

ANÁLISIS DE UN MODELO ESTADÍSTICO PARA EL DOWNSCALING DE LA PRECIPITACIÓN DIARIA EN UN PUNTO

J. Abaurrea⁽¹⁾, E. Álvarez⁽²⁾, J. Asín⁽¹⁾, A. C. Cebrián⁽¹⁾, Z. Gracia⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dep. de Métodos Estadísticos. Universidad de Zaragoza. abaurrea@unizar.es

⁽²⁾ AEMet, Centro de Aragón, La Rioja y Navarra. ealvarez@inm.es

Resumen

Se presenta un modelo estadístico de precipitación diaria que permitirá obtener proyecciones para dicha precipitación, en escenarios de cambio climático, en cualquier lugar. Se está ensayando con observatorios de la cuenca del Ebro. El objetivo de esta comunicación es, además, analizar el significado físico de algunas combinaciones de variables presentes en los modelos de cantidad y ocurrencia ajustados en el observatorio de Zaragoza Aeropuerto.

1. Introducción

La aplicación de un procedimiento de downscaling, dinámico o estadístico, es una fase necesaria en la generación de escenarios regionales, debido al insuficiente grado de reproducción del proceso de precipitación que logran las salidas de los modelos de circulación general (GCM), Christensen et al. (2007). La escala diaria es, al menos, el intervalo que debería utilizarse cuando nos interesan aspectos como el impacto del cambio climático en los episodios extremos o en los recursos hídricos.

El modelo que se propone consiste en una combinación de dos modelos lineales generalizados (GLM), uno de regresión logística para representar la serie binaria asociada a la ocurrencia (observar al menos 1mm de precipitación) y otro, con distribución de error Gamma, que modela la cantidad recogida en los días con precipitación.

La probabilidad de ocurrencia de precipitación en un día dado y el valor esperado de la precipitación medida se hacen depender de la situación atmosférica, resumida por variables como la presión, humedad, temperatura, nivel geopotencial, velocidad y dirección de viento, etc. La representación de estas variables explicativas (covariables) por parte del GCM debe ser adecuada, si se va a utilizar el modelo en la obtención de escenarios verosímiles de cambio.

La utilidad de este tipo de modelo se probó en el área de Zaragoza, Abaurrea y Asín (2005), usando como información atmosférica los datos de superficie y altura procedentes de las mediciones hechas en el observatorio del aeropuerto. Su

aplicación al downscaling de la precipitación se hizo usando datos generados por el GCM canadiense, CGCM2. El trabajo ha sido referenciado en una reciente revisión de técnicas de downscaling para la evaluación de impactos del cambio climático en los recursos hídricos, Fowler et al. (2007).

Nuestro objetivo actual es desarrollar un procedimiento que permita construir modelos para cualquier área, dotada sólo de un observatorio pluviométrico, con medidas de calidad y una longitud de registro suficiente. Actualmente estamos ensayando el modelo en puntos de la cuenca del Ebro; la información atmosférica necesaria proviene del reanálisis ERA-40 con resolución 2.5°x2.5°. Para construir el modelo asociado a un observatorio utilizamos la información de los cuatro nodos de ERA-40 que lo enmarcan.

En la siguiente sección se presentan los datos y variables que utilizamos como covariables potenciales; en la sección 3 se explica el proceso de construcción del modelo; la sección 4 se dedica a la presentación de los resultados obtenidos en el modelo ajustado para Zaragoza, mientras que la última sección presenta las conclusiones y las líneas de trabajo futuro.

2. Datos necesarios

Se dispone, por una parte, de la serie de precipitación diaria observada en el aeropuerto de Zaragoza en el periodo 1947-2004, proporcionada por la Agencia Estatal de Meteorología. Tras un análisis de su calidad y homogeneidad se decidió considerar los datos posteriores a 1975. Por otra, se dispone de los datos del reanálisis ERA-40, en la resolución básica 2.5°x2.5°, donde cada nodo nos proporciona información sobre un área rectangular de alrededor de 62.500 Km², ver Figura 1. Según la clasificación de Orlanski, estamos dentro de la mesoescala- α que cubre entre 200 y 2000 Km. La información disponible en ERA-40 es voluminosa ya que ofrece en cada nodo medidas a las 0h, 6h, 12h y 18h de un gran número de variables, para el periodo 1957-2002.

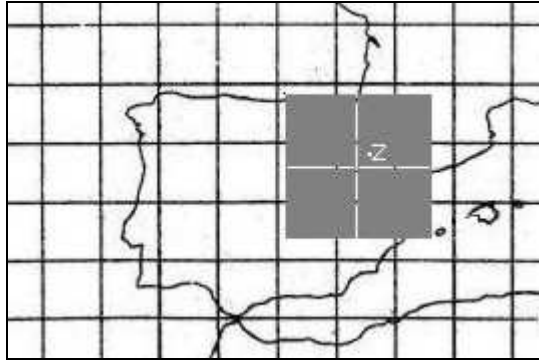


Figura 1: Tamaño y posición de las cuadrículas de ERA-40 utilizadas (en gris) y posición relativa de Zaragoza.

Variable	Nivel
Temperatura	T Superficie : sup
Presión media al nivel del mar	P 1000hPa : 1000
Geopotencial	G 925hPa : 925
Temperatura del punto de rocío	Td 850hPa : 850
Humedad específica	He 700hPa : 700
Divergencia	Di 500hPa : 500
Vorticidad relativa	Vr 300hPa : 300
Velocidad del viento	Vv
Dirección del viento	Dv
Advección de temperatura	At
Advección de humedad	Ah

Tabla 1: Variables atmosféricas y niveles geopotenciales considerados, junto con la notación empleada.

