.1	-7.1	21.1	34.0	-12.5	-14.7	3.7	-3.5	-23.5	-9.5	-21.2	33.5	-8.9
Formosa	-19.2	-6.5	65.7	17.0	-10.5	-25.7	1.0	-7.3	-28.5	-2.4	-14.2	42.3	11.7
Gob. Virasoro	-1.5	-26.1	33.5	23.5	-9.1	-42.5	-0.5	-7.8	-10.1	-6.9	-25.9	28.0	-45.4
Guauguaychú	-22.7	20.4	-2.0	15.2	33.2	-12.1	4.7	2.7	6.6	-2.1	-19.1	18.4	43.2
Ituzaingó	-8.6	-33.6	35.2	28.0	-8.3	-39.8	2.9	-5.3	-11.3	-12.0	-31.3	42.3	-41.7
J. J. Castelli	2.4	14.7	4.4	20.4	-16.9	-2.1	-0.7	1.0	-10.5	-11.9	-6.8	8.3	2.4
Las Breñas	-20.8	30.2	-19.0	21.0	-11.9	1.0	0.3	-1.9	-4.7	-24.4	-21.7	14.7	-37.3
Las Lomitas	-11.5	13.6	54.1	-1.2	-23.5	-6.4	4.6	-5.2	-16.5	-1.8	6.2	29.5	41.9
Paraná	-18.5	22.1	-8.0	17.0	27.9	5.1	9.9	-0.5	2.0	-5.4	-14.1	15.9	53.4
P.d. los Libres	0.9	0.1	12.7	-28.7	-3.4	-44.5	0.5	-0.7	-14.7	-8.8	-20.3	6.1	-100.7
Posadas	27.5	-16.7	51.3	24.0	0.0	-32.9	-1.1	-11.0	-13.4	2.8	-17.2	49.7	63.1
P. R. S. Peña	-4.3	11.2	-1.2	14.4	-22.4	-8.5	-5.5	-0.3	-9.8	-23.8	-19.8	10.3	-59.9
Rafaela	-6.5	6.0	-12.7	17.6	33.2	6.2	7.7	-4.7	0.5	-9.8	-17.1	10.5	30.9
Reconquista	4.3	13.5	-10.6	1.3	10.4	-7.4	2.4	-3.7	0.4	-8.1	-34.7	-12.1	-44.3
Resistencia	17.8	-30.1	-9.3	0.5	-20.3	-33.9	-0.6	-6.3	-9.9	-14.0	-28.5	28.2	-106.5
Rosario	-4.8	34.0	-11.6	10.6	26.4	7.8	13.7	2.2	0.8	-3.4	-5.7	3.0	72.9
Santa Fe	-18.2	18.6	-9.2	19.0	27.9	5.3	9.2	-0.4	2.5	-6.8	-14.5	18.4	52.0
Villa Ángela	-15.1	12.2	-15.5	29.1	-5.4	-3.7	0.2	-3.1	0.5	-21.9	-30.2	7.8	-45.0

Tabla 6. Diferencias entre precipitaciones medias mensuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - B2 y 1981-1990 [mm]

