
CAPÍTULO II

ESTADO DE LA CUESTIÓN

En muchas ocasiones tratar de explicar una realidad física se torna un problema complejo dada la cantidad de factores y variables a las que es necesario recurrir para que la explicación tenga sentido y también por la diversidad de puntos de vista desde los que se puede observar el mismo hecho. Un buen ejemplo de esta idea es recogido por el autor BUCAI (1997) en uno de sus magníficos libros cuando afirma que “...*el sordo siempre cree que los que bailan están locos*”.

Tres han sido, al menos, los ámbitos del conocimiento en los que se puede ubicar lo expuesto en este documento.

El primero de ellos se refiere al campo de la Climatología GARCÍA FERNÁNDEZ (1963), JANSÁ (1969), PÉDÉLABORDE (1970), BARRY y CHORLEY (1972), AUSTIN MILLER (1975), PAPADAKIS (1980), HUFTY (1984), MARTIN-VIDE (1991). Dentro de los estudios denominados climáticos se encuentra una gran diversidad de temas tratados y de enfoques a la hora de buscar explicaciones a la realidad física.

El meteorólogo JANSÁ (1969) alude a las formas en que el hombre se ha aproximado al conocimiento del clima de una región diferenciando entre:

- La Climatología Descriptiva, tradicional, que ha tratado de explicar los eventos atmosféricos a partir del estudio estadístico de las series de datos registradas por las estaciones meteorológicas.
- Un segundo paso fue la aparición de la Climatología Dinámica, donde se hizo mayor hincapié, además de en el análisis estadístico, en el estudio de las características físicas de las masas de aire.
- Posteriormente apareció la Climatología Sinóptica centrada en la tipificación de los estados atmosféricos, de acuerdo a su mayor o

menor repetición o habitualidad, dedicada a explorar los efectos que cada tipo de tiempo tiene sobre una región determinada.

Actualmente parece haber tomado una relevancia significativa las tendencias hacia la modelización matemática y el análisis de imágenes de satélite, así como el empleo de nuevas técnicas informáticas aplicadas a la Climatología.

En segundo lugar, para el desarrollo de la investigación, ha resultado determinante profundizar en el mundo de las técnicas estadísticas en general y de la estadística probabilística en particular, muy especialmente, en el manejo y la aplicación de las cadenas de Markov, unos modelos estocásticos de gran utilidad para el análisis y la representación de fenómenos dicotómicos.

Estos modelos se han constituido en la pieza clave del desarrollo de la investigación. Se trata de una técnica ya empleada en el ámbito de la Climatología y de la Meteorología por otros autores en el pasado: DOMÍNGUEZ (1937), CASKEY (1963), MATEO GONZÁLEZ (1965), MARTÍN-VIDE (1981), RASO (1982), PÉREZ MANRIQUE et al. (1984), GÓMEZ NAVARRO, CÁRDENAS (1989), CONESA GARCÍA y MARTÍN-VIDE (1993), YOUNG (1994), GÓMEZ NAVARRO (1997), MARTÍN-VIDE y GÓMEZ NAVARRO (1999) y también en otras muchas disciplinas científicas, GORDON (1967), CÓRDOBA Y ORDOÑEZ y ANTÓN BURGOS (1990).

Por último ha sido necesario sumergirse, de forma sucinta, en el amplio mundo de las tecnologías SIG y la geoestadística CRESSIE (1990), CRESSIE (1991), JOURNAL (1989), DAVIS (1986), FRANKE (1982), CARLSON y FOLEY(1991), FRANKE (1982), POWELL (1990), ISAAKS y SRIVASTAVA (1989), BOSQUE SENDRA (1997) con la intención de elaborar diferentes composiciones cartográficas que, además de constituir un objetivo en si mismas, han servido de constante apoyo para la

especialización de las variables estudiadas y en la interpretación del fenómeno de la persistencia en la CAPV.

El estado de la cuestión se ha organizado de acuerdo a estos tres pilares fundamentales de conocimiento que se acaban de presentar, siendo el más notable, en esta ocasión, el referente a los trabajos relacionados con el análisis de la persistencia de la precipitación y los modelos markovianos.

