



Canal de
Isabel II

CUADERNOS DE I+D+I

2

Identificación de rachas
y tendencias hidrometeorológicas

EN EL ÁMBITO DEL SISTEMA DE CANAL DE ISABEL II



CUADERNOS DE I+D+I

2

Identificación de rachas
y tendencias hidrometeorológicas
en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II



© Canal de Isabel II - 2008

Autores: Luis García y Alejandro Carrasco Mínguez
Dirección del Estudio: Juan Carlos Ibáñez Carranza
Edición coordinada por: Subdirección de Comunicación y RR.PP.

ISBN: 978-84-933694-6-0



EXCLUSIÓN DE RESPONSABILIDAD



Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.



PRESENTACIÓN



Los cuadernos de I+D+I de Canal de Isabel II forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo del Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde Canal de Isabel II para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones, es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Además de su publicación en forma impresa, los cuadernos están disponibles en la página web de Canal de Isabel II, en el apartado de Publicaciones.

FICHA TÉCNICA

Título del proyecto	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
Línea de investigación	Aseguramiento de la continuidad estratégica del servicio
Unidades implicadas de Canal de Isabel II	Subdirección de I+D+I
Participación externa	Ecología y Tecnología del Medio Ambiente, S.A.
Objeto y justificación del proyecto	Conocer mejor el comportamiento de las aportaciones a los embalses de Canal de Isabel II en el medio plazo (nivel mensual, estacional y anual). En particular, identificar patrones de comportamiento no aleatorio e independientes del ciclo estacional, que sean cuantificables estadísticamente y que, eventualmente, puedan aplicarse al pronóstico de aportaciones a medio plazo.
Contribución al estado del arte	Las técnicas estadísticas en que se ha basado el análisis son convencionales, si bien su aplicación sistemática a un conjunto amplio de series de aportación con el fin de identificar y extraer las componentes no estacionales y no aleatorias, puede considerarse novedosa.
Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes	La investigación ha proporcionado resultados significativos para un sistema hidrológico bastante relevante y representativo de la región central de la península Ibérica.
Resumen de resultados obtenidos	Conocimiento soportado en datos e independiente de la perspectiva de la explotación sobre la persistencia de las situaciones hidrológicas de escasez, los comportamientos cíclicos no estacionales y, en definitiva, la relación entre aportaciones pasadas con las aportaciones esperables en el medio y largo plazo.
Líneas de investigación abiertas para la continuación de los trabajos	a) Aprovechamiento de las relaciones observadas entre variables hidrológicas para mejorar la capacidad de pronóstico de aportaciones futuras. b) Profundización del conocimiento de la aparente tendencia decreciente de las aportaciones primaverales, observada en los datos de 1940-2003.

RESUMEN EJECUTIVO

La existencia de ciclos o rachas de diversa duración e intensidad, en el régimen de precipitaciones de una zona o en el comportamiento de los caudales circulantes por los ríos, forma parte de la realidad hidrometeorológica de cada sistema hídrico y, en ocasiones, se constata de forma dramática como en el caso de las sequías severas. Prescindiendo del ciclo estacional, que está incorporado desde el principio en el diseño de un sistema de embalses como el de Canal de Isabel II en su abastecimiento a la Comunidad de Madrid, cabe preguntarse si otros ciclos o rachas, los que se manifiestan en fenómenos como las sequías, obedecen a patrones de comportamiento que se puedan identificar y caracterizar de forma cuantitativa o si, por el contrario, tienen carácter aleatorio (o no distinguible de aleatorio con la información disponible). El interés de la cuestión es indudable: en caso de existir tales patrones de comportamiento no aleatorios, su conocimiento permitiría anticipar la evolución de las aportaciones futuras y, en consecuencia, mejorar la gestión del recurso en situaciones de escasez u otras situaciones adversas.

En términos generales, la investigación realizada intenta responder a la siguiente pregunta: ¿existe alguna característica del comportamiento de las aportaciones que no pueda explicarse de forma satisfactoria a partir de la combinación de un ciclo estacional y una componente aleatoria? Dado que de existir alguna de tales características, se manifestaría en forma de relaciones cuantificables entre las aportaciones de uno o varios periodos con las aportaciones de uno o varios periodos posteriores, la cuestión investigada puede formularse también así: ¿están las aportaciones de un periodo condicionadas en alguna medida por las aportaciones de periodos anteriores?

El nivel temporal del análisis realizado corresponde a lo que podríamos llamar medio y largo plazo: aportaciones mensuales, estacionales, anuales y plurianuales. Es decir, el nivel temporal en que se manifiestan fenómenos como las sequías.

La forma más simple en la que las condiciones hidrológicas de un periodo pueden condicionar las del siguiente es persistiendo. Si las variaciones de las variables hidrológicas se producen en una escala temporal de duración mayor que el periodo de análisis, por ejemplo una situación de sequía en un periodo, tenderá a trasladarse al siguiente. En este trabajo se han considerado dos tipos de persistencia: persistencia pluviométrica y persistencia hidrológica. La primera se refiere a las precipitaciones, y la segunda a las condiciones hidrológicas de la cuenca que inciden en la respuesta a las precipitaciones, y en la producción de caudales base: humedad edáfica, nivel de acuíferos, acumulación de nieve, etc. Se parte del principio de que la persistencia de las aportaciones puede resultar de la persistencia pluviométrica, de la persistencia hidrológica o de una combinación de ambas.

Los datos de partida para el estudio han sido las series de aportaciones a las cuencas alimentadoras de los embalses de Canal de Isabel II de los años hidrológicos 1940-41 a 2003-04. También, como referencia de precipitación, se han utilizado los datos históricos de precipitación acumulada mensual en la estación meteorológica de Retiro del Instituto Nacional de Meteorología.

Se han empleado varias técnicas de análisis estadístico, todas ellas conocidas y de uso habitual, encaminadas a evaluar diversas hipótesis sobre la aleatoriedad de las series de datos hidrológicos:

- 1) Coeficiente de correlación y su significación estadística, como medida general de dependencia entre variables. Se ha utilizado para evaluar la existencia de tendencia significativa en las series (correlación con la variable tiempo), la independencia de la serie (coeficiente de autocorrelación) y las relaciones entre precipitación y aportación y entre aportación de un periodo con la del periodo anterior.

- 2) Test de tendencia de Mann-Kendall, utilizado para contrastar la tendencia en las series.
- 3) Test de las rachas, que se ha empleado para evaluar la aleatoriedad de la formación de rachas en las series.
- 4) Autocorrelogramas, aplicados a las series anuales para tratar de identificar comportamientos cíclicos plurianuales.
- 5) Tablas de contingencia, aplicadas en el nivel anual para investigar posibles relaciones entre las aportaciones de un año y las del siguiente.

La investigación realizada ha consistido en la aplicación sistemática de las técnicas anteriores a las series hidrológicas del sistema de embalses de Canal de Isabel II, y en la integración de los resultados que proporcionan. De esta manera, se ha generado conocimiento en la línea de las preguntas planteadas más arriba. De este conocimiento se derivan las conclusiones más relevantes del estudio:

- a) Existe una clara persistencia de las aportaciones en el nivel mensual, que no parece tener correspondencia con persistencia pluviométrica (esta última, si existe, es mucho más débil). Parece plausible pues, atribuir la persistencia de las aportaciones mensuales a lo que más arriba se ha denominado persistencia hidrológica.
- b) En el nivel estacional también se observa persistencia de las aportaciones, aunque más débil que la mensual y ausente entre verano y otoño. Esto último cabe atribuirlo al efecto del estiaje en las variables responsables de la persistencia hidrológica.
- c) Aparentemente, existe una tendencia a largo plazo decreciente y estadísticamente significativa en las aportaciones de primavera. El tipo de investigación realizado no proporciona una explicación causal para esta observación, por lo cual tampoco puede hacerse un pronóstico fiable de su posible evolución futura.
- d) Con los resultados del análisis realizado no se puede rechazar la hipótesis de que las aportaciones de un año hidrológico sean estadísticamente independientes de las del año anterior. Dicho de otro modo, no se han encontrado evidencias que permitan afirmar que, por ejemplo, un año hidrológico seco tenga una probabilidad de ser seguido por otro año seco distinta de la que tiene un año cualquiera.
- e) Tampoco se han detectado comportamientos cíclicos plurianuales ni se han podido identificar elementos no aleatorios en la formación de rachas de años secos o rachas de años húmedos.
- f) Los resultados (d) y (e) indican que existe una independencia serial completa en las aportaciones anuales. Esta conclusión es relevante para cualquier intento de pronóstico sobre aportaciones anuales. Así, se desprende de ella que el conocimiento de las aportaciones de un año hidrológico no proporciona información relevante sobre las aportaciones del año que le sigue. Y también, desde otro punto de vista, que el número de años transcurridos desde el inicio de una sequía plurianual en curso no aporta ninguna información sobre el número de años secos que aún quedan para concluir la racha.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN página 16

- 1.1. Planteamiento del problema
- 1.2. Plan del documento

2. DATOS DE PARTIDA página 22

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS página 26

- 3.1. Coeficiente de correlación
- 3.2. Test de tendencia de Mann-Kendall
- 3.3. Test de las rachas
- 3.4. Autocorrelograma
- 3.5. Tablas de contingencia

4. APORTACIONES DE LA CUENCA DE EL VADO página 36

- 4.1. Nivel mensual
- 4.2. Nivel trimestral
- 4.3. Nivel anual
- 4.4. Conclusiones

5. PRECIPITACIÓN EN RETIRO página 50

- 5.1. Nivel mensual
- 5.2. Nivel trimestral
- 5.3. Nivel anual
- 5.4. Conclusiones

6. APORTACIÓN AGREGADA página 60

- 6.1. Nivel mensual
- 6.2. Nivel trimestral
- 6.3. Nivel anual
- 6.4. Conclusiones

7. OTRAS SERIES DE DATOS DE APORTACIÓN página 74

- 7.1. Pinilla
- 7.2. Lozoya aguas arriba de Riosequillo
- 7.3. Puentes Viejas
- 7.4. Lozoya aguas arriba de El Villar
- 7.5. El Atazar
- 7.6. Lozoya aguas arriba de El Atazar
- 7.7. Pedrezuela
- 7.8. Navacerrada
- 7.9. Manzanares
- 7.10. Navalmedio
- 7.11. La Jarosa
- 7.12. Las Nieves

8. CONCLUSIONES página 124

- 8.1. En el nivel mensual
- 8.2. En el nivel trimestral
- 8.3. En el nivel anual

9. REFERENCIAS página 130

1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La existencia de ciclos o rachas de diversa duración e intensidad en el comportamiento de las aportaciones es un hecho que se constata en la explotación de los embalses, a veces de forma dramática, como es en el caso de las sequías.

Prescindiendo del ciclo estacional, perfectamente caracterizado e incorporado de origen en el diseño de un sistema de embalses como el de Canal de Isabel II, cabe preguntarse si otros ciclos o rachas, los que se manifiestan en fenómenos como las sequías, obedecen a patrones de comportamiento identificables y cuantificables o si, por el contrario, son aleatorios (o, al menos, indistinguibles de un fenómeno aleatorio con la información disponible). La cuestión tiene un interés indudable: en caso de existir patrones de comportamiento no aleatorios y cuantificables, estos podrían servir para anticipar la evolución de las aportaciones futuras y, en consecuencia, permitirían mejorar la gestión de fenómenos adversos como las sequías.

En términos generales, la cuestión que intenta responder la investigación que se presenta en este cuaderno de I+D+i, puede formularse de la siguiente manera: ¿existe alguna característica del comportamiento de las aportaciones que no pueda explicarse de forma satisfactoria a partir de la combinación de un ciclo estacional y una componente aleatoria? De existir características de este tipo, se manifestarían como relaciones cuantificables entre las aportaciones de uno o varios periodos con las aportaciones de uno o varios periodos posteriores. En este sentido, la cuestión investigada puede formularse también así: ¿están las aportaciones de un periodo condicionadas en alguna medida por las aportaciones de periodos anteriores?

La primera formulación lleva implícita la naturaleza esencialmente estadística del análisis realizado: una vez eliminada la estacionalidad de una serie, se trata de testar hipótesis estadísticas relacionadas con su aleatoriedad. La segunda formulación apunta hacia la aplicación práctica de los resultados del análisis: se buscan relaciones que aporten información sobre aportaciones futuras a partir de los datos conocidos sobre aportaciones pasadas.

Por lo dicho, queda claro que el nivel temporal del análisis que se plantea corresponde a lo que podríamos llamar medio y largo plazo: aportaciones mensuales, estacionales, anuales y plurianuales. Es decir, el nivel temporal en que se manifiestan fenómenos como las sequías.

La forma más simple en la que las condiciones hidrológicas de un periodo pueden condicionar las del siguiente es persistiendo: si las oscilaciones de las variables hidrológicas siguen ciclos de duración mayor que el periodo de análisis, es evidente que una situación de, por ejemplo, sequía en un periodo se trasladará al siguiente. En este trabajo se han manejado dos conceptos relacionados con la persistencia:

- Persistencia pluviométrica. En la medida en que los episodios de escasez o de abundancia de precipitaciones tengan duraciones típicas mayores que el periodo de análisis, la desviación respecto de los valores normales de la aportación en un periodo tenderá a trasladarse al periodo siguiente. Si una sequía meteorológica dura más de un año, la correspondiente sequía hidrológica también durará más de un año.
- Persistencia hidrológica. Si en un periodo hay aportaciones más abundantes de lo normal, es de suponer que, en ese periodo, el estado de humedad de la cuenca ha sido mayor que el habitual. En la medida en que esa mayor humedad de cuenca persista en el periodo siguiente, redundará en una tendencia a mayores aportaciones: caudales de base altos y mayor respuesta a las precipitaciones que puedan producirse. Se incluye aquí lo que podríamos llamar "persistencia nival" que, en el nivel mensual, sería la consecuencia de ciclos de deshielo de duración superior a un mes.

Con todo, cabe advertir aquí que la persistencia de las sequías operacionales, que es la que tiende a percibir el explotador, puede ser distinta (en general, mayor) que la persistencia de las sequías hidrológicas, que es la que puede ser relevante para estimar aportaciones futuras. Una secuencia seco-normal-seco puede ser, desde el punto de vista operacional, una sequía que persiste 3 periodos, aunque desde el punto de vista hidrológico, puede no haber tal persistencia.

1.2. Plan del documento

La investigación realizada se expone en los epígrafes 2 a 8 siguientes, según el esquema de contenido que se indica a continuación:

Epígrafe 2. Datos de partida

Se indican cuáles han sido las fuentes de datos y los criterios de selección y validación a partir de los cuales se han formado las series de datos hidrológicos y meteorológicos que se han sometido a estudio.

Epígrafe 3. Metodología de análisis

Se describe el tipo de análisis estadístico realizado, detallando el fundamento de cada técnica y su aplicación al problema investigado.

Epígrafe 4. Aportaciones de la cuenca de El Vado

Se expone el análisis realizado sobre las series de aportaciones mensuales, trimestrales y anuales de la cuenca del embalse de El Vado.

El análisis se ha realizado en primer lugar sobre esta serie hidrológica porque es una de las que presenta, en apariencia, mejor consistencia en los datos. Los resultados del análisis de esta serie servirán como referencia para el análisis de las demás.

Epígrafe 5. Precipitaciones en Retiro

Un comportamiento no aleatorio en una serie de aportaciones podría tener diversas causas pero, parece evidente que el primer lugar donde buscar es en el comportamiento de las precipitaciones. Por ejemplo, la formación de ciclos o una tendencia a largo plazo en las precipitaciones explicaría de forma inmediata un comportamiento similar en las aportaciones correspondientes.

De los datos de precipitación disponibles, la única serie que tiene una longitud suficiente para el análisis es la de Retiro, en Madrid. Aunque esta estación no está en la zona de las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II, se supone que en los niveles mensual, trimestral y anual, sus datos son representativos del régimen de precipitaciones general en dichas cuencas: un noviembre seco en Madrid será, en la mayoría de los casos, un noviembre seco en la cuenca del embalse de Manzanares, por ejemplo.

En el epígrafe 5 se analizan las series de precipitaciones mensuales, trimestrales y anuales de Retiro. Este análisis ha de permitir evaluar hasta qué punto los comportamientos no aleatorios que se identifiquen en las series de aportaciones provienen de comportamientos no aleatorios de las precipitaciones.

Epígrafe 6. Aportación agregada

En este epígrafe se estudia el comportamiento de la serie de aportaciones formada por la agregación de las series validadas de cuencas individuales. Esta serie pretende representar el comportamiento de la aportación total al sistema y, por tanto, las conclusiones de su análisis resultan especialmente relevantes.

Epígrafe 7. Otras series de aportación

El análisis se ha extendido a un conjunto de 14 series de aportaciones, aplicando en todas ellas la misma metodología. Los resultados obtenidos también son similares. Se ha renunciado a la exposición pormenorizada de estos análisis, ya que daría resultado a un documento más largo y tedioso de lo necesario, y en su lugar se realiza una recopilación somera de los aspectos más relevantes.

Epígrafe 8. Conclusiones

Finalmente, se exponen las conclusiones que se extraen del análisis realizado.

2

Datos de partida

Canal de Isabel II dispone de series de datos de caudales aportados por las cuencas de los embalses que gestiona que, en el nivel mensual, se remontan hasta el año hidrológico 1913-14. Adicionalmente, dispone de series más o menos completas de datos meteorológicos y de explotación de los correspondientes embalses a partir de las fechas en que estos entran en servicio (precipitación y temperatura en la presa, volumen de embalse, entradas distintas de la aportación de la cuenca propia, salidas). También se dispone de la serie de precipitación en la estación de Retiro (Madrid), desde 1901 en el nivel mensual.

La búsqueda de relaciones estadísticas entre variables puede llegar a conclusiones completamente erróneas si se realiza sobre datos sin la suficiente calidad. Cuando los datos carecen de suficiente precisión, el error aleatorio puede enmascarar las relaciones que se buscan. En otros casos, cuando las series de datos contienen errores sistemáticos o han sido reconstruidas de forma artificiosa, el análisis puede detectar relaciones que reflejan más las características del proceso de elaboración de las series que el comportamiento real del fenómeno que se pretende representar con ellos.

Para evitar posibles problemas como los descritos en el párrafo anterior, se ha realizado un examen de las series de datos y se ha adoptado un criterio selectivo a la hora de considerarlos aptos para el análisis. Como resultado de este análisis se ha optado por prescindir de los datos de aportaciones anteriores al año 1940-41. Aunque sean adecuados para otras aplicaciones, estos datos son los menos fiables por su antigüedad y por su origen: la mayoría son series reconstruidas a partir de otras.

Cuestiones sobre notación

Para simplificar la escritura, los años hidrológicos se refieren, en el presente documento, por el año natural en el que comienzan. Así, el año hidrológico 1968-69 se denota simplemente 1968. Cuando se citan años naturales, para evitar confusiones, esta circunstancia se expresa explícitamente.

Para los trimestres se adopta a veces la siguiente notación, basada en las iniciales de los meses:

- Otoño (octubre, noviembre y diciembre): OND
- Invierno (enero, febrero y marzo): EFM
- Primavera (abril, mayo y junio): AMJ
- Verano (julio, agosto y septiembre): JAS

3

Metodología de análisis

La investigación se ha basado en la aplicación de un conjunto de técnicas de análisis estadístico, todas ellas de empleo frecuente y recogidas en los manuales de estadística al uso. Con todo, en los epígrafes siguientes se describen de manera somera y, además, se explica el modo concreto en que han sido aplicadas en este trabajo.

3.1. Coeficiente de correlación

3.1.1. Concepto

El coeficiente de correlación, r , se puede emplear como medida general de la correspondencia entre dos variables. En rigor, el coeficiente de correlación mide el grado de correspondencia lineal entre dos variables.

Las eventuales dependencias entre variables hidrológicas no suelen ser lineales. Sin embargo, en muchos casos sí son monótonas (crecientes o decrecientes) y el análisis se restringe a un rango de variación en que una buena parte de la variabilidad se puede representar mediante funciones lineales. Se supone, por tanto, que el coeficiente de correlación tiene capacidad para detectar estas dependencias.

Dada una muestra de n pares (x, y) , el valor del coeficiente de correlación correspondiente se determina según:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x) \cdot (y_i - m_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - m_y)^2}}$$

donde m_x y m_y son, respectivamente, las medias muestrales de x e y .

El coeficiente de correlación adopta valores comprendidos entre -1 y 1. Estos valores extremos indican dependencia lineal total inversa o directa respectivamente (una variable se puede expresar como función lineal de la otra; el signo de r es el signo de la pendiente de la recta). Por el contrario, cuanto más próximo a 0 es el valor de r , menos dependencia lineal se manifiesta entre las dos variables.

El cuadrado del coeficiente de correlación, r^2 , es el coeficiente de regresión o coeficiente de determinación. Su valor, comprendido entre 0 y 1, es la fracción de la varianza de una de las variables que puede ser explicada mediante una función lineal de la otra variable.

Significación estadística del coeficiente de correlación

Dada una muestra de pares (x, y) obtenida a partir de dos variables x e y independientes, el coeficiente de correlación r correspondiente adoptará un valor que esperamos próximo a 0. En la medida en que se aleje de 0, la hipótesis de que x e y son independientes será menos verosímil. Pero ¿cuánto se tiene que separar de 0 para considerar que un valor de r refleja una dependencia significativa entre x e y ? Esto se puede evaluar mediante el valor de significación de r en la hipótesis nula de independencia lineal entre x e y .

En la hipótesis nula, el estadístico t , que se define a continuación, sigue una distribución t de Student de $n-2$ grados de libertad (t_{n-2})¹:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}}$$

El valor absoluto de t , $|t|$, es creciente con el valor absoluto de r . De este estadístico se desprende inmediatamente un contraste para la hipótesis nula que proporciona un valor p de significación para r : $p=2 \cdot \Pr[t_{n-2} \geq |t|]$.

3.1.2. Aplicación

En esta investigación, r se ha adoptado como medida general de dependencia o interrelación entre series de datos y se le ha dado varias aplicaciones:

- a) Medida de la tendencia de una serie temporal: coeficiente de correlación entre la serie y la variable tiempo.
- b) Medida de la independencia de una serie temporal: coeficiente de autocorrelación de orden 1 (es decir, correlación entre la serie temporal y la misma serie retrasada en un periodo).
- c) Medida de la dependencia entre aportaciones y precipitaciones del mismo periodo: coeficiente de correlación entre la serie de aportaciones y la serie de precipitaciones correspondiente.
- d) Medida de la dependencia entre las aportaciones de un periodo y las aportaciones del periodo anterior: coeficiente de correlación entre las dos series de aportaciones.

Es conveniente poner de relieve que las medidas (b) y (d) corresponden a planteamientos diferentes cuando se analiza el nivel mensual o el trimestral. La autocorrelación de una serie de aportaciones mensuales es normalmente significativa y alta debido al efecto de la estacionalidad: la aportación de un mes tiene relación con la aportación del mes anterior simplemente porque dos meses consecutivos están siempre en una posición parecida en relación con el ciclo estacional de las aportaciones. Enero suele tener aportaciones mayores que las del mes medio y siempre sigue a diciembre, que también suele tener aportaciones mayores que las del mes medio.

Sin embargo, en el coeficiente de correlación de la serie de aportaciones de enero contra la serie de aportaciones de diciembre del mismo año hidrológico (cada enero contra el diciembre que le precede), no interviene la estacionalidad. En este caso, una correlación positiva indicaría que un enero con aportaciones altas (mayores que las del enero medio) tiende a ir precedido por un diciembre con aportaciones también altas (mayores que las del diciembre medio). Es decir, indicaría una dependencia entre las aportaciones de diciembre y las de enero no aleatoria ni atribuible a la estacionalidad.

¹ LOWRY, R., internet

3.2. Test de tendencia de Mann-Kendall

3.2.1. Concepto

Se trata de un test no paramétrico para evaluar si existe tendencia en una serie temporal. La descripción del test puede encontrarse en DOUGLAS et al. 2000.

El estadístico de prueba, para una serie de n valores $x_1 \dots x_n$, es:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j)$$

donde la función $\text{sgn}(x)$ es la función signo que devuelve 1 si $x > 0$, -1 si $x < 0$ y 0 si $x = 0$. Cuanto más se aparta una serie del comportamiento estacionario, más alejado de 0 es el valor de S correspondiente. Los valores negativos de S indican tendencias crecientes y los valores positivos indican tendencias decrecientes.

En la hipótesis nula (la serie es estacionaria) se tiene que el valor esperado y la varianza de S valen:

$$E[S] = 0$$

$$D^2[S] = \frac{n \cdot (n-1) \cdot (2n+5)}{18} = \sigma^2$$

Para $n > 10$ el estadístico $Z_S = \frac{S - \text{sgn}(S)}{\sigma}$ sigue aproximadamente una distribución normal estándar,

por lo que el valor de significación de Z_S se calcula como: $p = 2 \cdot \Pr[v \geq |Z_S|]$, donde v representa una variable aleatoria normal estándar.

3.2.2. Aplicación

El test se ha utilizado para evaluar la existencia de tendencia en las series de aportaciones. Realmente, la tendencia se ha evaluado sistemáticamente mediante el coeficiente de correlación entre la serie y la variable tiempo. En los casos en que el coeficiente de correlación detecta una tendencia significativa, este resultado se ha contrastado con el test de Mann-Kendall.

3.3. Test de las rachas

3.3.1. Concepto

Consideremos una serie temporal de la variable ξ_t y supongamos que los valores de ξ_t se pueden clasificar en dos categorías a y b (por ejemplo, en función de que sean mayores o no que un valor umbral determinado, x_u). Una sucesión de n valores de la misma categoría precedida y seguida por un valor de categoría distinta es una racha de longitud (o duración) n . La siguiente secuencia de 30 valores:

aababbbbaabaabbabbbbaabaabbaab

formada por 15 valores a y 15 valores b , tiene 16 rachas, cuyas longitudes varían entre 1 y 4.

El número de rachas de una secuencia es una variable aleatoria cuya distribución depende de determinadas características de la serie temporal ξ_t . Si los ξ_t son *iid* (independientes e idénticamente distribuidos: la serie verifica los requisitos de independencia y estacionariedad), diremos que la serie es aleatoria. En este supuesto, el número de rachas para una secuencia con n_a valores a y n_b valores b y $n_a > 30$ ó $n_b > 30$, se distribuye aproximadamente según una distribución normal de media y varianza dadas por²:

$$\mu_R = \frac{2 \cdot n_a \cdot n_b}{n_a + n_b} + 1 \quad \sigma_R = \frac{2 \cdot n_a \cdot n_b \cdot (2 \cdot n_a \cdot n_b - n_a - n_b)}{(n_a + n_b)^2 \cdot (n_a + n_b - 1)}$$

Determinadas características de la serie hacen que el número de rachas se separe de la anterior distribución:

- a) Si existe una tendencia en la serie (es decir, esta no es estacionaria), el número de rachas tiende a ser menor, ya que un determinado valor predomina en la parte inicial de la serie y el otro predomina en la parte final.
- b) Si existen ciclos de periodo más o menos largo (por tanto, no hay independencia), el número de rachas tiende a ser menor: en cada semiperiodo predomina uno de los valores.
- c) Si existe un comportamiento alternante (por tanto, no hay independencia) el número de rachas tiende a ser mayor que el correspondiente al caso aleatorio: la alternancia corta las rachas.

