

# Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional

Penalba, O. C. y V. C. Pántano

## RESUMEN

Las distintas variables involucradas en la interacción suelo-atmósfera fueron analizadas en Sudamérica a partir de siete Modelos Climáticos Globales (MCG) del CMIP5. Dos períodos diferentes fueron utilizados: 1970-2005 como período climático de referencia para el experimento *historical* y 2065-2100 para las proyecciones bajo el escenario futuro (Representative Concentration Pathways) RCP 8.5. Se evaluó la sensibilidad climática de la humedad de suelo y el escurrimiento a la precipitación y evapotranspiración con foco en la región de secano de Argentina. El análisis reveló cuáles son las variables más sensibles para cada MCG.

Finalmente, los cambios futuros en los flujos de agua basados en los escenarios futuros de cambio climático fueron analizados en Sudamérica para las variables más sensibles. A pesar de que se proyectan aumentos tanto en la precipitación como en la evapotranspiración, algunos modelos muestran que los flujos de agua en el suelo responden a los incrementos en la precipitación. En base a los resultados de este estudio, no se recomienda el cálculo del ensamble para la humedad de suelo y el escurrimiento, sino que se sugiere el estudio por separado y sólo para aquellas variables sensibles al cambio climático.

**Palabras clave:** Balance hídrico; interacción suelo-atmósfera; escenarios de emisión futura.

Penalba, O. C. and V. C. Pántano, 2019. Soil water fluxes projections from global climate models of CMIP5 in South America and its regional impact. RADA X: 1-13

## SUMMARY

The several variables involved in soil-atmosphere interaction were analyzed in South America from seven Global Climate Models (GCM) of CMIP5. Two different periods were used: 1970–2005 as climate reference for *historical* experiment and 2065–2100 for projections under the Representative Concentration Pathways scenario RCP 8.5. We assessed the climate sensitivity of soil moisture and runoff to precipitation and evapotranspiration focused on

the rainfed agriculture region of Argentina. The analysis revealed which are the more sensible variables for each GCM.

Finally, future changes in water fluxes based on future scenarios of climate change were analyzed in South America for the more sensible variables. Even though both precipitation and evapotranspiration are projected to increase, some models showed that soil water fluxes respond to increases in precipitation. Based on the results of this study, the ensemble of soil moisture and runoff is not recommended but we better suggest to study separately only for those variable sensible to climate change.

**Keywords:** Water balance; soil-atmosphere interaction; future emission scenarios.

*O. C. Penalba y V. C. Pántano: Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón 2, 2° piso – Ciudad Universitaria, C1428EGA Buenos Aires, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, C1033AA, Buenos Aires, Argentina. Correspondencia a: penalba@at.fcen.uba.ar*

## INTRODUCCIÓN

Las interacciones que caracterizan al sistema climático implican que el cambio en las variables de un subsistema repercute en los demás. En un contexto de cambio climático, los distintos acoplamientos que forman parte del sistema suelo-atmósfera pueden ser analizados a partir de los Modelos Climáticos Globales (MCGs). La Fase 5 del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (Taylor *et al.*, 2012) reúne una variedad de MCGs que han crecido en complejidad a lo largo del tiempo, mejorando la representación de los procesos e incorporando nuevas incertidumbres asociadas a las distintas parametrizaciones. Sin embargo, aún presentan cierta dispersión entre ellos y en la definición de algunas variables, como aquellas involucradas en el balance hídrico del suelo.

A escala global, se han llevado a cabo algunos estudios sobre la interacción suelo-atmósfera, a partir de los MCGs del CMIP5. Por ejemplo, Dirmeyer *et al.* (2013) analizan los cambios proyectados en la interacción entre el suelo y la atmósfera a partir de 15 modelos del CMIP5 y concluyen que la misma se fortalecerá en la mayor parte del globo. Los autores indican que este resultado se debe a un aumento del control que realiza la humedad del suelo sobre los flujos de superficie en la baja tropósfera. En esa misma línea, Seneviratne *et al.* (2013) analizan el impacto

de las proyecciones futuras en los mecanismos de feedback entre suelo y atmósfera a partir de 5 modelos del CMIP5. Los autores advierten que los cambios proyectados en los regímenes de humedad de suelo impactarán en la temperatura media y extrema localmente y en latitudes medias. Sin embargo, hay pocos trabajos que abordan esta problemática a partir de los MCGs del CMIP5 en el Sudeste de Sudamérica, más específicamente en la región oriental húmeda y semi-húmeda de producción agrícola en secano de la Argentina (RS). Esta región constituye la principal base productiva, alimentaria y de exportación de la Argentina, organizándose como una región de suma importancia para la agricultura y ganadería, entre otros sectores productivos.

En un análisis más regional, se encuentran algunos trabajos en base a Modelos Climáticos Regionales (Sörensson y Menendez; 2011; Pessacg y Solman, 2012; Spennemann, 2015; entre otros). Cabe destacar los trabajos de Ruscica *et al.* (2015) y Zaninelli *et al.* (2018) que analizan los cambios proyectados para los principales flujos de interacción entre el suelo y la atmósfera: precipitación y evapotranspiración, en base a modelos climáticos regionales. Los autores concluyen que el Sudeste de Sudamérica se caracteriza por una tendencia significativa hacia condiciones más húmedas dadas por un incremento de agua disponible y de precipitación por sobre evapotranspiración.

Al llevar a cabo un estudio basado en MCGs, se deben tener en cuenta varios aspectos sobre la selección del grupo de modelos y el cómputo del ensamble. En primer lugar, determinados modelos representan mejor las variables climáticas en algunas regiones mientras que sobreestiman o subestiman en otras. A partir de esta variabilidad entre los modelos, se recomienda el uso de un "ensamble" multi-modelos que mejora el desempeño debido a la cancelación de los errores individuales por compensación (Knutti *et al.*, 2010). Knutti *et al.* (2013) indican que el ensamble puede estar sesgado por la inter-dependencia entre modelos por origen institucional o por códigos compartidos. Es por ello que los autores recomiendan que la selección busque la máxima independencia posible entre los modelos para mejorar el desempeño del ensamble.

Este tipo de metodologías es aplicable a las variables climáticas, como temperatura y precipitación, cuya definición es coincidente entre los modelos. Sin embargo, se encuentran en la bibliografía diferencias en la definición y cómputo de los flujos de agua que participan del submodelo suelo de cada MCG del CMIP5. Por lo tanto, las respuestas de estos flujos a los cambios en las variables climáticas también van a diferir entre los distintos modelos seleccionados.