El régimen de las precipitaciones en la costa NW y N de la Península Ibérica ha sido objeto de múltiples investigaciones y estudios doctorales. Uno de los más relevantes es el elaborado por el profesor Antón Uriarte en el año 1979 en lo que fue su tesis doctoral. En ella, a lo largo de doce capítulos, se desarrolla un exhaustivo análisis de la precipitación en forma de lluvia en la Cornisa Cantábrica a partir de los datos registrados en cinco observatorios meteorológicos (Vigo, La Coruña, Gijón, Santander y San Sebastián) durante el periodo 1946 -1975.

Ya en esta fuente aparecen referencias concretas a otros autores como el profesor alemán LAUTENSACH (1967), quien desde los años cuarenta se vino preocupando por cuestiones climáticas en la Península Ibérica como así lo demuestra en su obra *Geografía de España y Portugal*.

También es necesario señalar, dentro de este grupo de referencias generales, la obra de MATEO GONZÁLEZ (1965), profundo conocedor de la pluviometría en el Norte de España en general y de la asturiana en particular.

Otro de los trabajos de referencia será la obra de LINÉS ESCARDO (1970), debido a la gran experiencia acumulada por el meteorólogo en los análisis de las situaciones sinópticas que afectan al territorio peninsular como se desprende del título de su propia tesis doctoral "*Perturbaciones en la Península Ibérica y precipitaciones asociadas*".

A finales de la década de los setenta se escribe *Les climats oceaniques des regions atlantiques de l'Espagne et du Portugal*, MOUNIER (1979), que se convierte en un referente básico para el análisis de la climatología oceánica ibérica.

Un documento de obligada referencia en esta ocasión ha sido la tesis doctoral del profesor RUIZ URRESTARAZU (1981) donde queda clara la complejidad climática de la zona de estudio y el interés de la misma al corresponderse parte del territorio, principalmente Álava, con un área de transición climática.

Una de las primeras referencias al análisis numérico de la persistencia de la precipitación viene dada por el meteorólogo francés BESSON (1914). Este autor da nombre a uno de los coeficientes de persistencia más empleado a lo largo del siglo XX que fue formulado por primera vez en un artículo de la revista de la Academia de las Ciencias de París.

En el año 1924 era publicada en la revista *Monthly Weather Review* una traducción del mencionado cálculo y poco después DOMINGO QUÍLEZ (1928) publicaba en los *Anales de la Sociedad Española de Meteorología* un estudio en el que se aplicaba el mencionado coeficiente de Besson sobre las lluvias en Zaragoza.

Con posterioridad, la edición del manual *Handbook of Statistical Methods in Meteorology*, BROOKS y CARRUTHERS (1953) dará lugar a una mala interpretación de la fórmula de Besson, lo que provocará posteriormente algunas interpretaciones erróneas en trabajos relacionados con la persistencia tal y como muy bien expone el profesor URIARTE (1983). El cálculo propuesto por Brooks y Carruthers difería del de Besson únicamente en el denominador de la fórmula.

El coeficiente de persistencia de Besson (RB) se apoyaba en la expresión:

$$RB = \frac{(p' - p)}{(1 - p)}$$

siendo:

- p' = la probabilidad condicionada de que llueva un día, habiendo llovido el precedente.
- p = la probabilidad general de lluvia, es decir el número de días de lluvia entre el total de días de la serie.

Sin embargo la fórmula impresa en el manual de Brooks y Carruthers modificó el denominador, alterando el intervalo de variación del coeficiente tal y como se puede ver a continuación.

$$RB = \frac{(1 - p)}{(1 - p')} = \frac{(p' - p)}{(1 - p')}$$

MATEO GONZÁLEZ (1965) presenta en su artículo *Persistencia de los días con precipitación y sin precipitación en Gijón* uno de los primeros análisis de la persistencia de la lluvia en España. Para ello empleó la fórmula de Brooks y Carruthers y no la original de Besson dado que acaba comparando los valores de persistencia obtenidos por Besson en París con los obtenidos por el mismo para Gijón. El hecho persistente es justificado en esta ocasión en las llamadas precipitaciones de estancamiento o detención en la vertiente Norte de la Cordillera Cantábrica.

Esto mismo es atribuible, a otros autores cuyas publicaciones relacionadas con el análisis de la persistencia de la lluvia en España fueron pioneras como las de GARCÍA MENDAÑA y GARMENDIA IRAUNDEGUI (1969) en su análisis de la persistencia de la persistencia en Salamanca, registrando valores superiores a los de Gijón. La justificación se encontraba, en esta ocasión, en la propia persistencia de las situaciones de tipos de tiempo lluviosos, defendiéndose la idea de que el efecto föhn rompía las secuencias lluviosas, luego perjudicaba al fenómeno de la persistencia en la Cornisa Cantábrica.