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Bella Vista	2.1	2.3	3.5	2.1	2.1	2.1	4.5	3.9	3.4	3.7	2.7	2.7	2.9
Ceres	2.9	1.7	3.3	1.7	1.5	1.9	3.8	3.2	2.2	2.4	2.3	3.1	2.5
Concordia	2.6	2.3	3.3	2.0	1.9	1.6	3.6	3.4	2.8	2.8	2.1	2.5	2.6
Corrientes	1.8	2.1	3.1	2.1	1.8	2.1	4.6	3.9	3.7	4.1	3.1	2.4	2.9
El Colorado	1.9	2.2	2.8	1.9	1.6	2.2	4.8	4.0	3.8	4.3	3.1	2.2	2.9
Formosa	1.7	2.1	2.4	1.7	1.6	1.9	4.4	3.9	4.0	4.4	3.2	2.2	2.8
Gob. Virasoro	1.4	2.1	2.7	1.7	1.8	1.7	4.0	3.4	3.4	3.9	2.6	2.4	2.6
Guauguaychú	3.0	1.7	2.9	1.7	1.7	1.4	3.2	3.0	2.1	1.9	1.7	2.6	2.3
Ituzaingó	1.6	2.1	2.7	1.8	1.8	1.7	4.0	3.5	3.4	4.0	2.9	2.4	2.7
J. J. Castelli	2.2	2.1	2.6	2.0	1.7	2.5	5.0	4.0	3.7	4.2	3.1	2.3	2.9
Las Breñas	2.4	2.0	2.9	1.9	1.6	2.5	4.8	3.9	3.3	3.8	3.0	2.6	2.9
Las Lomitas	2.0	2.0	2.2	1.9	1.6	2.5	5.1	4.2	4.0	4.4	3.0	2.1	2.9
Paraná	2.8	1.5	3.2	1.8	1.5	1.4	3.4	2.9	1.8	2.0	1.9	2.7	2.2
P. de los Libres	1.9	2.2	3.2	2.0	2.2	1.8	4.1	3.6	0.3	3.5	2.3	2.4	2.5
Posadas	1.6	2.1	2.5	1.6	1.7	1.6	3.7	3.3	3.3	3.8	2.7	2.3	2.5
Pres. R. S. Peña	2.3	2.1	3.0	2.0	1.7	2.5	4.9	4.0	3.6	4.0	3.1	2.4	3.0
Rafaela	2.8	1.7	3.4	1.7	1.4	1.6	3.5	2.9	1.8	2.1	2.0	2.8	2.3
Reconquista	2.5	2.2	3.5	2.1	1.9	2.1	4.3	3.7	3.0	3.3	2.5	2.9	2.8
Resistencia	1.9	2.1	3.1	2.1	1.8	2.1	4.6	4.0	3.7	4.1	3.1	2.4	2.9
Rosario	2.6	1.3	2.9	1.4	1.6	1.3	3.1	2.6	1.6	1.6	1.6	2.7	2.0
Santa Fe	2.7	1.5	3.2	1.7	1.5	1.4	3.3	2.9	1.7	1.9	1.8	2.7	2.2
Villa Ángela	2.4	2.1	3.2	2.0	1.6	2.4	4.7	3.9	3.3	3.7	3.0	2.7	2.9

Tabla 7. Diferencias entre temperaturas del aire medias mensuales simuladas con el modelo CIMA para los períodos 2081/2090 - B2 y 1981-1990 [°C]

Se aplicó el modelo de balance a cada estación, considerando como datos de entrada los valores de precipitación y temperatura media mensual del período 2081/2090 - Escenario B2 obtenidos como se ha descrito en el párrafo anterior.

Para cada estación, se tuvo en cuenta una disminución del parámetro $R_{m\acute{a}x}$ respecto del valor actual, aunque más atenuada que la aplicada para el escenario A2. El escenario B2 está asociado a un nivel intermedio de desarrollo económico,

mayor que el actual pero menor que el previsto para el escenario A2. Asumiendo que dicho desarrollo originará una degradación del suelo intermedia entre la situación actual y la del Escenario A2, para cada estación se adoptó un valor de $R_{m\acute{a}x}$ igual al promedio entre los valores del parámetro correspondientes a estas dos últimas situaciones.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8.

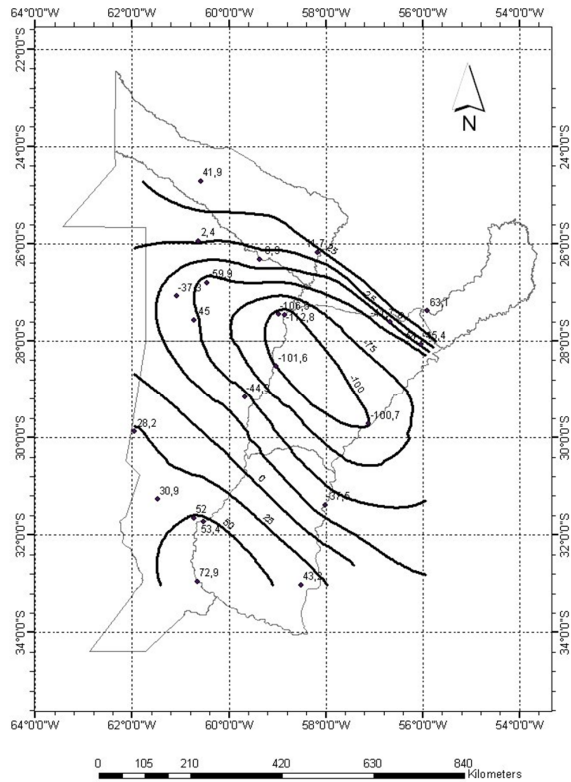


Figura 12. Variación entre las precipitaciones medias anuales del período 2081/2090 - B2 y del período 1981/1990 [mm]

