

---

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**



El presente estudio para la obtención del grado de Doctor fue iniciado, hace ya un largo tiempo, en la ciudad de Vitoria. Allá por el año 1997, y gracias a la financiación obtenida por parte del Servicio Vasco de Meteorología para el desarrollo de diversos proyectos de investigación científica en el ámbito de la meteorología y de la climatología, comenzó una larga y continua reflexión acerca del comportamiento de la precipitación en la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) que llega hasta hoy día. La dirección de ese embrionario proyecto de tesis fue asumida, en aquel entonces, por D. Eugenio Ruiz Urrestarazu, catedrático del Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología de la Facultad de Filología, Geografía e Historia de la Universidad del País Vasco.

En breve tiempo, ese conjunto de ideas iniciales fueron acogidas por la ciudad de Barcelona, que tuvo a bien alimentar ese bagaje inicial de conocimientos por medio de diferentes Cursos de Doctorado (bienio 1998 - 2000) realizados en el Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional de la Universidad de Barcelona, especialmente aquellos impartidos por el profesor Javier Martín-Vide y la Doctora Lidia Gómez Navarro, quienes decantaron ese conjunto de inquietudes referentes al hecho pluviométrico en un proyecto de tesis mucho más claro y definido tras la obtención de la Suficiencia Investigadora. El asesoramiento recibido por su parte en los momentos en los que las incógnitas se hacían más severas ha resultado de una gran ayuda.

En los años siguientes el proceso investigador se asentó en la ciudad de Santander en donde fue tomando cuerpo progresivamente. El aire de la comunidad montañesa y las experiencias investigadoras compartidas en el Departamento de Geografía Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria, han constituido un magnífico caldo de cultivo para

el buen desarrollo del proyecto. Las aportaciones de muchos de sus miembros y principalmente las referencias realizadas por profesores como Juan Carlos García Cerdón, Domingo Rasilla y Carolina Garmendia han alimentado el estudio y lo han hecho crecer y mejorar de forma progresiva.

Las últimas líneas de la presente tesis doctoral han sido redactadas en la ciudad de Dublín, siendo el Trinity College un magnífico lugar donde poner un punto y final irlandés a este documento que en el día de hoy aspira alcanzar la mayoría de edad.

Han existido además un gran número de personas e instituciones detrás de cada esfuerzo realizado. Desde el Instituto Nacional de Meteorología (INM) hasta el Servicio Vasco de Meteorología (SVM), pasando por Iberdrola, AENA, o el apoyo incondicional de otros compañeros, muy especialmente de la doctora Lidia Gómez Navarro y del matemático Kepa Otxoa de Alda.

Resulta necesario acordarse también de Isabel, quien me ha sabido motivar en todo momento para terminar definitivamente este trabajo. Un nuevo círculo se ha cerrado.

## 1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El agua dulce es un recurso escaso. Esta es una frase habitual en los medios de comunicación y en la comunidad científica. Se repite constantemente aunque todavía no ha sido asimilada en la medida en la que se hace preciso por los diferentes estados y poblaciones del planeta. Es por ello, por lo que resulta cada día más necesario acercarse al conocimiento de las disponibilidades de agua dulce de una región y a la forma en la que se distribuye el mencionado recurso en el tiempo y en el espacio.

En ocasiones, el modo en que se recibe el mencionado compuesto se encuentra asociado a situaciones extremas (inundaciones, riadas...) que originan innumerables pérdidas humanas y económicas. Sucesos puntuales poco habituales o sucesos pluviométricos continuos, conjugados con una mala planificación de los usos del espacio por parte del hombre, pueden generar importantes catástrofes.

Cualquier esfuerzo orientado hacia la identificación de este tipo de situaciones, bien desde la óptica de la física de las masas atmosféricas, bien desde el análisis de las situaciones sinópticas, bien desde los estudios empírico-estadísticos, resulta bienvenido. Es dentro de este contexto donde se pretende aportar, desde una perspectiva estadística, una aproximación al conocimiento del comportamiento que la precipitación en forma de lluvia tiene en la CAPV.