A pesar de las limitaciones que presentan los MCGs, es un recurso que se utiliza para brindar información a los tomadores de decisiones políticas y económicas de diversos sectores y sobre el cual se generan convenios y compromisos políticos a nivel regional y global a largo plazo. Por lo tanto, la comunidad científica debe advertir sobre dichas limitaciones en la interpretación de las salidas de los MCGs.

A partir de lo expuesto, el objetivo de este trabajo es evaluar la sensibilidad en la respuesta de los principales flujos de agua involucrados en la interacción suelo-atmósfera en Sudamérica, con especial foco en la región de secano de Argentina, y analizar los cambios proyectados, a partir de los MCGs del CMIP5.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo a escala mensual, en Sudamérica, con especial atención en la región de producción agrícola en secano de la Argentina (Figura 1).

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron datos observacionales de precipitación mensual en puntos de retícula del Global Precipitation



**Figura 1.** Área de estudio considerada para el análisis e identificación de la región de secano: RS (28°S-38°S; 58°O-64°O).

Centre (GPCC) Full Data Reanalysis v6 (Schneider *et al.*, 2011) y salidas de los MCGs derivados de la base multi-modelo del CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012). Para el análisis del tiempo presente se utilizó el experimento *historical* en el período 1970-2005 y las proyecciones bajo el escenario futuro (Representative Concentration Pathways) RCP 8.5 para el período 2065-2100.

La selección de los modelos consistió en 3 etapas. En primer lugar, se identificaron aquellos modelos disponibles para los experimentos con los que se iba a trabajar. Con el objetivo de utilizar un conjunto de modelos independientes (Knutti *et al.*, 2013), el proceso continuó con la selección de un solo modelo por institución. Debido a que algunos modelos pertenecientes a instituciones distintas presentan similitudes en sus códigos, cuando dos modelos comparten el mismo código del sub-modelo suelo, se seleccionó sólo uno de ellos. Finalmente, se estudiaron las parametrizaciones del sub-modelo suelo de cada modelo y se seleccionaron aquellos que permitían la mejor comparación con resultados previos (Pántano y Penalba, 2017). A partir de este proceso de selección, se dispuso de 7 MCGs detallados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Detalle de los Modelos Climáticos Globales seleccionados del CMIP5.

Modelo	ID de la Institución (País)	Submodelo Atmósfera	Sub-modelo Suelo y Referencias	Referencia del modelo
<b>ACCESS 1.0</b>	CSIRO-BOM (Australia)	AGCM v1.0	MOSES2 (Cox et al., 1999; Essery et al., 2001 y Essery y Clark, 2003)	Bi et al. (2013)
<b>CanESM2</b>	CCCMA (Canadá)	CanAM4	CLASS2.7 y CTEM1 (Arora y Matthews, 2009 y Arora y Boer, 2010)	Arora et al. (2011) y Christian et al (2010)
<b>CESM1 (CAM5)</b>	NSF-DOE-NCAR (Estados Unidos)	Community Atmosphere Model 5 (CAM5)	CLM4 (Oleson et al., 2010)	Lawrence et al. (2011)
<b>EC-EARTH</b>	EC-EARTH	IFS	Htessel (Balsamo et al., 2009)	Hazeleger et al. x2010).
<b>IPSL-CM5A-MR</b>	IPSL (Francia)	LMDZ4	ORCHIDEE (Krinner et al., 2005 y De Rosnay y Polcher, 1998)	Dufresne et al. (2013)
<b>MIROC5</b>	MIROC (Japón)	MIROC-AGCM6	MATSIRO (Takata et al., 2003)	Watanabe et al (2010)
<b>MPI-ESM-MR</b>	MPI-M (Alemania)	ECHAM6	JSBACH basado en BETHY (Knorr, 2000) y ECHAM5 (Roeckner et al., 2003)	Raddatz et al. (2007)

Para una mejor comparación de los resultados, las salidas de los MCGs y los datos observados fueron interpolados a una retícula común de 2° por 2°, utilizando el método de interpolación bilineal (Accadia *et al.*, 2003). El análisis se realizó para cada uno de los modelos y para ensamble multi-modelo.

La relación entre los flujos de agua involucrados en el sub-modelo de cada MCG se consideró a partir de la siguiente ecuación general de balance de humedad de suelo mensual basada en el principio de conservación de masa:

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t} = PP - ET \pm E + otrosflujos \quad (1)$$

donde HS es la humedad del suelo; PP la precipitación; ET la evapotranspiración y E el escurrimiento. La mayoría de los modelos discriminan las variables HS y E en valores totales y superficiales. En este estudio, teniendo en cuenta las características de la región de interés, no se incluyen en el análisis los ingresos de agua al suelo por riego y por derretimiento de nieve. A su vez,

debido al enfoque climatológico del mismo, no se tienen en cuenta los flujos de menor escala como, por ejemplo, la intercepción de precipitación por parte del canopeo. A partir de la ecuación (1), las variables que fueron utilizadas y sus unidades originales se detallan en la Tabla 2. Las unidades de los flujos de agua (precipitación, escurrimiento y evapotranspiración) fueron convertidas a mm de espesor de la lámina de agua por mes y la humedad de suelo a mm de espesor de la lámina de agua.

Los experimentos del CMIP5 consideran a la HS superficial en los primeros 10 cm del suelo, sin embargo su metodología de cálculo depende del modelo, al igual que la estimación del escurrimiento. Es por ello que para el análisis de estos flujos se evalúa la sensibilidad de las distintas variables para cada modelo a partir de probabilidades condicionales y el análisis estadístico de tablas de contingencia a través del estadístico Chi2 (Wilks, 2006).

**Tabla 2.** Variables utilizadas de los Modelos Climáticos Globales. (El nombre corto corresponde a las siglas con que fueron identificadas en este trabajo)

Variable	Nombre corto	Unidades originales	Submodelo
<b>Precipitación</b>	PP	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Atmósfera
<b>Evaporación</b>	ET	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Atmósfera
<b>Humedad en la porción más alta de la columna de suelo.</b>	HS sup	kg m <sup>-2</sup>	Suelo
<b>Contenido total de humedad en el suelo</b>	HS total	kg m <sup>-2</sup>	Suelo
<b>Escurrimiento superficial</b>	E sup	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Suelo
<b>Escurrimiento total</b>	E total	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Suelo

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**1) Balance entre precipitación y evapotranspiración (exp. *Historical*)**

El estudio fue llevado a cabo a escala mensual y anual y para uno de los modelos seleccionados y el ensamble. A modo de síntesis, algunos resultados serán mostrados en los meses enero y julio y otros a escala anual.