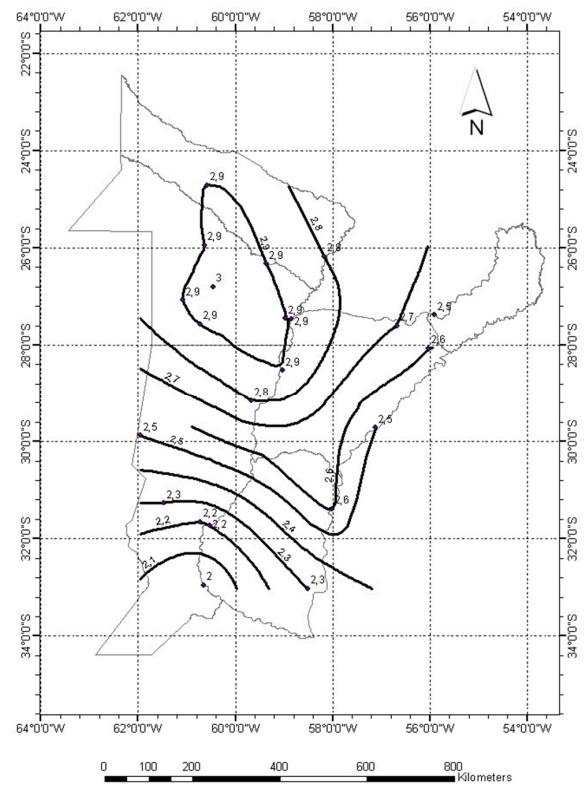


Figura 13. Variación entre las temperaturas medias anuales del período 2081/2090 - B2 y del período 1981/1990 [mm]

Estación	$R_{m\acute{a}x}$ [mm]	Exc[mm]	Déf [mm]	ΔExc [%]	ΔExc [mm]	$\Delta D\acute{e}f$ [mm]
Bella Vista	175	22.8	9.6	-95	-396.3	9.6
Ceres	175	0.0	176.4	0	0.0	173.5
Concordia	70	262.2	133.7	-33	-126.7	112.8
Corrientes	175	131.9	5.6	-77	-434.1	5.6
El Colorado	175	20.6	257.3	-86	-123.2	257.3
Formosa	175	70.3	88.3	-79	-272.0	88.3
Gob. Virasoro	175	534.5	0.0	-38	-323.4	0.0
Gauleguaychú	215	204.3	0.0	-34	-104.9	0.0
Ituzaingó	175	423.4	0.0	-45	-343.4	0.0
J.J. Castelli	175	0.0	399.6	0	0.0	354.0
Las Breñas	175	0.0	310.3	-100	-31.7	310.3
Las Lomitas	70	0.0	655.6	0	0.0	387.5
Paraná	215	78.4	0.0	-56	-100.0	0.0
Paso de los Libres	215	298.1	0.0	-52	-319.5	0.0
Posadas	175	621.4	0.0	-27	-226.5	0.0
Pres. R. S. Peña	175	1.8	207.4	-99	-153.6	207.4
Rafaela	215	22.7	0.0	-84	-119.0	0.0
Reconquista	171	73.2	0.0	-81	-306.3	0.0
Resistencia	215	64.5	0.0	-87	-422.9	0.0
Rosario	175	20.3	0.0	-71	-48.5	0.0
Santa Fe	215	0.0	18.9	-100	-105.3	18.9
Villa Ángela	175	0.0	262.3	-100	-103.8	262.3
Promedio				-61	-184.6	99.4

Exc: excesos medios anuales, Déf: déficit medios anuales, ΔExc y $\Delta D\acute{e}f$: variación de los excesos y déficit medios anuales del período 2081/2090 - Escenario B2 respecto del período 1981-1990

