



# **Sistema estadístico de predicción estacional para la gestión de los embalses en España**

**José Voces Aboy  
Eroteida Sánchez García  
Beatriz Navascués Fernández-Victorio  
Federico Franco Manzano  
Ernesto Rodríguez Camino**

**XXXIV Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica  
Española (Teruel, 29 febrero – 2 marzo 2016)  
ISBN 978-84-617-5240-9**

## Introducción

S-CimWaRe es el resultado de un grupo de trabajo multidisciplinar impulsado por AEMET y la Dirección General del Agua creado con el objetivo de desarrollar un servicio climático experimental para el apoyo a la gestión de los embalses en España. Este proyecto forma parte de las actividades de implementación en España del Marco Mundial de Servicios Climáticos y se desarrolla como un caso de estudio dentro del proyecto europeo FP7 EUPORIAS que trabaja en el desarrollo de sistemas de previsión de impactos a escala estacional y decadal para el apoyo a la toma de decisiones dependientes del clima.

En S-ClimWaRe se han seleccionado 4 embalses de las cuencas del Duero, Tajo, Ebro y Guadalquivir en los que se está probando la utilización de las predicciones climáticas estacionales (Pouget et al., 2015). El proyecto combina datos de observación hidrológicos y meteorológicos, el sistema estadístico de predicción estacional de aportaciones que se describe en este documento y un modelo de previsión de riesgos de los embalses, SIMRISK, que fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (Andreu et al., 1996). Así mismo, el proyecto contempla la formación en los temas que se van desarrollando, actividades de divulgación y un activo foro de encuentro entre los agentes implicados.

Este documento es un extracto del documento de referencia que con el título "Sistema Estadístico de Predicción Estacional para la Gestión de los Embalses en España" será publicado en el Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado durante el año 2016.

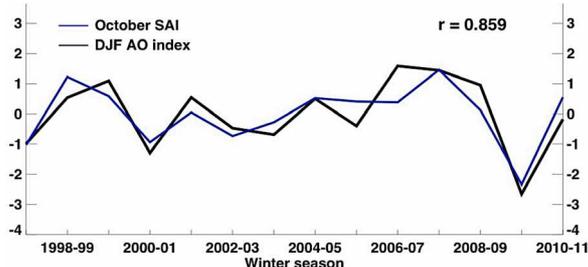
## Antecedentes

El caso de estudio se apoya en sistemas ya probados con éxito en otros países, fundamentalmente de Asia y Norteamérica, basados en la predecibilidad del clima a escala estacional que proporciona el fenómeno de El Niño. Más concretamente, el IRI (International Research Institute for Climate and Society) de EEUU, ha participado activamente en estos desarrollos (Brown et al., 2010) y sus trabajos están siendo una referencia para esta experiencia pionera en España.

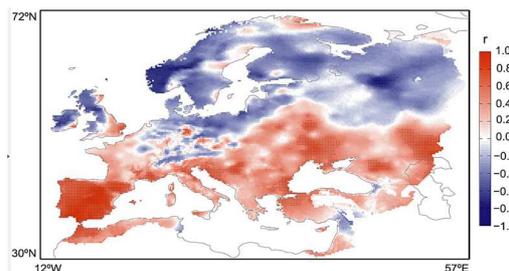
El sistema de predicción desarrollado en S-ClimWaRe explora la posibilidad de explotar fuentes de la predecibilidad de la precipitación invernal en la Península Ibérica. Cuando se examinan las herramientas más complejas de las que se dispone en el campo de la predicción climática, los modelos numéricos de circulación general océano-atmósfera, se observa (Sánchez et al., 2014a; Sánchez et al., 2014b) que en España, aunque se presentan algunas ventanas de oportunidad (como la temperatura en verano), a día de hoy su habilidad para pronosticar la precipitación es, por lo general, escasa. La precipitación en invierno en amplias zonas de España está muy relacionada con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), un conocido patrón dominante de la variabilidad del clima en la zona del Atlántico Norte (ver por ejemplo, Rodríguez-Puebla et al. 1998). En general, se puede afirmar que los modelos de circulación general todavía muestran un poder predictivo limitado para la NAO en las escalas de tiempo estacionales con la excepción de algunos buenos resultados solo obtenidos recientemente (Scaife et al. 2014).

Por otro lado, en Cohen y Jones (2011) se muestra que la Oscilación del Ártico (AO) en invierno (de la que la NAO es una manifestación regional) está estadísticamente asociada al avance de la cobertura de nieve en Eurasia durante el mes de octubre (figura 1), y definen un índice basado en la medida de satélite de esta magnitud, el Snow Advance Index (SAI).

