

## Análisis de sensibilidad en la construcción de ensembles de RCMs de variables meteorológicas

P. Olmos<sup>(1)</sup>, S. García<sup>(1)</sup>, J.D. Giraldo<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Politécnica de Cartagena, Grupo de I+D+i Gestión de Recursos Hídricos, Unidad Predepartamental de Ingeniería Civil. Paseo Alfonso XIII, 52. 30203. Cartagena, España.  
patricia\_olmos@live.com

<sup>(2)</sup> Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.

### RESUMEN

España, por su situación geográfica y características, es uno de los países europeos con mayores problemas ambientales relacionados a la escasez hídrica y las sequías, los cuales se pueden agravar debido al impacto de los usos del suelo y del calentamiento global. En particular, diversos estudios evidencian cambios del ciclo hidrológico en cuencas semiáridas, con tendencias crecientes en las temperaturas, y decrecientes en las precipitaciones, asociadas a una mayor variabilidad climática. Los Modelos Climáticos Regionales (o RCMs por sus siglas en inglés) constituyen una valiosa herramienta para analizar, comprender y predecir las tendencias a medio y largo plazo de las componentes del ciclo hidrológico. Sin embargo, las proyecciones divergentes obtenidas a partir de diferentes RCMs demuestran las muchas incertidumbres asociadas. Las metodologías de combinación de múltiples RCMs (o ensemble en inglés), permiten la cuantificación y reducción de incertidumbres en las proyecciones. En este trabajo se presenta una versión mejorada del método REA (Reliability Ensemble Averaging) diseñado para generar información probabilística sobre el cambio climático a partir de conjuntos de simulaciones de RCMs, en el que el criterio de convergencia se ha eliminado. Se presentan resultados del análisis de sensibilidad de la metodología aplicada para la generación de ensembles, principalmente en temperaturas, en la España Peninsular. Desde los mismos se demuestra que se mejora la fiabilidad de las proyecciones climáticas, y al considerarlas como input a modelos hidrológicos se espera una mayor robustez en las proyecciones hidrológicas.

**Palabras clave:** CDFs; Cambio climático; REA modificado.

### 1. Introducción

Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, el clima ha cambiado los últimos 100 años. Existe evidencia robusta sobre la intensificación actual y futura del ciclo hidrológico, y es necesario mejorar la habilidad para la monitorización y predicción de impactos asociados con el cambio de los regímenes hidrológicos [1]. En España es prioritario disponer de los mejores escenarios regionalizados posibles de cambio climático futuro, con objeto de poder realizar análisis de riesgos e impactos para determinar las posibles medidas de adaptación.

A pesar de los progresos alcanzados en la modelación climática con los RCMs, aún persisten incertidumbres debidas a la parametrización física, a la resolución espacio-temporal y a la variabilidad interna de los

modelos. Esto indica que una aproximación de tipo combinación de modelos o “ensemble” es necesaria para obtener información robusta sobre el cambio climático (CC), y para estimar adecuadamente las incertidumbres asociadas [2]. Dado que no es posible concluir qué modelo parece el más confiable de entre todos los disponibles, una evaluación global de las proyecciones del cambio climático debería basarse en la información proporcionada por una combinación o ensemble de todos ellos para simular la variabilidad de la temperatura [3]. Estos autores trabajan con Modelos Climáticos Regionales (RCM). Los sesgos se reducen y las simulaciones de los Modelos Climáticos Globales (GCMs) mejoran promediando las cuatro simulaciones de RCMs con las que cuentan [4], lo que sugiere que ensembles de RCMs (forzados por GCMs) ayudan a compensar errores sistemáticos tanto de los modelos

anidados como de los considerados como forzamientos.

Por otro lado, asumir que un modelo es más idóneo para simular la función de densidad de probabilidad (PDF) observada de una variable implica que se tendrá una mayor confianza en las proyecciones de este modelo [5].

Estudios previos han usado el método REA para evaluar el rendimiento de modelos climáticos [6-7]. En la bibliografía se encuentran distintos trabajos [6,8], sobre estimación de PDFs de variables hidrometeorológicas utilizando proyecciones climáticas. Sin embargo, la habilidad del modelo para representar el clima actual no parece ser suficiente para avalar su robustez para simular el clima futuro [6].