Inicialmente, se validó la precipitación de los MCGs en comparación con las observaciones de la base de datos del GPCC. En la Figura 2 se muestran los resultados del *bias* porcentual de los valores medios de PP de los meses de enero y julio con respecto a las observaciones, calculado según la siguiente ecuación:

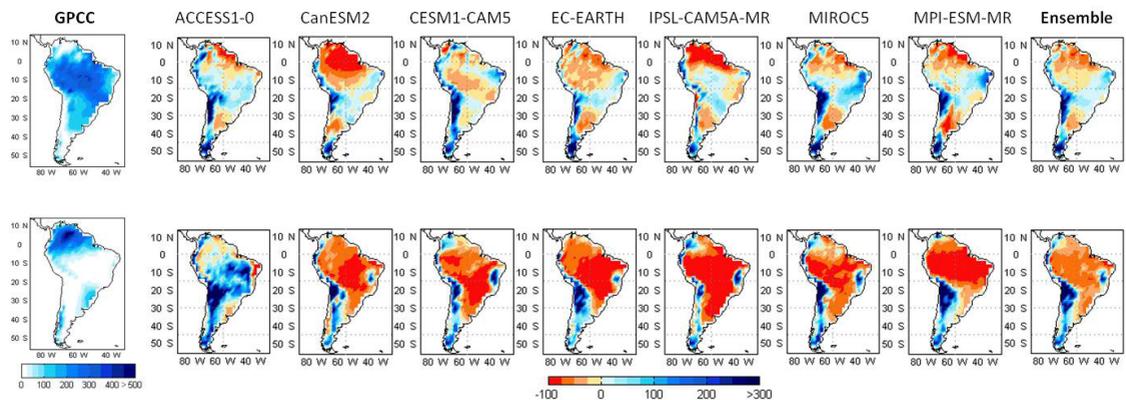
$$Bias (\%) = \frac{(\text{Modelo} - \text{observaciones})}{\text{observaciones}} * 100 \quad (2)$$

La mayoría de los modelos subestiman la PP en la región del Amazonas y hacia el Sudeste de Sudamérica. Estas áreas se extienden o reducen según el mes (no se muestra). En el caso del ACCESS 1.0, sobreestima en algunas zonas del Amazonas. En general, en julio, las áreas de subestimación en el Amazonas se intensifican y extienden hacia el sur hasta la región RS. También se intensifica la sobreestimación del modelo ACCESS 1.0. Hacia el oeste (Cordillera de los Andes) y al sur de 40°S, los modelos sobreestiman la precipitación. Barros *et al.* (2002) advierte que los errores en los Andes se deben a la dificultad de los modelos en describir el flujo cercano a superficie y el ciclo diario. Sobre el noreste de

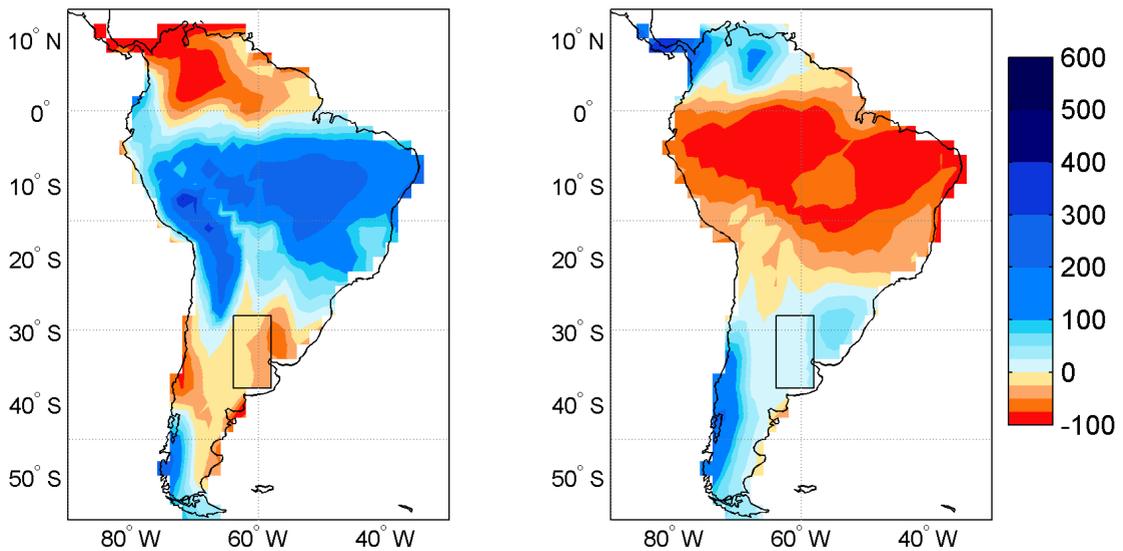
Brasil, se observa una sobreestimación de PP para algunos modelos. En cuanto a las magnitudes, el modelo que presenta las mayores diferencias sobre la región de interés de este estudio es el IPSL-CM5A-MR que supera la subestimación del 50% en julio. El ensamble sigue el mismo patrón de subestimación en el Amazonas y región RS y sobreestimación sobre los Andes y noreste de Brasil, principalmente. Mayor información sobre esta validación se puede consultar en Pántano (2016).

Posteriormente, se evaluaron los valores medios mensuales de PP-ET, integrando las limitaciones encontradas en la validación de la precipitación a fin de advertir sobre la interpretación del resultado. En la Figura 3 se presentan estos resultados para enero y julio, para el ensamble. En el Sur del Amazonas y centro de Sudamérica, las mayores PP características de los meses estivales prevalecen por sobre la ET; a pesar de que, en esa región, la PP es subestimada por los modelos. Por el contrario, durante los meses fríos, PP-ET es negativo. Sin embargo, debido a la subestimación de PP, no se puede ser concluyente sobre los resultados para este mes. En el Noroeste de Sudamérica los máximos de PP se dan en julio, de manera que en la figura se observa PP-ET negativo en enero y PP-ET positivo en julio. En el Sudoeste de la Patagonia, los altos valores de PP superan la baja ET todo el año, aunque la PP allí es sobreestimada. En el Norte de la Patagonia y centro-oeste de Argentina, la ET supera a la PP en enero. En la región de Secano (recuadro Figura 3), también ET supera a PP en enero pero el balance es de menor magnitud, mientras que en julio PP-ET es positivo con valores cercanos a cero.

Dada la importancia de estos resultados, en



**Figura 2:** Panel izquierdo: Campos medios de precipitación acumulada mensual del GPCC. Paneles hacia la derecha: *Bias* porcentual (%) de los MCGs y el ensamble respecto a la base de datos GPCC en Sudamérica (superior: enero; inferior: julio).