Haciendo uso de esta relación, a través de la cual se adquiere la capacidad de pronosticar empíricamente la NAO en invierno, los modelos de aprendizaje estadístico aparecen como una alternativa para el desarrollo de un sistema de predicción de las aportaciones en invierno. En esta línea, en Brands et al. (2012) se pone de manifiesto cómo haciendo uso del SAI apuntado anteriormente es posible hacer un pronóstico estacional de la precipitación invernal en España con una regresión lineal que utiliza como único predictor el índice de avance de la cobertura de la nieve en octubre (figura 2).



**Figura 1.** Serie temporal del SAI diario (azul) y la AO invernal (negro) para el periodo 1997/98 a 2010/11. Se ha eliminado la tendencia de ambas series y se muestra la anomalía estandarizada. El SAI se ha multiplicado por -1 para facilitar la comparación. El coeficiente de correlación es estadísticamente significativo a un nivel  $p < 0.01$ . Fuente: Cohen y Jones (2011)



**Figura 2.** Correlación entre el SAI diario y la precipitación en el trimestre dic-ene-feb. Las correlaciones estadísticamente significativas ( $\alpha=0.05$  se han sombreado). Fuente: Brands et al. (2012)

Se dan pues las condiciones para implementar un sistema empírico de predicción estacional que pronostique la aportación invernal a un embalse con ciertas garantías.

Una cuestión añadida al hablar de cualquier tipo de pronóstico, pero especialmente significativa en las predicciones estacionales, es la estimación de la incertidumbre en la predicción realizada. No se proporciona sólo el valor más probable de la variable pronosticada, si no que se da todo un abanico de posibles valores con su probabilidad de ocurrencia. Son las predicciones probabilísticas. En este caso se ha optado por generar un *ensemble* de simulaciones para representar la incertidumbre de las predicciones.

## Modelo estadístico de predicción estacional de aportaciones a los embalses

Como se ha apuntado anteriormente, en el desarrollo del sistema de predicción estacional para embalses se ha seguido la metodología propuesta por el International Research Institute for Climate and Society (Brown et al., 2010).

Una vez diagnosticada la variabilidad hidroclimática que está ligada a patrones dominantes conocidos (por ejemplo El Niño, en Asia y Norteamérica, o la NAO en la Península Ibérica en invierno), Brown et al. (2010) presentan diferentes implementaciones de sistemas de predicción estacional de aportaciones a los embalses. En los sistemas estadísticos que proponen, el primer paso consiste en encontrar una variable que actúe como predictor (el SAI en este caso) de las aportaciones a los embalses (el predictando). A continuación, se plantean diferentes alternativas para relacionar el predictor con el predictando, y construir el *ensemble* de simulaciones que dan cuenta de la estimación de la incertidumbre y que constituyen la predicción probabilística.

El módulo de predicción desarrollado en S-ClimWaRe consiste en un sistema estadístico para pronosticar, a partir del valor del SAI (disponible a comienzos de noviembre) un *ensemble* de valores de la aportación en el trimestre diciembre – enero – febrero (DEF) en un embalse determinado.

Para poder representar mejor la variabilidad hidroclimática del embalse, la predicción de aportaciones se realiza en dos pasos: primero se pronostica la NAO invernal, y a partir de ésta se predice la aportación al embalse o la precipitación.



**Figura 3.** Diagrama del sistema de predicción

El *ensemble* de aportaciones generado está compuesto por 1500 valores de aportaciones tomados de la serie histórica del embalse en cuestión. Es decir, está formado por sucesos que ya han ocurrido en el pasado. Cada suceso tendrá una frecuencia asociada, el número de veces que aparece en el *ensemble* de predicción. Esta frecuencia está directamente relacionada con la probabilidad de esa aportación.

El modelo desarrollado es totalmente aplicable a la predicción estacional de la precipitación, sin más que sustituir la serie de valores observados de aportaciones al embalse por el de precipitación.

Los datos brutos del *ensemble* generado por el sistema de predicción no son muy adecuados para ser trasladados directamente a los responsables de la gestión del embalse, sin embargo sí lo son como entrada de un sistema de apoyo a la toma de decisiones que pueden utilizar los usuarios finales. Una forma más apropiada de presentar el pronóstico a los usuarios es a través de terciles. Para ello, a partir de la serie histórica de aportaciones del embalse se generan 3 intervalos con las aportaciones “por debajo de lo normal”, “normales” y “por encima de lo normal”. Por la forma de generar los terciles, la probabilidad climatológica de que la aportación de un invierno determinado se corresponda con un determinado tercil es del 33%. La presentación por terciles es una forma habitual de suministrar la información de los pronósticos probabilistas estacionales. Clasificando los miembros del *ensemble* en los intervalos que corresponden a los terciles climatológicos, obtenemos que la probabilidad pronosticada de cada tercil será directamente proporcional a la población de miembros del *ensemble* que contiene.