De este modo, lo aquí expuesto es consecuencia de una serie de años de trabajo y de reflexión acerca del comportamiento que la precipitación en forma de lluvia tiene sobre la Comunidad Autónoma vasca.

El estudio tiene el objetivo final de demostrar, desde un punto de vista meramente estadístico, el carácter persistente de la precipitación en forma de lluvia en la CAPV.

Además se pretende analizar, a lo largo de la obra, la estructura pluviométrica propia de esta región, definir y espacializar los regímenes pluviométricos existentes, identificar las probabilidades empíricas y markovianas de ocurrencia de las secuencias lluviosas y regionalizar por medio de diferentes cartografías y el empleo de las tecnologías SIG los mencionados aspectos.

## **2. LA COMPLEJIDAD DE LA VARIABLE ESTUDIADA**

El estudio detallado de la lluvia que precipita en un determinado evento atmosférico resulta ciertamente complejo. Son múltiples los factores que inciden directa o indirectamente sobre la precipitación en una determinada región.

La variabilidad espacial de los episodios lluviosos dificulta la determinación de comportamientos tipo. En muchas ocasiones se considera la precipitación en forma de lluvia como una variable continua en el espacio asignándose un volumen de lluvia registrado en un punto del territorio a cada metro cuadrado de una cuenca hidrográfica. Sin embargo, otro tipo de investigaciones, inciden en la existencia de una clara componente discreta. Es decir, la distribución espacial de la lluvia puede resultar altamente desigual y compleja.

La diversidad de las intensidades registradas dificulta la homogeneidad en la distribución temporal de las series de datos. En esta ocasión la variabilidad temporal nace ya en la propia estacionalidad astronómica de nuestras

latitudes manteniéndose, incluso en escalas temporales de muy baja frecuencia, como lo demuestran los datos registrados cada diez minutos.

Los factores geográficos (latitud, altitud, exposición, vegetación, suelos, radiación solar, orografía...) inciden igualmente, con mayor o menor intensidad, en la configuración de los regímenes pluviométricos y en los balances hídricos de las cuencas hidrográficas. Estos factores tienen una importancia significativa en la personalidad pluviométrica de cada región.

Por último, la actividad humana está teniendo cada día más efectos sobre el comportamiento atmosférico. De este modo, es habitual que se produzcan actuaciones (construcción de grandes presas, repoblaciones forestales...), susceptibles de influir sobre la cantidad de lluvia que precipita y el modo en que lo hace. Valorar la existencia de estas alteraciones y admitir la presencia de relaciones, directas o indirectas, entre los aspectos mencionados dotará de mayor objetividad a los análisis posteriores.

Mención aparte tienen los medios técnicos y humanos empleados para la recogida de la información meteorológica, su fiabilidad y validez. Desde la calibración de los sensores de medición de las variables físicas hasta el emplazamiento correcto de las estaciones meteorológicas, pasando por los errores de comunicación y registro de los valores en las redes automáticas, así como por las deficiencias de las técnicas estadísticas de detección de errores y de relleno de series incompletas aplicadas hoy en día.

A pesar de todas estas dificultades, resulta posible modelizar los comportamientos de variables climáticas como la precipitación. Lo que se gana en generalidad se pierde en detalle. Podemos considerar que el sistema se cierra anualmente, si bien, las interacciones existentes en el mismo son tantas y tan complejas que lo máximo a lo que podemos aspirar es a lograr una aproximación de la realidad.

Una de las principales características de la precipitación que se registra en parte de la Península Ibérica en general y, en la Comunidad Autónoma del País Vasco en particular, es la persistencia.

Las relativamente frecuentes y continuas situaciones frontales a las que es sometida esta zona del Norte peninsular (RUIZ URRESTARAZU, 1982), nos permiten hablar del hecho de que, las jornadas lluviosas se suceden de forma encadenada durante periodos de varios días. Las situaciones sinópticas que producen vientos de componente Noroeste son un ejemplo del desarrollo de secuencias lluviosas, más o menos largas que depositan, de forma generosa, las aguas evaporadas en otros ámbitos marinos.