Entre las variables disponibles en ERA-40 se han utilizado aquéllas que se consideran influyentes, teniendo en cuenta, además, que figurasen en las salidas de los experimentos con GCMs que los centros de investigación ponen a disposición pública o que sus datos pudieran deducirse de la información ofrecida. No se consideró adecuado utilizar variables de las que los GCMs no fueran a generar salidas verosímiles como, por ejemplo, la nubosidad o la columna total de agua.

La Tabla 1 muestra la notación para designar las variables empleadas; hemos trabajado con 7 variables básicas (temperatura, altura geopotencial, humedad específica, componentes U y V del viento, vorticidad relativa y divergencia) en 6 niveles geopotenciales (1000, 925, 850, 700, 500 y 300hPa), más 5 variables en superficie (temperatura, punto de rocío, presión media a nivel del mar y componentes U y V del viento). En el proceso de modelización surgen variables derivadas para expresar, por ejemplo, el cambio en una variable entre dos niveles geopotenciales o el valor medio (o la diferencia) entre los valores de una variable en dos nodos a la misma hora, etc. Se ha preferido trabajar con la dirección y la velocidad del viento, en lugar de con las componentes U y V y se han definido variables para tener en cuenta efectos como la advección de humedad o de temperatura.

La dirección del viento, D_v , se introduce en los modelos mediante dos variables, el seno y el coseno del ángulo de procedencia, medido de 0 a 2π , desde el Norte en sentido horario; las variables se identifican escribiendo al final las letras 's' o 'c'. En cuanto a la velocidad del viento, se ha descompuesto en 4 variables para que pueda conocerse, aproximadamente, la dirección que tiene: V_{1v} será la velocidad de un viento que proviene del cuadrante 1, entre N y E, V_{2v} la de un viento que procede del cuadrante 2, entre E y S, etc.

Se realizó una revisión de la estructura de correlación existente en los datos de ERA-40, pensando en la posibilidad de simplificar su información antes de introducirla en el modelo; también se analizó la correlación entre los valores de ERA-40 y las medidas observadas en Zaragoza. Podemos señalar brevemente que: (i) La correlación entre los datos de los 4 nodos es muy elevada en las variables Presión a nivel del mar, Altura geopotencial y Temperatura. Para ellas, la correlación del dato observado es mayor con el valor medio de los 4 nodos que con el del nodo más próximo, siendo los coeficientes de correlación siempre superiores a 0.97. (ii) El grado de correlación dentro de ERA desciende para las componentes U y V del viento, siendo mayor en la componente V. El grado de correlación entre el valor observado y el del nodo más próximo es 0.830 para la componente U y 0.896 para la V. (iii) La correlación más débil se observa en la variable Humedad, siendo notable la diferencia de correlación entre los nodos situados en diferentes paralelos; la correlación de los datos de Zaragoza con los del nodo más próximo es 0.837 y con los dos nodos situados al Sur, inferior a 0.68.

3. Construcción del modelo estadístico

El modelo que se propone es de tipo regresión: se busca explicar la variación observada en la variable respuesta, la ocurrencia de precipitación o la cantidad de precipitación recogida, en función de los valores que toman un conjunto de variables predictoras que caracterizan la situación atmosférica. Como se ha indicado, el modelo está formado por dos GLM, uno con error Bernoulli y el otro con error Gamma.

Conviene advertir que no se está planteando un modelo predictivo sino de caracterización del fenómeno a escala diaria y local. Dado que el uso posterior del modelo (realizar el downscaling de la salida de un GCM) lo permite, se pueden usar como covariables tanto la información contemporánea, como la de días pasados y la de días posteriores (la trayectoria del GCM proporciona esos datos). En concreto, hemos considerado como covariables posibles las que se citan en la Tabla 1

correspondientes al día en que se observa la respuesta, las del día previo y el día posterior; es decir, el modelo puede reconocer como situaciones asociadas al proceso de precipitación en Zaragoza, no sólo las precursoras, favorecedoras o inhibidoras de precipitación, sino las que puedan ser resultado (consecuencia) de la observación de precipitación.

Se dispone por consiguiente de un gran número de covariables, muy relacionadas entre sí, susceptibles de ser influyentes en relación con la precipitación. La estrategia de construcción del modelo consiste en un proceso, no automático, de incorporación progresiva de variables predictoras al modelo. Éstas las hemos organizado en tres bloques: (i) Presión, Geopotencial, Divergencia y Vorticidad; (ii) Velocidad y Dirección del Viento; (iii) Humedad, Temperatura y sus advecciones. Se considera, en primer lugar, la incorporación de las covariables correspondientes al día en que se observa la respuesta y más tarde se analiza la incorporación de las variables de los días previo y posterior.

El proceso de selección evalúa primero la entrada global al modelo existente en cada momento, de bloques formados por todas las covariables con un mismo nombre, Presión en superficie, por ejemplo, en todas las horas del día y en los 4 nodos. Tras ese análisis “global” de diferentes variables y tras decidir cuál conviene incorporar en ese momento (análisis de la disminución de la deviance residual), se realiza un análisis pormenorizado del efecto de cada covariable perteneciente al bloque de interés (disminución de deviance) y se seleccionan las más adecuadas (explicativas) para incorporarlas al modelo y analizar su significación. Para facilitar este proceso de selección se han diseñado funciones adecuadas con el software SPLus.