El test de las rachas evalúa el número de rachas de una secuencia sobre la hipótesis nula de que la serie es aleatoria. La distribución del número de rachas en la hipótesis nula es aproximadamente la normal de media y varianza dadas más arriba. Sobre esta distribución se evalúa la probabilidad de obtener un número de rachas tanto o más alejado de la media (2 colas) que el obtenido.

3.3.2. Aplicación

El test se ha aplicado a las series temporales de aportaciones y de precipitaciones, en los niveles mensual, trimestral y anual. Para ellos, las series temporales de datos hidrológicos se han transformado en series categóricas, tomando un valor umbral y calificando los datos en inferiores o no inferiores al valor umbral.

Para eliminar el efecto de la estacionalidad en el caso de series temporales mensuales o trimestrales, el valor umbral se ha hecho dependiente del mes o del trimestre. De esta forma, la probabilidad de ser superado es la misma independientemente del mes o del trimestre de que se trate.

Por lo general se adoptan como umbrales la mediana (igual número de datos inferiores que no inferiores) o la media de la serie (o de las series parciales: mediana de los octubres para octubre, de los noviembre para noviembre, etc.).

² Universidad de Málaga, internet

En una serie de aportaciones en la que no se aprecia una tendencia significativa, un número de rachas significativamente menor que el esperado en la hipótesis nula indicaría la existencia de ciclos de sequía o de abundancia de aportaciones de duración mayor que la que puede esperarse por azar. Es decir, indicaría la tendencia de las condiciones hidrológicas a persistir entre periodos consecutivos.

3.4. Autocorrelograma

3.4.1. Concepto

Los autocorrelogramas se emplean habitualmente dentro del análisis de series temporales en la fase de identificación de modelos ARIMA, según la metodología clásica de Box y Jenkins. Son la representación gráfica de las funciones de autocorrelación empíricas.

Dada una serie temporal X_t con T observaciones ($t \in \{1..T\}$) se define el coeficiente de autocorrelación de orden k , r_k , como el coeficiente de correlación entre los valores de la serie y los correspondientes a un desfase de k unidades de tiempo:

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^T (X_t - \bar{X})(X_{t-k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^T (X_t - \bar{X})^2} \quad \text{donde} \quad \bar{X} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_t$$

Los valores de r_k en función de k constituyen la función de autocorrelación (ACF) de X_t y su representación en un diagrama de barras es el autocorrelograma de X_t . El nivel de significación de r_k se puede determinar según se ha explicado en 3.1.1. El autocorrelograma suele incluir dos líneas que representan los umbrales para los que r_k es estadísticamente significativo para un determinado nivel de significación (en general, 5 por ciento). En el gráfico 3.1 se presenta el autocorrelograma de la serie de aportaciones anuales de la cuenca de El Vado. El gráfico incluye el caso trivial de desplazamiento 0 ($r_0=1$).

El autocorrelograma proporciona una visión rápida de las dependencias de los valores de X_t con los valores anteriores de la serie. Un valor de r_k alto y significativo indica una relación entre el valor de la serie en el tiempo t y el que se ha producido en el tiempo $t-k$. Si los datos de la serie son anuales y, por ejemplo, existe una tendencia a formarse ciclos de 4 años, el autocorrelograma presentaría valores altos de r_k para $k = 4, 8, 12 \dots$

El autocorrelograma presenta el inconveniente de que no discrimina entre correlaciones directas e indirectas. Por ejemplo: si existe una fuerte autocorrelación de orden 1, esta inducirá también una autocorrelación indirecta de orden 2: en virtud de la autocorrelación de orden 1, los valores de X_t están relacionados con los de X_{t-1} , y los de X_{t-1} con los de X_{t-2} , por lo que los valores de X_t estarán relacionados con los de X_{t-2} a través de X_{t-1} .

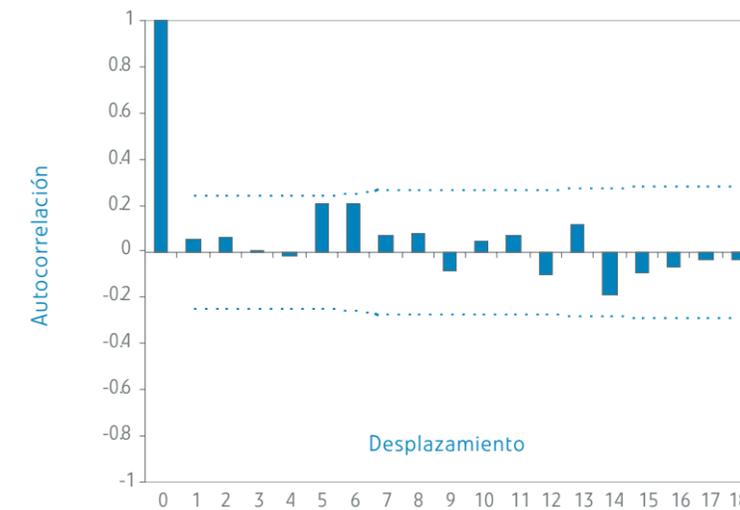
Por lo anterior, el autocorrelograma se complementa con el llamado autocorrelograma parcial. La autocorrelación parcial de orden k es la autocorrelación entre X_t y X_{t-k} que no es atribuible a las autocorrelaciones de órdenes 1 a $k-1$. El coeficiente de correlación parcial de orden k , Φ_k , es coeficiente de correlación entre X_{t-k} y los residuos de la regresión lineal de X_t sobre $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-k+1}$. Los valores de Φ_k en función de k constituyen la función de autocorrelación parcial (PACF) de X_t . El autocorrelograma parcial es la representación gráfica de la función de autocorrelación parcial.

En el gráfico 3.2 se presenta el autocorrelograma parcial para la serie de aportaciones anuales de la cuenca de El Vado. En este caso, la función de autocorrelación parcial es casi idéntica a la función de autocorrelación debido a la ausencia de autocorrelaciones significativas.

3.4.2. Aplicación

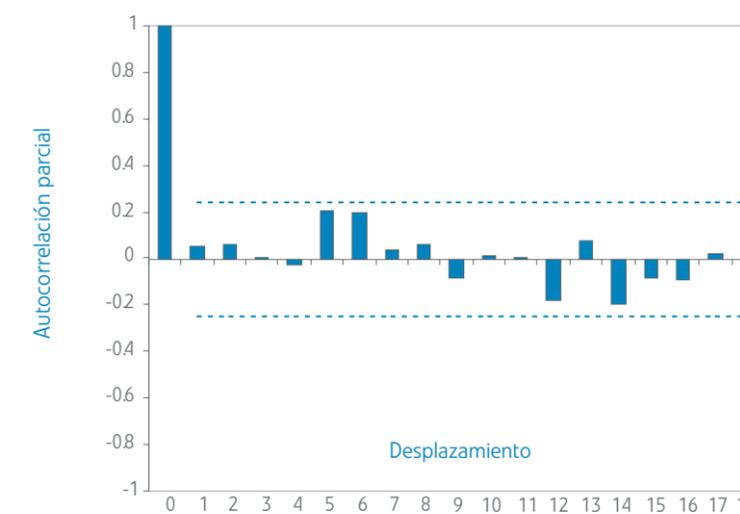
Los autocorrelogramas se han utilizado en el análisis de series de datos anuales de precipitación y aportación para intentar detectar patrones de comportamiento: persistencia, ciclos, etc. En especial, han servido para investigar si existe tendencia a formarse ciclos plurianuales.

Gráfico 3.1. Autocorrelograma de la serie de aportaciones anuales a El Vado



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

Gráfico 3.2. Autocorrelograma parcial de la serie de aportaciones anuales a El Vado



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

3.5. Tablas de contingencia

3.5.1. Concepto

Sea una muestra de N pares (x, y) , donde x e y son dos variables aleatorias categóricas que pueden tomar, respectivamente, n y m valores $(x_1, x_2, \dots, x_n$ por una parte, y_1, y_2, \dots, y_m por otra). Existen $n \cdot m$ tipos de pares posibles. Sea N_{ij} el número de pares (x_i, y_j) que hay en la muestra. Se llama tabla de contingencia de la muestra a la tabla de doble entrada que recoge el número de pares de cada tipo que se encuentran en la muestra:

	y_1	...	y_j	...	y_m
x_1	N_{11}	...	N_{1j}	...	N_{1m}
...
x_i	N_{i1}	...	N_{ij}	...	N_{im}
...
x_n	N_{n1}	...	N_{nj}	...	N_{nm}

Sea $N_{i\cdot}$ el número de veces que aparece x_i en los pares de la muestra y $N_{\cdot j}$ el número de veces que aparece y_j en los pares de la muestra. Es decir,

- $N_{i\cdot}$ es la suma de la fila i -ésima de la tabla:
$$N_{i\cdot} = \sum_{j=1}^m N_{ij}$$
- $N_{\cdot j}$ es la suma de la columna j -ésima de la tabla:
$$N_{\cdot j} = \sum_{i=1}^n N_{ij}$$
- N es la suma de todos los elementos de la tabla:
$$N = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij}$$

Dicho de otro modo, la frecuencia con que aparece x_i en la muestra es $N_{i\cdot}/N$ y la frecuencia con que aparece y_j en la muestra es $N_{\cdot j}/N$.

Supongamos ahora que las dos variables x e y son independientes. Entonces, la frecuencia con que podemos esperar que aparezca el par (x_i, y_j) en la muestra es el producto de las frecuencias de x_i e y_j : $N_{i\cdot} \cdot N_{\cdot j} / N^2$. Es decir, el valor esperado para N_{ij} , supuestos determinados $N_{i\cdot}$ y $N_{\cdot j}$ es $N_{ij}^* = N_{i\cdot} \cdot N_{\cdot j} / N$.

En otras palabras: supuestas x e y independientes, esperamos que los valores de cada fila de la tabla de contingencia se distribuyan de forma similar a la distribución de las $N_{i\cdot}$ (es decir, independientemente de los valores de y) y, también, esperamos que la distribución de los valores de cada columna de la tabla sea similar a la distribución de las $N_{\cdot j}$ (es decir, independiente de los valores de x). En la medida en que la tabla se aleje de esta distribución "equilibrada", la hipótesis de que x e y son independientes será menos verosímil.

Se demuestra³ que, en la hipótesis nula de independencia entre x e y , el estadístico X^2 siguiente se distribuye aproximadamente según una χ^2 con $(n-1) \cdot (m-1)$ grados de libertad:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(N_{ij} - N_{ij}^*)^2}{N_{ij}^*}$$

Cuanto mayor es el valor del estadístico, más alejada está la tabla de contingencia observada de la tabla de contingencia esperada en condiciones aleatorias. El valor p de significación para la hipótesis nula es, por tanto, $p = \Pr[\chi^2_{(n-1) \cdot (m-1)} \geq X^2] = 1 - F(X^2)$, siendo F la función de distribución de una variable $\chi^2_{(n-1) \cdot (m-1)}$.

3.5.2. Aplicación

En este estudio, la prueba de significación para la tabla de contingencia se ha aplicado como método para detectar la posible dependencia de las aportaciones de un año respecto de las del anterior. Para ello, dada una serie de aportaciones anuales, se procede como sigue:

1. Se determinan los terciles de la serie, es decir, los valores umbral que dividen la muestra en tres categorías con el mismo número de elementos.
2. Se califica cada año hidrológico de seco (S), normal (N) o húmedo (H) según el tercil en el que cae la aportación correspondiente. La categoría S, N o H del año es la variable x .
3. Se califica cada año hidrológico según el tercil en el que cae la aportación del año hidrológico anterior: precedido de seco (S), precedido de normal (N) o precedido de húmedo (H). La categoría S, N o H del año precedente es la variable y .
4. Con los $N-1$ pares (x, y) , donde N es el número de años de la serie, se forma la tabla de contingencia.
5. Se calcula el valor de significación de la tabla de contingencia. Si resulta significativamente pequeño (por ejemplo, inferior a 0,05) se interpreta como que existe dependencia entre las condiciones hidrológicas de un año y las del anterior.

Este test se aprovecha para incluir una categorización algo más detallada de los años (tres categorías en lugar de las dos que se han empleado para los test de rachas).

³ Ver, por ejemplo: NIST/SEMATECH, internet

4

Aportaciones de la cuenca de El Vado

La serie de aportaciones de la cuenca del embalse de El Vado ha servido como piloto para la aplicación de la metodología de análisis. Las consecuencias que se extraen del análisis de esta serie se tomarán como referencia en la evaluación de otras series.

4.1. Nivel mensual

4.1.1. Correlación entre aportaciones mensuales

La tabla 4.1 recoge la matriz de correlación de las 12 series de aportaciones mensuales de un mismo año civil. Por ejemplo, la casilla de la fila "marzo" y la columna "julio" recoge el coeficiente de correlación entre las aportaciones mensuales de marzo y las de julio del mismo año civil (-0,019). Además, los coeficientes de correlación que resultan significativos al 5 por ciento se resaltan en negrita.

Se observa que las únicas correlaciones significativas corresponden a meses próximos y que todas ellas son positivas. Estas correlaciones, que no pueden considerarse debidas al azar, indican persistencia en el nivel de aportaciones, al menos entre meses consecutivos: el mes siguiente a uno de aportaciones por encima (debajo) de lo habitual en ese mes tiende a ser también más húmedo (seco) que lo normal para el mes en cuestión.

Tabla 4.1. Matriz de correlación de las series de aportaciones mensuales a El Vado

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene	1,000	0,546	0,220	0,062	-0,016	0,085	0,161	0,049	0,028	-0,017	0,165	0,072
Feb	0,546	1,000	0,598	0,296	0,120	0,185	0,196	0,192	0,127	0,228	0,215	-0,006
Mar	0,220	0,598	1,000	0,490	0,235	0,095	-0,019	0,082	0,124	0,152	0,118	-0,085
Abr	0,062	0,296	0,490	1,000	0,507	0,216	0,169	0,108	0,129	-0,048	0,007	0,010
May	-0,016	0,120	0,235	0,507	1,000	0,667	0,359	0,167	0,018	-0,218	-0,214	-0,241
Jun	0,085	0,185	0,095	0,216	0,667	1,000	0,500	0,516	0,148	-0,162	0,003	-0,140
Jul	0,161	0,196	-0,019	0,169	0,359	0,500	1,000	0,448	0,099	-0,092	-0,099	-0,108
Ago	0,049	0,192	0,082	0,108	0,167	0,516	0,448	1,000	0,513	0,093	0,053	0,062
Sep	0,028	0,127	0,124	0,129	0,018	0,148	0,099	0,513	1,000	0,298	0,263	0,336
Oct	-0,017	0,228	0,152	-0,048	-0,218	-0,162	-0,092	0,093	0,298	1,000	0,617	0,244
Nov	0,165	0,215	0,118	0,007	-0,214	0,003	-0,099	0,053	0,263	0,617	1,000	0,424
Dic	0,072	-0,006	-0,085	0,010	-0,241	-0,140	-0,108	0,062	0,336	0,244	0,424	1,000

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa = 0,050 (prueba bilateral)

La tabla 4.2 muestra en detalle el cálculo de los coeficientes de correlación de las aportaciones de un mes con las del mes anterior. La columna r es el coeficiente de correlación, la columna n es el número de pares de datos con que se ha calculado r, t es el valor de la variable t de Student y p el correspondiente valor de significación. A diferencia de la tabla 4.1, la tabla 4.2 incluye también el coeficiente de correlación entre diciembre y enero consecutivos.

Tabla 4.2. Correlación de la aportación de un mes con la del anterior

Mes	r	n	t	p
Enero	0,322	65	2,698	0,009
Febrero	0,546	65	5,175	0,000
Marzo	0,598	65	5,922	0,000
Abril	0,490	65	4,464	0,000
Mayo	0,507	65	4,675	0,000
Junio	0,667	65	7,101	0,000
Julio	0,500	65	4,579	0,000
Agosto	0,448	65	3,978	0,000
Septiembre	0,513	65	4,740	0,000
Octubre	0,298	65	2,479	0,016
Noviembre	0,619	66	6,302	0,000
Diciembre	0,423	66	3,738	0,000

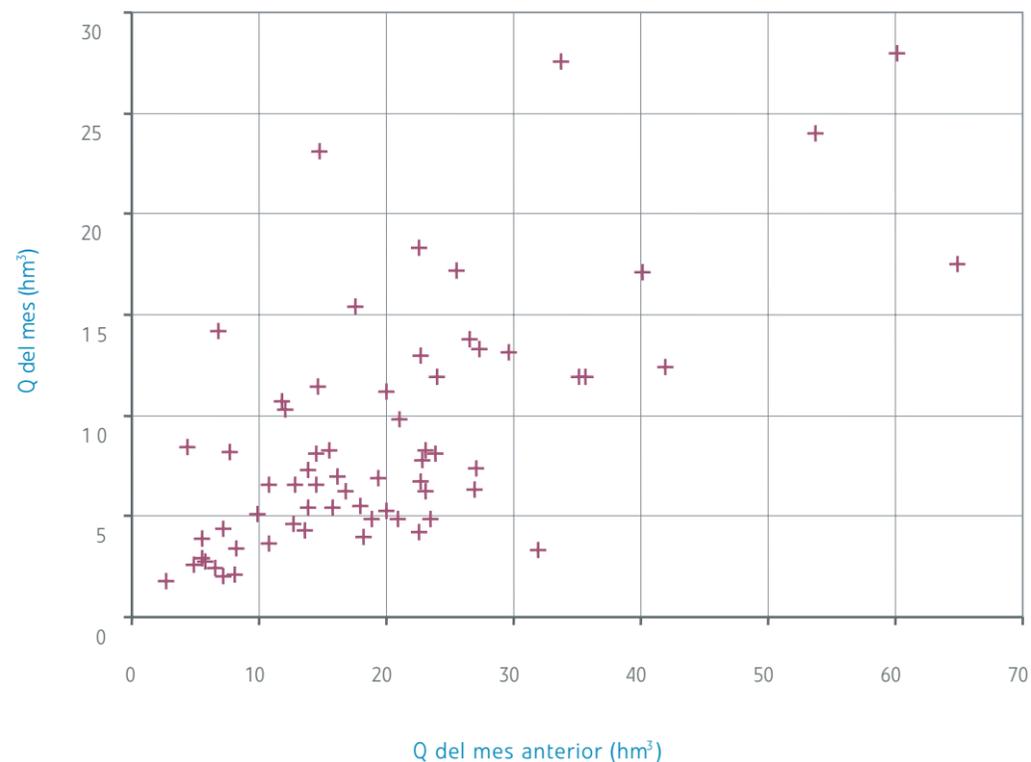
El gráfico 4.1 muestra, como ejemplo, la nube de puntos (aportación de mayo, aportación de junio).

Como ya se ha explicado (ver apartado 3.1.2), el ciclo estacional de las aportaciones no interviene en las correlaciones detectadas, tal y como se han calculado.

Una explicación para la correlación positiva y significativa detectada reside en la persistencia hidrológica de la cuenca: en un mes en el que las aportaciones han sido superiores (inferiores) a lo habitual, los almacenamientos de humedad de la cuenca están más (menos) saturados que lo habitual. En consecuencia, los caudales base que se generen en el mes siguiente y, la respuesta a las precipitaciones que se produzcan en el mes siguiente, serán más altos (bajos) que lo normal. El hecho de que la correlación de octubre con septiembre sea la más débil de las detectadas apoya esta hipótesis: al final del estiaje, la variabilidad que pueda existir en las condiciones hidrológicas de la cuenca (que siempre serán secas) no parece que puedan tener reflejo en las aportaciones del mes siguiente. El estiaje produce lo que podríamos denominar "puesta a cero hidrológica" de la cuenca.

Una explicación alternativa puede buscarse en el comportamiento de las precipitaciones. Si las rachas de tiempo lluvioso o de tiempo seco tienen duraciones típicas de más de un mes, las condiciones hidrometeorológicas de un mes tienden a persistir en el mes siguiente. Es decir, si hay persistencia pluviométrica entre meses, esta se traducirá en persistencia en las aportaciones.

Gráfico 4.1. El Vado. Aportaciones mensuales de junio vs aportaciones mes anterior



La aportación esperable en un mes está parcialmente determinada por la aportación del mes que le precede. Se trata de una relación de persistencia: las desviaciones sobre los valores centrales tienden a persistir de un mes al siguiente.

4.1.2. Tendencia

Se aprecia una tendencia decreciente a largo plazo, estadísticamente significativa, en los meses de abril y mayo. En el gráfico 4.2 se muestra la serie de abril ($r=0,315$; $p=0,011$). Por el contrario, el mes de agosto (ver gráfico 4.3) presenta tendencia positiva muy clara y significativa ($r=0,393$; $p=0,001$).

Aparentemente, se ha producido una reducción de las aportaciones primaverales y una cierta atenuación del estiaje. El análisis realizado no permite establecer las causas de estas tendencias que, incluso, podrían ser el reflejo de una falta de homogeneidad en las series de datos (en octubre de 1965 los datos originales empiezan a ser diarios). Sin disponer de una explicación causal, tampoco es posible predecir la evolución de la tendencia en el futuro.

Gráfico 4.2. El Vado. Aportaciones mensuales de abril

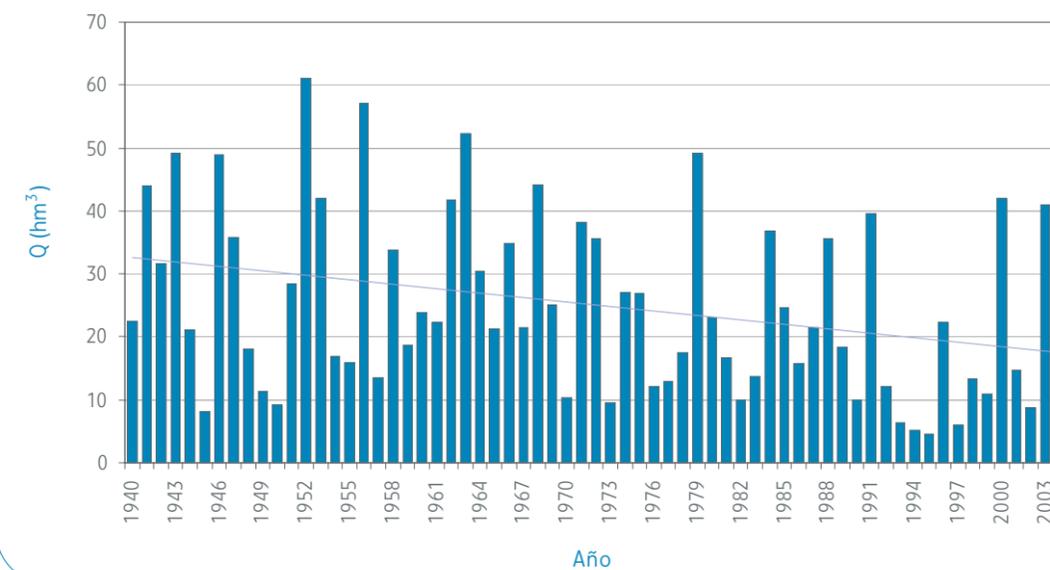
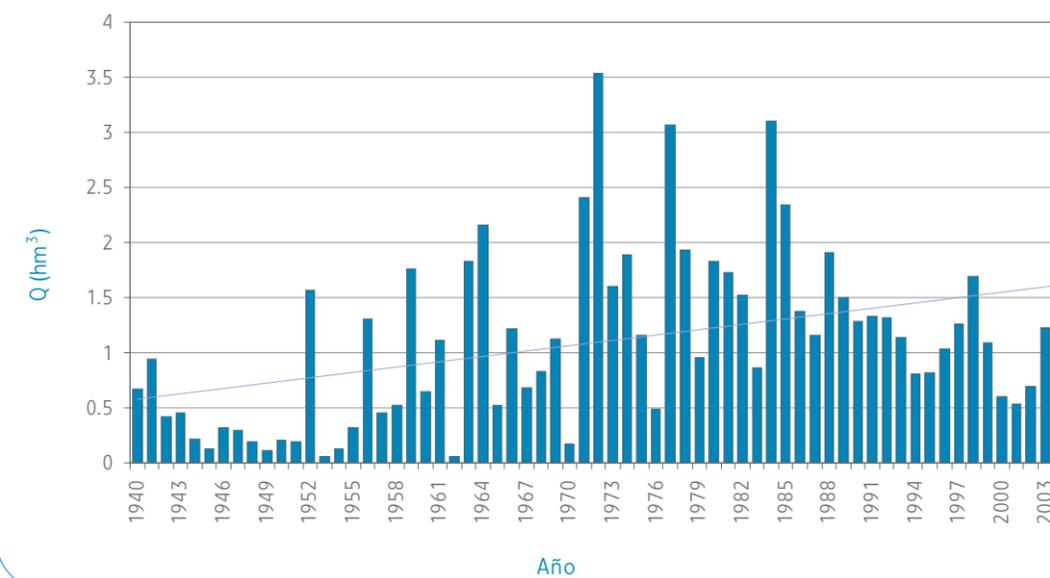


Gráfico 4.3. El Vado. Aportaciones mensuales de agosto



4.1.3. Análisis de rachas sobre la mediana

Se dispone de una serie de 771 aportaciones mensuales: desde octubre de 1940 hasta diciembre de 2004. Sobre esos datos se han determinado las medianas de la aportación mensual de cada mes, que son las que se recogen en la tabla 4.3.

Cada mes de la serie se ha clasificado en las categorías “seco” o “húmedo” según su aportación mensual sea menor o no menor que la mediana del mes correspondiente. Nótese que esta clasificación elimina el efecto de la estacionalidad.

Una vez clasificados los meses, se han contabilizado las rachas de meses “secos” y meses “húmedos” consecutivos, con el resultado que se presenta en la tabla 4.4. El gráfico 4.4 presenta estos mismos resultados de forma gráfica.

Se contabiliza un total de 230 rachas, con duraciones entre 1 y 14 meses. La distribución de longitudes presenta desequilibrios entre las rachas “secas” y las “húmedas” para las rachas cortas (entre 1 y 4 meses). Para las duraciones de un mes se cuenta un 50 por ciento más de rachas “secas” que “húmedas” mientras que, con las rachas de 2, 3 y 4 meses se da la situación contraria. La longitud media de las rachas es de poco más de 3 meses.