**Figura 3.** Distribución espacial de PP-ET media en mm para enero (izquierda) y julio (derecha), para el período 1970-2005, a partir del ensamble. En el recuadro se indica la región RS.

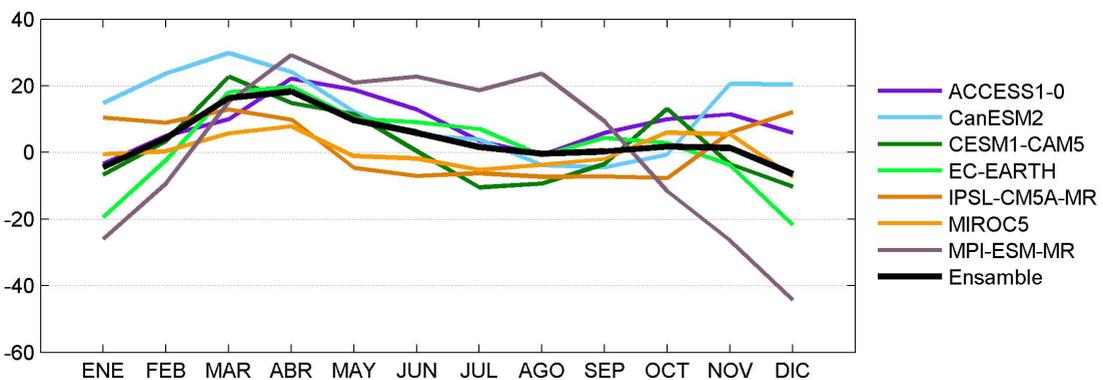
particular en la región de secano, se evalúa la representación del ciclo anual de PP-ET por parte de cada uno de los modelos (Figura 4). De la Figura se observa un predominio de PP por encima de ET en los meses de otoño y primavera. En los meses de invierno, en los que tanto PP como ET disminuyen (Pántano *et al.*, 2014), los modelos presentan valores bajos de PP-ET mientras que en los meses de verano predomina ET sobre PP.

### Respuesta del suelo

El comportamiento será distinto para cada modelo, ya que depende de las parametrizaciones y ecuaciones termo-dinámicas del submodelo

suelo correspondiente a cada uno. Al respecto, en esta sección se analizan los flujos de cada modelo, para la región RS en particular.

Para ello se identifican los valores medios de los totales anuales de cada uno de los flujos que intervienen en la ecuación (1). En la Tabla 3 se muestran estos valores a escala anual promediados en la región RS. Los casilleros en blanco en la Tabla se deben a que algunos modelos no tienen disponibles las 4 variables. En primer lugar se analiza si los flujos anuales cumplen con las expectativas básicas de relación entre ellos, a pesar de las diferencias en sus parametrizaciones. A partir de este análisis, se



**Figura 4.** Ciclo anual medio de PP-ET media en mm, para el período 1970-2005, promediado en la región RS, para cada MCG y el ensamble.

corroborar que las variaciones de humedad de suelo son muy pequeñas, consistente con la escala de trabajo, mientras que la ET representa el flujo saliente más importante del subsistema suelo. El modelo ACCESS1.0 presenta valores de escurrimiento superficial mayores que los demás modelos y se debe a que en su submodelo MOSES 2.2 los excesos de agua en el suelo son removidos lateralmente contribuyendo a valores más altos de escurrimiento superficial (Kowalczyk *et al.*, 2013). El valor medio de PP del modelo CESM1-CAM5 es cercano al del modelo ACCESS 1.0, pero debido a que el primero genera valores más altos de ET, el escurrimiento, total y superficial, es menor. El modelo CanESM2 es el que presenta la mayor fracción de salida por escurrimiento total.

Con respecto al escurrimiento, no todos los modelos lo consideran como flujo entrante y saliente de la retícula. Para identificar cómo se comporta esta variable en cada modelo, en la Tabla 4 se contabilizan los valores positivos, negativos y nulos. Las celdas sombreadas indican aquellos modelos en los que el escurrimiento (total o superficial) contiene un gran número de ceros. Es interesante destacar que los modelos MIROC5 y CESM1-CAM5 consideran el ingreso de agua a la retícula por escurrimiento, mientras que para los demás modelos el escurrimiento es siempre mayor o igual a cero. En el caso del modelo IPSL-CM5A-MR, que presenta gran cantidad de ceros, De Rosnay y Polcher (1998) explican que

el sub-modelo SECHIBA cuantifica los valores de escurrimiento cuando el suelo está saturado y PP-ET es positivo, de lo contrario el escurrimiento está igualado a cero. Cabe destacar que si bien el escurrimiento total y superficial están disponibles en las salidas del CMIP5 de este modelo, el sub-modelo SECHIBA sólo considera escurrimiento profundo, por lo cual el escurrimiento superficial informado en la Tabla 4 para el modelo IPSL-CM5A-MR corresponde al escurrimiento profundo o total, dando valores iguales para las dos variables. Idéntica situación ocurre con el modelo MPI-ESM-MR en el que la variable corresponde al escurrimiento superficial (Roeckner *et al.*, 2003). A partir de los resultados de la Tabla 4, los casos en que el escurrimiento contiene una gran número de ceros fueron considerados independientes de la variabilidad de PP-ET y, por lo tanto, no se tuvieron en cuenta en el análisis que se continúa.

Con el fin de identificar la sensibilidad del escurrimiento y la humedad de suelo, se estudió la coherencia con PP-ET a partir de rangos de percentiles, separando en condiciones normales (P40 a P60), valores altos (P60 a P80), bajos (P20 a P40) y extremos (<P20 y >P80). A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la probabilidad de que la variable se encuentre en cada categoría para el modelo MPI-ESM-MR, condicionado a valores extremos bajos de PP-ET. En este caso, el escurrimiento superficial responde al balance PP-ET con una probabilidad del 53% de presentar

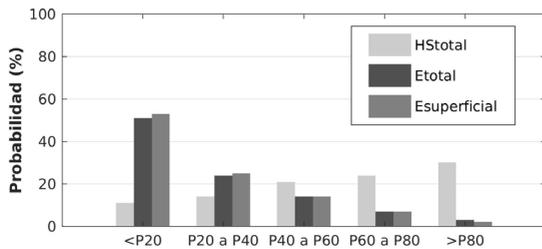
**Tabla 3.** Valores medios anuales de precipitación (PP), evapotranspiración (ET), variación de humedad de suelo (VHS) total y superficial, escurrimiento (E) total y superficial; promediados sobre la región RS.