Teniendo en cuenta que el modelo se usará para obtener proyecciones en una situación de calentamiento respecto al periodo actual y para no construir un modelo que plantee problemas de extrapolación, no se ha considerado como covariable útil la Temperatura en términos absolutos pero sí las diferencias de Temperatura en distintos niveles geopotenciales. Considerando también que las covariables presentes en el modelo deben ser reproducidas, sin grandes sesgos, por el GCM que se utilice y pensando que éste reproducirá mejor las variables menos ligadas a los efectos locales, se ha dado preferencia para incorporarlas al modelo, en similares condiciones, a las covariables correspondientes a las capas altas de la atmósfera.

Hemos ajustado modelos diferentes para los periodos Mayo-Septiembre y Octubre-Abril, al considerar que las situaciones típicas asociadas a la precipitación en ambas épocas del año, en la región analizada, son diferentes.

4. Resultados

Los modelos que caracterizan el proceso de la precipitación en el área de Zaragoza se presentan (parcialmente) en las Tablas 2, 4, 6 y 8, donde se muestran los efectos significativos del mismo día para los 4 modelos, 2 de ocurrencia y 2 de cantidad, ajustados. En esas Tablas se especifica la hora, el nodo, el código de cada variable, ver Tabla 1, el valor de su coeficiente en el modelo y su t-valor (en valor absoluto), que indica el peso de la covariable en el modelo; a mayor t-valor, mayor importancia.

Las Tablas 3, 5, 7 y 9 presentan algunas medidas de bondad del ajuste: los coeficientes AIC, BIC y el porcentaje de variabilidad explicada. En los modelos de ocurrencia se incluye el resultado del test de Hosmer-Lemeshow, así como el porcentaje de días correctamente clasificados, cuando la probabilidad de precipitación se compara con el valor de referencia 0.5.

Complementariamente a las medidas estadísticas de bondad de ajuste, creemos conveniente realizar un análisis del significado meteorológico de las covariables. Aunque estos modelos no garanticen la coherencia entre todas las covariables presentes, es conveniente que sean capaces de representar los modelos conceptuales meteorológicos más comunes en la región para la que se han desarrollado. En lo que sigue mostraremos los resultados de un análisis que ha buscado la presencia de ese “significado físico” en los modelos.

Modelo de ocurrencia Octubre-Mayo

La Tabla 2 muestra los términos significativos correspondientes a las covariables del mismo día. En el predictor lineal del modelo se incluyen, además, 4 términos, correspondientes a los dos primeros armónicos, que ayudan a captar el ciclo estacional, junto con covariables del día previo (12 efectos significativos, no mostrados por brevedad) y del día posterior (14 efectos).

El modelo explica, globalmente, un 51.1% de la variabilidad total (Tabla 3). Si se analiza ese porcentaje por meses, vemos que se sitúa en un rango entre 44.8% en Mayo y 59.1% en Noviembre. Estos porcentajes son satisfactorios y comparables a los obtenidos usando la información registrada por el radiosondeo y las medidas en superficie en Zaragoza (53.5% globalmente), Abaurrea y Asín (2005). Por otra parte, el ciclo anual y la evolución temporal de la ocurrencia de precipitación son reproducidos adecuadamente, ver Figura 2, donde se ha representado el valor medio de las probabilidades ajustadas en cada mes (arriba) y cada año (abajo), junto con la frecuencia media observada y un intervalo de confianza para dicho valor medio.

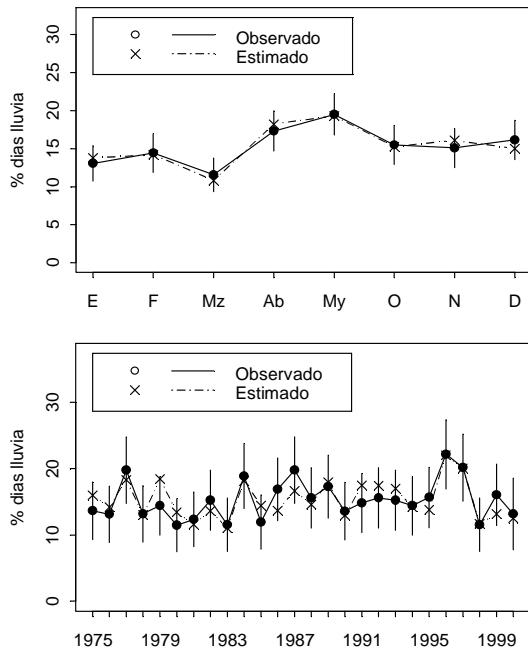


Figura 2: Valor medio de la probabilidad ajustada y frecuencia relativa observada para cada mes (arriba) y para cada año (abajo).