Tabla 4.3. Mediana de aportación mensual por meses para el embalse de El Vado

Mes	Aportación mediana (hm ³)
Octubre	2.48
Noviembre	6.97
Diciembre	14.08
Enero	16.54
Febrero	19.05
Marzo	21.07
Abril	21.89
Mayo	18.03
Junio	6.91
Julio	2.06
Agosto	1.10
Septiembre	1.10

Tabla 4.4. Número de rachas mensuales sobre la mediana en función de su longitud

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	77	46	31
2	36	15	21
3	37	16	21
4	28	10	18
5	12	5	7
6	7	5	2
7	15	7	8
8	3	2	1
9	5	3	2
10	0	0	0
11	1	1	0
12	6	4	2
13	2	0	2
14	1	1	0
TOTAL	230	115	115
L media	3.35	3.34	3.37

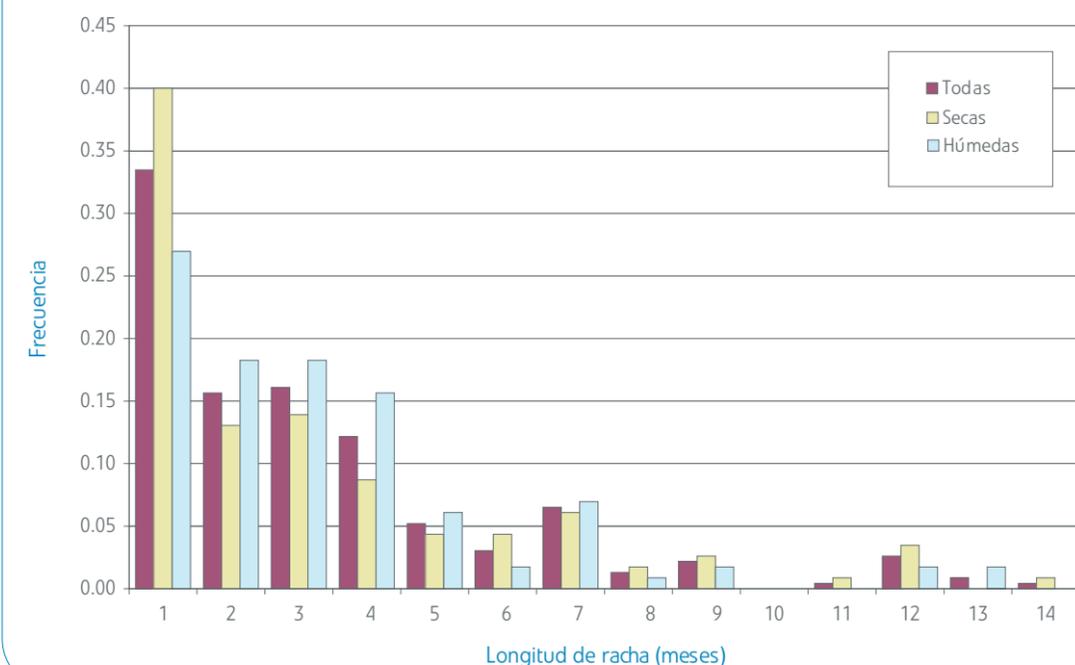
El número de meses “secos” y “húmedos” es de 384 y 387 respectivamente (no pueden ser muy distintos, puesto que cada mes se clasifica por la mediana). En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 386,5 y 13,9 respectivamente. No es necesario hacer ningún cálculo más para dictaminar que el número de rachas observado (230) es completamente inverosímil en la hipótesis nula.

La formación de menos rachas de las esperables en condiciones de aleatoriedad indica persistencia entre meses de las desviaciones respecto a valores normales: un mes seco es seguido con más probabilidad por un mes seco que por un mes húmedo y a la inversa.

Se insiste en que las rachas que se han contabilizado no se corresponden necesariamente con los ciclos de sequía o de abundancia de aportaciones desde el punto de vista operacional. Su única finalidad es contrastar la aleatoriedad estadística del comportamiento de las aportaciones.

El test de las rachas también pone de manifiesto el comportamiento persistente de las aportaciones mensuales.

Gráfico 4.4. Frecuencia observada de las longitudes de racha mensuales sobre la mediana



4.1.4. Análisis de rachas sobre la media

El mismo tipo de análisis se ha realizado clasificando los meses en secos o húmedos en relación con la media de aportaciones del mes en lugar de con la mediana. Los valores de aportación media mensual que se han utilizado, se han calculado a partir de la misma serie de datos que en el análisis de la mediana (desde octubre de 1940 hasta diciembre de 2004) y son los que recoge la tabla 4.5.

El número de rachas que se forman, en este caso, es de 218. Según la clasificación por la media hay un total de 479 meses secos y 292 meses húmedos. En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 363,8 y 13,1 respectivamente. Tampoco es necesario, en este caso, hacer ningún cálculo más para dictaminar que el número de rachas observado es completamente inverosímil en la hipótesis nula. Es decir, febrero marzo abril mayo junio julio agosto septiembre octubre noviembre diciembre el análisis de rachas sobre la media proporciona el mismo resultado que el análisis sobre la mediana.

Tabla 4.5. Media de aportación mensual por meses para el embalse de El Vado

Mes	Aportación media (hm ³)
Octubre	5,21
Noviembre	15,12
Diciembre	21,65
Enero	25,42
Febrero	25,53
Marzo	26,84
Abril	25,05
Mayo	19,96
Junio	8,93
Julio	2,67
Agosto	1,10
Septiembre	1,41

4.2. Nivel trimestral

4.2.1. Correlación entre trimestres consecutivos

La correlación de las aportaciones de un trimestre con las del trimestre anterior se debilita notablemente, hasta el punto de que sólo resulta significativa la correlación de primavera con el invierno anterior (ver tabla 4.6). Es una correlación positiva pero débil.

En la hipótesis de que la persistencia de las aportaciones entre periodos consecutivos tenga su origen en la inercia hidrológica de la cuenca, cabe pensar que las aportaciones del trimestre anterior no son un buen indicador de las condiciones hidrológicas al inicio del trimestre. Por ejemplo, un trimestre muy seco salvo la última quincena, puede quedar en los últimos puestos de la escala de aportaciones trimestrales pero trasladar al trimestre que le sigue unas condiciones hidrológicas de humedad mayores que la media. Por eso se han ensayado las correlaciones entre aportaciones de un trimestre y aportaciones del bimestre y del mes que le preceden (ver tabla 4.6). La correlación con el mes anterior es claramente mejor que con el trimestre anterior.

Tabla 4.6. Correlaciones entre aportaciones trimestrales

Trimestre	EFM	AMJ	JAS	OND
Correlación con trimestre anterior				
r	0,220	0,282	0,196	0,026
n	65	65	65	65
t	1,789	2,332	1,584	0,205
p	0,078	0,023	0,118	0,839
Correlación con bimestre anterior				
r	0,230	0,358	0,425	0,291
n	63	63	63	64
t	1,844	2,997	3,663	2,395
p	0,070	0,004	0,001	0,020
Correlación con mes anterior				
r	0,228	0,390	0,545	0,376
n	63	63	63	64
t	1,828	3,309	5,007	3,196
p	0,072	0,002	0,000	0,002

La dependencia entre aportaciones de trimestres consecutivos es débil. La aportación de un trimestre está mejor determinada por la aportación del mes que le precede.

4.2.2. Tendencia

El comportamiento de las aportaciones de El Vado en el nivel trimestral, en cuanto a tendencia a largo plazo, es un reflejo del comportamiento mensual. Se detecta una tendencia descendente y significativa de las aportaciones de primavera (trimestre AMJ). Igual que en el nivel mensual, no se conoce una explicación causal para esta tendencia, por lo que tampoco es posible pronosticar su evolución futura.

Tabla 4.7. Tendencia a largo plazo de las aportaciones trimestrales de El Vado

Trimestre	EFM	AMJ	JAS	OND
Tendencia según coeficiente de correlación				
r	-0,095	-0,309	-0,055	-0,002
n	65	65	65	66
t	-0,753	-2,574	-0,437	-0,013
p	0,454	0,012	0,663	0,990
Tendencia: test de Mann-Kendall				
S	172	440	-297	-22
z _s	0,991	2,543	-1,715	-0,119
p	0,322	0,011	0,086	0,905

Aparentemente, las aportaciones de primavera al embalse de El Vado han sufrido una tendencia clara a disminuir a lo largo del periodo 1940-2003 (ver también gráfico 4.2).

4.2.3. Análisis de rachas sobre la mediana

Las medianas de cada trimestre son las que se recogen en la tabla 4.8. Cada trimestre de la serie (desde otoño de 1939 hasta otoño de 2004) se clasifica como "seco" o "húmedo" en función de que su aportación sea menor o no menor que la mediana correspondiente.

Tabla 4.8. Valores de la aportación mediana de cada trimestre

Trimestre	Mediana de aportación (hm ³)
Otoño (OND)	30.92
Invierno (EFM)	65.45
Primavera (AMJ)	51.14
Verano (JAS)	4.21

La contabilización de rachas de trimestres “secos” o “húmedos” proporciona el resultado que se muestra en la tabla 4.9. Hay un total de 116 rachas, con duraciones entre 1 y 7 trimestres. La distribución de longitudes parece equilibrada entre las rachas “secas” y las “húmedas”. La longitud media de las rachas es de 2,2 trimestres.

El número de trimestres “secos” y “húmedos” es de 128 y 129 respectivamente. En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 129,5 y 8,0 respectivamente. En esta distribución, a 116 rachas le corresponde un valor de significación de 0,092 (2 colas), valor pequeño pero que no permite rechazar la hipótesis nula. Es decir, las rachas trimestrales podrían ser aleatorias.

Si se plantea la prueba unilateral, esto es, sólo una cola, el valor de significación es la mitad: 0,046. Esta es la probabilidad de obtener un número de rachas igual o inferior al obtenido y, es el valor de significación en el caso de que el test se refiera a la hipótesis nula de que no existe persistencia (que es una hipótesis más débil que la de que las rachas son aleatorias).

Tabla 4.9. Número de rachas trimestrales sobre la mediana

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	46	23	23
2	35	19	16
3	12	4	8
4	16	8	8
5	3	2	1
6	2	1	1
7	2	1	1
TOTAL	116	58	58
Media	2.22	2.21	2.22

Se puede concluir que la serie de aportaciones trimestrales a El Vado parece presentar cierta persistencia, aunque el test no permite asegurar que esta sea el reflejo del comportamiento del sistema hidrológico. Podría ser simplemente un comportamiento fortuito de la secuencia particular analizada.

Buscando profundizar más en el comportamiento de estas rachas, se ha contabilizado el número de rachas en función del trimestre en que concluyen, con el resultado que se muestra en la tabla 4.10. La última racha acaba en otoño simplemente porque éste es el último trimestre de la serie, por lo que se contabiliza aparte.

Tabla 4.10. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	27	13	14
Invierno (EFM)	24	12	12
Primavera (AMJ)	28	14	14
Verano (JAS)	36	18	18
Última racha	1	1	0

Téngase en cuenta que, en caso de aleatoriedad de la secuencia de trimestres “secos” y “húmedos”, habría que esperar un reparto más o menos uniforme en los trimestres en que concluyen las rachas: alrededor de $129/4 \approx 32$ rachas en cada trimestre.

Los datos de la tabla anterior se pueden interpretar de la siguiente manera: de los 64 otoños de la serie (excluyendo el último), 27 son de cambio (de seco a húmedo o al revés) y el resto (37) van seguidos de un invierno de la misma categoría (seco o húmedo). Diremos que de los 64 otoños, 37 “persisten” y 27 “no persisten”. El último otoño se excluye puesto que no podemos saber si persiste o no. El reparto de trimestres persistentes y no persistentes es el que se recoge en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Número de trimestres “persistentes” y “no persistentes”

Trimestre	Total	Persistentes	No persistentes
Otoño (OND)	64	37	27
Invierno (EFM)	64	40	24
Primavera (AMJ)	64	36	28
Verano (JAS)	64	28	36

En condiciones de independencia entre trimestres consecutivos, (hipótesis nula), la probabilidad de que un trimestre sea persistente es del 50 por ciento. Es decir, que para 64 trimestres esperamos 32 trimestres persistentes con una desviación típica de $(64 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2})^{1/2} = 4$. Las desviaciones respecto de la media son del orden de una desviación típica en otoño, primavera y verano y del doble de la desviación típica en invierno. Es decir, el único trimestre para el que es plausible suponer que influye en el siguiente (que “persiste”) es el trimestre de invierno.

En coincidencia con el análisis de correlación, el test de las rachas detecta persistencia entre las aportaciones de invierno y las de primavera.

4.3. Nivel anual

4.3.1. Análisis de rachas

El análisis de rachas en el nivel anual se realiza de forma similar al de los niveles mensual y trimestral. Se toma como referencia el valor de la mediana de las 64 aportaciones anuales que forman la serie disponible (años hidrológicos 1940 a 2003). La aportación anual mediana es de 186,23 hectómetros cúbicos y los años se clasifican como “secos” o “húmedos” en función de que su aportación sea menor o no menor que la mediana.

El cómputo de rachas proporciona los resultados de la tabla 4.12. Hay un total de 31 rachas de longitudes entre 1 y 6 años y, la distribución de longitudes es más o menos equilibrada entre las rachas “secas” y las “húmedas”. La longitud media de la racha es de prácticamente 2 años.

Hay igual número de años “secos” y “húmedos”, 32 (como cabe esperar cuando se toma la mediana como umbral). En estas condiciones, el número esperado de rachas aleatorias es de 33, con una desviación típica de 4,0. El número de rachas observado (31) es completamente compatible con la hipótesis nula. Es decir, las rachas observadas se pueden explicar perfectamente como resultado de la aleatoriedad. El análisis de rachas, por tanto, no detecta ningún tipo de dependencia entre aportaciones de un año para otro.

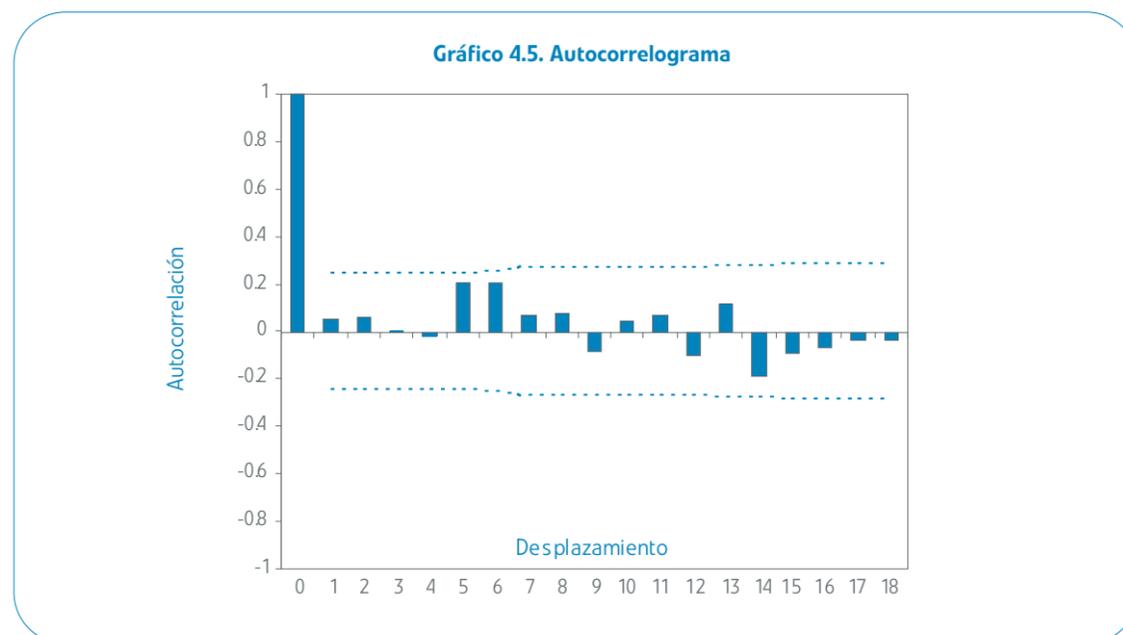
Tabla 4.12. Número de rachas anuales sobre la mediana

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	14	6	8
2	9	5	4
3	4	2	2
4	1	0	1
5	2	2	0
6	1	0	1
TOTAL	31	15	16
Media	2.06	2.13	2.00

4.3.2. Autocorrelograma

En un intento adicional de búsqueda de comportamientos no aleatorios en el nivel anual o plurianual, se ha elaborado el autocorrelograma de las aportaciones anuales de El Vado, que se presenta en el gráfico 4.5.

Se observa que en ningún caso se superan los niveles de significación de los coeficientes de autocorrelación (nivel de significación: 0,05). El comportamiento del autocorrelograma parcial, que no se presenta, es idéntico. Podría apuntarse una ligera tendencia a formar ciclos de 5 ó 6 años, si bien los datos no permiten sostener estadísticamente esta hipótesis.



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

4.3.3. Tabla de contingencia

Para este análisis, los años hidrológicos se han clasificado en secos (S), normales (N) o húmedos (H) en función de que su aportación caiga en el 1er, 2º ó 3er tercil de la serie. Los límites de los terciles son, respectivamente, 136,3 y 213,4 hectómetros cúbicos. Es decir, los años con aportación menor o igual que 136,3 hectómetros cúbicos se clasifican como S, los que tienen aportaciones mayores que 213,4 hectómetros cúbicos se clasifican como H y el resto, intermedios, como N. Se insiste en que la denominación "seco", "normal" o "húmedo" es convencional para el análisis y no se corresponde necesariamente con aspectos operacionales.

Una vez clasificados los años hidrológicos, se forman los pares (x, y) donde x es la categoría de un año e y la categoría del año anterior. La serie de 64 años proporciona 63 pares con los que se obtiene la tabla de contingencia que se presenta como tabla 4.13.

A primera vista, la tabla es bastante equilibrada. El test de χ^2 sobre esta tabla de contingencia proporciona un valor p de 0,730 que viene a confirmar que la tabla de contingencia obtenida es perfectamente compatible con la hipótesis nula: la secuencia de años secos, normales y húmedos es aleatoria.

En los niveles anual y plurianual no se detecta nada significativamente distinto de un comportamiento aleatorio.

Tabla 4.13. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	7	6	7	20
Actual - N**	9	6	6	21
Actual - S***	5	8	9	22
TOTAL	21	20	22	63

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

4.4. Conclusiones

Las aportaciones manifiestan persistencia clara en el nivel mensual. Así, los meses secos (húmedos) tienen más probabilidad de ser seguidos por meses secos (húmedos).

En el nivel trimestral hay persistencia aparente entre invierno y primavera pero, en conjunto, el comportamiento persistente es bastante más débil que en el caso mensual. Sí parece haber una relación clara entre las aportaciones de un trimestre y las del mes anterior.

En los niveles anual y plurianual no se detecta ningún comportamiento no aleatorio. En particular, los datos indican que un año seco puede ser seguido con la misma probabilidad por otro año seco, uno húmedo o uno normal.

5

Precipitación en Retiro

En el epígrafe anterior se ha comprobado que existen comportamientos no aleatorios en las aportaciones a El Vado, al menos en el nivel mensual. Una causa posible es el comportamiento no aleatorio de las precipitaciones. Para intentar detectar estos posibles comportamientos no aleatorios se ha realizado un análisis de rachas sobre los datos de precipitación de Retiro, con idéntico planteamiento al presentado para las aportaciones de El Vado.

Se estudia la serie de precipitaciones de Retiro porque es la única de las disponibles con un periodo de datos suficientemente largo. La serie de precipitaciones de Navacerrada Puerto también es larga pero en el momento de la realización del estudio no se dispone de datos posteriores a febrero de 1996. Además, en esta serie se han detectado algunas anomalías que podrían desaconsejar su utilización en el análisis.

La serie de datos de precipitación de Retiro se extiende desde enero de 1901 hasta diciembre de 2004.

5.1. Nivel mensual

5.1.1. Correlación entre meses consecutivos

En la tabla 5.1 se presenta la matriz de correlación de precipitaciones mensuales en Retiro. Sólo 4 de los 66 coeficientes de correlación diferentes, un lado de la diagonal, resultan significativos al 5 por ciento. Este resultado entra dentro de lo esperable en condiciones de independencia entre las series. En 66 ensayos con probabilidad de 0,05 se esperan 3,3 "impactos" con una desviación típica de $(66 \cdot 0,05 \cdot (1-0,05))^{1/2} \approx 1,78$. Se puede concluir, por tanto, que el coeficiente de correlación no detecta relaciones entre las precipitaciones de meses consecutivos.

5.1.2. Tendencia

La tabla 5.2 muestra los valores del coeficiente de correlación de la precipitación mensual con el año. Sólo una de las 12 correlaciones es significativa al 5 por ciento ($p=0,011$). Un acierto en 12 intentos con probabilidad de 0,05 entra claramente dentro de lo esperable por azar, por lo que no hay razón para afirmar que las precipitaciones mensuales de Retiro presentan tendencia a largo plazo en el nivel mensual.

Tabla 5.1. Matriz de correlación de las series de precipitaciones mensuales en Retiro

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene	1,000	0,162	0,041	-0,059	-0,094	0,031	0,116	-0,101	-0,051	0,081	0,123	-0,073
Feb	0,162	1,000	0,260	0,063	-0,038	0,118	0,011	0,053	0,068	0,085	-0,075	-0,172
Mar	0,041	0,260	1,000	-0,050	0,110	0,073	-0,094	0,034	0,131	0,047	-0,086	-0,143
Abr	-0,059	0,063	-0,050	1,000	-0,027	-0,066	0,066	0,044	0,046	-0,170	-0,070	-0,042
May	-0,094	-0,038	0,110	-0,027	1,000	-0,009	-0,102	0,150	-0,167	-0,225	-0,030	0,098
Jun	0,031	0,118	0,073	-0,066	-0,009	1,000	-0,033	-0,012	-0,022	0,081	-0,012	0,008
Jul	0,116	0,011	-0,094	0,066	-0,102	-0,033	1,000	0,346	0,159	0,064	0,017	0,030
Ago	-0,101	0,053	0,034	0,044	0,150	-0,012	0,346	1,000	0,118	0,105	-0,057	-0,026
Sep	-0,051	0,068	0,131	0,046	-0,167	-0,022	0,159	0,118	1,000	0,162	-0,003	-0,069
Oct	0,081	0,085	0,047	-0,170	-0,225	0,081	0,064	0,105	0,162	1,000	-0,160	-0,271
Nov	0,123	-0,075	-0,086	-0,070	-0,030	-0,012	0,017	-0,057	-0,003	-0,160	1,000	0,146
Dic	-0,073	-0,172	-0,143	-0,042	0,098	0,008	0,030	-0,026	-0,069	-0,271	0,146	1,000

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0,050 (prueba bilateral)

Tabla 5.2. Tendencia de las precipitaciones mensuales: correlación de la precipitación mensual con el año

Mes	r	n	t	p
Enero	0,163	104	1,667	0,099
Febrero	-0,053	104	-0,534	0,594
Marzo	-0,130	104	-1,320	0,190
Abril	0,102	104	1,034	0,304
Mayo	0,156	104	1,593	0,114
Junio	-0,248	104	-2,586	0,011
Julio	0,144	104	1,468	0,145
Agosto	0,112	104	1,142	0,256
Septiembre	-0,153	104	-1,564	0,121
Octubre	0,109	104	1,103	0,272
Noviembre	-0,031	104	-0,314	0,754
Diciembre	0,071	104	0,722	0,472

5.1.3. Correlación con las aportaciones de El Vado

La correlación esperable entre aportaciones y precipitaciones se manifiesta en el nivel mensual según se puede comprobar en la tabla 5.3. Se comprueba que la correlación es positiva y significativa con la excepción de los meses de julio y agosto.

Tabla 5.3. Correlación entre precipitación mensual en Retiro y aportación mensual en El Vado, por meses

Mes	r	n	t	p
Enero	0,746	65	8,881	0,000
Febrero	0,615	65	6,192	0,000
Marzo	0,735	65	8,615	0,000
Abril	0,471	65	4,243	0,000
Mayo	0,400	65	3,459	0,001
Junio	0,324	65	2,716	0,009
Julio	-0,060	65	-0,476	0,636
Agosto	-0,074	65	-0,593	0,555
Septiembre	0,684	65	7,445	0,000
Octubre	0,660	66	7,020	0,000
Noviembre	0,585	66	5,776	0,000
Diciembre	0,589	66	5,836	0,000

La ausencia de correlación en los meses de estiaje no es sorprendente si se tiene en cuenta que, por una parte, las precipitaciones tienen un carácter mucho más local y esporádico (pueden caer aguaceros en Retiro y no caer nada en la cuenca de El Vado o al revés) y, por otra, que la respuesta de la cuenca a la precipitación está atenuada por la falta de humedad del suelo (puede haber un intervalo muy amplio de valores de precipitación mensual para los que la respuesta en aportación es prácticamente nula).

Se ha comprobado que la correlación entre las precipitaciones mensuales de Retiro y otras series de aportaciones mensuales a embalses de Canal de Isabel II es similar a la descrita para El Vado.

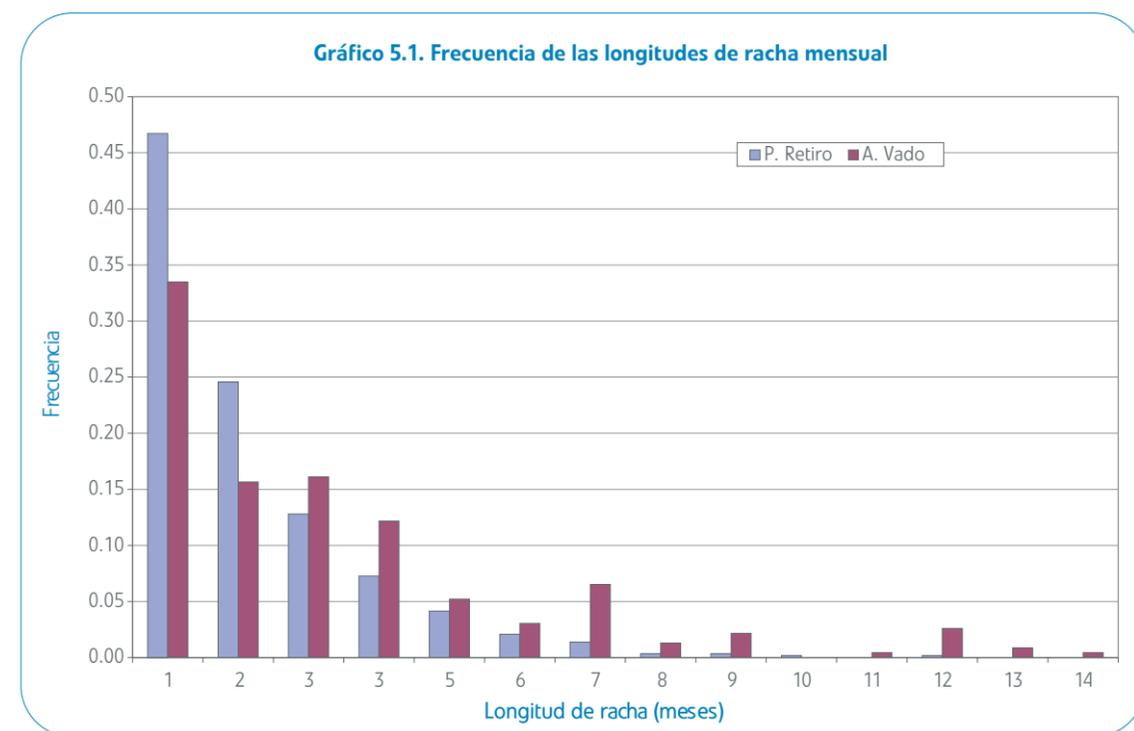
En el nivel mensual, las precipitaciones registradas en la estación de Retiro son un indicador aceptable del nivel pluviométrico acaecido en las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II.