Es precisamente sobre esta reincidencia diaria, sobre la que se centra el estudio que aquí se presenta con un claro contenido estadístico y cartográfico en su metodología y en sus resultados. La demostración de que la persistencia es una característica fundamental de la lluvia en la CAPV vendrá dada por la comparación de la realidad empírica y varios modelos estadístico-probabilísticos cuyo enunciado teórico se haya fundamentado precisamente en el concepto de persistencia.

### **3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

La hipótesis básica planteada en esta obra se fundamenta en el supuesto de que la persistencia es una de las características principales del modo en el que se produce la precipitación en forma de lluvia en la Comunidad Autónoma del País Vasco bajo los umbrales de corte de 1, 5 y 10 mm/día.

El estudio desarrollado a continuación pretende demostrar la veracidad de este supuesto, por medio de la comparación de la realidad empírica con



diferentes modelos matemáticos markovianos que, expresan la idea de persistencia en términos de probabilidades de ocurrencia.

La demostración de este supuesto permitiría, por un lado, señalar cuáles son aquellos modelos que mejor se ajustan el comportamiento real de la precipitación en forma de lluvia en la zona de estudio bajo los diferentes umbrales de corte aplicados y, por otra parte, regionalizar la propiedad en cuestión mediante el empleo de diferentes técnicas SIG de representación cartográfica.

El proceso de validación de la hipótesis de trabajo planteada se ha condicionado a la consecución previa de una serie de objetivos generales, u objetivos marco y, otros objetivos más concretos. Así, el primero de los objetivos marco ha consistido, en el desarrollo de un estudio descriptivo del *contexto pluviométrico* propio de la CAPV, sobre el que poder encuadrar los análisis posteriores referidos a la hipótesis de trabajo principal. La consecución de este objetivo marco está sujeta al logro de tres objetivos menores:

- Identificar el volumen de las *fuentes de datos* de información climática existentes respecto a la variable precipitación para el periodo de estudio, mostrando con detalle la componente humana de la recogida de información climática.
- Realizar un sucinto retrato del comportamiento pluviométrico en la CAPV a partir *de los indicadores pluviométricos básicos* tales como los valores máximos, valores medios, días de lluvia, etcétera.
- Tipificar los diferentes *regímenes pluviométricos* que conviven en el territorio objeto de estudio, con la idea añadida de regionalizar este aspecto a partir de la distribución espacial de los mismos en la CAPV.

Un segundo objetivo marco se ha centrado en *el análisis y descripción de las estructuras pluviométricas* propias de la zona de estudio bajo cada umbral de corte. En este sentido, la definición de los tipos pluviométricos y su regionalización se halla condicionada por la consecución de otros tres objetivos menores tales como:

- Señalar la *longitud y la frecuencia absoluta de las rachas lluviosas* registradas en treinta y nueve localidades del territorio autonómico durante el periodo 1965-1994.
- Concretar la longitud de la *racha media* para cada estación meteorológica considerada e identificar las fechas en las que tuvieron lugar las *secuencias lluviosas más largas* bajo cada umbral, así como los tipos de circulación atmosférica que las generaron.
- Definir y aplicar los criterios necesarios para la *tipificación de las estructuras pluviométricas* presentes en la CAPV bajo cada umbral y representar cartográficamente su distribución espacial.

El tercer objetivo marco constituye el centro de la investigación dado que ha consistido en verificar la existencia de ajustes estadísticos significativos entre las frecuencias observadas y las esperadas para el fenómeno estudiado, *las rachas*, con el fin de validar la bondad de los modelos markovianos como expresiones estadísticas del carácter persistente de la precipitación en forma de lluvia en la CAPV para cada umbral de corte. Para ello resulta imprescindible:

- Calcular las probabilidades empíricas de ocurrencia de cada tipo de *secuencia lluviosa* bajo los tres umbrales de corte.
- Estimar las probabilidades empíricas de cada tipo de *enlace lluvioso* bajo los tres umbrales de corte.