Respecto a los efectos incluidos en el predictor lineal cabe destacar que, si se representan las direcciones desde las que, con velocidades significativas, sopla el viento en distintos momentos y cuadrículas (covariables **V2v.700**, **V4v.300**, **V1v.850**, **V1v.925**, **V4v.500**, en negrita en la Tabla 2), se encuentra un patrón fácilmente identificable como uno de los mejor asociados con la ocurrencia de precipitación en la zona. Al representar esos efectos gráficamente, Figura 3, se observa el flujo del NW en los niveles medios y altos de la atmósfera, mientras, en los niveles bajos, influyen positivamente los vientos de componente Este, como es habitual en los episodios de precipitación. Vemos además que incorpora el efecto de la cizalladura en todo el espesor de la atmósfera, en el sentido de favorecer los ascensos al rotar horariamente según nos elevamos en la vertical e incluso explica la inestabilidad por el distinto origen de las masas de aire involucradas: atlánticas en altura y de origen mediterráneo en las capas más bajas.

Modelo de ocurrencia en Junio-Septiembre

Los efectos significativos en este modelo (Tabla 4) son distintos de los correspondientes al periodo Octubre-Mayo, lo que avala la necesidad de la división que hemos establecido. El grado de ajuste alcanzado es similar al del modelo anterior, 50.0% de variabilidad explicada, ver Tabla 5.

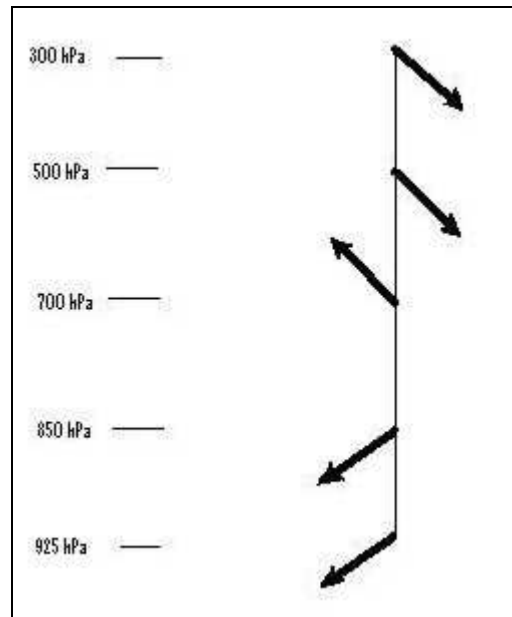


Figura 3: Efecto cizalladura en el modelo de ocurrencia Octubre-Mayo.

En este modelo podemos ver el efecto combinado de la divergencia en el nivel de 300 hPa (**Di.300**) con la convergencia en 850hPa en el nodo NW a las 12 horas (**Di.850**), que nos muestra cómo se producen ascensos en la vertical. Si seguimos observando, a las 24 horas en el nodo NE, la convergencia en niveles bajos se ha ido trasladando al nivel de 700hPa (**Di.700**) e incluso al de 500hPa (**Di.500**), lo que nos indica unos ascensos continuados y fuertes.

En la misma tabla podemos ver la distribución relativa de los efectos del geopotencial en 700hPa (**G.700**) en el día previo, con coeficientes positivos en las cuadrículas primera-cuarta, NW-SE, y negativos en las otras dos, que asociamos a una vaguada en las celdas NE y SW, entre dos dorsales situadas en NW y SE, circunstancia favorable para la ocurrencia de precipitación sobre Zaragoza.

El efecto de la dirección del viento, Figuras 4 y 5, en función del ángulo de procedencia, recoge la influencia conjunta de las covariables seno y coseno. Para ayudar a su interpretación se han delimitado con líneas verticales las direcciones de procedencia correspondientes a los cuatro cuadrantes: **1** $\rightarrow [0, \pi/2]$, **2** $\rightarrow [\pi/2, \pi]$, **3** $\rightarrow [\pi, 3\pi/2]$, **4** $\rightarrow [3\pi/2, 2\pi]$.

La dirección del viento aparece repetidamente como variable explicativa tanto de la ocurrencia como de la cantidad de precipitación y, en todos los casos, muestra una interpretación fácil y coherente. Volviendo al modelo de ocurrencia Junio-Septiembre, la Figura 4 muestra el efecto de la dirección del viento en 850hPa en el nodo SW a las 6 horas. Vemos su influencia positiva cuando su dirección está entre 135° y 315° , siendo máxima en torno a los 225° . Esto representa claramente a los “bochornos” del SE, mediterráneos, húmedos y

característicos de cualquier época del año, pero también a los vientos “ábregos” (SW) y a los “westerlies” y “moncayos” (W), que tan fuertemente contribuyen a la precipitación estival en Zaragoza.

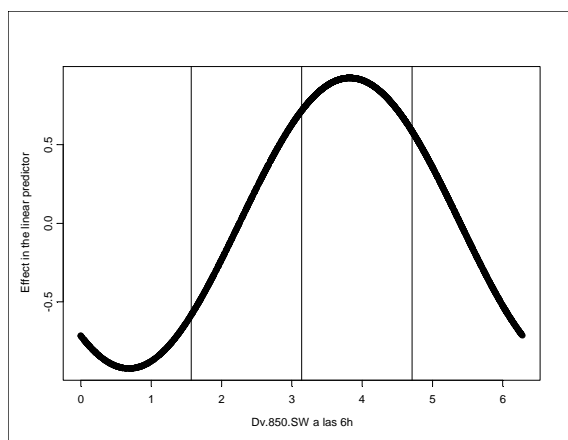


Figura 4: Efecto en el modelo de ocurrencia en J-S de la dirección del viento a 850hPa en el nodo SW a las 6 horas.