5.1.4. Análisis de rachas

En el análisis de rachas sobre la mediana se forman 578 rachas en una serie de 1248 datos. En la hipótesis nula, el número de rachas esperado es de 625, con desviación típica de 17,7. El valor de significación correspondiente al número de rachas observado es de 0,008 (dos colas), que permite rechazar la hipótesis nula de aleatoriedad de la serie. Es decir, la persistencia de las precipitaciones a nivel mensual es significativa, aunque sensiblemente menos acusada que la observada en las aportaciones. La longitud media de las rachas es de 2,16 meses.

En el gráfico 5.1 se muestra la frecuencia observada de las longitudes de rachas mensuales sobre la mediana para las precipitaciones de Retiro y para las aportaciones de El Vado.

Hay cierta persistencia en el comportamiento de las precipitaciones mensuales, pero esta es mucho más débil que la observada para las precipitaciones de El Vado.



5.2. Nivel trimestral

5.2.1. Análisis de correlación

En el nivel trimestral, las precipitaciones de Retiro desde 1901 hasta 2003 exhiben un comportamiento que se corresponde con el observado en el nivel mensual:

- No se detecta tendencia a largo plazo en ninguno de los trimestres.
- La correlación entre la precipitación de un trimestre y la del anterior no es significativa para ningún trimestre.
- Para otoño, invierno y primavera existe una correlación positiva y significativa con las aportaciones de El Vado (valores de r , respectivamente: 0,817, 0,570, 0,787). En verano no hay correlación ($r = 0,059$).

Una correlación entre aportación y precipitación menor en primavera que en otoño o invierno se ha observado en casi todas las series de aportaciones. La fracción de la aportación primaveral proveniente del deshielo, bastante independiente de la cantidad de precipitación primaveral, es una posible explicación para este hecho.

5.2.2. Análisis de rachas

Se forman 206 rachas en una serie de 416 datos, con una duración media de aproximadamente 2 trimestres. La distribución de longitudes entre las rachas "secas" y "húmedas" es aparentemente equilibrada.

El número esperado de rachas en la hipótesis de aleatoriedad es de 209, con una desviación típica de 10,2. El valor observado, por tanto, es perfectamente compatible con la hipótesis nula.

La distribución de trimestres finales de racha también es coherente con lo esperable en la hipótesis nula (ver tabla 5.4).

El análisis no permite identificar ningún tipo de comportamiento distinto del puramente aleatorio.

Tabla 5.4. Número de rachas trimestrales según el trimestre en que concluyen

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	52	26	26
Invierno (EFM)	53	26	27
Primavera (AMJ)	49	25	24
Verano (JAS)	52	26	26

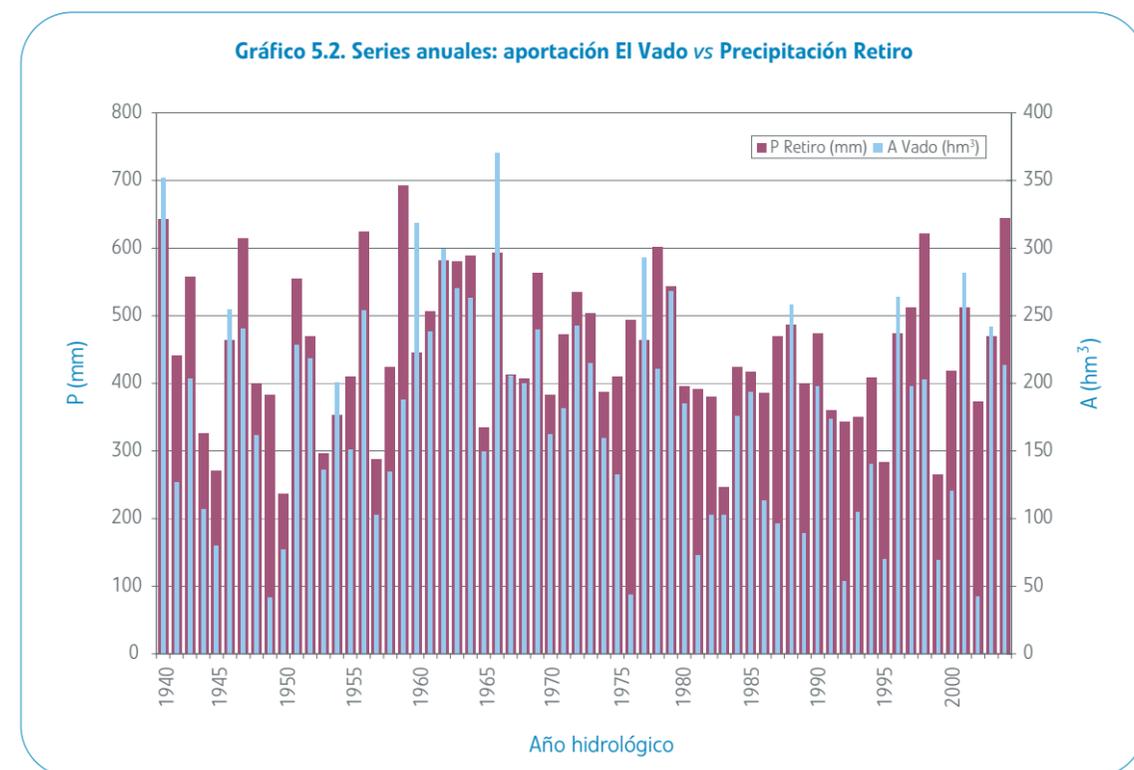
En el nivel trimestral, el comportamiento de las precipitaciones no presenta características distintas de la estacionalidad y la aleatoriedad.

5.3. Nivel anual

5.3.1. Correlación con aportaciones

El coeficiente de correlación entre la serie de precipitación anual de Retiro y la de aportaciones a El Vado (años hidrológicos 1940-2003) es de 0,699 y claramente significativo (más de 7 desviaciones típicas). Ambas series se presentan gráficamente en el gráfico 5.2.

Se observa, por tanto, una razonable correspondencia entre ambas series, la cual se ha constatado también en otras series de aportación. Esto apoya la hipótesis de que las precipitaciones de Retiro representan suficientemente bien el efecto de las precipitaciones en las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II.



5.3.2. Tendencia

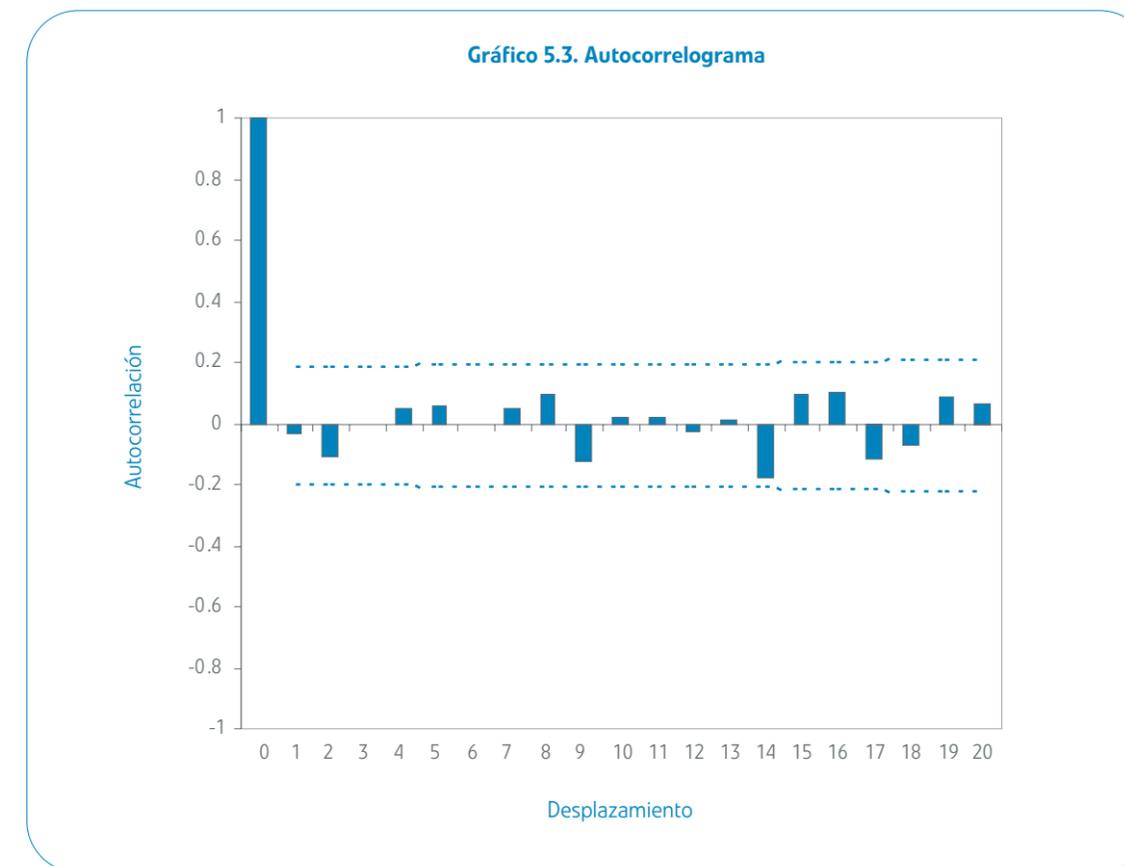
No se detecta ninguna tendencia significativa en las precipitaciones anuales registradas en la estación de Retiro.

5.3.3. Análisis de rachas

Se forman 53 rachas en una serie de 103 datos en la que el valor esperado para el número de rachas es de 52,5, con desviación típica de 5. El test no detecta ningún tipo de comportamiento distinto del puramente aleatorio.

5.3.4. Autocorrelograma

El gráfico 5.3 muestra el autocorrelograma de la serie de precipitaciones anuales en Retiro. Se comprueba que no existe ninguna autocorrelación significativa para ningún desplazamiento entre 1 y 20.



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

5.3.5. Tabla de contingencia

Los umbrales de los terciles de la serie de precipitaciones anuales 1901-2003 (años hidrológicos) son 391,2 mm y 470,7 mm. Esto es, un año hidrológico con $P \leq 391,2$ mm se considera del tercil seco (S), uno con $P > 470,7$ mm se considera del tercil húmedo (H) y el resto son del tercil normal (N).

La tabla de contingencia entre terciles y terciles del año anterior es la que se recoge como tabla 5.5. El test de χ^2 sobre esta tabla de contingencia proporciona un valor p de 0,012. Es decir, la diferencia entre esta tabla y una tabla equilibrada puede considerarse estadísticamente significativa.

Tabla 5.5. Tabla de contingencia 1901-2003

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	10	16	7	33
Actual - N**	9	6	19	34
Actual - S***	14	12	9	35
TOTAL	33	34	35	102

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

La tabla 5.5 se aleja de la tabla equilibrada esperada en condiciones de aleatoriedad sobre todo en los siguientes casos:

- De los 34 años normales (N) registrados, 19 han ido precedidos de un año seco (S). Recíprocamente, de los 35 años secos registrados, 19 han ido seguidos de años normales. En ambos casos, se registra una frecuencia de alrededor del 55 por ciento, cuando el valor esperado en condiciones aleatorias es de 33 por ciento.
- De los 34 años normales (N) registrados, sólo 6 van seguidos de un año normal (N), mientras que 16 van seguidos de años húmedos (H). En ambos casos, el valor esperado en condiciones de aleatoriedad es de alrededor de 11.

Es decir, en la serie histórica de precipitaciones, en Retiro un año seco tiende a ir seguido de un año normal (19 de 35 ocasiones) mientras que es menos frecuente que vaya seguido de año húmedo (7 de 35 ocasiones) u otro seco (9 de 35 ocasiones). A un año normal, en cambio, casi nunca le sigue otro año normal (6 veces en 34 ocasiones) y, en cambio, es bastante probable que le siga un año húmedo.

Estamos, por tanto, ante un comportamiento no explicable como resultado del azar pero que, curiosamente, no se detecta en el resto de pruebas realizadas en la serie ni en pruebas similares en las series de aportaciones de la cuenca de El Vado o de otras cuencas (las tablas de contingencia de estas series son, en general, muy equilibradas). Como las series de aportaciones analizadas corresponden a un periodo más corto (1940-2003) se ha confeccionado la tabla de contingencia de precipitaciones en Retiro para el mismo periodo (se toman los umbrales de terciles correspondientes a ese periodo: 399,2 mm y 486,8 mm). El resultado se muestra en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Tabla de contingencia 1940-2003

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	6	12	2	20
Actual - N**	5	5	11	21
Actual - S***	9	4	9	22
TOTAL	20	21	22	63

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

La tabla de contingencia 5.6 tiene un valor de significación según el test de χ^2 de 0,011, similar al de la tabla 5.5. En la tabla 5.6 se observan las siguientes anomalías:

- Los años normales (N) tienden a ir precedidos por años secos (S). 11 de 21 años normales fueron precedidos por años secos.
- Los años normales (N) tienden a ir seguidos por años lluviosos (H). 12 de los 21 años normales van seguidos de un año húmedo.
- Un año seco raramente es seguido por un año húmedo. Sólo 2 de 22 años secos han ido seguidos de un año húmedo.

Las anomalías de la tabla 5.6 son relativamente equivalentes a las de la tabla 5.5. Lo que resulta sorprendente es que no existe correspondencia con la tabla de consistencia para las aportaciones de El Vado (tabla 4.13) ni para otras series de aportación.

En todo caso, el comportamiento que refleja las tablas de contingencia 5.5 y 5.6 no es de persistencia. Un comportamiento persistente se reflejaría en un peso de la diagonal mayor que el esperado, que en una tabla de 3x3 es de 1/3. En la tabla 5.6 la diagonal acumula 20 casos de 63. Tampoco se trata, aparentemente, de un comportamiento cíclico puesto que no se detectan ciclos en el autocorrelograma (ver apartado 5.3.3).

5.4. Conclusiones

La precipitación en Retiro muestra un patrón de persistencia débil que sólo se manifiesta en el nivel mensual y, que se detecta en el análisis de rachas pero no en las correlaciones entre meses consecutivos. Esta persistencia puede explicarse simplemente en función de la duración típica de las situaciones de tiempo anticiclónico o de tiempo borrascoso. Con tal de que esta duración típica sea de, al menos, algunas semanas, generará una persistencia perceptible en el nivel mensual. En la medida en que sea claramente inferior a un trimestre, no se manifestará en el nivel trimestral ni en el anual.

Aun sin perder de vista que no se han analizado otras variables climatológicas relevantes (temperatura, ETP, ocurrencia de nieve), ni tampoco la precipitación en la cuenca de El Vado, sino en un pluviómetro relativamente alejado, el análisis apunta a que la persistencia observada en las aportaciones mensuales y trimestrales de El Vado es fundamentalmente de carácter hidrológico, más o menos ayudada en el nivel mensual por eventuales situaciones pluviométricas persistentes de algunas semanas de duración.

La persistencia observada en las aportaciones mensuales y trimestrales de El Vado (y que se encontrará también en el resto de series de aportaciones) no parece tener origen pluviométrico. Más bien se trata de una persistencia de tipo hidrológico.

El análisis de las tablas de contingencia por terciles de precipitación anual sugiere la existencia de comportamientos no aleatorios que, sin embargo, son difíciles de interpretar. Por una parte, no se trasladan a las aportaciones, a pesar de la relativamente buena correlación entre aportación y precipitación. Por otra parte, no parecen responder a un patrón de persistencia ni cíclico.

6

Aportación agregada

Se han agregado algunas de las series de aportaciones más importantes en magnitud y con comportamiento aceptable en el estudio de validación para obtener una serie de aportaciones más o menos representativa de la aportación total al sistema de Canal de Isabel II. La serie agrega las aportaciones de El Vado, los cinco embalses del Lozoya, Pedrezuela, Manzanares, Navacerrada, Navalmedio, Las Nieves y La Jarosa.

6.1. Nivel mensual

6.1.1. Correlación entre aportaciones mensuales

La tabla 6.1 recoge la matriz de correlación de las 12 series de aportaciones mensuales de un mismo año civil. Se aprecia una correlación aceptable entre meses consecutivos que incluso, se traslada por uno o dos meses más allá del contiguo. Vista la debilidad de la persistencia de las aportaciones en el nivel mensual (ver 5.1.1 y 5.4), esta correlación podría atribuirse, fundamentalmente, a la inercia hidrológica de las cuencas.

Los meses de octubre y noviembre presentan inesperadas correlaciones con febrero y marzo, para las que no se dispone de una explicación plausible. Entra dentro de lo razonablemente probable que sean simplemente fruto del azar.

Tabla 6.1. Matriz de correlación de las series de aportaciones mensuales agregadas

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ene	1,000	0,529	0,178	0,127	0,042	0,065	0,219	-0,028	0,014	0,052	0,133	0,054
Feb	0,529	1,000	0,601	0,375	0,195	0,228	0,202	0,110	-0,023	0,382	0,247	0,041
Mar	0,178	0,601	1,000	0,587	0,311	0,176	0,045	0,070	0,232	0,286	0,089	-0,054
Abr	0,127	0,375	0,587	1,000	0,608	0,415	0,211	0,051	0,172	0,118	0,090	0,033
May	0,042	0,195	0,311	0,608	1,000	0,812	0,389	0,138	0,139	-0,004	-0,071	-0,136
Jun	0,065	0,228	0,176	0,415	0,812	1,000	0,505	0,211	0,104	0,029	0,096	-0,075
Jul	0,219	0,202	0,045	0,211	0,389	0,505	1,000	0,173	0,056	0,046	0,024	-0,074
Ago	-0,028	0,110	0,070	0,051	0,138	0,211	0,173	1,000	0,529	0,110	0,338	0,008
Sep	0,014	-0,023	0,232	0,172	0,139	0,104	0,056	0,529	1,000	0,223	0,259	0,203
Oct	0,052	0,382	0,286	0,118	-0,004	0,029	0,046	0,110	0,223	1,000	0,635	0,143
Nov	0,133	0,247	0,089	0,090	-0,071	0,096	0,024	0,338	0,259	0,635	1,000	0,531
Dic	0,054	0,041	-0,054	0,033	-0,136	-0,075	-0,074	0,008	0,203	0,143	0,531	1,000

En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa = 0,050 (prueba bilateral)

La tabla 6.2 muestra en detalle del cálculo de los coeficientes de correlación de las aportaciones de un mes con las del mes anterior. Es equivalente a la tabla 4.2 presentada en el apartado 4.1.1.

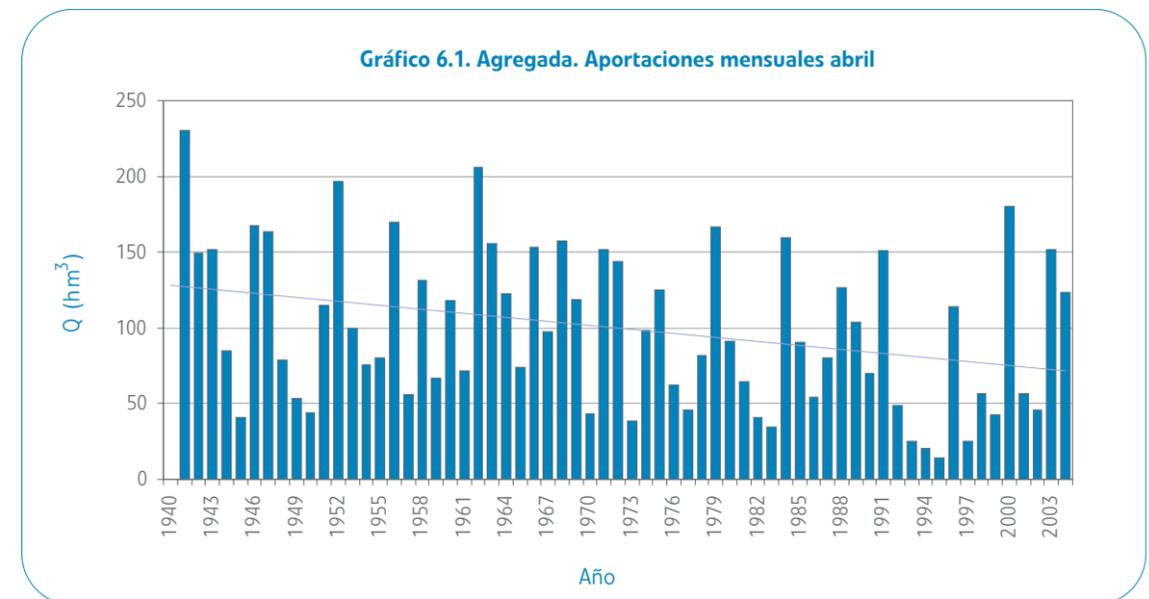
Se observa, como en el caso de la cuenca de El Vado, una correlación positiva y significativa en la mayoría de los meses. La ausencia de correlación entre octubre y septiembre, así como entre agosto y julio, se puede explicar como efecto del estiaje, como en el caso de El Vado (ver apartado 4.1.1).

Tabla 6.2. Correlación de la aportación de un mes con la del anterior

Mes	r	n	t	p
Enero	0,434	64	3,795	0,000
Febrero	0,529	64	4,914	0,000
Marzo	0,601	64	5,926	0,000
Abril	0,587	64	5,704	0,000
Mayo	0,608	64	6,023	0,000
Junio	0,812	64	10,968	0,000
Julio	0,505	64	4,603	0,000
Agosto	0,173	64	1,385	0,171
Septiembre	0,529	64	4,905	0,000
Octubre	0,223	64	1,802	0,076
Noviembre	0,635	65	6,517	0,000
Diciembre	0,530	65	4,963	0,000

6.1.2. Tendencia

Los meses en los que se observa una tendencia a largo plazo significativa son los de primavera y verano. En todos los casos la tendencia es decreciente. El gráfico 6.1 muestra la serie de aportaciones de abril con la correspondiente línea de tendencia ($r=-0,318$, $p=0,010$). Tratándose de la serie agregada, estas tendencias negativas resultan particularmente relevantes.



Es posible que la mayor frecuencia de meses secos en los años 90 sea determinante en la tendencia observada. En cualquier caso, es llamativo que no se corresponda con una tendencia similar en las precipitaciones. Una explicación plausible para este comportamiento exigiría una investigación más allá del alcance de la que aquí se recoge. Por otra parte, es difícil pronosticar su posible evolución futura sin disponer de tal explicación.

6.1.3. Análisis de rachas

Se ha realizado el análisis de rachas sobre la mediana de cada mes. El resultado es similar al observado en El Vado: un número de rachas muy inferior al valor esperado en la hipótesis de aleatoriedad. Se cuentan 206 rachas cuando, para una distribución formación de rachas aleatoria, se esperan 386,5 con desviación típica de 13,9. Se puede afirmar que el número de rachas observado es incompatible la hipótesis de aleatoriedad.

La distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes es muy equilibrada. En la tabla 6.3 y en el gráfico 6.2 se muestran los resultados completos obtenidos.

El número de meses "secos" y "húmedos" es de 384 y 387 respectivamente. La mayor persistencia se produce entre los meses de marzo de 1942 y diciembre de 1943 donde se identifica una racha "húmeda" de 22 meses de duración. No obstante, la gran mayoría de las series presenta una longitud inferior a 10 meses.

La serie de aportación agregada presenta un claro comportamiento persistente en el nivel mensual, que cabe atribuir a la persistencia hidrológica en las cuencas.

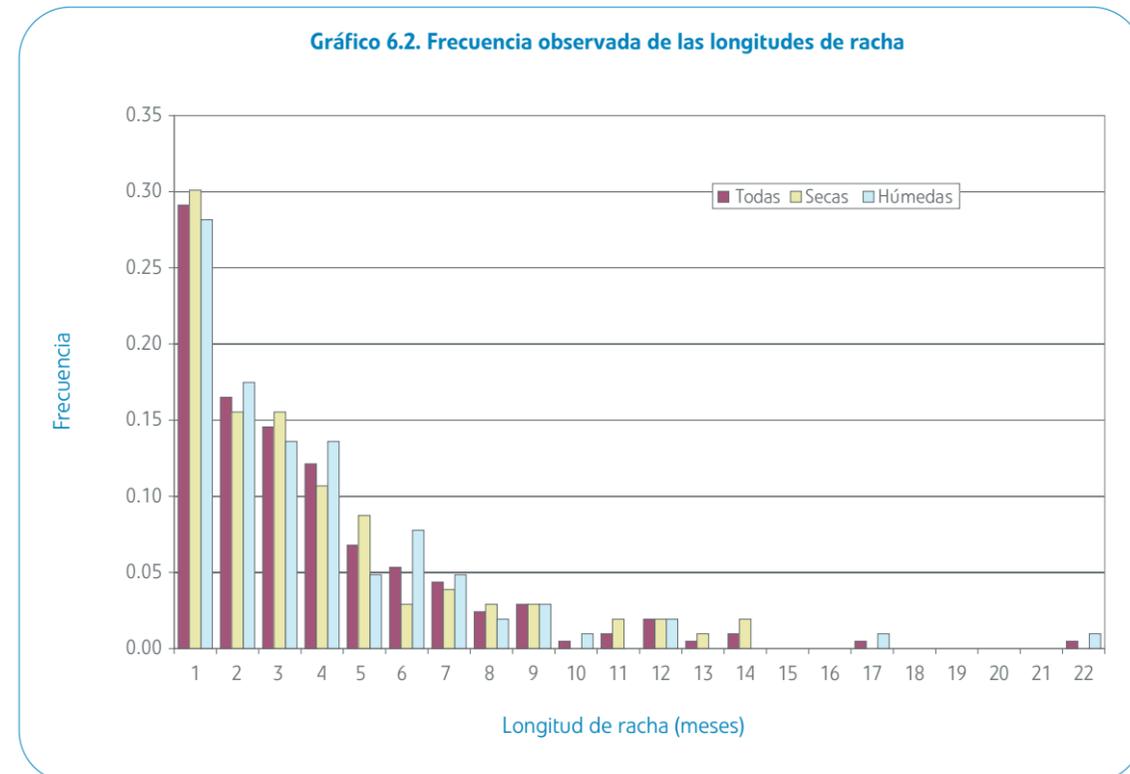


Tabla 6.3. Número de rachas mensuales sobre la mediana en función de su longitud

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	60	31	29
2	34	16	18
3	30	16	14
4	25	11	14
5	14	9	5
6	11	3	8
7	9	4	5
8	5	3	2
9	6	3	3
10	1	0	1
11	2	2	0
12	4	2	2
13	1	1	0
14	2	2	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	1	0	1
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0
21	0	0	0
22	1	0	1
TOTAL	206	103	103
Media	3.74	3.73	3.76

6.2. Nivel trimestral

6.2.1. Correlación entre trimestres consecutivos

La correlación de las aportaciones de un trimestre con las del trimestre anterior se comporta de forma parecida a la observada en las aportaciones de El Vado: hay una correlación positiva significativa pero débil en algunos trimestres. También, como en El Vado, la correlación mejora si se considera el bimestre o el mes anterior. En la tabla 6.4 se presentan los coeficientes de correlación correspondientes. Se comprueba que la correlación de las aportaciones de un trimestre con las del mes anterior es significativa para los cuatro trimestres, aunque muy débil en otoño e invierno.