- Calcular las *probabilidades markovianas* de diferentes órdenes (hasta el quinto orden) para cada tipo de rachas lluviosa bajo los umbrales de corte de 1, 5 y 10 mm/día.
- Validar estadísticamente la bondad de los ajustes entre los resultados empíricos y los teóricos.

Finalmente, un último objetivo de carácter transversal hace referencia a la necesidad de representar cartográficamente los diferentes indicadores pluviométricos manejados a lo largo de la investigación, mediante el empleo de métodos geoestadísticos y técnicas SIG. Desde los totales de precipitación registrados en cada localidad hasta los primeros ajustes de los órdenes markovianos a la realidad empírica para los umbrales de corte aludidos.

La consecución de todos estos objetivos permitirá la validación de la hipótesis inicial bajo el contexto pluviométrico en el que ha tenido lugar la investigación.

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Algunas indicaciones preliminares**

Una de las primeras aclaraciones tiene un carácter lingüístico. En numerosas ocasiones se ha empleado el término *observatorio* en referencia a lo que técnicamente son estaciones meteorológicas. El número de estaciones meteorológicas que tienen rango de observatorio es muy reducido en esta ocasión. La razón fundamental de este mal uso del término radica en la intención de evitar la reiteración del término “estación”, sobre

todo, en aquellos apartados en donde aparecen referencias continuas a las estaciones astronómicas como periodos estacionales.

En segundo lugar, antes de alcanzar el capítulo propio de las probabilidades markovianas, se hacen algunas referencias en el texto a los *órdenes* de los modelos markovianos. Se ha considerado oportuno realizar una breve aclaración de lo que supone el concepto de orden para el cálculo de los modelos. El orden del modelo hace referencia a la memoria que el modelo emplea para el cálculo. De este modo, los *órdenes inferiores* aluden a los modelos cuyos cálculos están basados en una memoria de uno o de dos días previos. De ahí su denominación como modelos de primer y de segundo órdenes. Por otro lado, los *órdenes superiores* hacen referencia a aquellos modelos markovianos que condicionan su cálculo de probabilidad a lo que sucedió en tres, cuatro o más días pasados (modelo de tercer, cuarto... órdenes).

## **4.2. Contenidos metodológicos**

Una vez presentada la hipótesis de trabajo y los objetivos de la obra se realiza una *revisión bibliográfica* que sintetiza aquellos antecedentes en donde los modelos markovianos han sido aplicados, con mayor o menor complejidad, al estudio de la climatología en general y de la precipitación en particular.

El análisis de las *fuentes de datos* meteorológicas empleadas para el desarrollo del trabajo atiende en esta ocasión a su disponibilidad temporal con base diaria, la distribución espacial de la información, al carácter manual de las estaciones, su calidad y su precisión.

El *tratamiento de esta información* se orienta hacia una primera definición de un escenario pluviométrico de la zona estudiada mediante el enfoque propio

de la Climatología Descriptiva. Para ello resulta necesario desarrollar el cálculo de los indicadores climáticos básicos, el análisis de la influencia que la localización geográfica tiene sobre los volúmenes de lluvia registrados y el empleo de técnicas geoestadísticas con el fin de acometer la regionalización de los regímenes pluviométricos.

Comenzando con el análisis de las distribuciones de frecuencias de las rachas lluviosas se tipifican las *estructuras pluviométricas* de cada observatorio para los umbrales de 1, 5 y 10 mm/día, representándose cartográficamente los ámbitos climáticos homogéneos en base a los tipos de estructuras definidos. El cálculo estadístico de las probabilidades de ocurrencia de las secuencias lluviosas se desarrolla tanto de forma individualizada como agrupadas en cinco categorías diferentes.

El estudio del grado de *persistencia empírica* de la precipitación en cada localidad comienza con el análisis de las probabilidades empíricas de las transiciones lluviosas y la representación gráfica de las curvas de persistencia.

Seguidamente se plantea el análisis de los modelos probabilísticos markovianos de doble estado, como herramientas válidas a la hora de explicar el comportamiento pluviométrico propio de la precipitación en los diferentes ámbitos climáticos de la CAPV.