Tabla 8. Resultados obtenidos para el período 2081/2090 - B2

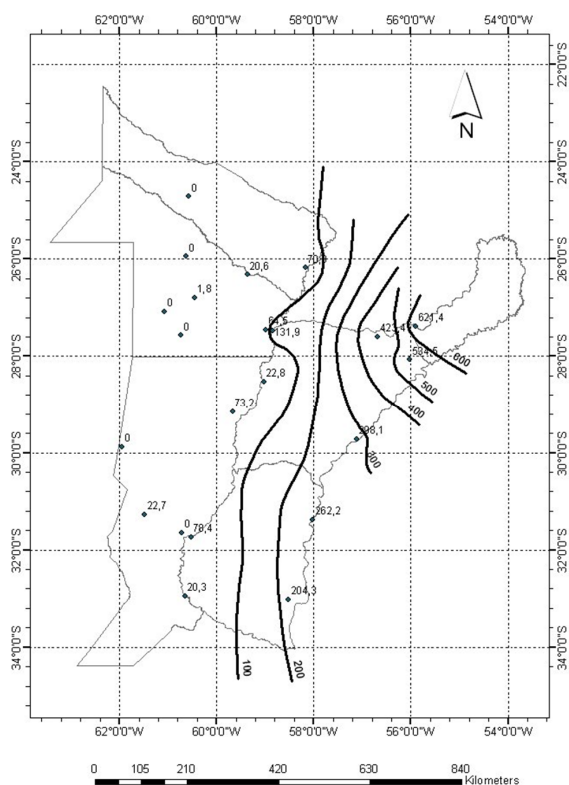


Figura 14. Excesos medios anuales calculados para el período 2081/2090 - B2 [mm]

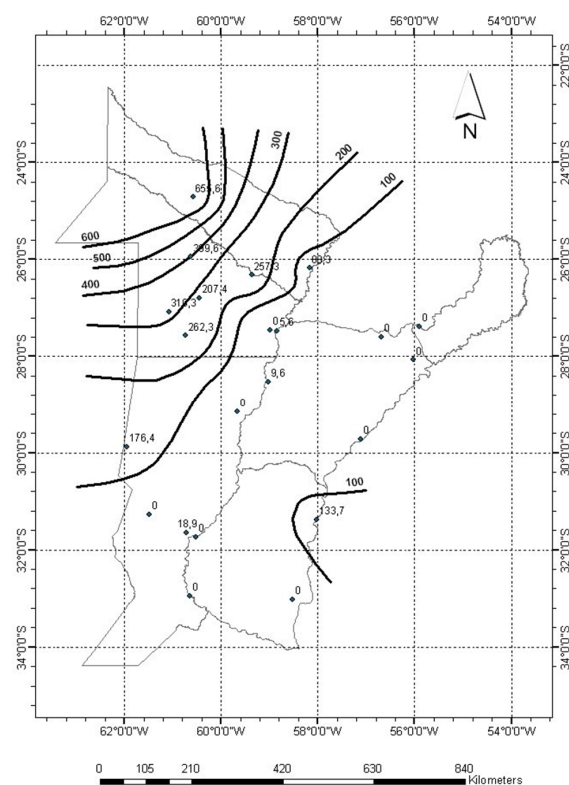


Figura 15. Déficit medios anuales calculados para el período 2081/2090 - B2 [mm]

Las Figuras 14 y 15 muestran las isóneas de excesos y déficit medios anuales, respectivamente, obtenidos con el modelo de balance para el período 2081/2090 - Escenario B2.

Se observa una disminución generalizada de los excesos hídricos en la región, aunque menos acentuada que para el Escenario A2. Los excesos medios anuales conservan un gradiente de aumento hacia el Noreste, similar al período de referencia, pero el área con excesos se reduce y los montos anuales son menores a los de aquel período.

También se observa un aumento de los déficit en la región, aunque más atenuado y menos generalizado que para el Escenario A2. Los déficit medios anuales presentan un gradiente de aumento hacia el Noroeste y alcanzan valores de hasta 600 mm/año.

La Figura 16 muestra las isóneas de variación (negativa) entre los excesos medios anuales del período 2081/2090 - Escenario B2 y del período de referencia.

La Figura 17 muestra las isóneas de variación (positiva) entre los déficit medios anuales del período 2081/2090 - Escenario B2 y del período de referencia.