La aportación esperable en un trimestre está parcialmente determinada por la aportación registrada en el mes que le precede.

Tabla 6.4. Correlaciones entre aportaciones trimestrales

Trimestre	EFM	AMJ	JAS	OND
Correlación con trimestre anterior				
r	0,197	0,348	0,371	0,192
n	64	64	64	64
t	1,580	2,927	3,147	1,544
p	0,119	0,005	0,003	0,128
Correlación con bimestre anterior				
r	0,259	0,420	0,384	0,281
n	91	91	91	91
t	2,527	4,360	3,928	2,760
p	0,013	0,000	0,000	0,007
Correlación con mes anterior				
r	0,282	0,445	0,409	0,278
n	91	91	91	91
t	2,777	4,683	4,229	2,735
p	0,007	0,000	0,000	0,008

6.2.2. Tendencia

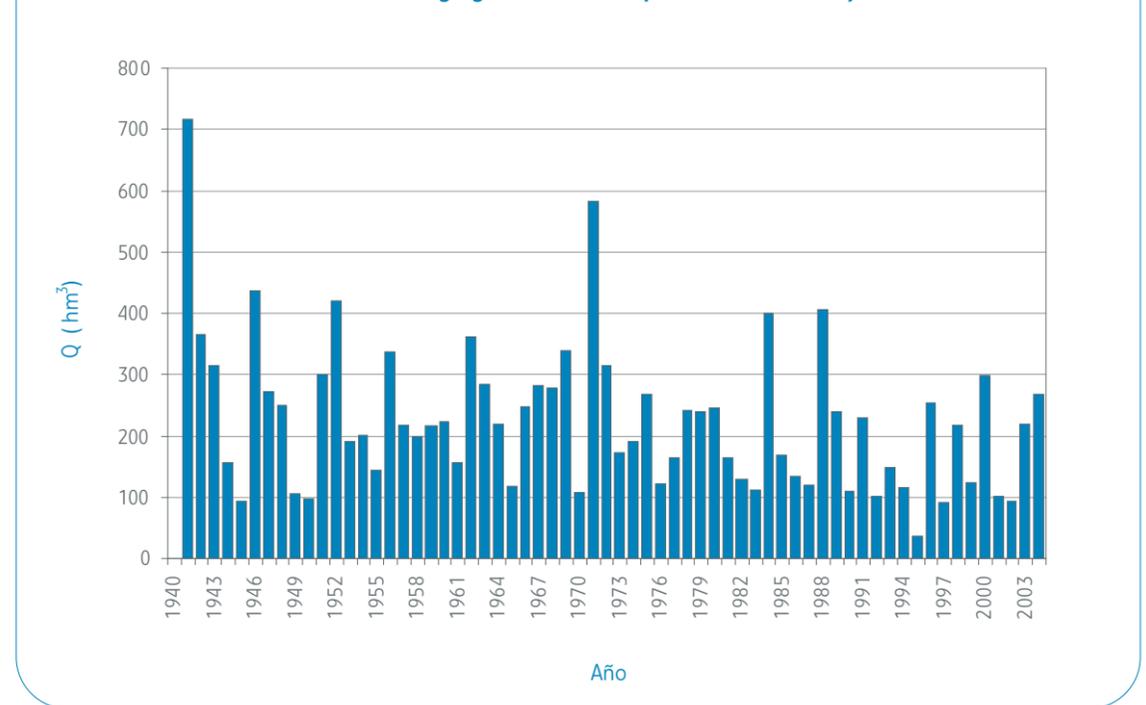
En correspondencia con lo que sucede en el nivel mensual, se detecta una tendencia a largo plazo negativa y significativa en los trimestres de primavera y verano. En el caso de primavera (el único de los dos con implicaciones importantes en el abastecimiento), el coeficiente de correlación correspondiente es $-0,338$, con un valor de significación de $0,006$. El test de Mann-Kendall para esta serie proporciona un valor de significación de $0,008$. El gráfico 6.3 muestra la serie de aportaciones agregadas de primavera con la correspondiente línea de tendencia.

Es llamativo que, de las 13 primaveras con aportación primaveral registrada superior a 300 hectómetros cúbicos, 11 corresponden a la primera mitad de la serie (años 1940-1972) y sólo 2 a la segunda.

Como en el caso mensual, no se dispone de una explicación causal para esta tendencia, por lo que es difícil pronosticar su evolución futura.

La aportación de primavera que recibe el sistema de embalses de Canal de Isabel II ha sufrido una clara tendencia a disminuir en el periodo entre 1940 y 2003 (años hidrológicos).

Gráfico 6.3. Agregada embalses. Aportaciones de abril-junio



6.2.3. Análisis de rachas sobre la mediana

El número de rachas sobre la mediana es muy inferior al esperado en condiciones aleatorias: 92 frente a 129,5 (con desviación típica de 8,0). En esta distribución, a 92 rachas le corresponde un valor de significación de $3 \cdot 10^{-6}$ (2 colas), que permite rechazar claramente la hipótesis nula. Es decir, se descarta que las rachas trimestrales tengan origen aleatorio y, dado que se forman rachas más largas que lo esperado, se concluye que existe persistencia en el nivel trimestral.

Las duraciones de las rachas oscilan entre 1 y 13 trimestres. La distribución de longitudes muestra un considerable equilibrio entre las rachas "secas" y las "húmedas", tal y como se observa en la tabla 6.5.

En la tabla 6.6 se presenta el número de rachas según su signo y el trimestre en que concluyen. Los trimestres con más capacidad para generar persistencia son, aparentemente, invierno y primavera: de 64 inviernos, sólo 20 rompen racha. En cambio, el verano apenas muestra tendencia a crear persistencia: de 64 veranos, rompen la racha 30, es decir, prácticamente la mitad. Esto parece apoyar la hipótesis de la persistencia hidrológica: el estiaje supone el agotamiento o "puesta a 0" hidrológica de la cuenca, por lo que el otoño será hidrológicamente independiente de él.

Tabla 6.5. Número de rachas trimestrales sobre la mediana

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	35	19	16
2	18	8	10
3	12	4	8
4	10	5	5
5	8	5	3
6	2	1	1
7	4	3	1
8	1	0	1
9	1	1	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	1	0	1
TOTAL	92	46	46
Media	2.79	2.78	2.80

Tabla 6.6. Número de rachas según el trimestre en que concluyen

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	24	12	12
Invierno (EFM)	20	10	10
Primavera (AMJ)	18	9	9
Verano (JAS)	30	15	15

6.2.4. Análisis de rachas: efecto de la tendencia

Las series de aportaciones trimestrales agregadas de primavera y verano presentan tendencia decreciente significativa. Para asegurar que esta tendencia no incide en la formación de rachas trimestrales se ha evaluado la formación de rachas respecto de las líneas de tendencia así como la formación de rachas respecto de las medias, como referencia. Los resultados se resumen en la tabla 6.7.

Sorprendentemente, el número de rachas sobre las líneas de tendencia es menor que sobre las medias (y la diferencia tipificada respecto de la media esperada en la hipótesis nula mayor: $3,24 \cdot \sigma$ con las medias y $3,51 \cdot \sigma$ con las líneas de tendencia). No cabe esperar, por tanto, que la persistencia detectada en el nivel trimestral pueda estar influida de forma significativa por la tendencia decreciente observada.

Tabla 6.7. Comparación del número de rachas sobre las medias y sobre las líneas de tendencia

Rachas respecto de	Medias	Tendencias
Nº total de trimestres	257	257
Trimestres secos	161	161
Trimestres húmedos	96	96
Número de rachas en la hipótesis nula		
Media	121,3	121,3
Desviación típica	7,5	7,5
Rachas observadas		
Número	97	95
Valor de significación	0,00118	0,00045

Ante la excepcionalidad del resultado, (rachas más largas respecto de las líneas de tendencia), se plantea la cuestión de si, en este caso, las rectas de regresión respecto del tiempo son adecuadas para representar la tendencia y, por tanto, eliminar su efecto en el análisis. Para asegurar la fiabilidad de la conclusión de que existe persistencia trimestral y de que esta no es un efecto aparente de la tendencia, se ha realizado una prueba adicional, que se describe a continuación.

Consideremos la serie de 257 trimestres dividida en dos mitades cronológicas (los años son civiles):

- 1ª mitad: desde otoño de 1940 hasta otoño de 1972 (129 trimestres)
- 2ª mitad: desde invierno de 1973 hasta otoño de 2004 (128 trimestres)

El reparto de meses "secos" y "húmedos" respecto de las medianas de la serie completa queda, en cada subserie, según la tabla 6.8.

Tabla 6.8. Reparto entre las subseries de meses secos y húmedos en relación con las medianas

Trimestres	1ª mitad	2ª mitad
"Húmedos"	82	47
"Secos"	47	81

El desequilibrio es evidente y señala que, efectivamente, el periodo de datos se caracteriza por una tendencia a la disminución de las aportaciones. Supongamos ahora que el reparto anterior se considera impuesto a priori. Es decir, el reparto de meses secos y húmedos se considera resultado de la tendencia y, el estudio de la formación de rachas condicionada a ese reparto podrá detectar ausencia de aleatoriedad que no es consecuencia de la tendencia.

Teniendo en cuenta los números de trimestres de cada clase en cada subserie, se tiene que los parámetros de la distribución del número de rachas aleatorias en cada uno de ellos son los siguientes:

a) 1ª mitad: media 60,75 y desviación típica 5,24.

b) 2ª mitad: media 60,48 y desviación típica 5,23.

La suma de dos variables normalmente distribuidas es otra variable normalmente distribuida cuya media y varianza son, respectivamente, la suma de las medias y la suma de las varianzas. Entonces, la suma del número de rachas contado en cada subserie de forma independiente se distribuye según una normal de media 121,23 y desviación típica de 7,40.

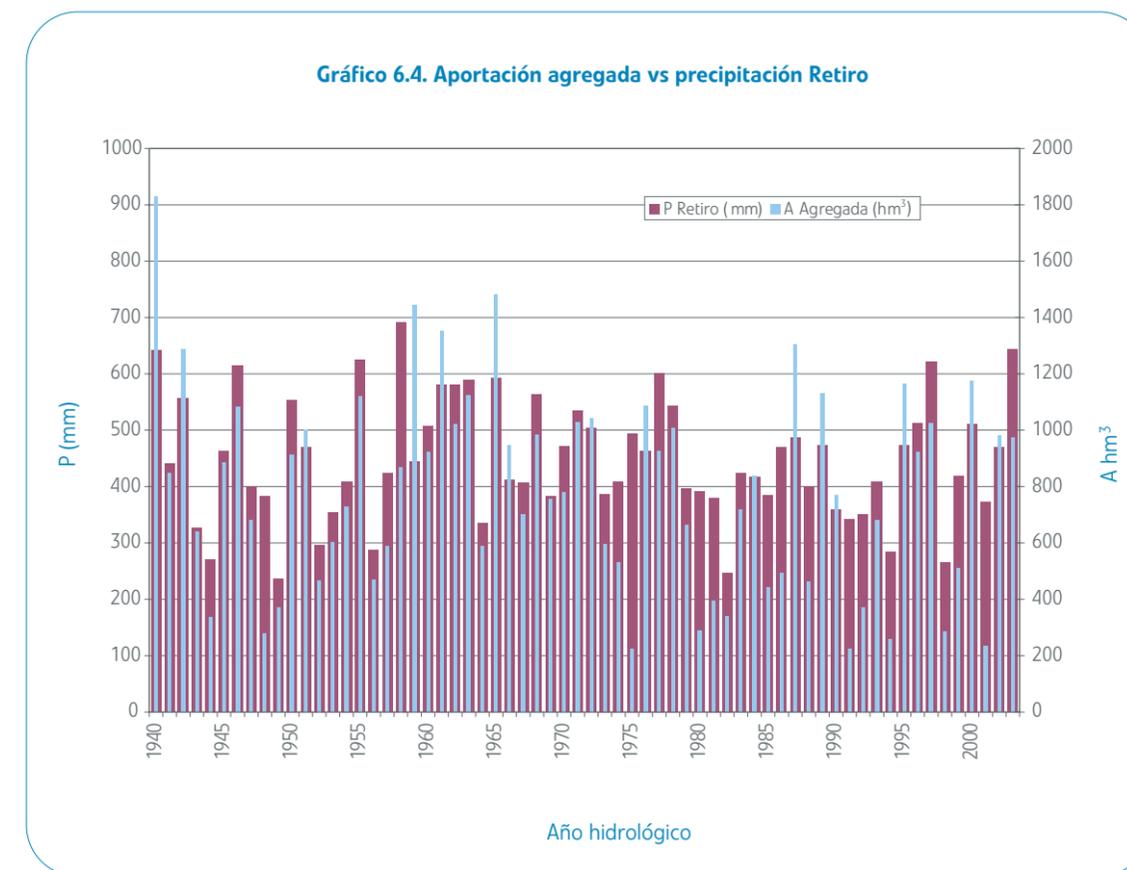
El número de rachas en cada subserie, contadas independientemente, es de 47 y 45 respectivamente, luego el total de rachas es 92 ó 93, dependiendo de que la división de la serie corte o no una racha en la serie completa. El valor de significación de 93 en la normal de media 121,24 y desviación típica de 7,40 es de 0,00014 (dos colas). Hay que concluir, por tanto, que la formación de rachas no es aleatoria y refleja la existencia de persistencia entre trimestres.

El test de las rachas detecta claramente persistencia en las aportaciones trimestrales de la serie agregada. Se ha comprobado que la formación de menos rachas que las esperadas en condiciones de aleatoriedad no puede achacarse a las tendencias decrecientes detectadas en algunos trimestres.

6.3. Nivel anual

6.3.1. Correlación con precipitaciones

La serie de aportaciones anuales agregadas correlaciona bastante bien y positivamente con la serie de precipitaciones de Retiro ($r=0,744$). En general, se puede concluir que la precipitación anual registrada en Retiro es un buen indicador del nivel pluviométrico del año en las cuencas de captación de Canal de Isabel II. En el gráfico 6.4 se presentan, para su comparación, las series de aportación anual agregada y precipitación anual en Retiro.



6.3.2. Tendencia

La línea de tendencia de las aportaciones agregadas anuales tiene pendiente negativa (-3,786 hectómetros cúbicos al año) pero no es estadísticamente significativa ($p=0,117$). Aparentemente, el efecto de la tendencia negativa detectada en los datos de primavera no es suficiente para manifestarse en el nivel anual.

Sin embargo, a la vista del gráfico 6.4, podría decirse que la relación entre aportación y precipitación anuales no es estacionaria y parece haber evolucionado hacia valores más desfavorables (menos aportación para una precipitación semejante).

6.3.3. Análisis de rachas

Se obtienen 29 rachas mientras que la distribución aleatoria de rachas tiene una media de 33 y una desviación típica de 4,0. El nivel de significación que le corresponde a 29 rachas en esta distribución es $p=0,313$, valor que se considera suficiente para afirmar que la formación de las rachas anuales puede ser de origen aleatorio.

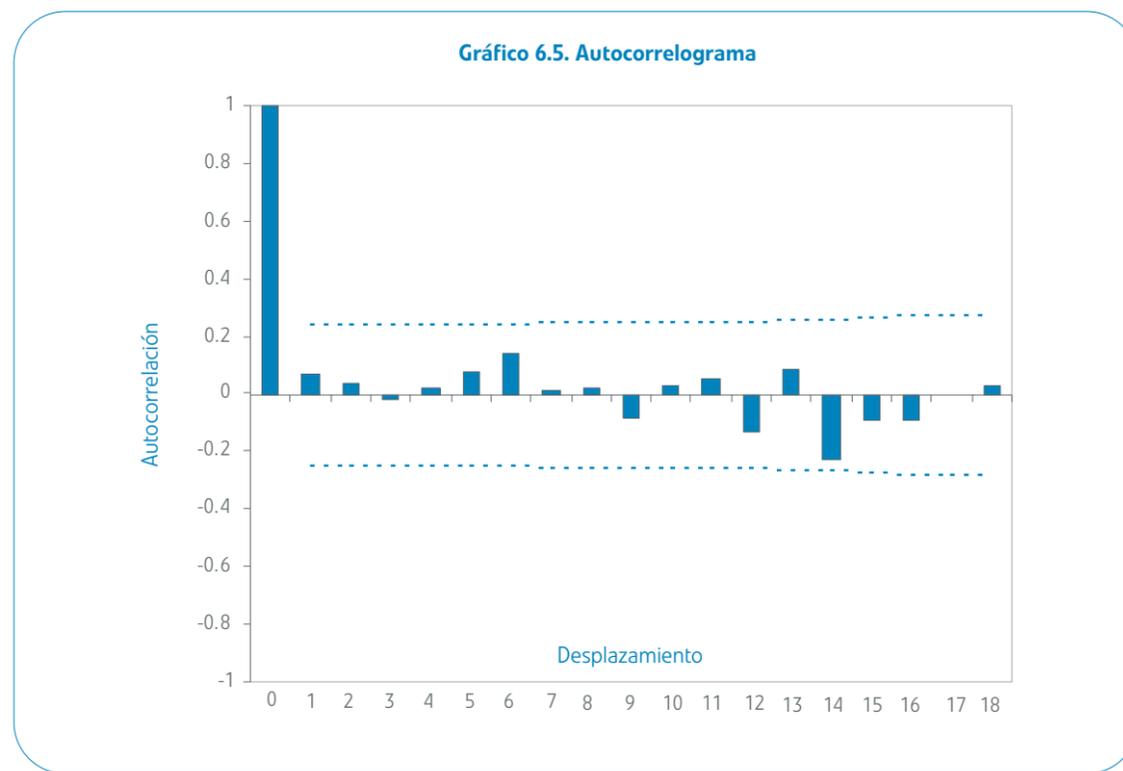
El cómputo de rachas proporciona los resultados de la tabla 6.9. La distribución de longitudes entre las rachas "secas" y las "húmedas" es equilibrada. La longitud media de la racha es de 2,21 años.

Tabla 6.9. Cómputo de rachas anuales sobre la mediana

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	11	5	6
2	8	4	4
3	7	3	4
4	0	0	0
5	2	2	0
6	1	0	1
TOTAL	0	0	0
Media	0	0	0

6.3.4. Autocorrelograma

El autocorrelograma, que se incluye en el gráfico 6.5, es similar al que se ha obtenido en la serie de aportaciones anuales de El Vado y no presenta ninguna autocorrelación significativa.



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

6.3.5. Tabla de contingencia

La tabla de contingencia 6.10 presenta un aspecto relativamente equilibrado y no es estadísticamente significativa (valor p para el test de la χ^2 : 0,088).

Tabla 6.10. Tabla de contingencia para la serie agregada

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	3	10	7	20
Actual - N**	11	4	6	21
Actual - S***	7	6	9	22
TOTAL	21	20	22	63

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

En los niveles anual y plurianual no se detecta nada significativamente distinto de un comportamiento aleatorio en las aportaciones agregadas del sistema de Canal de Isabel II.

6.4. Conclusiones

Como en el caso de El Vado, las aportaciones manifiestan persistencia clara en el nivel mensual: los meses secos (húmedos) tienen más probabilidad de ser seguidos por meses secos (húmedos).

En el nivel trimestral se detecta cierta persistencia. Se detecta una relación clara pero poco determinante entre las aportaciones de un trimestre y las del mes anterior. Esta relación se atribuye a la persistencia hidrológica de las cuencas.

En los niveles anual y plurianual no se detecta ningún comportamiento no aleatorio. En particular, los datos indican que un año seco puede ser seguido con la misma probabilidad por otro año seco, uno húmedo o uno normal.

7

Otras series de datos de aportación

Se expone de forma concisa el análisis realizado para cada una de las 12 series de aportaciones adicionales, que responde a la misma metodología que el expuesto en los epígrafes anteriores para El Vado, la serie agregada de aportaciones y la precipitación de Retiro.

Se adelanta que los resultados obtenidos son semejantes a los ya expuestos para las aportaciones de El Vado y las de la serie agregada, lo cual, por otra parte, es esperable. Comportamientos significativamente distintos de las aportaciones de cuencas relativamente próximas habrían sido de difícil interpretación. De hecho, existe una notable correlación entre las diferentes series de aportación.

La existencia de correlación cruzada entre series de aportaciones debe tenerse presente a la hora de interpretar los resultados del análisis. Si, por azar, una serie diera resultados estadísticamente significativos para cierto test, es probable que el mismo resultado se repitiera en algunas de las otras series debido a la correlación entre ellas. Por este motivo, se ha evitado deliberadamente extraer conclusiones en razón del número de series en que tal test detecta cierto comportamiento y, en cambio, se da más valor a los resultados obtenidos para la serie agregada, expuestos en el epígrafe 6.

En este sentido, la exposición que sigue tiene fundamentalmente valor de comprobación e incluso, es prescindible en una lectura rápida del documento, salvo que el lector esté interesado en algún caso concreto.

El análisis de las series de aportaciones individuales no altera los resultados y conclusiones del análisis expuesto más arriba. El comportamiento de la serie agregada puede considerarse representativo del comportamiento general de las aportaciones a los embalses de Canal de Isabel II.

7.1. Pinilla

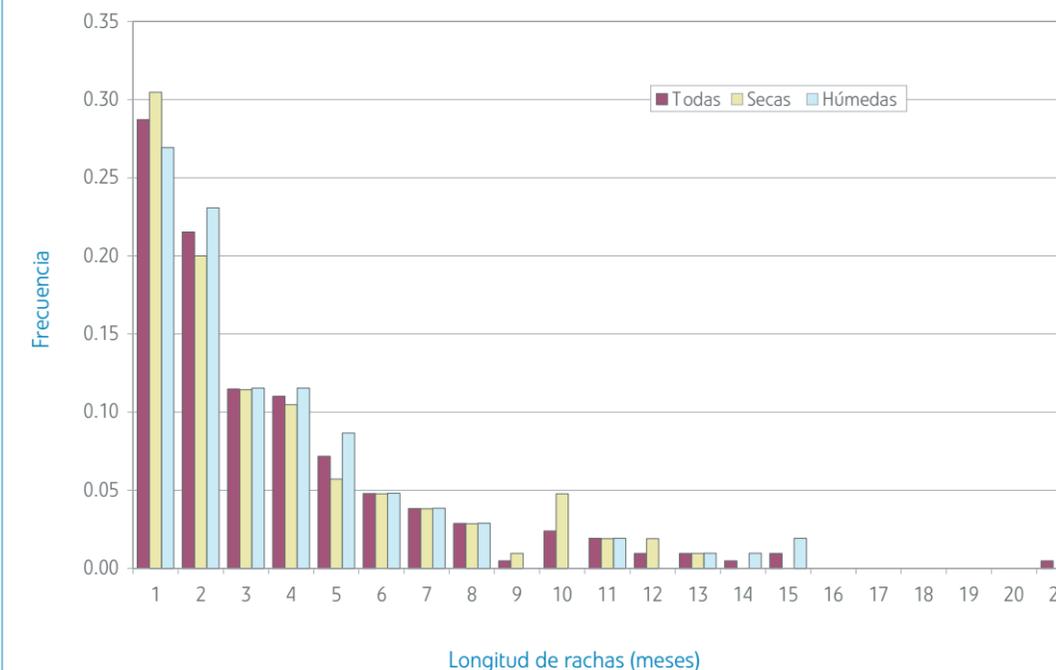
7.1.1. Nivel mensual

Las series de aportaciones mensuales de marzo, abril, mayo, agosto y septiembre desde 1940 hasta 2003 presentan tendencia decreciente estadísticamente significativa.

Para todos los meses existe correlación positiva y significativa (al 5 por ciento) con la aportación del mes anterior, siendo la de octubre con septiembre la más débil ($r=0,251$).

Clasificando la serie de aportaciones mensuales en función del valor de la mediana de cada mes, el número de rachas que se contabilizan es de 209 con una longitud media de más de 3,69 meses. En el gráfico 7.1 se presenta la distribución de rachas. El número de meses "secos" y "húmedos" es de 382 y 386 respectivamente. En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 386,1 y 13,9 respectivamente por lo que 209 rachas permiten descartar claramente dicha hipótesis.

Gráfico 7.1. Frecuencia observada de las longitudes de racha



7.1.2. Nivel trimestral

Se observa tendencia negativa significativa en los trimestres de primavera y verano. Para primavera r vale $-0,350$ y tiene un valor de significación p de $0,005$ (ver gráfico 7.2).

La correlación de la aportación de un trimestre con la del mes que le precede es positiva y significativa en invierno, primavera y verano, pero falta en otoño (ver tabla 7.1).

El número de rachas sobre la mediana en la serie de aportaciones trimestrales es muy inferior al esperable en una situación de aleatoriedad: se obtienen un total de 97 rachas mientras que la hipótesis de aleatoriedad establece una media de 129 rachas con una desviación típica de 8. El valor de significación, (dos colas), del número de rachas observado es $<0,00005$ y no deja lugar a dudas sobre la inverosimilitud de la hipótesis de aleatoriedad.

Se ha realizado un análisis del efecto de la tendencia en la formación de rachas similar al que se ha plantado en la serie agregada (ver apartado 6.2.4). Se ha comprobado que el efecto de la tendencia no es determinante en la formación de rachas no aleatorias.