El principal objetivo de este trabajo es construir escenarios climáticos plausibles desde RCMs, para amplias zonas geográficas y distintas variables hidroclimáticas (precipitaciones y temperaturas), aplicando una técnica parsimoniosa y robusta de generación de ensembles multimodelo en cada celda de la malla. Asimismo, se estudia la sensibilidad de la metodología aplicada para la generación de los ensemble multimodelo.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Área de estudio

Se trabaja en toda la extensión de la España Peninsular. El clima de España se caracteriza por un gradiente incremental de precipitación en dirección Sureste-Noroeste, con valores de menos de 250 mm/año en el Sureste a mayores valores (1600 mm/año) en el Oeste de los Pirineos, la costa Cantábrica y especialmente en la región de Galicia. Las temperaturas aumentan de Norte a Sur, y en las tierras del interior los valores descienden de poniente a levante. En el interior de la meseta, se registra la mayor amplitud térmica, llegando a 20°C. Enero es el mes con la mínima temperatura media, mientras que Agosto es el mes con el promedio más elevado.

### 2.2 Bases de datos

Considerando la zona de estudio seleccionada, se ha realizado una recopilación de datos mensuales meteorológicos observados, así como aquellos simulados provistos por el Proyecto Europeo ENSEMBLES [9]. Los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima mensual corresponden a los proporcionados por el experimento RT2B del Proyecto Europeo ENSEMBLES para Europa. De

entre todos los modelos disponibles, se trabajó con los diecisiete modelos seleccionados para realizar estudios en España [10]. Esta selección se basó en la resolución espacial (tamaño de celda 25\*25 km), periodo temporal (con datos en el periodo de control 1961-1990), y en evitar sesgar los ensembles. Los RCMs estaban anidados en distintos GCMs, para el escenario A1B.

También se trabajó con la base de datos meteorológicos observados denominada Spain02 (período 1950-2007) de la Península Ibérica, que provee datos de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas diarias con una resolución espacial de 0,2° (~20\*20 km) [11].

### 2.3 Cálculo del PDF ensemble

El método REA (Reliability Ensemble Averaging) [3] proporciona una medida de la fiabilidad, la media y el rango de incertidumbre del cambio climático simulado a partir de conjuntos de diferentes GCMs y RCMs. En este trabajo se presenta una modificación del método original, el método REA modificado [7], con el fin de mejorar algunas limitaciones del enfoque original. Esencialmente se mejora la forma en que se calculan los pesos del modelo. El nuevo modelo abandona el uso del criterio de convergencia a futuro, que cuantificaba la confiabilidad de cada RCM en base a la distancia al “mejor estimado” de la respuesta del clima futuro. Los cálculos del factor de fiabilidad del modelo  $R_i$  están basados en funciones de distribución acumuladas empíricas (e-CDF) estacionales y anual (Eq. 1), y una medida cuantitativa del grado de ajuste entre las funciones de probabilidad. Los e-CDF fueron construidos desde datos observados y RCMs para el periodo de control 1961-1990.

$$R_i = (\text{Invierno}^a * \text{Primavera}^b * \text{Verano}^c * \text{Otoño}^d * \text{Anual}^e)^{1/(a+b+c+d+e)} \quad (1)$$

Donde a, b, c, d y e son parámetros definidos por el usuario. Para identificar los parámetros a aplicar al *ensemble*, es necesario estudiar la similaridad distribucional entre los RCMs y los datos observados, puesto que el sólo uso de la media o desviación estándar no es suficiente para una comparación completa de la variabilidad. Como ejercicio de sensibilidad, vamos a considerar aquí cuatro formulaciones diferentes de los parámetros de REA, correspondientes a distintas combinaciones de los parámetros (Tabla 1). En REA1 todos los parámetros se consideran igual a 1. Este será el caso considerado de referencia.

La métrica para estimar el desempeño de los modelos corresponde al valor  $p$  del test de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov (SK) para dos muestras [12].

La probabilidad asociada a un cambio simulado por el RCM es proporcional al factor de fiabilidad del modelo  $R_i$ . El factor de fiabilidad normalizado  $P_m$  [6] puede ser interpretado como la probabilidad asociada a cada RCM.