	PP	ET	VHS <sub>total</sub>	VHS <sub>sup</sub>	E <sub>total</sub>	E <sub>sup</sub>
<b>ACCESS1.0</b>	884	783	0	0		123
<b>CanESM2</b>	908	761	0	0	145	12
<b>CESM1-CAM5</b>	879	857	0	0	25	25
<b>EC-EARTH</b>	820	796				39
<b>IPSL-CM5A-MR</b>	478	458	0	0	34	2
<b>MIROC5</b>	560	556	0	0	24	22
<b>MPI-ESM-MR</b>	665	643	1		20	12

**Tabla 4.** Cantidad de casos de Escurrimiento (total y superficial) positivo, negativo o nulo.

	E <sub>total</sub>			E <sub>sup</sub>		
	>0	0	<0	>0	0	<0
<b>ACCESS1.0</b>				10368	0	0
<b>CanESM2</b>	10332	36	0	1556	8812	0
<b>CESM1-CAM5</b>	9259	0	1109	10368	0	0
<b>EC-EARTH</b>				10368	0	0
<b>IPSL-CM5A-MR</b>	1726	8642	0	1726	8642	0
<b>MIROC5</b>	7812	2538	18	4840	5477	51
<b>MPI-ESM-MR</b>	10368	0	0	10367	0	1

valores extremos bajos. El escurrimiento total también responde a PP-ET mientras que no se evidencia la respuesta en la humedad de suelo total. La relación entre todos los intervalos de PP-ET y, por ejemplo, el escurrimiento superficial se resume en una Tabla de Contingencia como se muestra en la Tabla 5.



**Figura 5.** Probabilidad de ocurrencia de humedad del suelo (HS) total, escurrimiento (E) total y superficial dados valores extremos bajos de PP-ET, para el modelo MPI-ESM-MR

En general, para los diferentes modelos, los resultados muestran que algunas variables son más sensibles a las variaciones de PP-ET que otras. Con el fin de evaluar la significancia de esta relación se aplicó un test de Chi2, con un nivel significancia 5% (Tabla 6).

El análisis revela que las variables más sensibles para cada modelo son:

- ACCESS 1.0: humedad de suelo superficial y escurrimiento superficial.
- CanESM2: humedad de suelo total y superficial y escurrimiento total.
- CESM1-CAM5: humedad de suelo superficial y escurrimiento total y superficial.
- EC-EARTH: ninguno
- IPSL-CM5A-MR: humedad de suelo superficial.
- MIROC5: humedad de suelo superficial.
- MPI-ESM-MR: escurrimiento total y superficial.

**Tabla 6.** Valor del estadístico Chi2 empírico de la relación entre cada variable (HStotal, HSsup, Ettotal, Esup) y PP-ET de cada modelo. Se indican las variables que muestran independencia con PP-ET (rojo) y las que presentan dependencia significativa (azul) (valor del estadístico Chi2 teórico: 28.9; significancia: 5%).

Chi2	HS total	HS sup	E total	E sup
ACCESS 1.0	18	105		391
CanESM2	36	169	43	
CESM1 (CAM5)	1	98	515	538
EC-EARTH				2
IPSL-CM5A-MR	25	170		
MIROC5	24	107		
MPI-ESM-MR	27		325	353

## 2) Proyecciones en el período 2065-2100

El incremento en la emisión de gases de efecto de invernadero ha contribuido, entre otros factores, a los cambios observados en las variables climáticas a escala global y regional (IPCC, 2007). La respuesta del sistema climático a este forzante seguirá teniendo consecuencias en el futuro, aún si las emisiones se estabilizan en el valor estimado de los últimos años (IPCC, 2014).

A partir del escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 para el periodo 2065-2100, se analizó el cambio porcentual proyectado para las principales variables involucradas en los flujos de agua (PP y ET), en forma multiplicativa (futuro/historical).

En las Figuras 6, 7 y 8 se muestran estos resultados para los meses de enero y julio, para PP, ET y balance entre ambas variables, respectivamente, a partir del ensamble. Esta información se complementa con el acuerdo (*agreement*) entre los 7 MCGs con respecto a los aumentos.

Tanto en enero como en julio, se proyectan aumentos de PP en la Región RS (Figura 6). En enero, la mayoría de los modelos concuerdan con estos aumentos en dicha región, al igual que al este de Brasil y Perú, mientras que se proyectan disminuciones en el extremo sur y extremo norte

**Tabla 5.** Probabilidad de ocurrencia de los flujos en las distintas categorías, condicionados a las distintas condiciones de PP-ET, para el modelo MPI-ESM-MR.

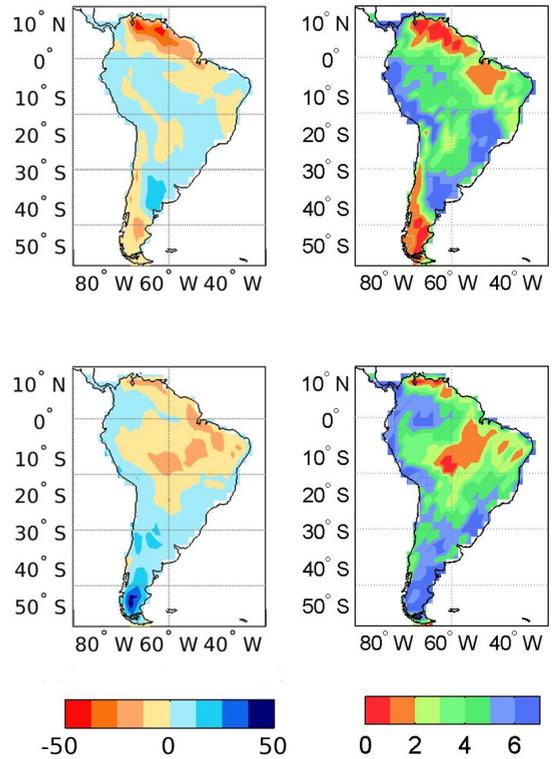
MPI-ESM-MR		Esup				
< P20		P20 a 40	P40 a 60	P60 a 80	> P80	
PP-ET	< P20	53	25	14	7	2
	P20 a 40	31	35	21	9	3
	P40 a 60	10	25	39	18	8
	P60 a 80	4	10	27	41	18
	> P80	1	2	7	22	68

de Sudamérica con alto acuerdo entre modelos. En julio, hay acuerdo en el aumento en la región RS y centro-este de Brasil, y en la disminución en el noreste de Brasil y centro de Chile.

Para la ET (Figura 7) se proyectan incrementos en la mayor parte de Sudamérica en enero y del centro hacia el sur en julio. Las disminuciones de ET se proyectan en el noreste de Brasil y la Patagonia en enero.