Gráfico 7.2. Pinilla. Aportaciones trimestrales de abril - junio

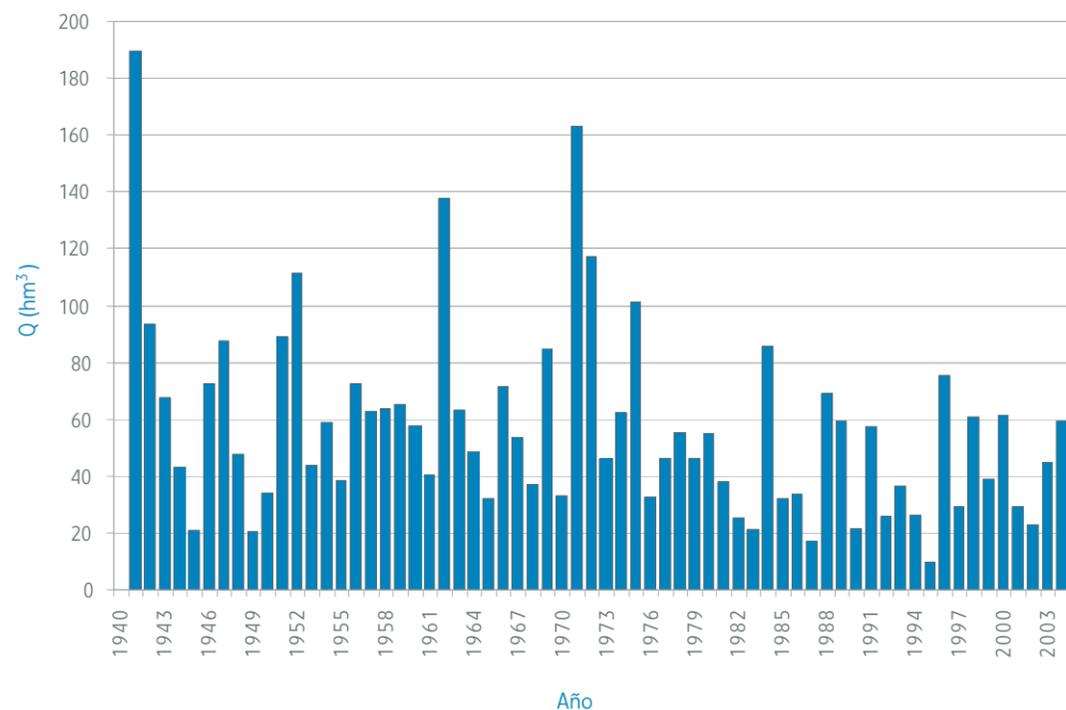


Tabla 7.1. Coeficiente de correlación entre aportación trimestral y aportación de periodos anteriores

Trimestre	EFM	AMJ	JAS	OND
Correlación con:				
Trimestre anterior	0,175	0,453	0,334	0,175
Bimestre anterior	0,206	0,469	0,358	0,168
Mes anterior	0,312	0,541	0,429	0,255

En negrita los valores significativos al 5%

7.1.3. Nivel anual

Las aportaciones anuales al embalse de Pinilla desde el año hidrológico 1940 presentan una tendencia negativa estadísticamente significativa al 5 por ciento ($r=-0,279$; $p=0,026$) que no tiene correspondiente en las series de precipitación y que debe ser la traslación al nivel anual de la observada en primavera (la de verano tiene poca influencia en el cómputo total del año).

No se dispone de elementos de juicio para argumentar una explicación plausible para esta tendencia que, si es real, puede tener su origen en cambios en la cuenca (por ejemplo, mayor desarrollo de la vegetación y el suelo) o en el clima (mayor ETP, cambios en la distribución estacional de las precipitaciones), pero que también podría tener su origen en una falta de homogeneidad en la determinación de los datos de aportación antes y después de la puesta en servicio de la presa.

La correlación con la serie de precipitaciones anuales de Retiro es alta ($r=0,722$). El gráfico 7.3 muestra las series anuales de aportación a Pinilla y precipitación en Retiro.

El cómputo de rachas sobre la mediana anual es de 29 rachas, con duraciones comprendidas entre 1 y 8 años. La longitud media es de 2,2 años. El número esperado de rachas aleatorias es de 33, con una desviación típica de 4,0. El número de rachas observado es, por tanto, compatible con la hipótesis nula.

El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de Pinilla no presenta ninguna autocorrelación significativa (nivel de significación: 0,05).

La tabla de contingencia para años clasificados en terciles se muestra en la tabla 7.2. Los límites de los terciles son, respectivamente, 134,9 y 186,1 hectómetros cúbicos. Es decir, los años con aportación menor o igual que 134,9 hectómetros cúbicos se clasifican como S, los que tienen aportaciones mayores que 186,1 hectómetros cúbicos se clasifican como H y el resto como N. La tabla es equilibrada y no presenta ninguna característica relevante.

Gráfico 7.3. Aportación Pinilla vs precipitación Retiro

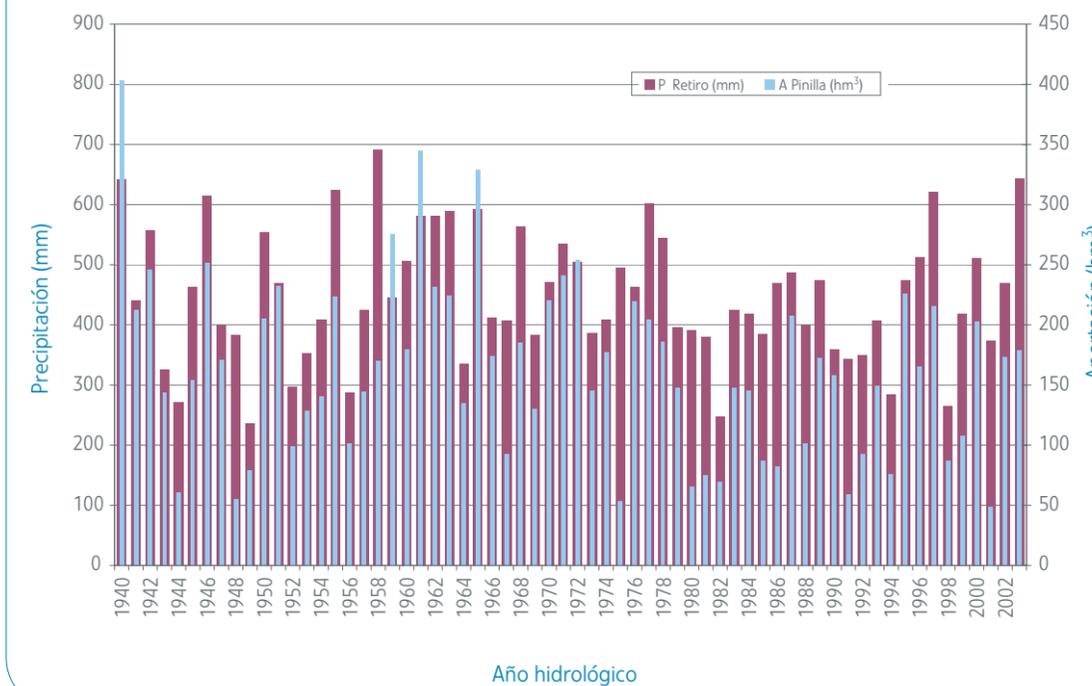


Tabla 7.2. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	8	5	7	20
Actual - N**	7	6	8	21
Actual - S***	6	9	7	22
TOTAL	21	20	22	63

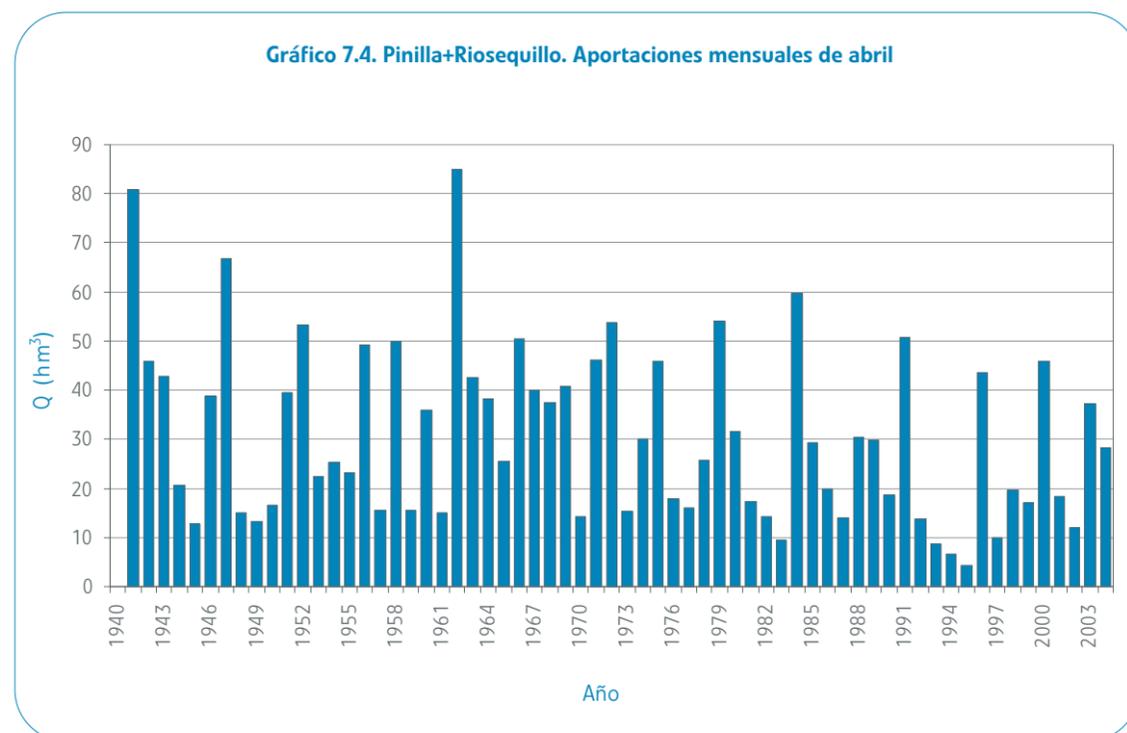
* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

7.2. Lozoya aguas arriba de Riosequillo

La serie de aportaciones de la cuenca propia de Riosequillo no se ha estudiado, por problemas de calidad en los datos. En cambio, se estudia la serie agregada de aportaciones de las cuencas de Pinilla y Riosequillo.

7.2.1. Nivel mensual

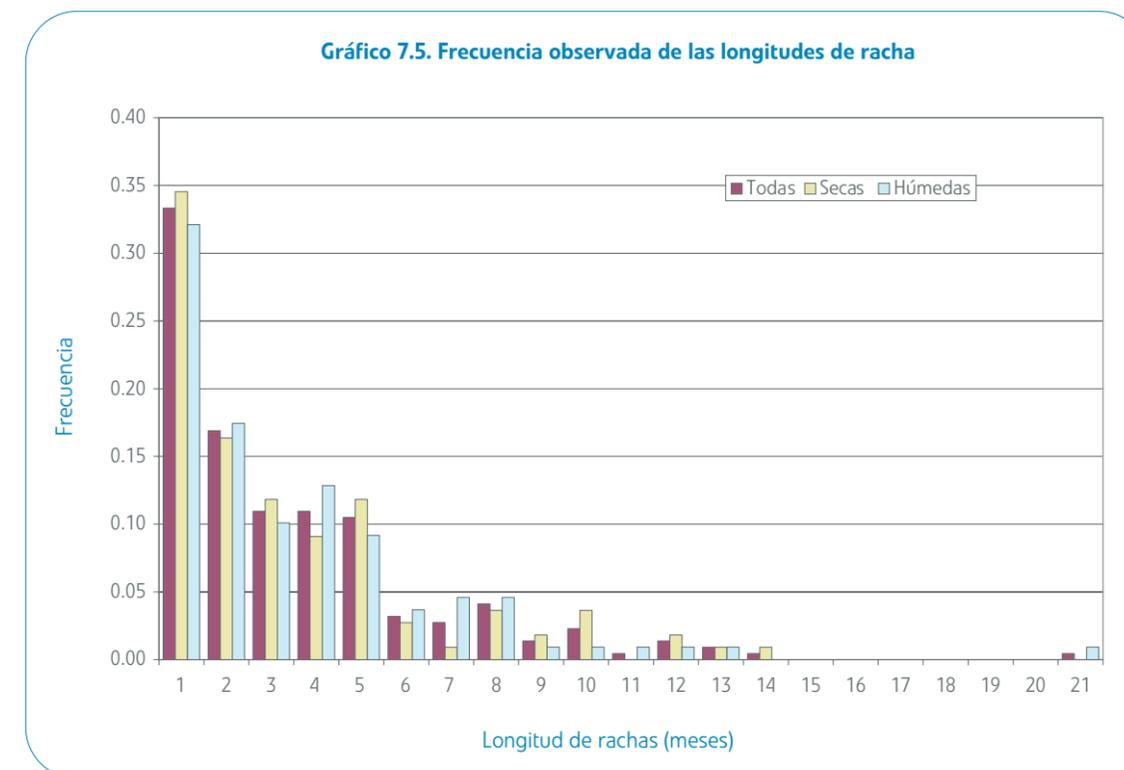
En los meses de abril y mayo se observa una tendencia decreciente significativa (valores de p en el entorno de 0,015). En el gráfico 7.4 se presenta la serie de aportaciones de abril.



La correlación de la aportación de un mes con la del anterior es positiva y significativa salvo para octubre.

En el análisis de rachas sobre la mediana se observa, nuevamente, un número de rachas incompatible con la hipótesis de aleatoriedad. Se cuentan 219 rachas cuando si la distribución fuese aleatoria tendrían que esperarse 386,5 con desviación típica de 13,9. La longitud media de las rachas es de 3,52.

La distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes es muy equilibrada. En el gráfico 7.5 se muestra la estadística de rachas en función de su longitud.



7.2.2. Nivel trimestral

Se observa tendencia negativa significativa en el trimestre de primavera ($r=-0,329$, $p=0,008$). En el gráfico 7.6 se muestra la serie de aportaciones de primavera con la correspondiente línea de tendencia. Conviene señalar que el valor de tendencia es también significativo aunque se prescindiera del primer dato de la serie (año civil 1941), que es el máximo.

Las correlaciones de la aportación trimestral con un periodo anterior mejoran cuando se consideran periodos anteriores más cortos (bimestre, mes), aunque sólo se encuentran correlaciones significativas en primavera (AM) y verano (JAS) (ver tabla 7.3).

Gráfico 7.6. Pinilla + Riosequillo. Aportaciones trimestrales de abril-junio

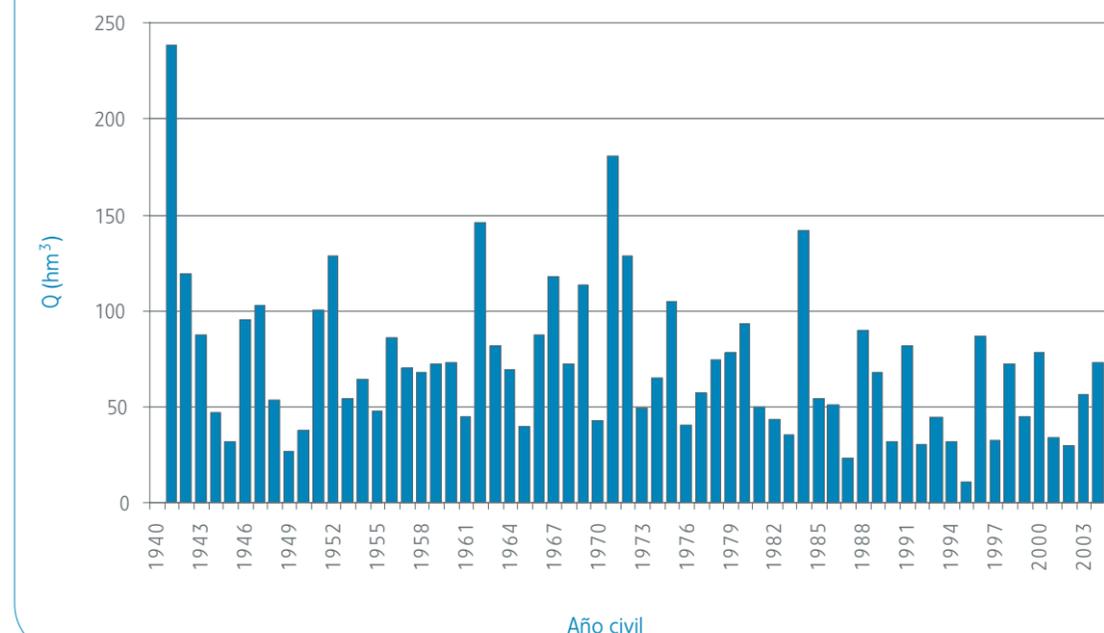


Tabla 7.3. Coeficiente de correlación entre aportación trimestral y aportación de periodos anteriores

Trimestre	EFM	AMJ	JAS	OND
Correlación con:				
Trimestre anterior	0,160	0,421	0,341	0,126
Bimestre anterior	0,179	0,470	0,370	0,166
Mes anterior	0,252	0,519	0,463	0,223

En negrita los valores significativos al 5%

El número de rachas sobre la mediana en la serie de aportaciones trimestrales es muy inferior al esperado en condiciones aleatorias: 95 frente a 129,5 (con desviación típica de 8,0). En esta distribución, a 95 rachas le corresponde un valor de significación de $2 \cdot 10^{-5}$ (2 colas), que permite rechazar claramente la hipótesis nula de aleatoriedad de la serie.

La tabla 7.4 muestra el número de rachas en función del trimestre en que concluyen. Para un número esperado de rachas de 129,5 en condiciones aleatorias se espera que, en cada trimestre, concluyan $129,5/4 \approx 32$ rachas. Se comprueba que el único trimestre con un comportamiento asimilable al aleatorio es el de verano, mientras que el resto presentan una tendencia clara a generar persistencia.

Tabla 7.4. Número de rachas según el trimestre en que concluyen

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	20	10	10
Invierno (EFM)	22	11	11
Primavera (AMJ)	22	11	11
Verano (JAS)	31	16	15

Se ha comprobado que la persistencia detectada en el análisis de rachas no es atribuible a la tendencia a largo plazo observada, por ejemplo, en primavera.

7.2.3. Nivel anual

Los análisis realizados en el nivel anual no detectan ninguna relación o dependencia entre las aportaciones de un año hidrológico y las del anterior. Existe cierta tendencia negativa que no llega a ser significativa al 5 por ciento ($p=0,074$).

Se obtienen 29 rachas sobre la mediana mientras que la distribución aleatoria de rachas tiene una media de 33 y una desviación típica de 4,0. El nivel de significación que le corresponde a 29 rachas en esta distribución es $p=0,313$, valor perfectamente compatible con la hipótesis de aleatoriedad.

El autocorrelograma que se presenta como gráfico 7.7 es similar al que se ha obtenido en otros casos y no presenta ninguna autocorrelación significativa.

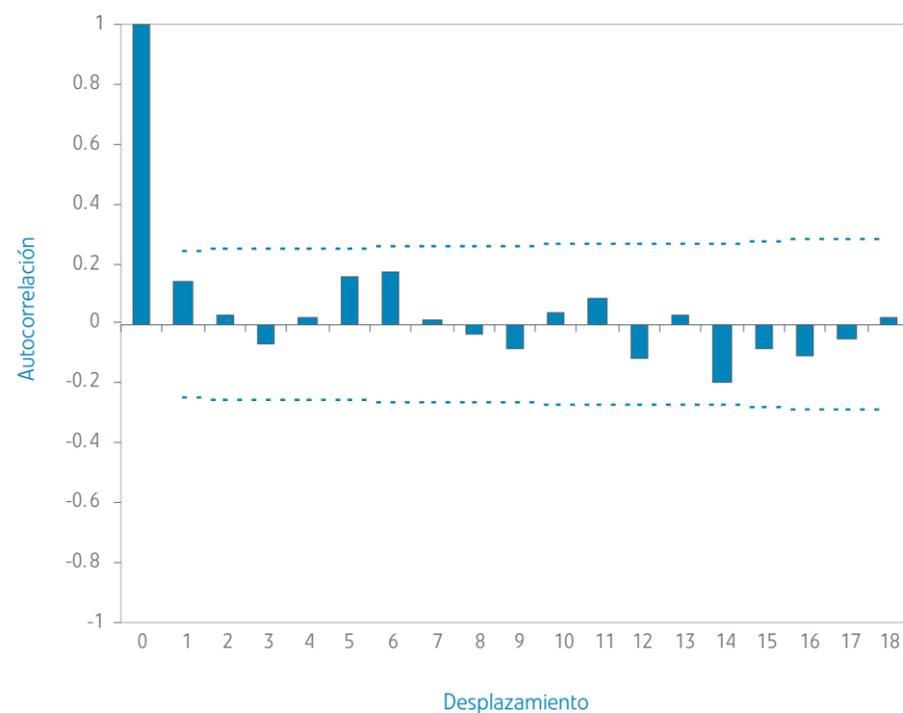
La tabla de contingencia, (ver tabla 7.5), presenta un aspecto equilibrado en general y no es estadísticamente significativa (valor p para el test de la χ^2 : 0,430).

Tabla 7.5. Tabla de contingencia para la serie agregada

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	7	8	5	20
Actual - N**	9	4	8	21
Actual - S***	5	8	9	22
TOTAL	21	20	22	63

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

Gráfico 7.7. Autocorrelograma



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

7.3. Puentes Viejas

7.3.1. Nivel mensual

Sólo los meses de marzo, agosto y septiembre presentan una tendencia significativa, en los tres casos, decreciente. En el gráfico 7.8 se muestra la serie de aportaciones de marzo y la línea de tendencia correspondiente.

El grado de correlación entre aportaciones de meses contiguos es alto. En todos los casos, a excepción del mes de octubre, el valor de r es significativo al 5 por ciento. En principio, se atribuye esta correlación a la inercia hidrológica de la cuenca.

El análisis de rachas sobre las medianas cuenta 223 rachas con una longitud media de 3,46 meses, con una distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes relativamente equilibrada (ver gráfico 7.9).

El número de meses "secos" y "húmedos" es de 383 y 388 respectivamente. En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 386,5 y 13,9. El resultado obtenido, (223 rachas), es claramente incompatible con dicha hipótesis.

Gráfico 7.8. Puentes Viejas. Aportaciones mensuales de marzo

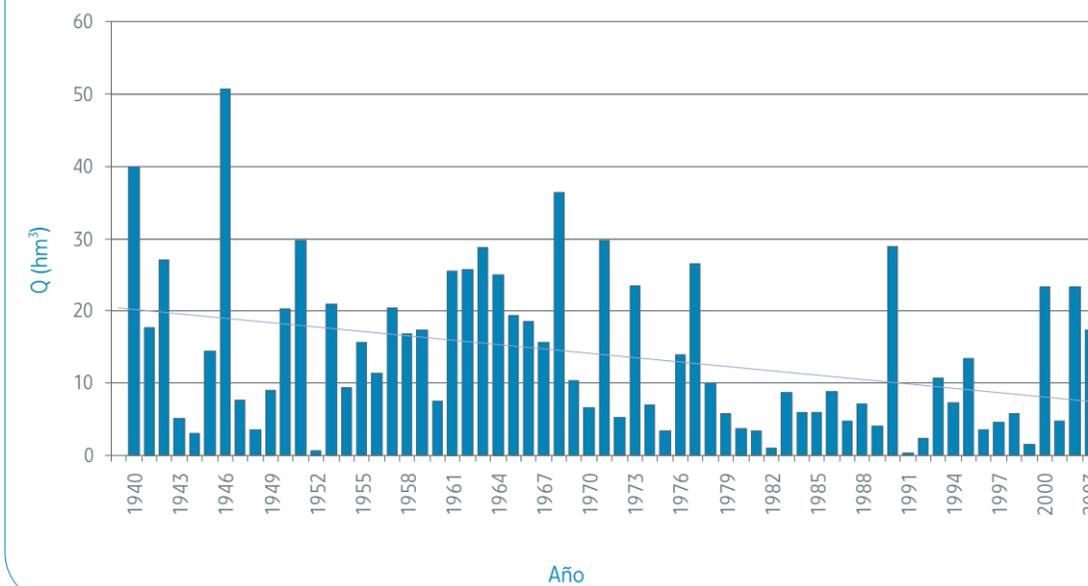
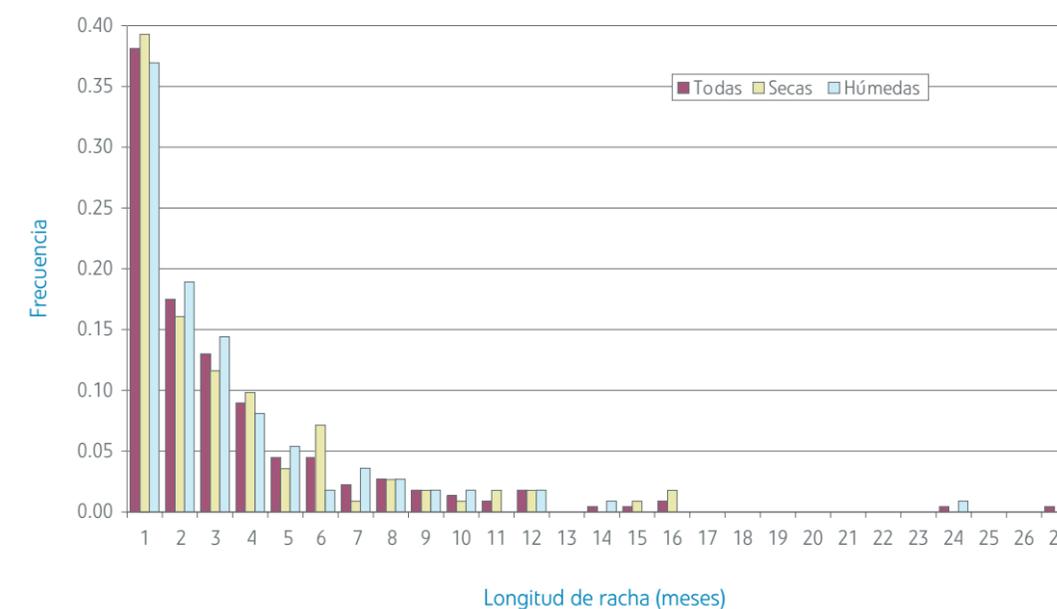


Gráfico 7.9. Frecuencia observada de las longitudes de racha



7.3.2. Nivel trimestral

Sólo se detecta tendencia significativa en las aportaciones del trimestre estival. La correlación entre aportación trimestral y aportación de periodos anteriores, (trimestre, bimestre, mes), es significativa salvo para el trimestre de otoño.

El análisis de rachas sobre las medianas pone de manifiesto la existencia de persistencia entre las aportaciones en el nivel trimestral. Se obtienen un total de 86 rachas mientras que la hipótesis de aleatoriedad establece una media de 129,5 rachas con una desviación típica de 8. La longitud media de las rachas es de 2,9 trimestres.

Se observa en la tabla 7.6 que predominan de manera significativa las rachas que acaban en el trimestre de verano. De los 64 veranos de la serie, en 28 se produce cambio y en el resto, 36, persisten las condiciones hidrológicas. Este desequilibrio, que no es exagerado, se acentúa enormemente en el resto de estaciones (por ejemplo: de los 64 inviernos, 46 son "persistentes").

Tabla 7.6 Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	20	10	10
Invierno (EFM)	18	9	9
Primavera (AMJ)	20	10	10
Verano (JAS)	28	14	14

Se ha comprobado que existe persistencia, independiente del efecto de la tendencia a largo plazo.

7.3.3. Nivel anual

La serie de aportaciones anuales al embalse de Puentes Viejas no presenta tendencia significativa. Con todo, la línea de tendencia es decreciente con $p=0,058$, muy próximo al umbral de significación del 5 por ciento.

Se observa, a partir de la década de los 70, que son mucho más frecuentes los años con aportaciones escasas. Se contabilizan hasta un total de ocho años en los que la aportación no supera los 30 hectómetros cúbicos, ninguno de ellos anterior al año hidrológico 1971. Sin duda, este escalón observado guarda relación con los periodos de sequía registrados en los años 80 y 90. Sin embargo, en la serie de precipitaciones en Retiro no se observa un descenso tan acusado. El gráfico 7.10 muestra las series anuales de aportación a Puentes Viejas y la precipitación en Retiro.