Modelo de cantidad Octubre-Mayo

El predictor lineal de este modelo tiene una estructura más sencilla que la de los dos anteriores, ver Tabla 6. De los 21 efectos significativos del día contemporáneo, 9 corresponden al viento, 6 a la temperatura, 3 a la humedad y 3 a la divergencia; hay además 6 términos del día previo que no se muestran. El porcentaje de variabilidad explicada es 37.3% (Tabla 7). En los modelos de cantidad este porcentaje suele ser inferior al obtenido en los modelos de ocurrencia, debido a la naturaleza fuertemente asimétrica de la variable respuesta, donde un ajuste adecuado del valor esperado no impide que se observen valores de precipitación extremos, difíciles de caracterizar.

En este modelo vemos claramente también el valor explicativo de las direcciones de procedencia de los flujos, Figura 5, que muestra el efecto de la dirección del viento en 850hPa, en la parte superior, y en 500hPa, en la parte inferior, confirmando esquemas habituales desde el punto de vista de la predicción.

Vemos que en 850hPa el viento tiene influencia positiva en las direcciones entre 45° y 215°, con un valor máximo en torno a 125°, lo que corresponde claramente a que, en niveles bajos, los vientos deben contribuir con persistentes masas de aire mediterráneo para que se recojan cantidades importantes de precipitación en la zona de Zaragoza. Las demás direcciones contribuyen negativamente, siendo mínimo el valor en torno a 300°, que representa claramente el “cierzo” frío y seco que sopla a lo largo del valle del Ebro cuando se instala sobre la zona un potente anticiclón tras el paso de los sistemas frontales.

En altura, 500hPa, vemos que tienen influencia positiva las direcciones entre 315° y 135°, siendo máxima en torno a 45°; es decir, vientos de marcada componente Norte capaces de aportar en niveles altos el frío necesario para que, en conjunción con los flujos mucho más cálidos en 850hPa, la columna atmosférica se vuelva fuertemente inestable y dé lugar a importantes cantidades de precipitación.

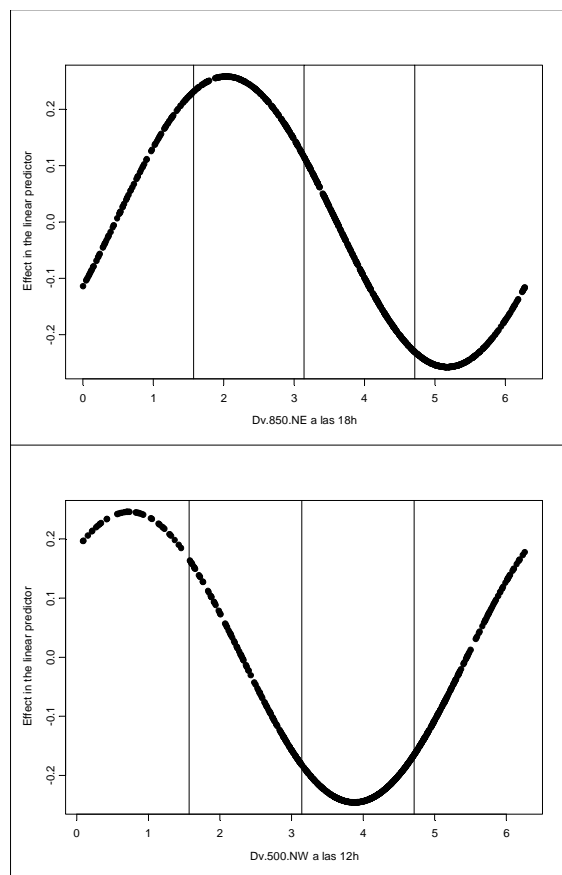


Figura 5: Efecto en el modelo de cantidad en O-M de la dirección del viento a 850hPa en el nodo NE a las 18 horas y a 500hPa en NW a las 12h.

Modelo de cantidad en Junio-Septiembre

La estructura de este modelo, Tabla 8, que cuenta además con 5 efectos del día previo y 3 del día posterior, es más compleja que la ajustada en Octubre-Mayo; el modelo alcanza una proporción similar, 38.1%, de variabilidad explicada.

Ya hemos visto que tanto los aspectos teóricos dinámicos como los termodinámicos están claramente presentes en los distintos modelos. También pueden encontrarse coherencias cuando se utilizan en las comparaciones climatológicas distintas de las series pluviométricas usadas en la construcción de los modelos, por ejemplo, los datos registrados por la red de detectores de descargas eléctricas o la precipitación diaria integrada por la red de radares.

En el modelo de cantidades Junio-Septiembre vemos cómo la inestabilidad vertical se representa a través de la diferencia entre las temperaturas en los niveles de 850 y 300hPa, presentes a las 12 horas en los cuadrantes NW y NE y a las 24 horas en el cuadrante NW, ver Tabla 8:

- En el cuadrante NW a las 12, **T.850 (1.1e-1)** y **T.300 (-1.1e-1)** nos indican una inestabilidad fuerte.
- En el cuadrante NE a la misma hora las mismas variables reflejan, por el contrario, estabilidad.
- A las 24 horas en el cuadrante NW tenemos **T.850 (-8.5e-2)** y **T.300 (8.5e-2)**, es decir, que la situación se ha estabilizado.