## Evaluación del Sistema

El sistema desarrollado se ha evaluado mediante la realización de una serie de experimentos en 4 embalses piloto sobre un periodo retrospectivo. Además de aportaciones al embalse, el sistema ha generado predicciones estacionales de precipitación en estaciones pluviométricas del entorno.

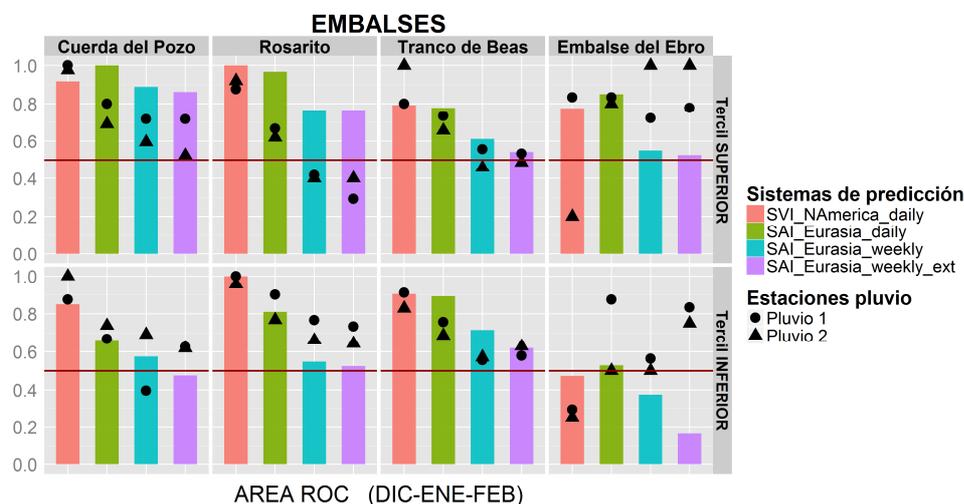


Figura 4. Área ROC para valores por encima y por debajo de los valores normales, para el periodo DEF, por embalses y sistema de predicción, tomando como periodo de verificación todos los años con datos desde 1999 a 2013. Los valores mostrados en forma de barras de colores en función del sistema de predicción, corresponden a los valores obtenidos para las aportaciones a cada embalse. Los valores de este índice de verificación obtenidos por cada sistema de predicción para la precipitación en las diferentes estaciones pluviométricas se muestran con puntos en forma de círculos y triángulos en la vertical de la aportación correspondiente.

El diseño de los experimentos afecta, entre otros, a la selección de los embalses y de las estaciones pluviométricas, y a los índices de variabilidad de la cobertura de nieve en octubre utilizados alternativamente como predictores de la NAO invernal. En este documento se exponen los resultados referentes a la capacidad de discriminación del sistema desarrollado, medida con el Área ROC como índice de verificación. La evaluación completa está disponible en el documento de referencia indicado anteriormente.

## Conclusiones

Se ha desarrollado un método empírico de predicción estacional en dos pasos que produce predicciones probabilísticas de aportaciones a los embalses o de precipitación acumulados en el periodo invernal, y que utiliza como base series temporales de datos del índice de la NAO, de índices de variabilidad de la nieve en octubre, de aportaciones a los embalses y de precipitación. El método desarrollado se ha evaluado realizando diferentes experimentos sobre un periodo de hindcast (1999-2013) en 4 embalses piloto en las cuencas del Ebro, Duero, Tajo y Guadalquivir. Las principales conclusiones de la verificación objetiva de las predicciones producidas por los experimentos llevados a cabo son las siguientes:

- La pericia del sistema de predicción depende del embalse. Hay una clara diferencia de comportamiento entre los embalses piloto de las cuencas del Guadalquivir, Tajo y Duero, y el situado en la cabecera del Ebro.
- Las predicciones estacionales de las aportaciones y precipitación en los embalses piloto seleccionados en las cuencas del Guadalquivir, Duero y Tajo muestran una pericia significativa para discriminar tanto el carácter húmedo como el carácter seco del próximo trimestre invernal (DEF). En estos embalses, las predicciones de aportaciones obtienen índices de verificación ligeramente mejores/peores que las de precipitación para el tercil superior/inferior.
- En el embalse seleccionado en la cuenca del Ebro, las predicciones de aportaciones son solo capaces de discriminar el tercil superior, aunque con peores índices de verificación que en los otros embalses estudiados. Sin embargo, en el entorno de este embalse, las predicciones de precipitación demuestran pericia para discriminar tanto el carácter húmedo como el seco del próximo trimestre invernal.
- La calidad de las predicciones estacionales de aportaciones y precipitación muestra ser muy sensible a los índices de variabilidad de la nieve en octubre usados como predictores de la NAO invernal.
- Aunque la verificación de las predicciones probabilísticas de aportaciones y precipitación indica que existe capacidad de discriminación para las distintas categorías correspondientes a los terciles superior e inferior, también refleja la existencia de sesgos en las predicciones probabilísticas.