Dado que las proyecciones indican incrementos tanto en PP como en ET, en la Figura 8 se presentan los resultados para PP-ET. Particularmente, en la región de interés, los incrementos tanto de PP como de ET se compensan y, por lo tanto, se observa un bajo acuerdo entre modelos en PP-ET (Figura 8), aumentando la incertidumbre. Aún así, el aumento proyectado para enero coincide con lo obtenido por Menéndez *et al.* (2016) para los meses de verano.

Finalmente, con el foco en la región RS, se analizaron las proyecciones en el escurrimiento para aquellos modelos en los que esta variable es sensible a los cambios de PP-ET. En la Figura 9 se puede observar que en todos los casos responden



Figuras 7. Como Figura 6, para ET.

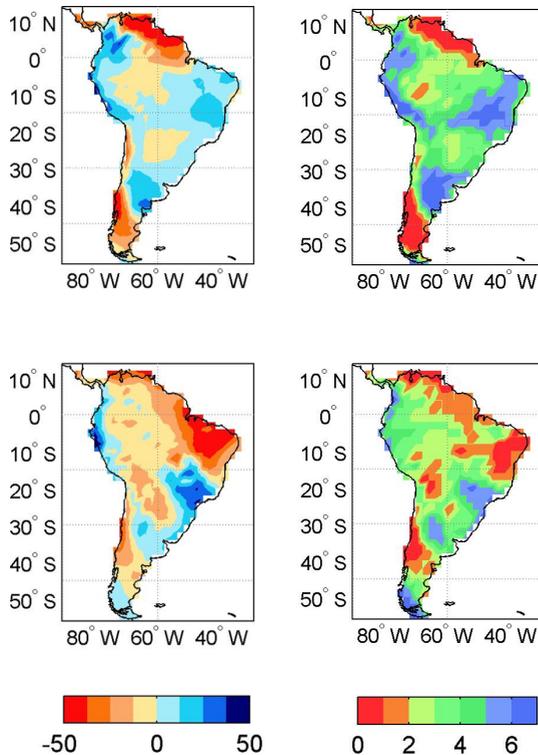
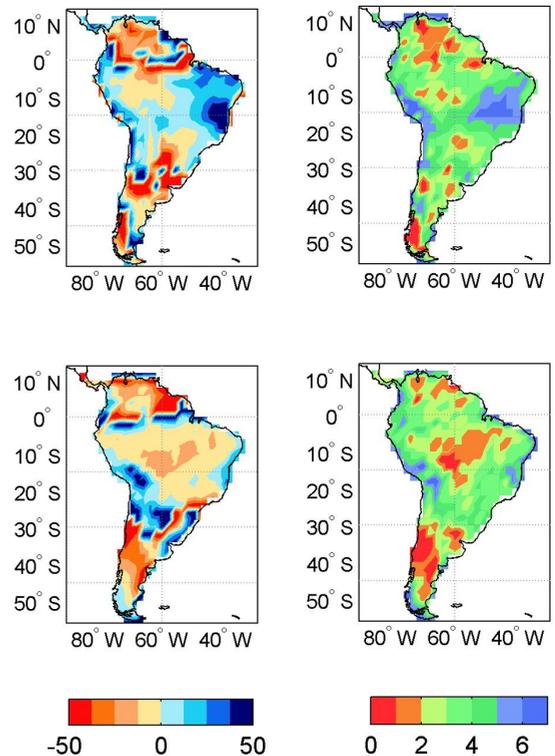
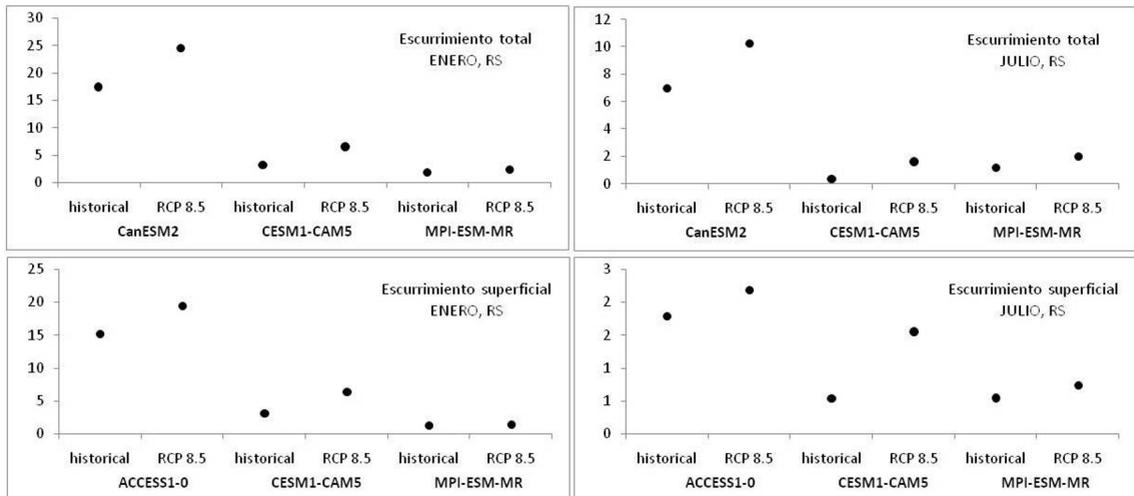


Figura 6. Cambio proyectado para precipitación (panel izquierdo) y acuerdo entre los 7 MCGs en el aumento (panel derecho) para enero (superior) y julio (inferior).



Figuras 8. Como Figura 6, para PP-ET.



**Figura 9.** Esgurrimento total (arriba) y superficial (abajo) futuro (RCP8.5) e *historical*, en los modelos más dependientes de los valores de PP-ET para enero (izquierda) y julio (derecha).

con aumentos, pero de distinta magnitud. Por ejemplo, se proyectan aumentos de esgurrimento superficial según ACCESS 1.0 y CESM1-CAM5i en enero y julio, mientras que los cambios en MPI-ESM-MR son pequeños. A su vez, se proyectan aumentos de esgurrimento total según CanESM2 y CESM1-CAM5 en ambos meses de mayor magnitud que según MPI-ESM-MR.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los principales flujos de agua involucrados en la interacción entre el suelo y la atmósfera, a partir de las salidas de los modelos seleccionados del CMIP5 y sus proyecciones bajo el escenario de cambio climático.