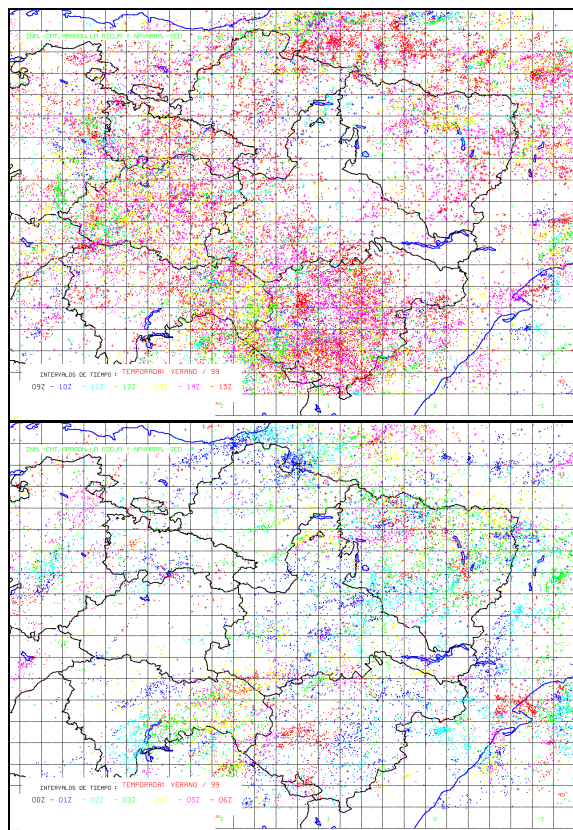


Figura 6: Climatología estival de descargas eléctricas; Arriba, mediodía, entre las 9 y 15 horas; abajo, noche, entre las 0 y las 6 horas.

Estos datos vienen a describir una situación frecuente en los meses estivales, en los que la convección se va trasladando desde el Oeste y Sur hacia el Este y Norte a lo largo del día. Un ejemplo lo tenemos en el gráfico climatológico del total de descargas, para estas horas, correspondiente al verano de 1999, Figura 6.

Este avance hacia el Este de los sistemas queda claro también, si analizamos en el modelo, a las 24 horas, los valores del geopotencial en 300hPa (en cursiva en la Tabla 8) con coeficientes positivos ($8.7e-4$) en el NW y negativos ($-4.4e-4$) en el SW y NE ($-6.3e-4$), lo que indica una profundización de la vaguada

en el Este, con la progresiva dorsalización en el Oeste.

Señalemos por último que podemos encontrar situaciones concretas, desde el punto de vista de un predictor, en las que la distribución espacial de la inestabilidad térmica se ajusta al patrón que el modelo reconoce. Un ejemplo es la situación del 7 de agosto de 1996, en el que unas precipitaciones matinales sobre la provincia de Huesca hicieron que la inestabilidad sobre esa zona quedara fuertemente reducida, lo que determinaría la focalización de las tormentas vespertinas fuera de la misma, como se aprecia en la acumulación diaria radar que se ofrece en la Figura 7, que concuerda con el efecto comentado antes.

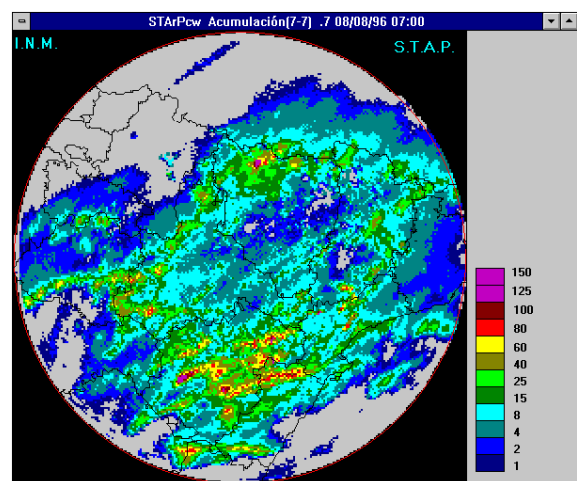


Figura 7: Acumulación radar del día pluviométrico 7 de agosto de 1996.

5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

1. A partir de la información utilizada, que se restringe a los 4 nodos de ERA-40, $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, que rodean al observatorio de interés, no se pueden representar adecuadamente los sistemas sinópticos caracterizados por escalas de longitud superiores a los mil kilómetros. En consecuencia, quedan fuera del modelo algunos patrones clásicos como puede ser el anticiclón de las Azores. No obstante lo anterior, los forzamientos dinámicos para la zona de interés se encuentran fácilmente en distintos agrupamientos de variables que aparecen en los modelos y entidades; por ejemplo, los sistemas frontales, se ven bien representados a su paso por la zona. Asimismo hemos visto que los efectos termodinámicos quedan bien representados.

Otros parámetros derivados, como las advecciones de temperatura y humedad, tienen también un efecto significativo en algunos modelos. Los criterios seguidos en la incorporación de variables han podido influir en que los parámetros en niveles bajos, como la presión en superficie, aparezcan en pocas ocasiones.

2. El modelo y el proceso de modelización que estamos experimentando parecen prometedores. La caracterización obtenida de la ocurrencia de precipitación en Zaragoza es satisfactoria, con porcentajes de variabilidad explicada superiores al 50%, mientras debemos mejorar la representación de la cantidad, donde se ha alcanzado un 37%. Se dispone ya de tres ajustes correspondientes al observatorio de Canfranc, donde la precipitación es más frecuente y 'sencilla' de caracterizar. Para Canfranc, los modelos de ocurrencia de Octubre-Mayo y Junio-Septiembre alcanzan porcentajes de variabilidad explicada del 63.6% y 58.3% y los de cantidad, 47.3 y 56.2%.