También LINÉS ESCARDÓ (1970) emplea, para el desarrollo de su publicación *The climate of the Iberian Peninsula*, la referencia al coeficiente de persistencia de Besson, tomando la fórmula del manual de Brooks y Carruthers cuando analiza la duración de las precipitaciones en forma de lluvia en la Península Ibérica.

Todos estos intentos se fundamentaron, en gran medida, en el análisis descriptivo de las probabilidades de que un día fuera lluvioso y en la probabilidad condicionada de día lluvioso con respecto al día previo.

Con el matemático Andrei Andreivich Markov (1856 -1922) y posteriormente con su hijo Andrei Markov (1903 -1979) se abre una línea estadística de trabajo referente a las relaciones matemáticas probabilísticas de las construcciones seriadas que serán rápidamente aplicadas en análisis tendenciales y prospectivos.

El concepto de persistencia fue traducido a una expresión matemática según la cual un hecho es considerado persistente a partir de la idea de que su probabilidad de ocurrencia se encuentra condicionada por lo que sucedió uno, dos o varios días previos.

A lo largo del siglo XX han sido innumerables las aplicaciones sociales, económicas, ambientales y climáticas que se han apoyado en los modelos markovianos.

Uno de los estudios pioneros en el uso de los modelos markovianos aplicados a la precipitación en forma de lluvia fue desarrollado por GABRIEL y NEUMANN (1962), demostrando la validez del modelo de las cadenas de Markov para el estudio de la ocurrencia de la lluvia diaria en Tel Aviv.

De igual forma, un claro referente de la metodología de trabajo empleada se encuentra ya expuesto en el estudio publicado por JAMES y CASKEY (1963), donde se demuestra el ajuste existente entre las probabilidades derivadas de un modelo de cadenas de Markov de primer orden y los valores empíricos de la probabilidad de precipitación, para intervalos de diferentes longitudes, en la ciudad de Denver.

Los autores FEYERHERM y DEAN BARK (1967), demuestran a partir de este tipo de modelos estocásticos el carácter persistente de la lluvia en la estación de primavera en el centro norte de los EEUU concluyendo que es más fácil que una secuencia lluviosa termine después de al menos dos días lluviosos que después de un solo día lluvioso.

LOWRY y GUTHRIE (1968), profundizan en la aplicación y el análisis de la bondad de los modelos markovianos superiores al de primer orden. Para ello trabajan con datos diarios de precipitación para un periodo aproximado de treinta años en Nuevo México y Oregón. En este trabajo se considera que dentro de un mismo ámbito climático, los órdenes estimados tienden a cero cuando los eventos lluviosos decrecen como sucede en los observatorios ubicados en las regiones más secas. Del mismo modo, la definición de umbrales de corte grandes hace que las estimaciones de los órdenes más elevados tiendan a cero.

Una segunda conclusión a la que llegan los autores es que las estaciones meteorológicas con una mayor diversidad de tipos de masas de aire se ajustan mejor a órdenes superiores que aquellas en las que, registrando una misma precipitación media estacional, tienen un clima menos diverso.

Una clara aplicación práctica del uso de los modelos markovianos es la realizada por GRAVES y PERLMUTTER (1975) cuando emplearon los modelos probabilísticos para realizar la estimación de las probabilidades existentes de que una lancha planeadora pudiera ser retrasada a una hora específica de una tarde cualquiera dentro de un plazo de anticipación de cuatro días.

Los autores GATES y TONG (1976), pertenecientes al Instituto de Ciencias y Tecnología de la Universidad de Manchester, emplearon modelos markovianos para el análisis de los días secos y lluviosos registrados en las ciudades de Manchester y Liverpool demostrando que era necesario emplear un modelo markoviano de segundo orden o superior, al ajustarse éstos mejor a la realidad empírica que el modelo de primer orden empleado hasta entonces.

Los modelos markovianos han sido también utilizados para estimar la distribución de probabilidades de que comience a llover un día cualquiera por encima de un umbral determinado en Samara (Nigeria) por STERN (1981).

MADSE, SPLIID y THYREGOD (1984) publicaron las conclusiones de un trabajo desarrollado en el Instituto de Matemáticas de la Universidad Tecnológica de Dinamarca titulado *Markov models in discrete and continuous time for hourly observations of cloud cover*, en el que se analizan 15 años de observaciones horarias de la cubierta nubosa en un aeropuerto próximo a la ciudad de Copenhague a partir de modelos markovianos

discretos y continuos demostrando que gran parte de las variaciones podían ser descritas mediante un modelo markoviano homogéneo de primer orden.