Por último, para la construcción de ensembles, se le dio más peso a los RCM con mayor factor de fiabilidad normalizado  $P_m$ , utilizando técnicas de bootstrapping.

### 3. Resultados y Discusión

Dado que se ha trabajado con más de 900 sitios (celdas) en la España Peninsular, con el objeto de un análisis en detalle de los resultados obtenidos, sólo se presentan resultados en algunos sitios seleccionados. Se ha analizado con mayor detalle en trece puntos distintos de España, el valor  $p$  del test de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogorov y el sumatorio del error medio anual del ensemble frente al observado para cada una de las combinaciones (REA1 a REA4) de precipitaciones, temperaturas máximas, mínimas y medias. A modo de ejemplo, se exponen sólo los resultados de un punto (Tabla 2 y Tabla 3) situado al norte de Extremadura. Se destaca que para el caso de la variable temperatura máxima, no se obtienen mejoras apreciables en el valor de  $p$  y el error, para las 3 combinaciones presentadas. Luego en la variable temperaturas mínimas, se observan efectos en la CDF, al considerar las distintas combinaciones. No obstante, desde los resultados obtenidos para las otras variables consideradas (temperaturas medias y precipitaciones mensuales) se aprecia que no hay ninguna combinación de parámetros, de entre las consideradas, que implique una mejora en el ensemble para todos los puntos estudiados. Ello puede deberse a que tanto la precipitación media como la temperatura media, al ser promedios, suavizan los resultados.

Además para identificar qué factores de ponderación presentan los mejores resultados, se ha estudiado la similaridad distribucional entre el ensemble y los datos observados con los CDFs, para los 13 puntos elegidos y cada uno de los casos considerados (REA1 a REA4). En la Figura 1 se presenta el CDF de verano de temperaturas máximas para las 4 opciones de REA. Se ha observado, que en los CDFs en los cuales se deja de tener en cuenta un solo factor de ponderación o dos (REA2, REA3) no se

detecta con claridad sensibilidad en los resultados, los cambios son imperceptibles. Esto también ocurre en el caso de la precipitación media (resultados no mostrados), para cualquier caso de REA, no se aprecia sensibilidad visualmente. Es de subrayar que los cambios en las colas de las distribuciones de temperaturas o precipitaciones, son diferentes en magnitud que los observados.

### 4. Conclusiones

Desde los resultados obtenidos, se concluye que no se puede generalizar pues el comportamiento del modelo propuesto es distinto según la variable analizada (precipitación media, temperatura máxima, media o mínima). Es de destacar, que no se ha encontrado una combinación de parámetros que mejore la de referencia (todos los parámetros son igual a 1). Además con algunas combinaciones de REA, la sensibilidad del modelo es inapreciable. Otros problemas que se presentan a la hora de plantear la generación de un *ensemble* de RCMs, es la selección del escenario de CC, y evitar sesgar el ensemble al considerar distintos RCMs forzados con el mismo GCM. Resulta de interés analizar el impacto que presenta en la ponderación, el forzamiento de distintos GCMs, así como el impacto de distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (A1, A2, B1 y B2) (GEI).

### 5. Agradecimientos

Se agradece el soporte recibido desde el proyecto del Plan Nacional CGL2012-39895-C02-01, "Evaluación de la variabilidad hidroclimática desde combinaciones multimodelo climáticas regionales (HYDROCLIM)", financiado por la Secretaría de Estado de Investigación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), y fondos FEDER.

### 6. Referencias bibliográficas

- [1] Huntington, T. G. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J. Hydrol.*, 319, 83–95.
- [2] Paeth, H., Hall, N.M.J., Gaertner, M., Alonso, M.D., Moumouni, S., Polcher, J., Ruti, P.M., Fink, A.H., Gosset, M., Lebel, T., Gaye, A.T., Rowell, D.P., Moufouma-Okia, W., Jacob, D., Rockell, B., Giorgi, F., and Rummukainen, M. 2011. Progress in regional downscaling of West African precipitation, *Atmos. Sci. Let.*, 12: 75–82. DOI:10.1002/asl.306.

[3] Giorgi F. and Mearns LO. 2002. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “reliability ensemble averaging” (REA) method. *J Clim* 15(10):1141–1158.