Hay un total de 23 rachas de duraciones comprendidas entre 1 y 9 años y la distribución de longitudes entre las rachas "secas" y las "húmedas" es equilibrada. La longitud media es de 2,8 años. En estas condiciones, el número esperado de rachas aleatorias es de 33, con una desviación típica de 4,0. Al número de rachas observado, 23, le corresponde un valor de significación de 0,012, 2 colas, suficientemente pequeño como para ser considerado significativo. Es decir, el número de rachas observado es significativamente menor que el esperado por azar, lo cual, en principio, indica un comportamiento persistente de las aportaciones anuales.

Este resultado es excepcional, por cuanto en el resto de los casos el análisis de rachas no detecta nada relevante en el nivel anual. Dado que la serie anual presenta una tendencia decreciente aparente, aunque no significativa

al 5 por ciento, se ha investigado si esta puede tener un papel determinante en la formación de rachas más persistentes que las aleatorias. Para comprobarlo, se ha realizado el análisis de rachas respecto de las líneas de tendencia trimestrales y, para tener una referencia comparable, el análisis de rachas sobre las medias trimestrales. Los resultados se presentan en la tabla 7.7.

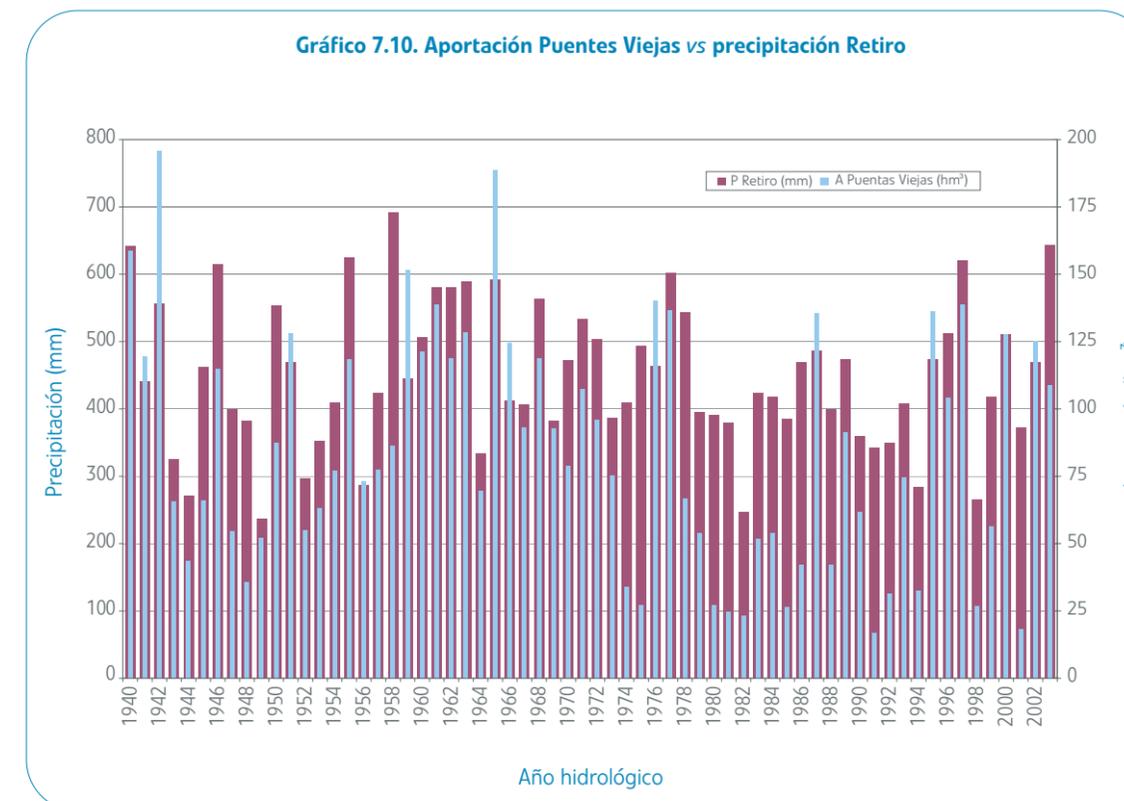


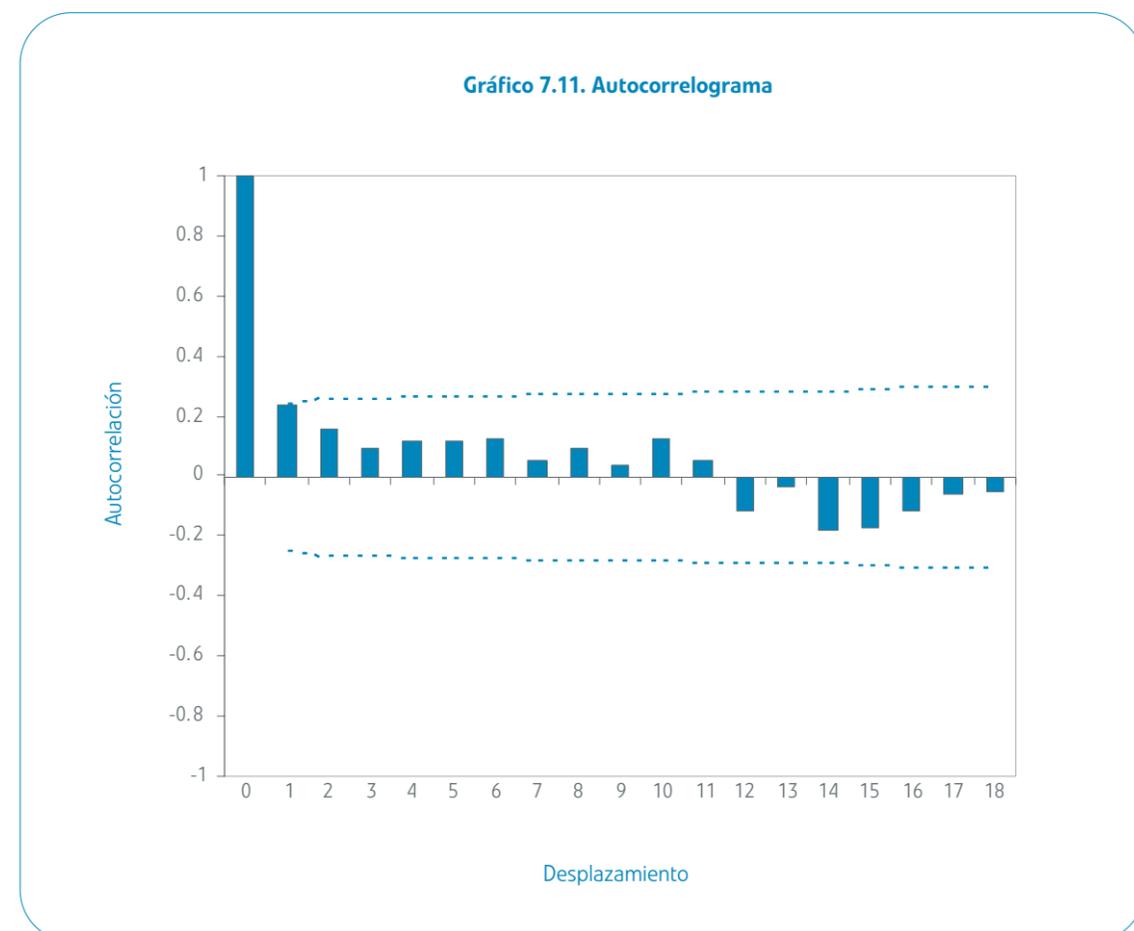
Tabla 7.7. Comparación del número de rachas sobre las medias y sobre las líneas de tendencia

Rachas respecto de	Media	Tendencia
Años secos	40	35
Años húmedos	24	29
Número de rachas en la hipótesis nula		
Media	31,0	121,3
Desviación típica	3,7	3,9
Rachas observadas		
Número	25	27
Valor de significación	0,106	0,146

De los resultados se desprende que:

- a) La formación de rachas sobre la media da un resultado mucho menos significativo que sobre la mediana. Esto puede achacarse a que el test sobre la media es menos potente, ya que el número de meses secos y húmedos es más desequilibrado (con lo cual hay menos combinaciones posibles).
- b) El número de rachas respecto de la línea de tendencia es aún menos significativo, pero la diferencia es pequeña: la desviación respecto de la media es $1,45 \cdot \sigma$ para las rachas sobre la línea de tendencia y $1,61 \cdot \sigma$ para las rachas sobre la media.
- c) Se puede concluir de b) que el efecto de la tendencia en la formación de rachas es poco significativo.

El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de Puentes Viejas se presenta en el gráfico 7.11 y no presenta ninguna característica relevante, aunque el coeficiente de autocorrelación de orden 1 está muy próximo al nivel de significación del 5 por ciento.



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

La tabla de contingencia a partir de la clasificación de años en terciles (ver tabla 7.8) presenta cierto desequilibrio aparente. Por ejemplo, parece más probable que los años secos se presenten de manera consecutiva. Pero, en conjunto, la tabla no es estadísticamente significativa (el valor de p para la tabla es de 0,216).

Tabla 7.8. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	8	7	5	20
Actual - N**	8	8	5	21
Actual - S***	5	5	12	22
TOTAL	21	20	22	63

A la vista del conjunto de resultados de las pruebas sobre la serie de aportaciones anuales de Puentes Viejas y de los del resto de series de aportaciones anuales analizadas, cabe considerar el resultado excepcional del test de rachas como fortuito, es decir, más un producto del azar que un reflejo de un comportamiento especial de la serie.

7.4. Lozoya aguas arriba de El Villar

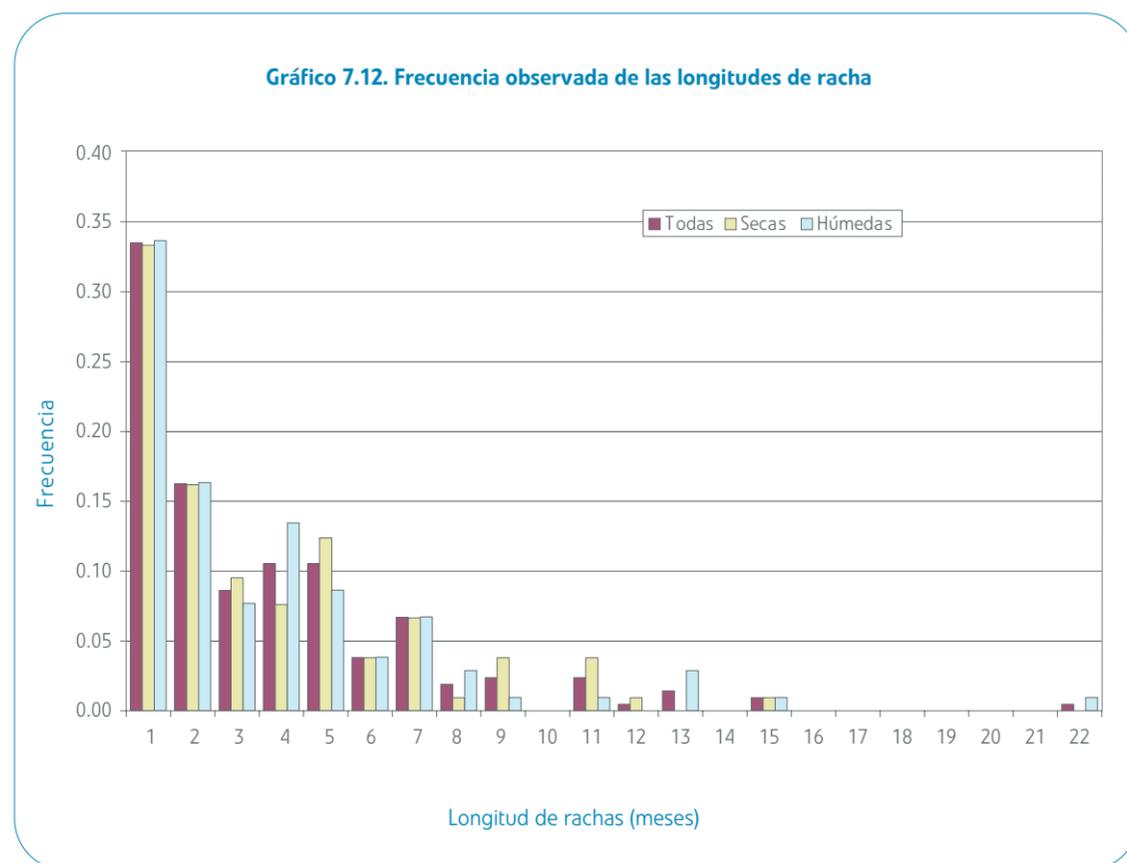
Por su escasa relevancia, no se han analizado las aportaciones de la cuenca propia de El Villar individualmente. En cambio, sí se analizan las de la cuenca agregada de Pinilla, Riosequillo, Puentes Viejas y El Villar.

7.4.1. Nivel mensual

Se detecta tendencia a largo plazo negativa y significativa en marzo, abril, mayo, agosto y septiembre. Como en casos anteriores, no se dispone de una explicación causal para esta tendencia.

La correlación de la serie de aportaciones de un mes con la del anterior es positiva y significativa salvo para el caso de octubre, como viene siendo habitual.

Se cuentan 209 rachas sobre la mediana con una longitud media de 3,7 meses. Se trata de un número de rachas incompatible con la hipótesis de aleatoriedad de la serie (media y desviación típica 386,5 y 13,9). La distribución del número de rachas puede verse en el gráfico 7.12.



7.4.2. Nivel trimestral

Se detecta una tendencia decreciente significativa en primavera (AMJ) y verano (JAS), reflejo de las detectadas en el nivel mensual y de las detectadas en las series de las cuencas de cabecera.

La correlación con la aportación del trimestre anterior es significativa al 5 por ciento en primavera (AMJ) y verano (JAS) y, en invierno, queda relativamente cerca del umbral de significación del 5 por ciento. Se comprueba que la correlación mejora si se refiere al bimestre o al mes anterior (y, en este caso, se hace significativa para invierno).

El análisis de rachas sobre las medianas detecta claramente la existencia de persistencia entre las aportaciones en el nivel trimestral. Se obtienen un total de 91 rachas, completamente inverosímil en la hipótesis de aleatoriedad, para la que se establece una media de 129,5 rachas con una desviación típica de 8. La longitud media de las rachas es de 2,8 trimestres.

Se observa en la tabla 7.9 que predominan las rachas que acaban en el trimestre de verano mientras que son minoría las que concluyen en primavera. De las 64 primaveras de la serie, sólo en 18 se produce cambio, mientras que 46 primaveras son "persistentes".

Tabla 7.9. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	24	12	12
Invierno (EFM)	22	11	11
Primavera (AMJ)	18	9	9
Verano (JAS)	27	14	13

El resultado obtenido en el análisis de rachas es contundente. Sin embargo, en las series de aportaciones trimestrales del Lozoya aguas arriba del embalse de El Villar se aprecian tendencias negativas en los trimestres de primavera y verano. Ante la posibilidad de que esta tendencia pueda influir en los resultados obtenidos del test de rachas, se ha realizado un nuevo análisis con respecto a las líneas de tendencia. Para tener una referencia comparable, también se ha analizado la formación de rachas respecto de las medias trimestrales. El resultado se resume en la tabla 7.10.

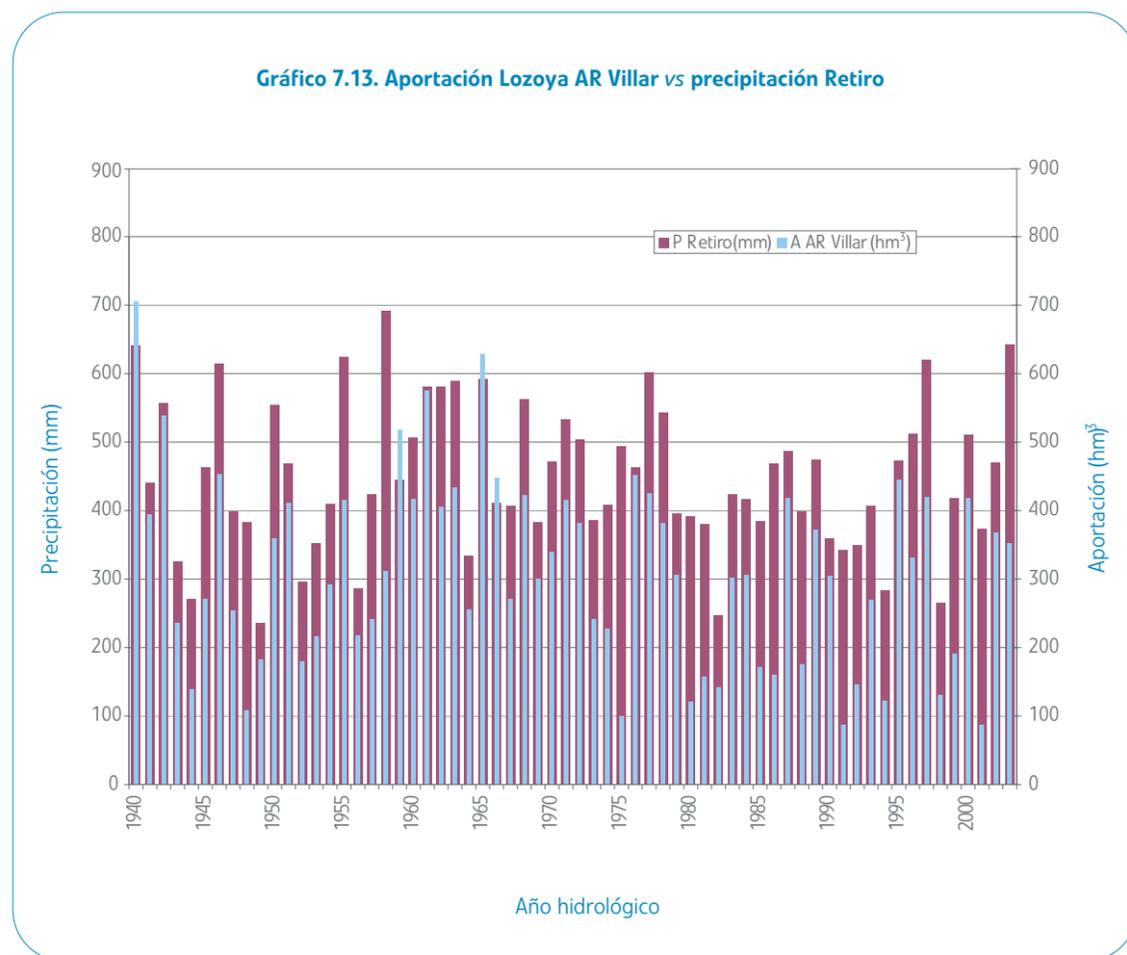
Tabla 7.10. Número de rachas sobre las medias y sobre las líneas de tendencia

Rachas respecto de	Medias	Tendencias
Trimestres secos	160	165
Trimestres húmedos	97	92
Número de rachas en la hipótesis nula		
Media	121,8	119,1
Desviación típica	7,5	7,3
Rachas observadas		
Número	91	95
Valor de significación	0,00004	0,00103

Se comprueba que el número de rachas sobre las líneas de tendencia es algo mayor que el que se obtiene si se toman como referencia las medias. El número de rachas esperado en la hipótesis nula es similar en ambas series y la diferencia con la media esperada sigue siendo claramente significativa. Es decir, la tendencia podría intervenir en la formación de rachas persistentes, pero no es un factor determinante.

7.4.3. Nivel anual

La serie presenta una tendencia decreciente apreciable, estadísticamente significativa al 5 por ciento ($r=-0,248$; $p=0,048$, ver gráfico 7.13). Resulta significativo que, de los 17 datos por debajo de 200 hectómetros cúbicos, 13 corresponden a la segunda mitad cronológica de la serie (años hidrológicos de 1972 a 2003). Las precipitaciones de Retiro no presentan un comportamiento comparable.

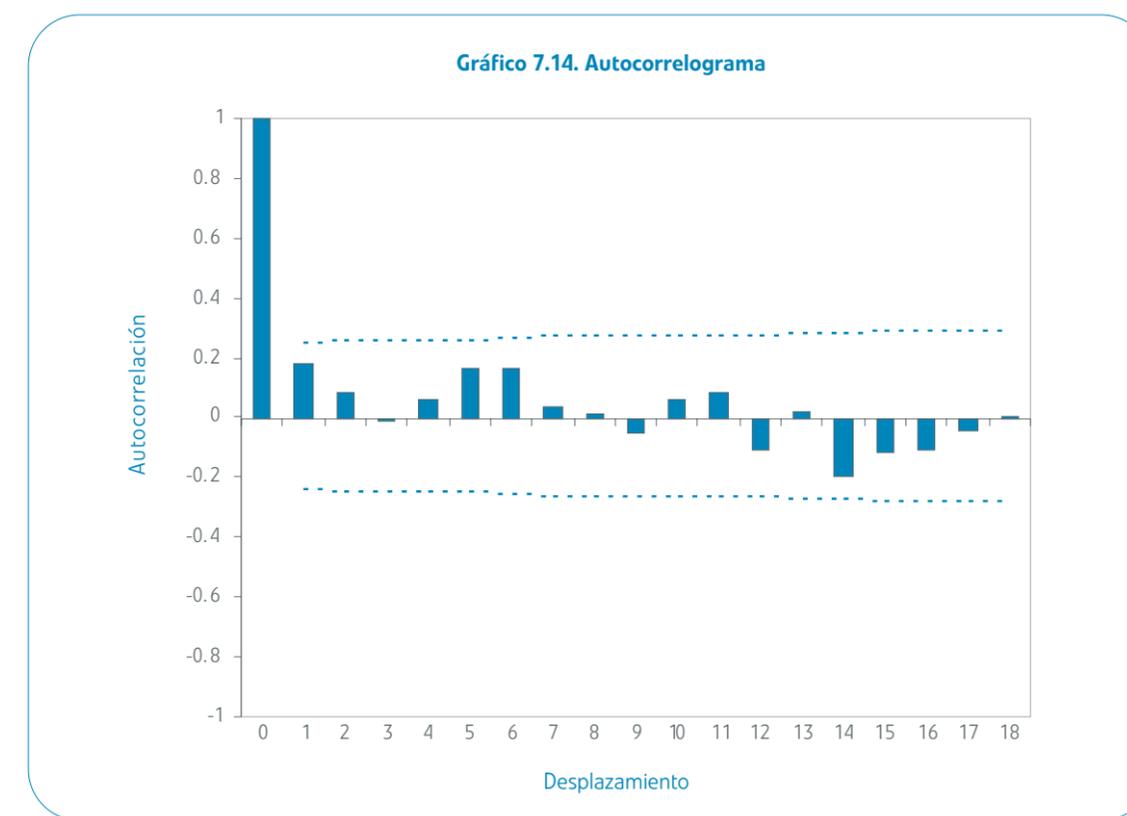


Hay un total de 29 rachas sobre la mediana, de duraciones comprendidas entre 1 y 6 años y, la distribución de longitudes entre las rachas “secas” y las “húmedas”, es equilibrada. La longitud media es de 2,2 años.

En estas condiciones, el número esperado de rachas aleatorias es de 33, con una desviación típica de 4,0. Al número de rachas observado, 29, le corresponde un valor de significación de 0,313, 2 colas, suficientemente grande como para descartar un comportamiento no aleatorio de las aportaciones anuales.

El autocorrelograma de las aportaciones anuales de la cuenca del Lozoya aguas arriba de la presa de El Villar se presenta en el gráfico 7.14. No se superan, en ningún caso, los niveles de significación de los coeficientes de autocorrelación.

La tabla de contingencia, a partir de la clasificación de años en terciles (tabla 7.11), presenta cierto desequilibrio para los años secos. Es más frecuente que los años secos vayan precedidos de otros años secos. Pero, en conjunto, el desequilibrio de la tabla no es estadísticamente significativo (el valor de p para la tabla es de 0,528).



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

Tabla 7.11. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	8	8	4	20
Actual - N**	7	6	8	21
Actual - S***	6	6	10	22
TOTAL	21	20	22	63

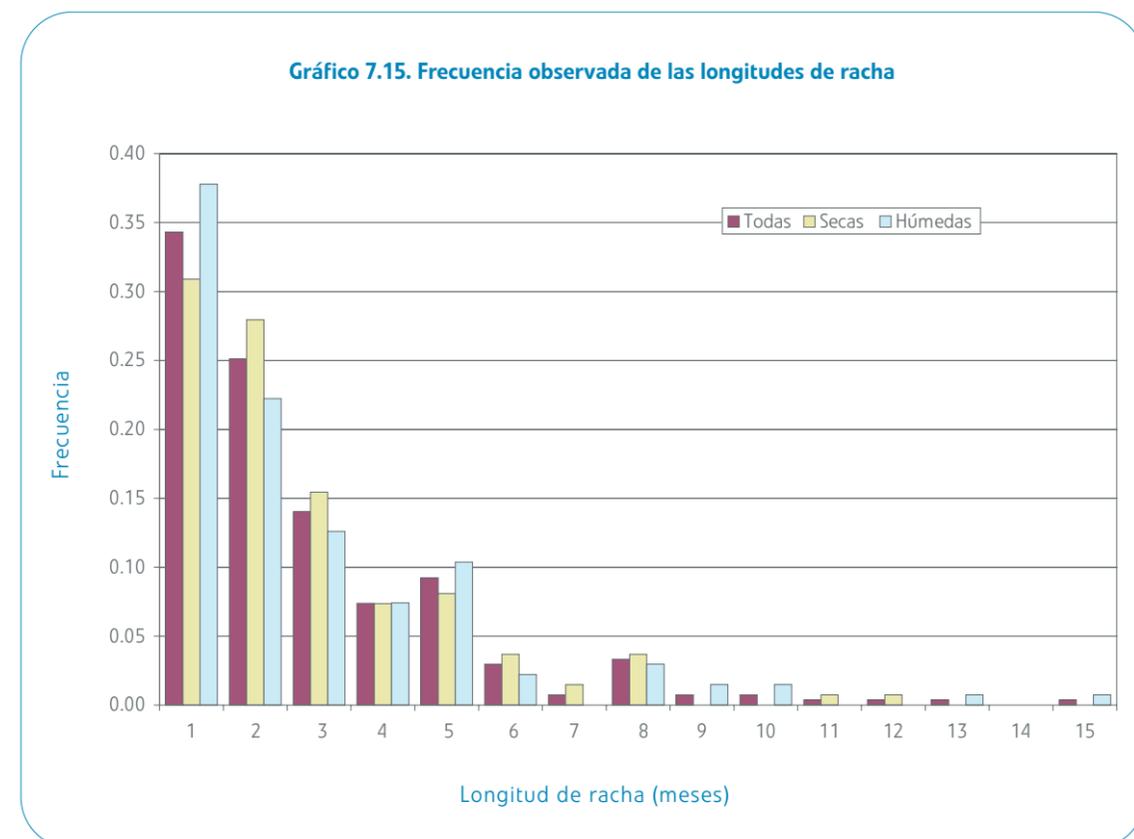
* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

7.5. El Atazar

7.5.1. Nivel mensual

No se detectan tendencias a largo plazo relevantes. La correlación entre la aportación de un mes y la del anterior es positiva y significativa para todos los meses salvo agosto, septiembre y octubre, pero considerablemente más débil que en otros casos.