Por un lado, se identificaron las variables más sensibles a las variaciones de PP-ET para cada modelo en Sudamérica y particularmente en la Región de Secano; este análisis se llevó a cabo por intervalos de percentiles. El resultado pone en evidencia que la sensibilidad de cada variable depende de las ecuaciones que describen las parametrizaciones de cada modelo. Por ejemplo, el suelo puede saturar a partir de distintos umbrales para distintos modelos, por lo cual una determinada magnitud de precipitación va a aportar al aumento de humedad del suelo para algunos y va a generar esgurrimento en otros. Este resultado está en concordancia con Williams *et al.* (2012) que explican que la simulación del impacto de las precipitaciones sobre la humedad

del suelo, dependen de las ecuaciones propuestas para el esgurrimento y la infiltración. Los autores encuentran que, debido a que los modelos utilizan distintas parametrizaciones, la representación de los acoplamientos entre la temperatura, la precipitación y la humedad del suelo y en el tiempo de respuesta a escala diaria es diferente para cada modelo.

Por otro lado, se mostraron los aumentos proyectados para precipitación y evapotranspiración en Sudamérica. Estos resultados están en concordancia con las proyecciones obtenidas por Ruscica *et al.* (2015) y Menéndez *et al.* (2016) a partir de un Modelo Climático Regional. En respuesta a los aumentos de precipitación, aquellos modelos más sensibles proyectan aumentos en el esgurrimento. Complementariamente a este resultado, Pántano *et al.* (2017) muestran que los aumentos proyectados para la temperatura influyen en el balance hídrico con un aumento de la demanda atmosférica de vapor de agua. De acuerdo a los resultados encontrados en este trabajo, ese aumento no alcanzaría a amortiguar el aumento del balance entre la precipitación y la evapotranspiración. Sin embargo, es necesario puntualizar que los resultados que se mostraron son en términos medios y que el cambio puede ocurrir en la variabilidad. Con lo cual, un aumento del balance entre el ingreso y la salida de agua al suelo no deja exenta a la región de la posible ocurrencia de extremos de sequía. En este sentido, Penalba y Rivera (2016) muestran que las proyecciones para un escenario futuro presentan incrementos en la frecuencia de

sequías caracterizadas por duraciones más cortas y mayor severidad. Los impactos sobre el balance hídrico no sólo dependen de la temperatura y la precipitación, sino también del tipo de suelo y del uso de la tierra.

En este trabajo se buscó identificar las variables más sensibles a la respuesta entre PP y ET y evaluar su incertidumbre. Los resultados muestran las diferencias entre los modelos en la representación de los flujos de agua involucrados en el balance hídrico del suelo que luego se deriva en una respuesta diversa del escurrimiento a los cambios proyectados en precipitación y evapotranspiración. En base a los resultados obtenidos, este estudio recomienda que el análisis de los flujos de agua en el suelo a partir de MCGs se realice individualmente para cada modelo por separado y no a partir de un ensamble, a diferencia de lo que se recomienda para las variables climáticas.

## AGRADECIMIENTOS

A los proyectos UBACyT2018 20020170100 357BA y CONICET PIP 0137.

## BIBLIOGRAFÍA

- Accadia, C.; S. Mariani, M. Casaioli, A. Lavagnini, A. Speranza, 2003. Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids. *Weather and Forecasting* 18 (5): 918-932.
- Arora, V.K. y G.J. Boer, 2010. Uncertainties in the 20th century carbon budget associated with land use change, *Global Change Biology* 16(12): 3327-3348.
- Arora V.K. y H.D. Matthews, 2009. Characterizing uncertainty in modeling primary terrestrial ecosystem processes. *Global Biogeochemical Cycles* 23 (2): 14 pp.
- Arora V.K.; J.F. Scinocca, G.J. Boer, J.R. Christian, K.L. Denman, G.M. Flato, V.V. Kharin, W.G. Lee y W.J. Merryfield, 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters* 38 (5): 6 pp.
- Balsamo G.; P. Viterbo, A. Beljaars, B. Van Den Hurk, M. Hirschi, A.K. Betts y K. Scipal, 2009. A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. *American Meteorological Society* 10(3): 623-643.
- Barros, V.; M. Doyle, M. González, I. Camilloni, R. Bejaran, R.M. Cafferla, 2002. Climate variability over subtropical South America and the South American monsoon: A review. *Meteorologica* 27: 33-57.
- Bi D.; M. Dix, S.J. Marsland, S. O'Farrell, H.A. Rashid, P. Uotila, A.C. Hirst, E. Kowalczyk, M. Golebiewski, A. Sullivan, H. Yan, N. Hannah, C. Franklin, Z. Sun, P. Vohralik, I. Watterson, X. Zhou, R. Fiedler, M. Collier, Y. Ma, J. Noonan, L. Stevens, P. Uhe, H. Zhu, S.M. Griffies, R. Hill, C. Harris y K. Puri, 2013. The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 63: 41-64
- Christian J.R.; V.K. Arora, G.J. Boer, C.L. Curry, K. Zahariev, K.L. Denman, G.M. Flato, W.G. Lee, W.J. Merryfield, N.T. Roulet y J.F. Scinocca, 2010. The global carbon cycle in the Canadian Earth system model (CanESM1): Preindustrial control simulation, *Journal of Geophysical Research* 115, no G3
- Cox P.M.; R.A. Betts, C.B. Bunton, R.L.H. Essery, P.R. Rowntree y J. Smith, 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* 15(3): 183-203.
- De Rosnay, P. y J. Polcher, 1998. Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrology and Earth System Sciences* 2 (2-3): 239-255.
- Dirmeyer, P.A.; Y. Jin, B. Singh, X. Yan, 2013. Evolving Land-Atmosphere Interactions over North America from CMIP5 Simulations. *Journal of Climate* 26 (19): 7313-7327
- Dufresne J.L.; M.A. Foujols, S. Denvil, A. Caubel, O. Marti, O. Aumont, Y. Balkanski, S. Bekki, H. Bellenger, R. Benshila, S. Bony, L. Bopp, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, F. Cheruy, F. Codron, A. Cozic, D. Cugnet, N. de Noblet, J.P. Duvel, C. Ethé, L. Fairhead, T. Fichefet, S. Flavoni, P. Friedlingstein, J.Y. Grandpeix, L. Guez, E. Guilyardi, D. Hauglustaine, F. Hourdin, A. Idelkadi, J. Ghattas, S. Joussaume, M. Kageyama, G. Krinner, S. Labetoulle, A. Lahellec, M.-P. Lefebvre, F. Lefevre, C. Levy, Z.X. Li, J. Lloyd, F. Lott, G. Madec, M. Mancip, M. Marchand, S. Masson, Y. Meurdesoif, J. Mignot, I. Musat, S. Parouty, J. Polcher, C. Rio, M. Schulz, D. Swingedouw, S. Szopa, C. Talandier, P. Terray, N. Viovy, N. Vuichard, 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* 40: 2123-2165.
- Essery R.; M. Best y P. Cox, 2001. MOSES 2.2 Technical Documentation. Nota técnica 30 del Hadley Centre del 14 de Agosto de 2001.
- Essery R. y D.B. Clark, 2003. Developments in the MOSES 2 land-surface model for PILPS 2e. *Global and Planetary Change* 38(1): 161-164.
- Hazeleger W.; C. Severijns, T. Semmler, S. Stefanescu, S. Yang, X. Wang, K. Wyser E. Dutra, J.M. Baldasano,