[4] Diallo I., Sylla M. B. , Giorgi F. , Gaye A. T. and Camara M. 2012. Multimodel GCM-RCM Ensemble-Based Projections of Temperature and Precipitation over West Africa for the Early 21st Century. Hindawi Publishing Corporation. *International Journal of Geophysics*. Volume 2012, Article ID 972896, 19 pages.

[5] Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., and McAneney, J. 2007. Evaluation of the AR4 climate models’ simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *J. Climate*, 20:4356–4376.

[6] Giorgi F. and Mearns LO. 2003. Probability of regional climate change based on reliability ensemble averaging (REA) method. *Geophys Res Lett* 30(12):311–314

[7] Xu Y., Gao X., Giorgi F. 2010. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections. *Clim Res* 41:61–81.

[8] Wigley, T.M.L. and Raper, C.B. 2001. Interpretation of high projections for global-mean warming. *Science*, 293:451–454.

[9] Christensen J. H., Rummukainen M., and Lenderink G. 2009. Formulation of veryhigh - resolution regional climate model ensembles for Europe. In *ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*, edited by: van der Linden, P. and Mitchell, J. F. B., Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 47–58.

[10] García Galiano, S. G., Giraldo Osorio, J. D. 2012. Assessing uncertainties in the building of ensemble RCMs over Spain based on dry spell lengths probability density functions. *Clim Dyn*. DOI 10.1007/s00382-012-1381-5

[11] Herrera S., Gutierrez JM., Ancell R., Pons MR., Frias MD., Fernandez J. 2010. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int J Climatol*. doi:10.1002/joc.2256.

[12] Sheskin DJ. 2000. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures, 2nd edn. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton

## Tablas y Figuras

**Tabla 1.** Diferentes formulaciones de los factores de ponderación de REA en Eq. 1.

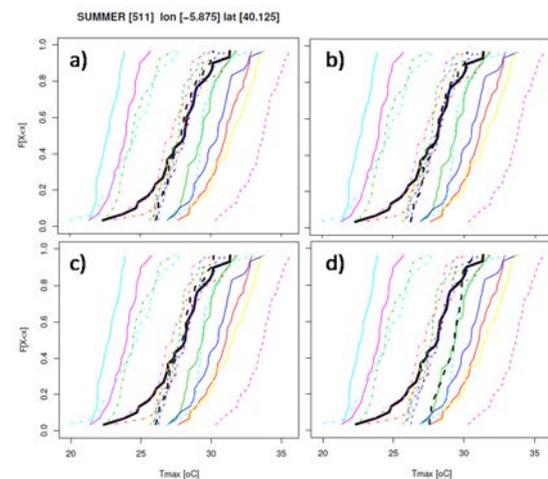
Métodos	Parámetros
REA1	a=1,b=1,c=1,d=1,e=1
REA2	a=1,b=1,c=1,d=1,e=0
REA3	a=0,b=1,c=0,d=1,e=1
REA4	a=0,b=0,c=0,d=0,e=1

**Tabla 2.** Valores de p del test de SK para el sitio 511 y sumatorio del error en valor absoluto del ensemble para Tmax.

p	REA1	REA2	REA3	REA4
In	0.23	0.24	0.39	0.20
Pr	1	0.99	0.95	0.52
Ver	0.61	0.41	0.61	0.009
Ot	0.46	0.47	0.21	0.14
An	0.94	0.95	0.66	0.61
Σ el	3.28	3.51	3.9	8.6

**Tabla 3.** Valores de p del test de SK para el sitio 511 y sumatorio del error en valor absoluto del ensemble para Tmin.

p	REA1	REA2	REA3	REA4
In	0.47	0.48	0.07	0.0006
Pr	0.07	0.21	0.47	3.71e <sup>-5</sup>
Ver	0.008	0.14	0.04	1.16e <sup>-6</sup>
Ot	0.21	0.10	0.13	0.22
An	0.71	0.99	0.99	0.89
Σ el	7.05	6.22	7.03	19.04



**Figura 1.** CDFs de verano de Tmax en el sitio 511 con datos observados (negro), ensemble (negra discontinua) y RCMs (en color) para el periodo 1961–1990: a) REA1; b) REA2; c) REA3 y d) REA4.