Utilizando las probabilidades de los cinco órdenes markovianos aplicados se estudian las probabilidades teóricas de ocurrencia de cada tipo de racha y sus correspondientes diferencias con respecto a la realidad empírica por estación y umbral.

El *análisis de la bondad* de los diferentes modelos markovianos mediante el estadístico  $X^2$  nos permite la regionalización de los días lluviosos a partir de

los modelos teóricos de Markov que explican la persistencia empírica de la precipitación en cada lugar de la comunidad autónoma.

En un primer momento, el apartado metodológico fue redactado en un único capítulo de forma detallada y, la presentación de los resultados aparecía en el capítulo inmediatamente posterior. Sin embargo, dado el tamaño de los apartados resultantes fue modificada la organización inicial con la intención de facilitar la lectura de la obra y dotar al conjunto de una estructura más armónica y compensada. De esta forma, según se avanza en la lectura del documento resultará habitual la presencia, dentro de cada capítulo, de un primer apartado metodológico y de un segundo apartado en donde se muestran los resultados obtenidos, formando el propio orden de los capítulos en sí mismos, el hilo metodológico de la obra.

A lo largo de esta concatenación de las fases metodológicas se elaboran múltiples composiciones cartográficas. Para ello se emplean diferentes técnicas propias de los sistemas de información geográficos (SIG) y métodos geoestadísticos de interpolación numérica.

Es necesario señalar que la elaboración de las cartografías climáticas nunca ha sido el objetivo principal de la obra sino que se plantea como una herramienta útil de cara al análisis geográfico de la persistencia de la precipitación en la CAPV.

Algunas de las composiciones más significativas se introducen directamente en el texto en forma de figuras, encontrándose los mapas originales recogidos para su consulta detallada, en mayor tamaño, en el Anexo Cartográfico.

Dada la importante diversidad de aspectos cartográficos considerados (mapas de localización, modelo digital del terreno, mapas de puntos proporcionales, composiciones cartográficas, superposiciones de mapas,

mapas de isolíneas...) se ha considerado útil elaborar un breve apartado transversal dedicado a las diferentes técnicas SIG y geoestadísticas empleadas para su elaboración.

El abanico de representaciones cartográficas elaboradas referentes a las secuencias lluviosas y a las probabilidades empíricas de las mismas ha sido diverso, pudiendo señalarse diferentes tipos de mapas.

El modelo digital del terreno se ha creado a partir de 7.565 puntos de altitud distribuidos por la comunidad autónoma generándose una rejilla de 142 columnas por 113 filas mediante la aplicación de la técnica de Kriging apoyada en un variograma lineal. El procedimiento generado para la estimación de los valores de altitud ha realizado búsquedas en los cuatro sectores empleando un número máximo de seis datos muestrales en cada sector, siendo necesarios un mínimo de cinco puntos muestrales entre los cuatro sectores para realizar las estimaciones. Posteriormente la malla del modelo ha sido recortada por el borde autonómico de la CAPV simplificado, para generar una imagen o mapa hipsométrico sometido en su representación visual a diferentes escalas de color. Este hecho nos permite identificar y discriminar las zonas elevadas de las deprimidas orográficamente.

Un segundo grupo de representaciones parten de esta base hipsométrica de fondo bien como mapa topográfico bien como imagen, a la que se le ha superpuesto otro tipo de cartografías que representan mediante símbolos proporcionales (gotas de agua) diferentes indicadores climáticos. A este grupo de composiciones pertenecen los mapas que representan los indicadores pluviométricos básicos

La dimensión de los símbolos se precisa a partir de un método de proporción lineal en donde para cada indicador se define un valor mínimo (aquella estación con el valor más bajo) y un valor máximo (la de valor más elevado),

caracterizándose el resto de símbolos por mantener un tamaño proporcional respecto a los valores que representan. Los valores máximos y mínimos pueden ser consultados en las leyendas de los propios mapas.

Existe un tercer grupo de representaciones cartográficas en las que la componente principal de su elaboración está marcada por el uso de diferentes técnicas de interpolación espacial. Se ha experimentado con una gran cantidad de técnicas, seleccionando finalmente aquellas que resultaron más expresivas con respecto a la realidad climática de la comunidad.