- R. Bintanja, P. Bougeault, R. Caballero, A.M.L. Ekman, J.H. Christensen, B. van den Hurk, P. Jimenez, C. Jones, P. Kållberg, T. Koenigk, R. McGrath, P. Miranda, T. Van Noije, T. Palmer, J.A. Parodi, T. Schmith, F. Selten, T. Storelvmo, A. Sterl, H. Tapamo, M. Vancoppenolle, P. Viterbo y Willén U.; 2010. EC-Earth: a seamless earth-system prediction approach in action. *Bulletin of American Meteorological Society* 91: 1357–1363.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds: Core Writing Team, Pachauri R.K. y Meyer L.A.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Knorr W.; 2000. Annual and interannual CO<sub>2</sub> exchanges of the terrestrial biosphere: Process based simulations and uncertainties. *Global Ecology and Biogeography* 9(3): 225-252.
- Knutti, R.; R. Furrer, C. Tebaldi, J. Cermak, G.A. Meehl, 2010. Challenges in combining projections from multiple climate models. *J Clim* 23(10): 2739–2758.
- Knutti, R.; D. Masson, A. Gettelman, 2013. Climate model genealogy: generation CMIP5 and how we got there. *Geophys Res Lett* 40(6): 1194–1199.
- Kowalczyk, E.; L. Stevens, R. Law, M. Dix, Y. Wang, I. Harman, K. Haynes, J. Srbnovsky, B. Pak, T. Ziehn, 2013. The land surface model component of ACCESS: description and impact on the simulated surface climatology. *Australian Met. and Oceanographic Journal* 63: 65–82.
- Krinner G.; N. Viovy, N. de Noblet Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch y I.C. Prentice, 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1): 33 pp.
- Lawrence D.M.; K.W. Oleson, M.G. Flanner, P.E. Thornton, S.C. Swenson, P.J. Lawrence, X. Zeng, Z.-L. Yang, S. Levis, K. Sakaguchi, G.B. Bonan y A.G. Slater, 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(1): 27 pp.
- Menéndez, C.G. ; P.G. Zaninelli, A.F. Carril, E. Sánchez, 2016. Hydrological cycle, temperature, and land surface atmosphere interaction in the La Plata Basin during summer: Response to climate change. *Climate Research* 68(2-3): 231-241.
- Oleson K.W.; D.M. Lawrence, G.B. Bonan, M.G. Flanner, E. Kluzek, P.J. Lawrence, S. Levis, S.C. Swenson, P.E. Thornton, A. Dai, M. Decker, R. Dickinson, J. Feddema, C.L. Heald, F. Hoffman, J.F. Lamarque, N. Mahowald, G.-Y. Niu, T. Qian, J. Randerson, S. Running, K. Sakaguchi, A. Slater, R. Stockli, A. Wang, Z.-L. Yang, X. Zeng y X. Zeng, 2010: Technical description of version 4.0 of the Community Land Model. *Nota Técnica NCAR*, 257.
- Pántano V.; 2016. Sensibilidad de la interacción suelo-atmósfera a los extremos de temperatura y precipitación en el sudeste de Sudamérica. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, <https://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd1-282/cgi-bin/library.cgi?p=about&c=tesis> Buenos Aires.
- Pántano, V.C. y O.C. Penalba, 2017. Soil response to long-term projections of extreme temperature and precipitation in the southern La Plata Basin. *Theoretical and Applied Climatology* 134: 1257–1268
- Penalba, O.C.; J.A. Rivera, 2016. Regional aspects of future precipitation and meteorological drought characteristics over Southern South America projected by a CMIP5 multi-model ensemble. *International Journal of Climatology* 36: 974 - 986
- Pessacg, N.; S. y Solman, 2012. Effects of land-use changes on climate in southern South America. *Climate Research* 55: 33–51
- Raddatz T.J.; C.H. Reick, W. Knorr, J. Kattge, E. Roeckner, R. Schnur, K.-G. Schnitzler, P. Wetzela y J. Jungclaus, 2007. Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty first century? *Climate Dynamics* 29: 565-574.
- Roeckner, E.; G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, A. Tompkins. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Max Planck Institut für Meteorologie. Report No. 349
- Ruscica, R.C.; C.G. Menendez, A.A. Sörensson, 2015. Land surface–atmosphere interaction in future South American climate using a multi model ensemble. *Atmospheric Science Letters* 17(2): 141-147.
- Schneider, U.; A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, M. Ziese, 2011. GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. GPCP, Offenbach, Germany, DOI: 10.5676/DWD\_GPCP/FD\_M\_V6\_050
- Seneviratne, S.I.; M. Wilhelm, T. Stanelle, B. van den Hurk, S. Hagemann, A. Berg, F. Cheruy, M.E. Higgins, A. Meier, V. Brovkin, M. Claussen, A. Ducharne, J.L. Dufresne, K.L. Findell, J. Ghattas, D.M. Lawrence, S. Malyshev, M. Rummukainen, B. Smith, 2013. Impact of soil moisture climate feedbacks on CMIP5 projections: First results from the GLACE CMIP5 experiment. *Geophysical Research Letters* 40 (19): 5212-5217.
- Sörensson A. y C. Menendez. 2011. Summer soil–precipitation coupling in South America. *Tellus* 63A: 56–68

- Spennemann P.; 2015. Estudio sobre la variabilidad temporal y espacial de la humedad del suelo sobre Sudamérica, y su rol en modular la evapotranspiración y la precipitación en distintas escalas temporales. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Takata K.; S. Emori, y T. Watanabe; 2003. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and planetary Change*, 38(1): 209-222.
- Taylor, K.E.; R.J. Stouffer, G.A. Meehl, 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design." *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93: 485-498.
- Watanabe M.; T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe y M. Kimoto; 2010. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate* 23(23): 6312-6335.
- Wilks, D.; 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Second Edition. Academic Press, 627 pp.
- Williams, C.J.R.; R.P. Allan, D.R. Kniveton, 2012. Diagnosing atmosphere-land feedbacks in CMIP5 climate models. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044003.
- Zaninelli, P.G.; C.G. Menéndez, M. Falco, N. López-Franca, A.F. Carril, 2018. Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 1-12.