En general, los resultados obtenidos son muy satisfactorios teniendo en cuenta la simplicidad del método utilizado.

Entre los factores que podrían contribuir a comprender el comportamiento observado del sistema de predicción, está la distribución espacial de la correlación de la precipitación invernal con la NAO y la localización de los embalses piloto seleccionados para realizar los experimentos de validación. Los embalses piloto de las cuencas del Duero, Tajo y Guadalquivir se encuentran situados en zonas en las que la precipitación invernal está fuertemente influenciada por este patrón de variabilidad climática. Sin embargo, la cornisa norte y la franja mediterránea de España presentan bajos valores de esta correlación. El Embalse del Ebro se encuentra en una zona de transición, lo cual explicaría, al menos parcialmente, la menor pericia encontrada. Sin embargo, el hecho de que las predicciones de precipitación en el entorno de este embalse verifiquen mejor que las de aportaciones, podría indicar que existen factores relevantes que sería necesario describir en el modelo empírico para las aportaciones. Entre ellos, el manto de nieve, que no contribuye al volumen de entrada al embalse hasta su fusión, que ocurre en escalas temporales más largas que el trimestre invernal.

## Reconocimientos

La colaboración de los miembros del grupo de trabajo de S-ClimWaRe ha sido esencial para el desarrollo y evaluación de este modelo de predicción estacional de aportaciones a los embalses.

La Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente ha proporcionado las series temporales de aportaciones utilizadas en este trabajo. La serie de valores mensuales del índice de la NAO empleada en este trabajo procede del Climate Prediction Center del National Weather Service de EEUU. Los productos de cobertura de nieve en rejilla usados para calcular los índices de la variabilidad de la nieve en octubre son los puestos a disposición por el National Snow and Ice Data Center de la NASA (EEUU).

## Referencias

- Andreu, J., Capilla, J., Sanchis, E., 1996. *AQUATOOL, a generalized decision-support system for water resources planning and operational management*. J. Hydrol. 177, 269–291. doi:10.1016/0022-1694(95)02963-X
- Brands, S., Manzanos, R., Gutiérrez, J. M., and Cohen, J., 2012. *Seasonal Predictability of Wintertime Precipitation in Europe Using the Snow Advance Index*. J. Climate, 25, 4023–4028. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00083.1
- Brown, C., Baroang, K. M., Conrad E., Lyon, B., Watkins, D., Fiondella, F., Kaheil, Y., Robertson, A., Rodriguez, J., Sheremata, M., and Ward, M. N., 2010. *Managing Climate Risk in Water Supply Systems*, IRI Technical Report 10-15, International Research Institute for Climate and Society, Palisades, NY, 133pp. Available online at <http://iri.columbia.edu/publications/id-1048>
- Cohen, J., and Jones, J., 2011. *A new index for more accurate winter predictions*. Geophys. Res. Lett., 38, L21701, doi:10.1029/2011GL049626.
- Pouget, L., Roldán, T., Gómez, M., Cabello, A., Rodríguez-Camino, E., Navascués, B., Voces, J., Comas, P., Pastor, F., García-Gómez, M.C., Gil, J.J., Gil, D., Galván, R., 2015. *Use of seasonal climate predictions in the water sector. International Conference on DROUGHT: Research and Science-Policy Interfacing (Valencia, Spain, 10-13 March 2015)* <https://www.crcpress.com/Drought-Research-and-Science-Policy-Interfacing/Andreu-Solera-ParedesArquiola-HaroMonteagudo-van-Lanen/9781138027794>
- Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A.H., Nieto, S., Garmendia, J., 1998. *Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian peninsula*. International Journal of Climatology 18: 299–316.
- Sánchez, E., Voces, J. and Rodríguez, E., 2014a. *Calibration and Combination of Seasonal Forecast over Southern Europe*. Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado. Available online at <http://goo.gl/aNScTp>
- Sánchez, E., Voces, J. and Rodríguez, E., 2014b. *Calibration and combination of seasonal forecasts over Southern Europe*. Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado. Available online at: [http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos\\_en\\_linea/publicaciones\\_y\\_estudios/publicaciones/CCPE\\_english/CCPE\\_SouthEurope\\_english.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/CCPE_english/CCPE_SouthEurope_english.pdf)
- Scaife, A.A., Blockley, E., Brookshaw, A., Clark, R.T., Dunstone, N., Eade, R., Fereday, D., Folland, C.K., Gordon, M., Hermanson, L., Knight, J. R., Lea, D. J., MacLachlan, C., Maidens, A., Martin, M., Peterson, A. K., Smith, D., Vellinga, M., Wallace, E., Waters, J., Williams, A., 2014. *Skillful long-range prediction of European and North American winters*. Geophys. Res. Lett., 41, 2514–2519, doi:10.1002/2014GL059637