El mapa de regionalización de los regímenes pluviométricos se genera por la creación de una grid a partir de la técnica del Kriging JOURNEL (1989), CRESSIE (1990), apoyada en una función lineal, y la posterior creación de un mapa de isolíneas que es representado en forma de cuatro niveles correspondientes a los diferentes regímenes pluviométricos.

Para la creación de los mapas de regionalización de las estructuras pluviométricas se interpolan los valores que representan los tipos pluviométricos de todos los observatorios (incluyendo también en esta ocasión Laguardia), mediante el empleo de la técnica del vecino más próximo (*Nearest Neighbour*) caracterizada por asumir el hecho de que aquellos espacios mas próximos a un punto muestral (BOSQUE SENDRA, 1997) toman el valor de ese punto muestral.

La preparación de las mallas interpoladas para los mapas de probabilidad empírica de las rachas por categorías se fundamenta en la técnica de las funciones de base radial multicuadráticas, CARLSON y FOLEY (1991), POWELL (1990).

Para la ilustración de las representaciones de los días de lluvia a partir de los órdenes markovianos se emplea la técnica *del inverso de la distancia*, DAVIS (1986), FRANKE (1982), con un factor de suavizado elevado. De este



modo, se obtiene una imagen, en la que la representación de los órdenes markovianos resulta continua. Seguidamente, se discretiza el hecho mediante la definición de isolíneas que contrastan el espacio la transición entre órdenes.

### **4.3 Estructura de la obra**

El conjunto de la obra se ha organizado a partir de un volumen principal y un *CD* adjunto con todos los anexos.

El volumen principal se encuentra formado por un índice, diez capítulos de contenidos, las referencias bibliográficas, un anexo cartográfico.

El orden capitular dado atiende a una introducción, la hipótesis de trabajo, el estado de la cuestión, las fuentes de datos, el desarrollo metodológico, la presentación de resultados y las conclusiones.

El *Capítulo II* se dedica al análisis del *estado de la cuestión* y define, el marco teórico en el que se inserta el presente trabajo en relación con el análisis de la propiedad de la persistencia y la aplicación de los modelos markovianos. Posteriormente, en el *Capítulo III* se examinan las fuentes de datos meteorológicas. El *Capítulo IV* incide en la aplicación práctica del enfoque propio de la climatología descriptiva de cara a lograr la caracterización pluviométrica detallada de la zona estudiada. El *Capítulo V* se centra en el análisis de la diversidad de las estructuras pluviométricas en la CAPV. El *Capítulo VI* presenta el estudio de las probabilidades empíricas de las rachas lluviosas y de las transiciones lluviosas como indicadores empíricos del grado de persistencia de la precipitación. El *Capítulo VII* está propuesto para la aplicación de los modelos markovianos al análisis de la persistencia de la precipitación en la CAPV.

Seguidamente, en el *Capítulo VIII* se presentan unas fichas síntesis en donde se recogen los aspectos más relevantes de cada observatorio estudiado, atendiendo a los diferentes parámetros clave manejados a lo largo del trabajo. Finalmente, en el *Capítulo IX* se redactan las conclusiones generales propias de la obra.

En el *Anexo Cartográfico* se representan los mapas elaborados a lo largo de la obra, empleados en los diferentes análisis pluviométricos. Algunas de estas cartografías aparecen ya insertadas en el texto si bien, quedan también recogidos en este anexo al poder apreciarse los mapas a una escala de mayor detalle.

En el tomo principal se encuentra adherido un Anexo Digital en forma de CD con todos los anexos referentes a los materiales empleados, los ficheros de datos, las representaciones gráficas y los procesos intermedios de cálculo desarrollados a lo largo de la obra. Se ha optado por una presentación digital al suponer su impresión un volumen muy elevado de páginas.

El CD se encuentra preparado para ser consultado en cualquier PC de una forma ágil a través de un índice principal que nos permite abrir directamente cada uno de los documentos que se encuentran en su interior de forma sencilla.