3. En cuanto a las líneas de trabajo a desarrollar, por una parte, se deben plantear cambios en el modelo de cantidad que mejoren sus capacidades. Nos planteamos flexibilizar el parámetro de forma de la distribución Gamma para permitirle cambiar a lo largo del año de un modo menos rígido que la actual división en dos periodos.

Vimos que la correlación entre la información en los nodos de ERA-40 2.5°x2.5° y las medidas tomadas en Zaragoza se reducía de modo apreciable en las variables Humedad y en las componentes del Viento, en comparación con lo observado en los campos de nivel Geopotencial, y Temperatura. Esto nos lleva a considerar cambios en el proceso de modelización que permitieran introducir, parcialmente, información del reanálisis ERA-40 full resolution (relativa a las capas bajas, por ejemplo) que, en nuestra región, supone, aproximadamente, cuadruplicar el número de nodos. La mesoescala-β, que cubre entre 20 y 200 Km, estaría así más adecuadamente representada al incorporar procesos influidos por la topografía que ahora quedan excesivamente promediados.

El modelo antes de ser utilizado en el proceso de downscaling debe experimentar un proceso de ajuste fino que tenga en cuenta los resultados de un análisis detallado de las salidas del GCM director, tanto en la época actual como en el horizonte del escenario. El modelo no debe contener covariables que el GCM reproduzca con un sesgo notable ni puede aplicarse para obtener el escenario de cambio climático en condiciones de clara extrapolación, es decir, fuera del marco en el que, al ajustarlo, el modelo ha mostrado su validez. Ambas cuestiones requerirán un examen atento de las salidas del GCM y la posible reformulación del modelo estadístico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, con el proyecto CGL2006-02485/CLI, y por el Gobierno de Aragón mediante el proyecto interdisciplinar "Validación de un modelo acoplado de simulación de procesos

hidrológicos e hidráulicos utilizando datos de cuencas experimentales en montaña mediterránea".

Referencias

- Aburrea, J., Asín, J. (2005). Forecasting local daily rainfall in a climate change scenario. *Clim. Res.*, 28, 183-197.
- Christensen, J. H., et al. (2007). Regional Climate Projections. En Solomon, S., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27, 1547-1578.
- Uppala, S. M., et al. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.

0h	NW		NE	V2v.700 9.2e-2 4.0 V4v.300 2.1e-2 4.4
	SW	T.850 -1.2e-1 3.1 T.500 1.2e-1 3.1	SE	
6h	NW	Dv.sup(s) 4.5e-1 3.5 Dv.sup(c) 9.5e-2 0.7 He.700 1.7e+2 4.7	NE	
	SW	T.850 2.5e-1 6.1 T.500 -2.5e-1 6.1 Ah.sup cuadrático	SE	He.700 1.7e+2 4.7
12h	NW	V1v.850 9.0e-2 2.4 P.sup 6.9e-4 4.7	NE	V1v.925 1.7e-1 2.8 G.850 -3.9e-3 5.8 Di.850 -1.8e+4 2.8
	SW	Vr.700 9.6e+3 3.8	SE	G.850 3.9e-3 5.8
18h	NW	Dv.850(s) 2.3e-1 1.8 Dv.850(c) -6.1e-1 4.3 Di.850 -2.9e+4 4.5 T.sup -3.1e-1 6.8 T.850 3.1e-1 6.8 T.850-T.300 cúbico	NE	
	SW	V4v.500 5.9e-2 6.6 He.700 2.3e+2 3.9 T.850 -1.9e-1 5.9 T.500 1.9e-1 5.9 Ah.500 2.2e+1 3.4 G.300 cuadrático	SE	Di.850 -2.1e+4 3.1 Td.sup 2.8e-1 8.5
24h	NW	Di.700 -2.2e+4 3.7 Td.sup 2.5e-1 6.2 He.1000 -2.9e+2 3.3 He.300 -6.8e+3 3.8 At.300 8.2e-5 3.9	NE	He.700 3.6e+2 4.7
	SW		SE	Di.850 -1.9e+4 3.2

Tabla 2: Covariables contemporáneas en el modelo de ocurrencia en Octubre-Mayo.

	Deviance	Grados libertad
Modelo nulo	5334.79	6231
Modelo ajustado	2578.12	6168
%Variabilidad explicada	51.1	
AIC	2706.12	
BIC	3137.32	
H-L	8.79 (pv 0.361)	
%Días correctamente clasificados	Sin precip.	Con precip.
	96.2	62.3

Tabla 3: Medidas de bondad de ajuste del modelo de ocurrencia en Octubre-Mayo.