En el año 1997 se publicaron los resultados de las investigaciones desarrolladas por SHASOM en el Instituto Nacional del Agua y de Investigación Atmosférica de Nueva Zelanda, mediante el empleo de modelos markovianos en los que se desconoce el estado del proceso analizado en un momento dado (*Hidden Markov Model, H.M.M.*), conociéndose únicamente los valores observados y el número de posibles estados. En esta ocasión son definidos cinco estados a partir de las rupturas (*Breakpoints*) más importantes registradas por los pluviógrafos y de la duración de los diferentes eventos lluviosos y secos (*Showers, Rain*) tanto dentro de un episodio lluvioso como fuera del mismo.

Un interesante y complejo artículo publicado por DELSOLE (1999) se realiza una comparativa entre los modelos estáticos como los de Markov y los sistemas dinámicos no lineales. Con respecto a los primeros concluye que su aplicación resulta problemática para intervalos de tiempo cortos, mientras la falta de una teoría no cerrada para los sistemas dinámicos no lineales dificulta la realización de comparaciones. Sin embargo, apoyándose en algunas diferencias fundamentales entre los modelos de Markov y los sistemas dinámicos concluye con la idea de que en el primer caso se generan covarianzas de curvatura positiva en periodos cortos mientras que los sistemas dinámicos generan covarianzas con curvatura negativa para esos mismos periodos temporales. Este hecho es visto por el autor como un factor limitante para el uso de este tipo de modelos.

Una de las investigaciones más recientes en las que se han empleado los modelos markovianos ha sido desarrollada por XUE, LEETMAA y JI, (1999) quienes incorporan una serie de modelos markovianos lineales estacionales dentro de una función mucho más compleja destinada a la realización de

predicciones de la ENSO considerando variables como la temperatura superficial del mar, el stress del viento en superficie y el nivel del mar.

La función empírica ortogonal multivariante (MEOF) que emplea los modelos markovianos fue probada para el periodo 1980-1995 y en un periodo independiente (1964-1979) concluyéndose que al ser la estacionalidad una componente esencial del comportamiento de la ENSO, ésta debería ser incluida en los modelos markovianos ya que, cuando así se hace los modelos markovianos se ajustan mejor al modelo en el periodo de prueba y resultan mucho más hábiles durante el periodo independiente que cuando no se emplean modelos sin estacionalidad.

También en esta misma línea de trabajo se encuentran los artículos publicados por autores como JOHNSON, BATTISTI y SARACHICK (1999) quienes se apoyaron en modelos markovianos para el análisis y la detección de anomalías térmicas en la superficie del océano Pacífico durante el periodo 1956-1995, demostrando que, en esta ocasión, el modelo markoviano de ciclo anual resulta menos apropiado de cara a la predicción que un modelo markoviano estacional fijo.

Otra compleja variable atmosférica que ha sido tratada a partir de la probabilística markoviana ha sido el viento. PANG, FORSTER y TROUTT (2000) realizaron diferentes cálculos probabilísticos mediante el uso de modelos markovianos y de la técnica de Monte Carlo que fueron empleadas como fuente para la estimación de los parámetros de la distribución de Weibul que ha sido utilizada tradicionalmente en el análisis de la distribución de la velocidad del viento. Mediante ambas técnicas se desarrolla un procedimiento de estimación bayesiano que es aplicado sobre datos de la velocidad del viento del observatorio de Hong Kong.

Si nos centramos en los trabajos realizados por autores españoles en las últimas décadas, MATEO GONZÁLEZ (1965), destaca por su estudio acerca

de la persistencia de la precipitación en forma de lluvia en la ciudad de Gijón.

MARTÍN-VIDE (1981) analiza las cantidades diarias de las precipitaciones en el Sur del litoral mediterráneo en la Península Ibérica a partir de modelos markovianos.

Otro de los trabajos publicados en la década de los ochenta es el referente al análisis de las probabilidades de transición de los días lluviosos y secos en Palma de Mallorca por RASO NADAL (1982).