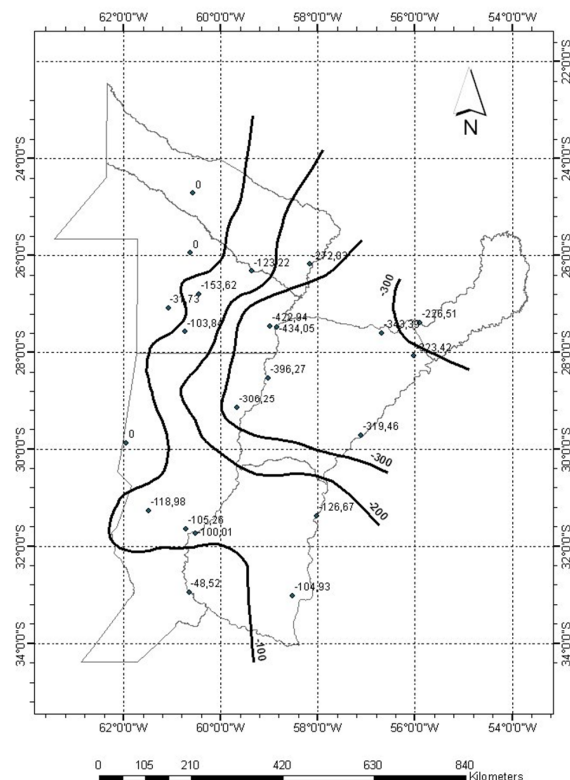


Figura 16. Variación entre los excesos medios anuales del período 2081/2090 - B2 y del período 1981/1990 [mm]

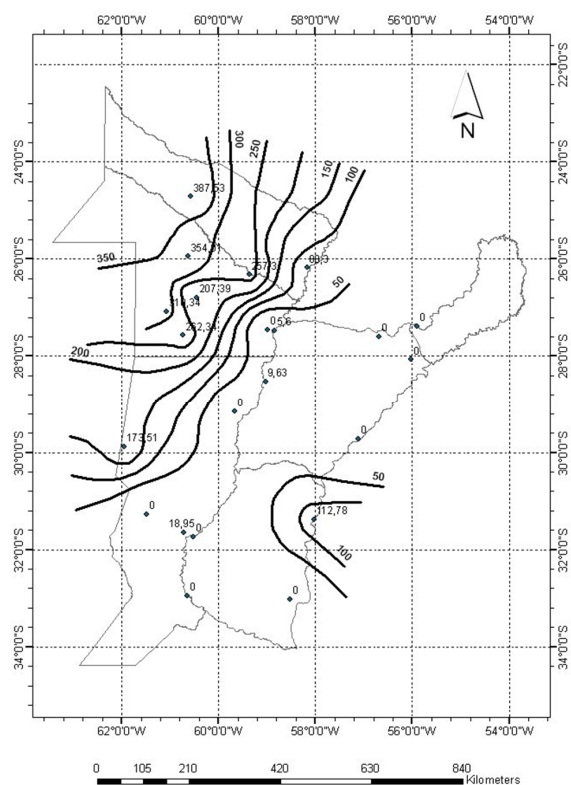


Figura 17. Variación entre los déficit medios anuales del período 2081/2090 - B2 y del período 1981/1990 [mm]

Los resultados obtenidos en este estudio presentan las incertidumbres propias de las proyecciones climáticas, ya que se consideraron como entrada al modelo de balance valores sintéticos de lluvia y temperatura simulados por un modelo climático regional.

Es sabido que las proyecciones del clima a lo largo del siglo XXI están caracterizadas por diferentes fuentes de incertidumbre, entre las cuales se pueden mencionar la incertidumbre asociada al escenario de emisión, la incertidumbre asociada a la variabilidad interna de los modelos climáticos, tanto globales como regionales y la incertidumbre debida a los modelos mismos (Dirección de Cambio Climático de Argentina, CI-MA, Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2009).

Sin embargo, el calentamiento global es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. La tendencia lineal a 100 años para el período 1906-2005 es de $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, superior a la tendencia de $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ correspondiente al período 1901-2000. De proseguir las emisiones de gases de efecto inerna-

do a una tasa igual o superior a la actual, el calentamiento aumentaría y el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente mayores que los observados durante el siglo XX (IPCC, 2008).