0h	NW	V2v.700 -2.2e-1 3.9 Td.sup 1.9e-1 3.8	NE	Di.500 -4.4e+4 3.6 V2v.700 2.2e-1 3.9 He.700 -2.6e+2 3.4
	SW	T.850 1.4e-1 3.8 T.300 -1.4e-1 3.8	SE	
6h	NW	V3v.700 7.0e-2 2.5 Ah.sup -1.1e-3 3.1	NE	Ah.sup -1.1e-3 3.1
	SW	Vr.300 8.9e+3 4.0 V4v.700 1.2e-1 3.7 Dv.850(s) -5.8e-1 3.1 Dv.850(c) -7.2e-1 3.4 Ah.sup -1.1e-3 3.1	SE	Ah.sup -1.1e-3 3.1
12h	NW	G.850 -8.5e-3 4.2 Di.850 -2.6e+4 4.0 Di.300 2.6e+4 4.0	NE	G.850 8.5e-3 4.2 V3v.700 -1.4e-1 5.3
	SW	Ah.700 2.0e+1 4.3	SE	
18h	NW	G.300 -3.0e-3 6.3 Vr.700 -2.4e+4 5.3 V1v.850 3.0e-1 4.6 He.700 4.1e+2 3.5	NE	G.300 1.5e-3 2.8 Vr.300 9.7e+3 4.2 Ah.500 1.7e+2 3.7 T.sup -3.7e-1 9.1 T.300 3.7e-1 9.1
	SW	Vr.700 2.4e+4 5.3 At.850 -4.4e-4 3.6	SE	Vr.700 -2.4e+4 5.3
24h	NW	V1v.850 -2.4e-1 3.4 He.700 1.7e+2 2.8	NE	Di.700 -3.5e+4 4.6 Di.500 -2.5e+4 3.7 Td.sup 2.3e-1 4.6 He.700 1.7e+2 2.8
	SW	Di.850 -2.8e+4 4.4 Di.300 2.8e+4 4.4	SE	Di.700 -3.5e+4 4.6 Di.500 -2.5e+4 3.7
Día t-1	NW	G.700 8.1e-3 3.5	NE	G.700 -8.1e-3 3.5
12h	SW	G.700 -7.0e-3 3.0	SE	G.700 7.0e-3 3.0

Tabla 4: Covariables contemporáneas y efecto en el día previo del geopotencial en el modelo de ocurrencia en Junio-Septiembre.

	Deviance	Grados libertad
Modelo nulo	2105.06	3171
Modelo ajustado	959.58	3127
%Variabilidad explicada	50.0	
AIC	1049.58	
BIC	1322.37	
H-L	4.30 (pv 0.830)	
%Días correctamente clasificados	Sin precip.	Con precip.
	97.8	56.6

Tabla 5: Medidas de bondad de ajuste del modelo de ocurrencia en Junio-Septiembre.

0h	NW		NE	
	SW		SE	Ah.850 -6.5e+0 3.8
6h	NW		NE	T.sup 4.8e-2 4.6 T.850 -4.8e-2 4.6
	SW	He.700 8.0 e+1 3.7	SE	
12h	NW	Dv.500(s) 1.7e-1 2.7 Dv.500(c) -3.6e-1 5.7 V3v.300 6.3e-3 3.0 V4v.300 6.3e-3 3.0	NE	Di.850 -7.2e+3 5.2 Di.300 7.2e+3 5.2
	SW	At.500 -6.9e-5 5.6	SE	
18h	NW		NE	Di.300 9.1e+3 4.5 Dv.850(s) 2.3e-1 4.0 Dv.850(c) -1.2e-1 2.3
	SW	T.sup -9.5e-2 5.1 T.850 9.5e-2 5.1	SE	V1v.925 -5.1e-2 3.1
24h	NW	V1v.925 cuadrático	NE	
	SW		SE	Ah.850 7.0e+0 3.7 At.sup 2.6e-4 2.8

Tabla 6: Covariables contemporáneas en el modelo de cantidad en Octubre-Mayo.

	Deviance	Grados libertad
Modelo nulo	800.90	954
Modelo ajustado	467.04	930
%Variabilidad explicada	37.34	
AIC	9060.66	
BIC	9177.22	

Tabla 7: Medidas de bondad de ajuste del modelo de cantidad en Octubre-Mayo.

0h	NW	Di.700 -2.4e+4 4.0	NE	Di.700 2.4e+4 4.0 Td.sup 1.1e-1 4.6
	SW		SE	V2v.500 -1.1e-1 2.9 Td.sup -6.8e-2 2.8
6h	NW	V2v.sup 1.7e-1 3.3	NE	
	SW	V4v.850 -8.6e-2 4.5	SE	
12h	NW	Dv.500(s) -1.3e+0 6.0 Dv.500(c) -1.6e-1 0.8 T.850 1.1e-1 2.9 T.300 -1.1e-1 2.9	NE	Dv.500(s) 1.5e+0 6.1 Dv.500(c) 2.6e-1 1.1 T.850 -1.1e-1 2.9 T.300 1.1e-1 2.9
	SW	V1v.850 1.8e-1 3.1	SE	Di.1000 -2.1e+4 3.7 Dv.500(s) -9.3e-1 3.6 Dv.500(c) -3.8e-1 1.6
18h	NW		NE	V2v.300 3.7e-2 4.0 T.sup -8.0e-2 2.9 T.850 8.0e-2 2.9
	SW		SE	
24h	NW	T.850 -8.5e-2 5.4 T.300 8.5e-2 5.4 <i>G.300 8.7e-4 4.4</i>	NE	<i>G.300 -6.3e-4 3.4</i>
	SW	Td.sup 4.6e-2 3.3 <i>G.300 -4.4e-4 3.4</i>	SE	V4v.500 -3.4e-2 3.9

Tabla 8: Covariables contemporáneas en el modelo de cantidad en Junio-Septiembre.

	Deviance	Grados libertad
Modelo nulo	319.01	327
Modelo ajustado	139.93	294
%Variabilidad explicada	38.07	
AIC	3164.19	
BIC	3289.26	

Tabla 9: Medidas de bondad de ajuste del modelo de cantidad en Junio-Septiembre.