MARTÍN-VIDE (1983) demuestra la aceptación del modelo estocástico de la cadena de Markov homogénea en tiempo discreto y de dos estados en los cálculos de la probabilidad de la precipitación diaria poniéndolo de manifiesto en diferentes estudios posteriores referentes a la probabilidad de ocurrencia de las secuencias secas y lluviosas en Cataluña o mediante el análisis de las secuencias secas en Almería MARTÍN-VIDE y MORENO (1985).

En esta misma década PÉREZ MANRIQUE et al. (1984) profundiza en el estudio del clima de Gijón y San Sebastián mediante el estudio de las rachas secas y lluviosas en estas dos ciudades.

En pocas ocasiones se han superados los dos primeros órdenes markovianos. Una de ellas, se corresponde con un estudio de la sequía en el Sureste de España desarrollado por MARTÍN-VIDE et al. (1992) en donde se llega a aplicar el modelo markoviano de tercer orden.

En el año 1993 aparece publicado en la revista francesa *Secheresse* un artículo escrito por CONESA y MARTIN-VIDE (1993), en el que se realiza un análisis, en este caso, de la sequía en el sureste de España a partir de modelos markovianos de hasta tercer orden resultando insuficientes estos

modelos para poder explicar con claridad los largos periodos secos de esta amplia región española dada la longitud de las secuencias secas.

Uno de trabajos publicados por GÓMEZ NAVARRO (1996), relaciona las secuencias lluviosas registradas durante el periodo 1951-1990, por quince observatorios repartidos por la geografía española, con los modelos probabilísticos de Markov de primer orden. Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran, de forma genérica, que los ajustes entre las probabilidades empíricas y el modelo markoviano de primer orden son mejores para los observatorios de la zona Sur peninsular (como por ejemplo Almería) que para la zona Norte (el ejemplo expuesto es La Coruña) recomendándose el empleo del modelo de segundo orden para lograr una mejora sustancial de los resultados en las estaciones en las que el número de días de lluvia es mayor y la persistencia de la misma también.

Poco después, la misma autora (1997), estudia en su tesis doctoral la sequía en la Península Ibérica definiendo la estructura de la misma para tres diferentes umbrales de corte mediante la aplicación de modelos markovianos de diferentes órdenes.

COLOMER (1997) analiza las variables de la precipitación y la temperatura en la provincia de Lleida con la intención de identificar zonas climáticamente diferenciadas a partir de ellas. La búsqueda de modelos teóricos explicativos de mencionadas variables que permitan simular su comportamiento de forma apropiada es uno de los objetivos fundamentales de la obra. Además de realizar un análisis de la estacionalidad de las variables mencionadas investiga la dependencia de sus valores con respecto a los que toman en momentos los previos, y las funciones de distribución propias de estos comportamientos condicionados.

En ese mismo año, MARTIN-VIDE et al. (1997), emplearon los modelos markovianos de primero y segundo órdenes como herramienta comparativa

de la persistencia de la precipitación en forma de lluvia en la ciudad de Barcelona entre dos periodos históricos; el primero de ellos formado por un periodo instrumental inicial (E.I.P.) que se extiende desde 1780 a 1860 y que fue dividido en dos subperiodos (1780-1820), (1821-1860) y el segundo, mucho más cercano en el tiempo (1951-1990). Los resultados concluyen que durante el final de la Pequeña Edad del Hielo (1821-1860) la persistencia de la lluvia en Barcelona fue algo inferior a la registrada en el periodo previo y también inferior con respecto al periodo actual a pesar de registrarse una frecuencia superior de eventos lluviosos de 9 y 10 días de duración.

Unos meses más tarde fue publicado en el *International Journal of Climatology* el artículo *Regionalization of peninsular Spain based on the length of dry spells*, MARTIN-VIDE y GOMEZ NAVARRO (1999), demostrándose el hecho de que es posible regionalizar un fenómeno persistente a partir del empleo de los modelos de Markov a pesar de las dificultades encontradas para lograr ajustes significativos para las secuencias más longevas.

ASÍN (2002) modeliza estadísticamente el comportamiento de la precipitación diaria en cuatro observatorios de la cuenca del Ebro (Reinosa, Agonzillo, aeropuerto de Zaragoza y Tortosa), a partir de dos de sus componentes, la ocurrencia de la misma representada y la cantidad de lluvia registrada, todo ello en el marco teórico de los modelos lineales generalizados (GLM). De este trabajo se desprende la idea de que la capacidad de ajuste del modelo empleado para la cantidad registrada en un día húmedo resulta inferior a la del modelo de ocurrencia atribuyendo este hecho a la falta de información.