En consecuencia, surge la necesidad de que los gobiernos de la región planifiquen medidas de adaptación para mitigar los efectos del cambio climático, como por ejemplo obras que permitan asegurar la disponibilidad de agua para consumo humano en las zonas que serán más afectadas.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que los efectos esperados del cambio climático en la región LM para la década 2081-2090, considerando los escenarios de emisión A2 y B2, son los siguientes:

- Se espera una drástica disminución de los excesos hídricos en la región. Esta disminución se produciría fundamentalmente por aumento de la evapotranspiración, debido al aumento de la temperatura del aire, e implicaría una reducción tanto de la escorrentía directa como de la recarga subterránea. Los cursos locales, cuya escorrentía se genera por lluvias caídas dentro de la región en estudio, verían reducidos sus caudales medios, lo que implicaría un cambio en la tendencia de aumento registrada en las últimas 3 décadas.
- Se espera un aumento significativo de déficit hídrico en la región. Los principales impactos del aumento de déficit hídrico serían: i) necesidad de incorporar o aumentar el abastecimiento de agua para riego en la región durante meses de primavera-verano, ii) dificultad para sostener la producción agrícola y el abastecimiento de agua para consumo humano con recurso hídrico local en los sectores Centro-Oeste de las provincias de Formosa y Chaco, iii) posible extinción o modificación de ecosistemas en estos sectores, debido a la magnitud y permanencia de déficit hídrico durante casi todo el año.
- Los efectos serían más severos para el Escenario A2.
- Los resultados obtenidos en este estudio presentan las incertidumbres propias de las proyecciones climáticas, ya que se consideraron como entrada al modelo de balance

valores sintéticos de lluvia y temperatura simulados por un modelo climático regional. Sin embargo, el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire en el último siglo, por lo que es necesario que los gobiernos de la región planifiquen medidas de adaptación para mitigar los efectos del cambio climático.

LISTA DE SÍMBOLOS

Déf: Déficit anual
 P: Precipitación
 Etr: Evapotranspiración real
 Exc: Exceso de agua
 ΔR : Variación de la reserva de agua utilizable por las plantas
 Esc: Escorrentía directa
 Per: Percolación al acuífero
 R: Reserva de agua utilizable por las plantas
 Etp: Evapotranspiración potencial
 $R_{m\acute{a}x}$: Reserva de agua máxima utilizable por las plantas
 W_{cc} : Capacidad de campo del suelo
 T: Temperatura
 ΔExc : Variación de los excesos medios anuales
 $\Delta D\acute{e}f$: Variación de los déficit medios anuales.

REFERENCIAS

- Barros V., (2008). El cambio climático y sus efectos sobre la Cuenca del Plata. Revista Hydria No. 18, <http://hydriaweb.com.ar/kb/entry/140/>
- Centro de Investigación del Mar y la Atmósfera (CIMA), (2005). 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. Nuñez M., Solman S., Menéndez C., Rolla A. y Cabré M., <http://medioambiente.gov.ar/archivos/web/UCC/File/modelos.pdf>
- Dirección de Cambio Climático de Argentina, CIMA, Agencia de Cooperación Internacional del Japón, (2009). Seminario Internacional: Escenarios Climáticos y Medidas de Adaptación. Conclusiones: Me-
- sa de Trabajo sobre Modelos Climáticos, <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=6582>
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), (2006). Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos en el Litoral- Mesopotamia, http://aplicaciones.medioambiente.gov.ar/archivos/web/UCC/File/vulnerabilidad_mesopotamia.pdf
- Grassi, C.J., (1998). Fundamentos del riego. CIDIAT, 3a. Edición, 393 pp, Venezuela.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1995. Atlas de Suelos de la República Argentina. Fundación Argentina, Aeroterra.
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), (2000). Special Report on Emissions Scenarios, www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), (2008). Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
- Saurral, R., Mezher R. y Barros V., (2006). Assessing long-term discharges of the Plata River. 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography Foz do Iguazu, Brazil - Editado en CD- ISBN 85-17-00023-4.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, (2004). Estadística Hidrológica de la República Argentina, <http://www.hidricosargentina.gov.ar/estadisticaHidro.html>
- Thornthwaite, C. y Holzman B., (1942). Measurement of Evaporation from Land and Water Surfaces. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 817.
- Thornthwaite C. y Mather J., (1955). The water balance. Publications in climatology, Vol. VIII, No. 1, Drexel Institute of Technology, New Jersey.