El comportamiento persistente es evidente en el análisis de rachas. Se cuentan 271 rachas con una longitud media de 2,85 meses. La distribución correspondiente a un número de rachas aleatorio tiene una media de 386,5 con una desviación de 13,9. En el gráfico 7.15 se muestra la distribución del número de rachas sobre las medianas.



7.5.2. Nivel trimestral

No se detecta tendencia significativa. La correlación de las aportaciones de un trimestre con las de periodos anteriores es débil y casi nunca significativa.

El número de rachas sobre las medianas, 115, es inferior al valor esperado, 129,5 con desviación típica de 8, pero la diferencia no es claramente significativa ($p=0,070$).

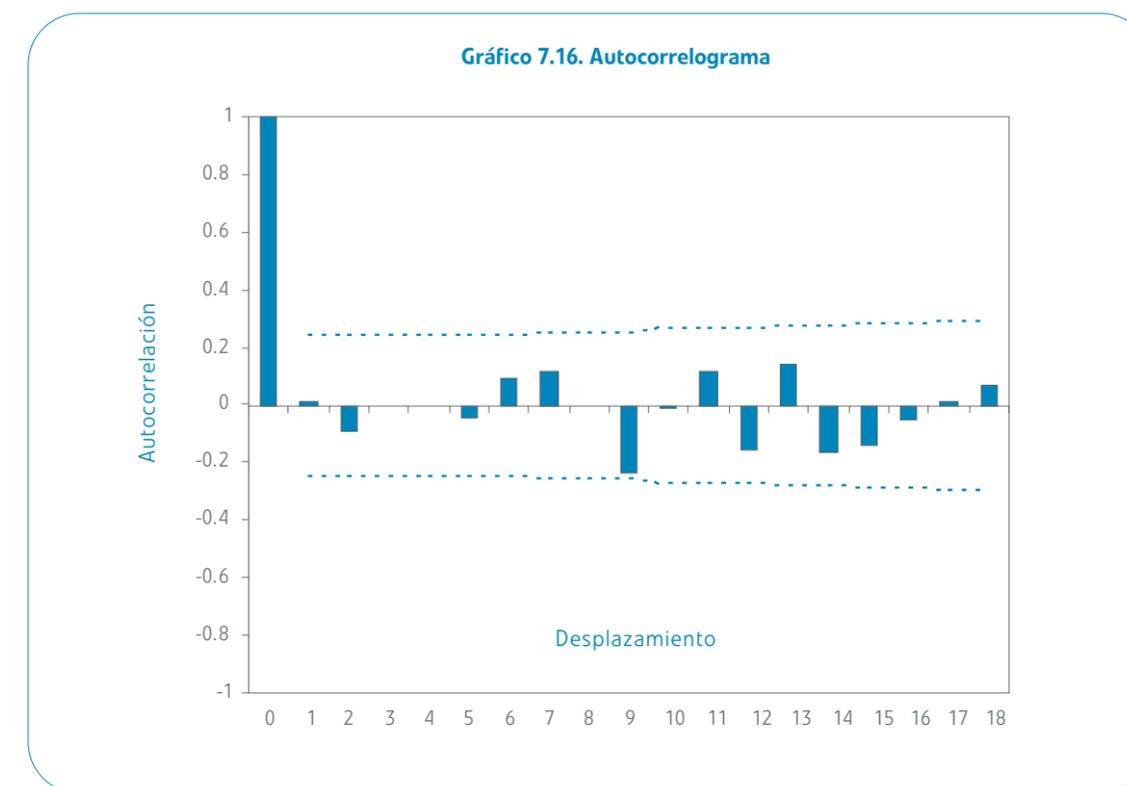
Es decir, en el nivel trimestral las aportaciones de la cuenca propia de El Atazar no presentan comportamientos no aleatorios claros salvo, tal vez, cierta tendencia a la persistencia.

7.5.3. Nivel anual

Las aportaciones anuales de la cuenca propia de El Atazar no presentan ninguna tendencia significativa.

Hay un total de 27 rachas sobre la mediana, de duraciones comprendidas entre 1 y 5 años y con una distribución de longitudes entre las rachas "secas" y las "húmedas" es bastante equilibrada. La longitud media es de 2,37 años. En estas condiciones, el número esperado de rachas aleatorias es de 33, con una desviación típica de 4,0. El número de rachas observado, 27, es compatible con la hipótesis de aleatoriedad de la serie.

El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de El Atazar no presenta ninguna característica reseñable (ver gráfico 7.16).



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

La clasificación de los años hidrológicos según terciles tampoco aporta nada destacable. La tabla de contingencia (ver tabla 7.12) no presenta ningún desequilibrio significativo.

Tabla 7.12. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***
Actual - H*	6	6	8
Actual - N**	7	9	5
Actual - S***	7	6	9

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

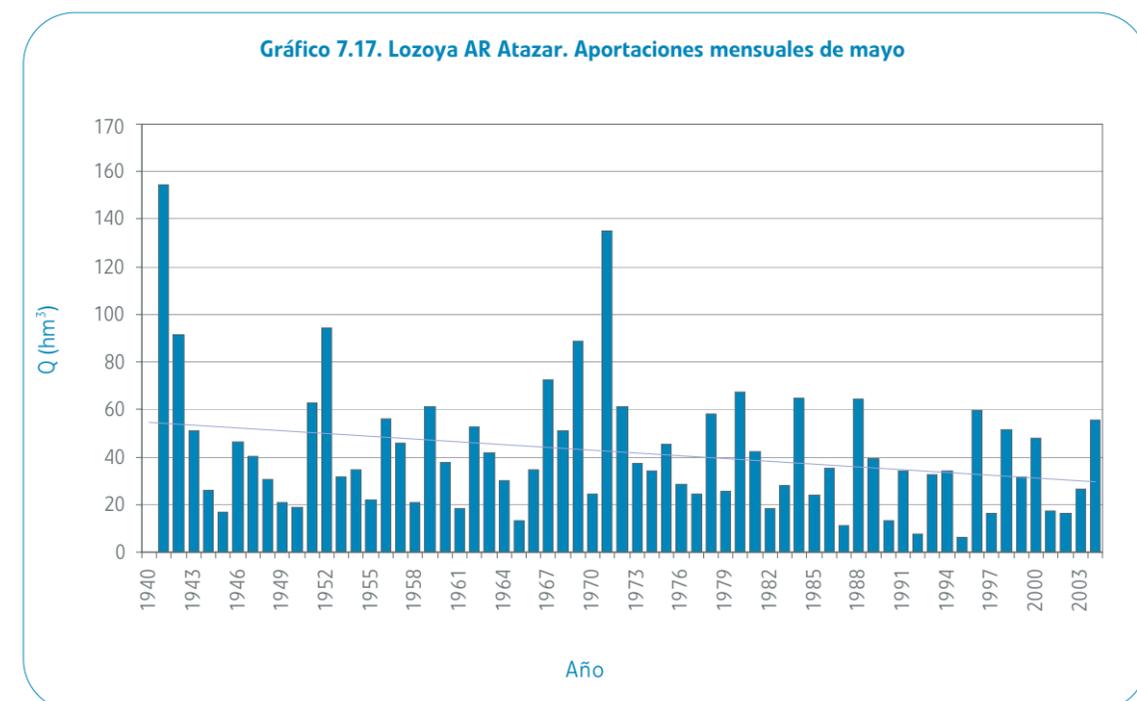
7.6. Lozoya aguas arriba de El Atazar

Se analiza la serie de aportaciones del sistema Lozoya completo por su relevancia dentro del sistema de captación de Canal de Isabel II.

7.6.1. Nivel mensual

Se detecta tendencia negativa y significativa en marzo, abril, mayo y septiembre. Es, por tanto, un comportamiento muy similar al observado en Lozoya aguas arriba de El Villar. En el gráfico 7.17 se muestra la serie de aportaciones de mayo. Obsérvese que, por ejemplo, la aportación de mayo de 70 hectómetros cúbicos sólo se supera en 6 ocasiones, todas ellas en la primera mitad de la serie.

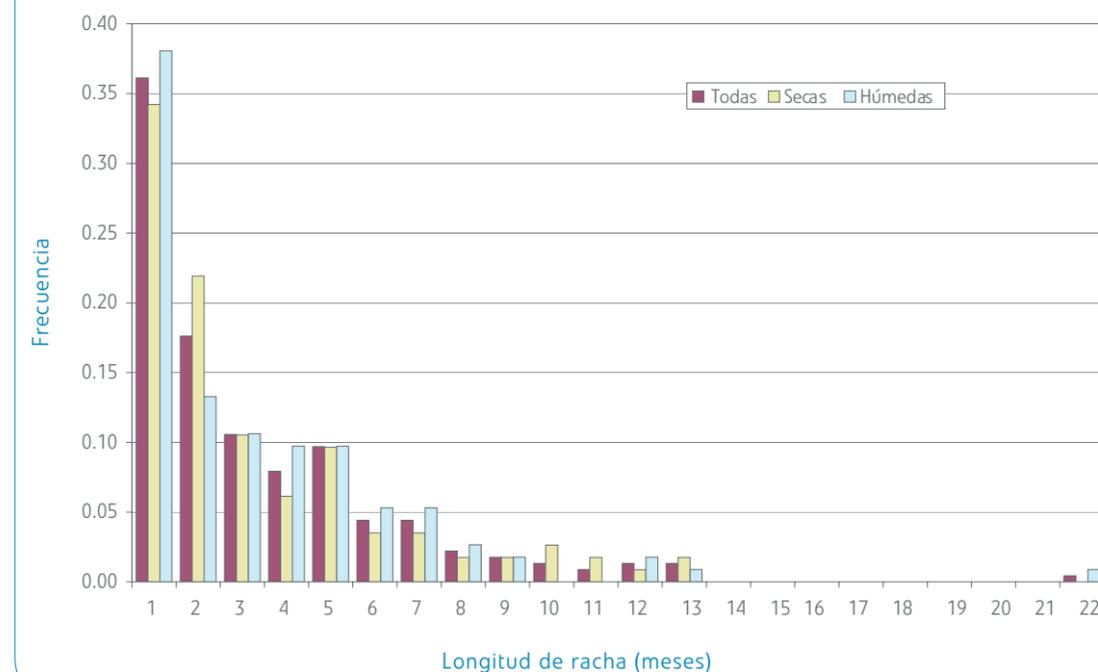
La correlación de la aportación de un mes con la del anterior es positiva y significativa (r en el entorno de 0,6), salvo para los meses de agosto y octubre.



Se cuentan 227 rachas sobre las medianas, con una longitud media de 3,40 meses. La distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes se muestra relativamente equilibrada. En el gráfico 7.18 se muestra la distribución de las longitudes de racha.

El número de meses "secos" y "húmedos" es de 384 y 387 respectivamente. En la hipótesis nula, aleatoriedad de la serie, el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 386,5 y 13,9. El resultado obtenido, 227 rachas, es incompatible con dicha hipótesis.

Gráfico 7.18. Frecuencia observada de las longitudes de racha



7.6.2. Nivel trimestral

Se detecta una tendencia a largo plazo decreciente significativa en primavera (AMJ) y verano (JAS). La serie de aportaciones primaverales puede verse en el gráfico 7.19. Nótese que sólo en cinco ocasiones la aportación de primavera queda por debajo de 50 hectómetros cúbicos, y que las cinco corresponden a la segunda mitad de la serie. En cambio, de las diez veces en que se superan los 150 hectómetros cúbicos, siete ocurren en la primera mitad de la serie.

La correlación con la aportación del trimestre anterior es significativa al 5 por ciento en primavera (AMJ) y verano (JAS). Se comprueba que la correlación mejora si se refiere al bimestre o al mes anterior. La correlación con el bimestre y mes anterior también es significativa para invierno.

La formación de rachas sobre las medianas detecta claramente persistencia en las aportaciones en el nivel trimestral. Se obtienen un total de 97 rachas mientras que, la hipótesis de aleatoriedad establece una media de 129,5 rachas con una desviación típica de 8. La longitud media de las rachas es de 2,65 trimestres.

En la tabla 7.13 se observa que predominan de manera significativa las rachas que acaban en el trimestre de verano mientras que, son minoría las que concluyen en primavera. De los 64 veranos de la serie, en 31 se produce cambio y en el resto, 33, persisten las condiciones hidrológicas. En primavera, la relación pasa a ser de 18 estaciones en las que se produce el cambio frente a 46 primaveras "persistentes".

Gráfico 7.19. Lozoya AR Atazar. Aportaciones de abril-junio

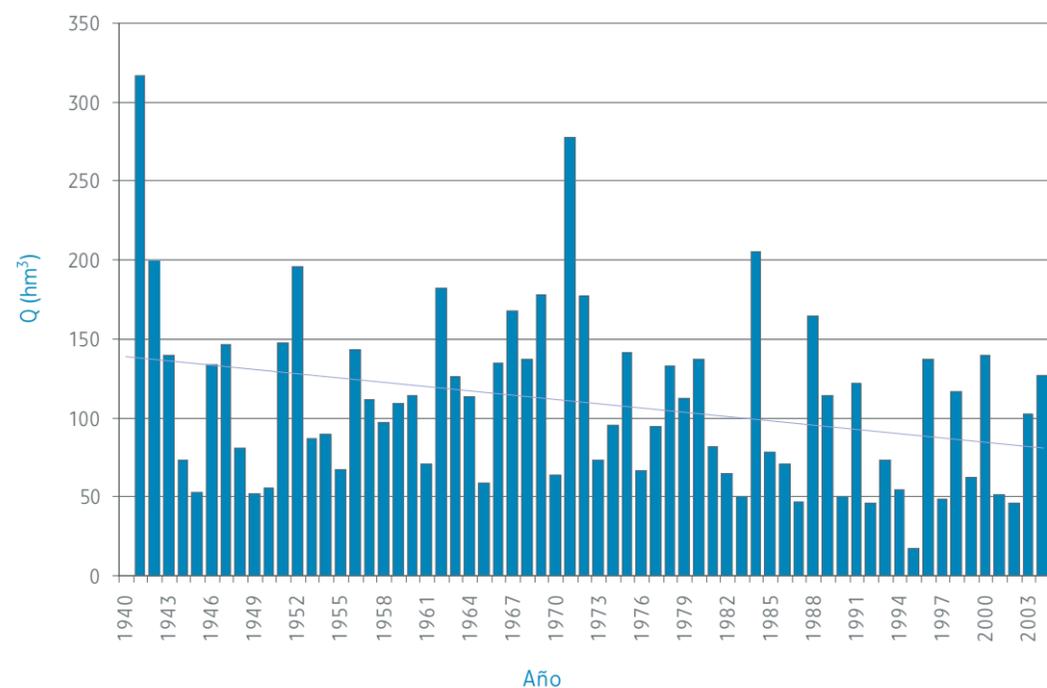


Tabla 7.13. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	24	12	12
Invierno (EFM)	24	12	12
Primavera (AMJ)	18	9	9
Verano (JAS)	31	16	15

El resultado obtenido en el nivel trimestral es contundente, pero podría estar influido por la tendencia a largo plazo observada en las aportaciones de primavera y verano. Para comprobar esta posibilidad, se ha realizado el análisis de rachas sobre las líneas de tendencia trimestrales y, para tener una referencia comparable, también se ha analizado la formación de rachas respecto de las medias trimestrales. El resultado se resume en la tabla 7.14. Se comprueba que hay un efecto claro de persistencia, independiente del efecto de la tendencia a largo plazo.

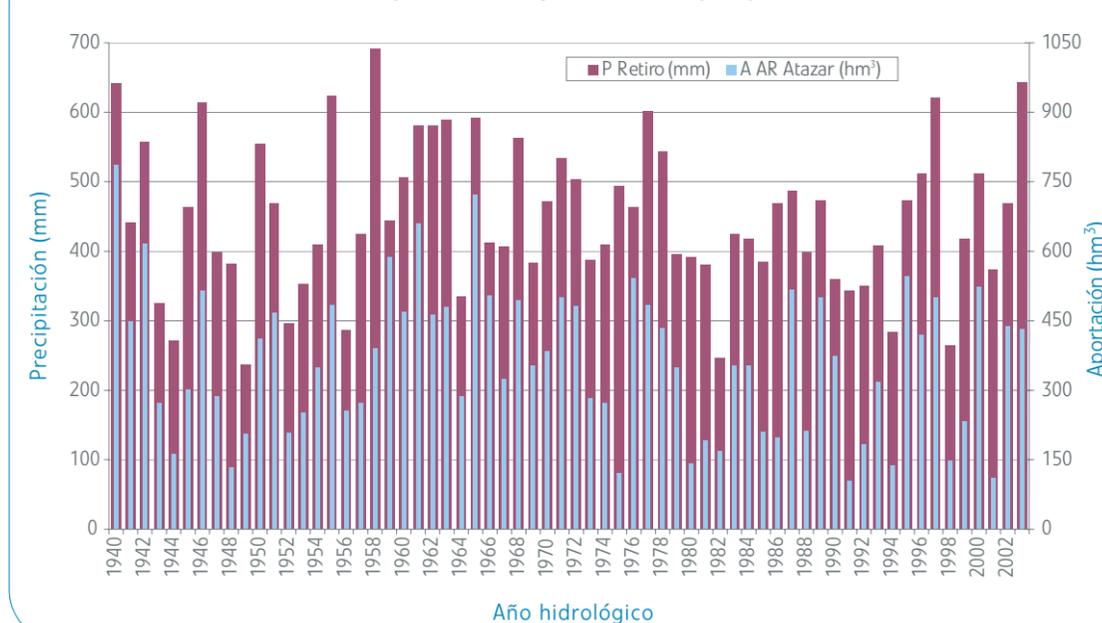
Tabla 7.14. Comparación del número de rachas sobre las medias y sobre las líneas de tendencia

Rachas respecto de	Medias	Tendencias
Trimestres secos	161	167
Trimestres húmedos	96	90
Número de rachas en la hipótesis nula		
Media	121,3	118,0
Desviación típica	7,5	7,3
Rachas observadas		
Número	93	93
Valor de significación	0,00016	0,0006

7.6.3. Nivel anual

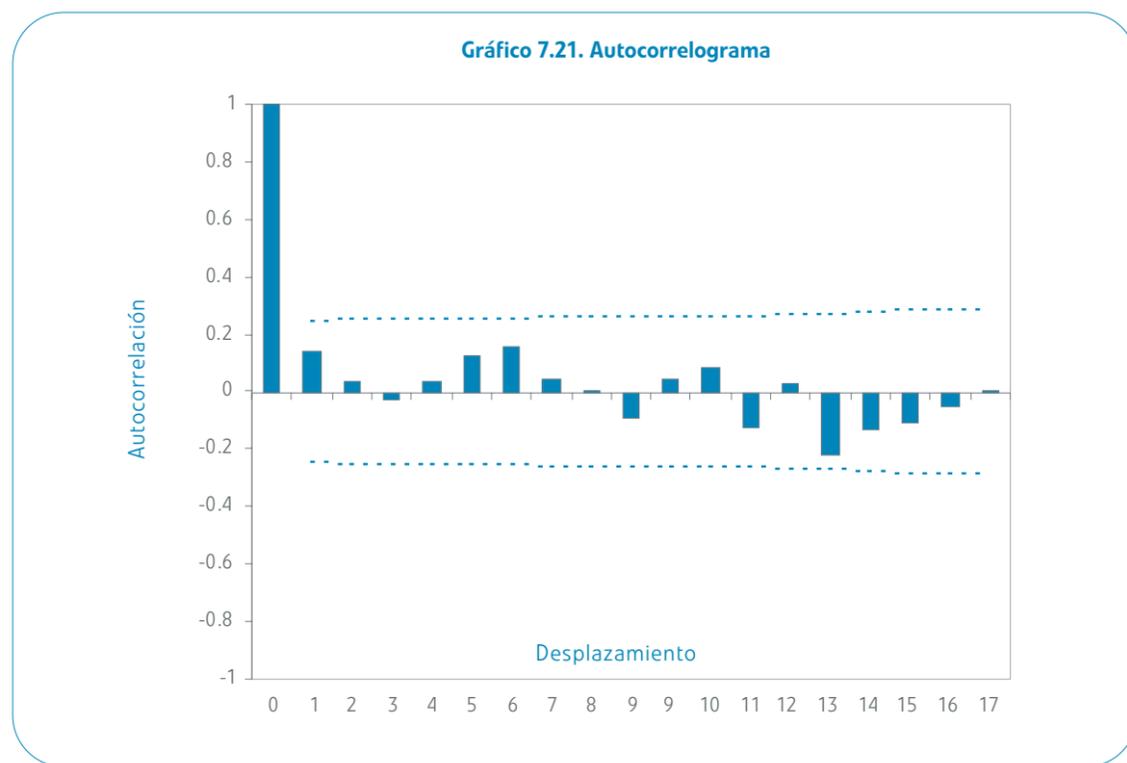
La tendencia decreciente que se identificó en el Lozoya aguas arriba de El Villar, y que procede de la tendencia decreciente de las aportaciones de primavera, se aprecia también en este caso (ver gráfico 7.20); que 6 de los 7 años, con aportación por debajo de 150 hectómetros cúbicos son de la segunda mitad de la serie. Sin embargo, en este caso, el valor del coeficiente de correlación con el tiempo no puede ser considerado estadísticamente significativo ($p=0,124$).

Gráfico 7.20. Aportación Lozoya AR Atazar vs precipitación Retiro



Hay un total de 29 rachas de duraciones comprendidas entre 1 y 6 años. La longitud media es de 2,21 años. El número esperado de rachas aleatorias es de 33, con una desviación típica de 4,0. Al número de rachas observado, 29, le corresponde un valor de significación de 0,313, 2 colas, suficientemente grande como para descartar un comportamiento persistente de las aportaciones anuales.

El autocorrelograma de las aportaciones anuales del conjunto de embalses del Lozoya se presenta en el gráfico 7.21. No presenta ninguna característica relevante.



La tabla de contingencia a partir de la clasificación de años en terciles (tabla 7.15) no resulta estadísticamente significativa según el test χ^2 (valor de p de 0,163).

Tabla 7.15. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	5	10	5	20
Actual - N**	10	4	7	21
Actual - S***	6	6	10	22
TOTAL	21	20	22	63

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

7.7. Pedrezuela

La serie analizada comprende el periodo desde mayo de 1969 hasta diciembre de 2004. Los datos anteriores a mayo de 1969 se han descartado por problemas de validación.

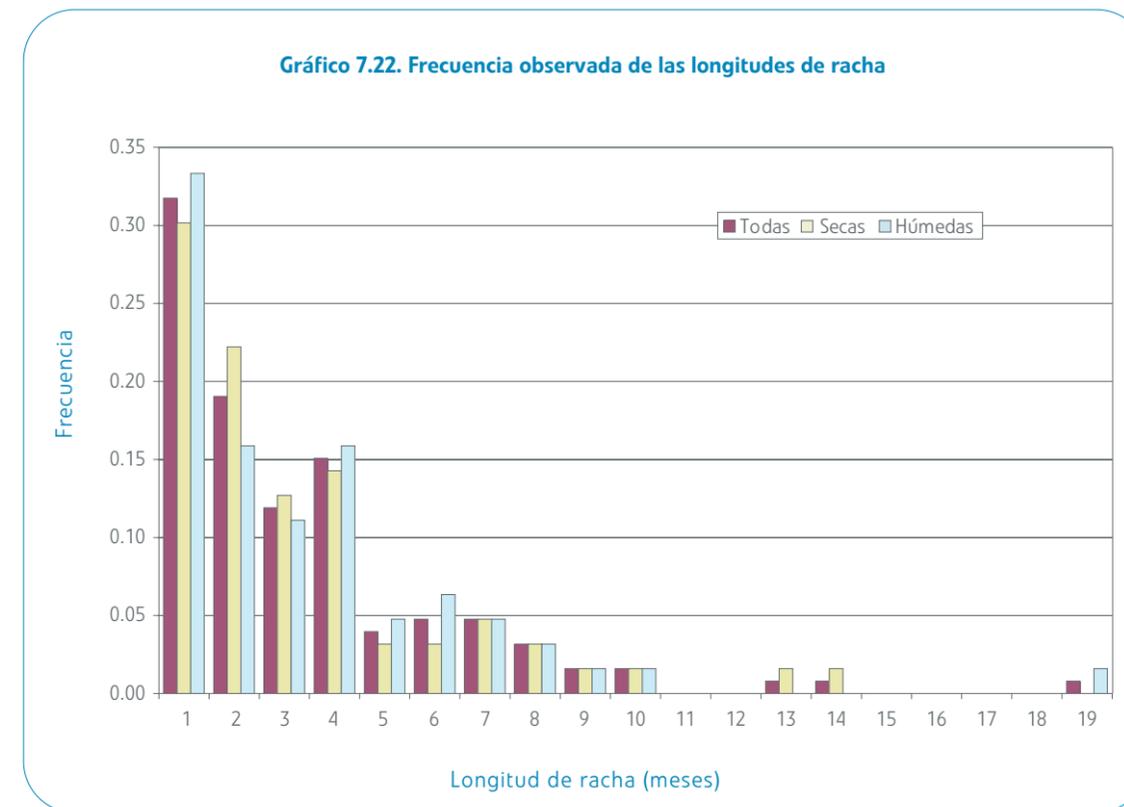
De antemano se advierte que, al ser una serie mucho más corta, su análisis tiene menos posibilidades de proporcionar resultados relevantes.

7.7.1. Nivel mensual

Las aportaciones de los meses junio, agosto y septiembre presentan una tendencia estadísticamente significativa de signo negativo. Desde el punto de vista operacional, su importancia es escasa. La correlación con las aportaciones del mes anterior es positiva y significativa para todos los meses salvo abril y agosto.

La serie de aportaciones mensuales está formada por 428 datos. Tomando como criterio de clasificación el valor de la mediana de cada mes, se cuentan 126 rachas con una longitud media de más de 3 meses. La distribución de rachas secas y húmedas se presenta en el gráfico 7.22.

El número de meses "secos" y "húmedos" es de 212 y 216 respectivamente. En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 215,0 y 10,3 respectivamente, por lo que, con 126 rachas observadas, se descarta dicha hipótesis.



7.7.2. Nivel trimestral

Se cuentan 56 rachas sobre la mediana de cada trimestre, mientras que la hipótesis de aleatoriedad establece una media de 72,0 rachas con una desviación típica de 5,9. En esta distribución, a 56 rachas le corresponde un valor de significación de 0,007, 2 colas, que permite rechazar la hipótesis nula. Es decir, las rachas trimestrales no son aleatorias.

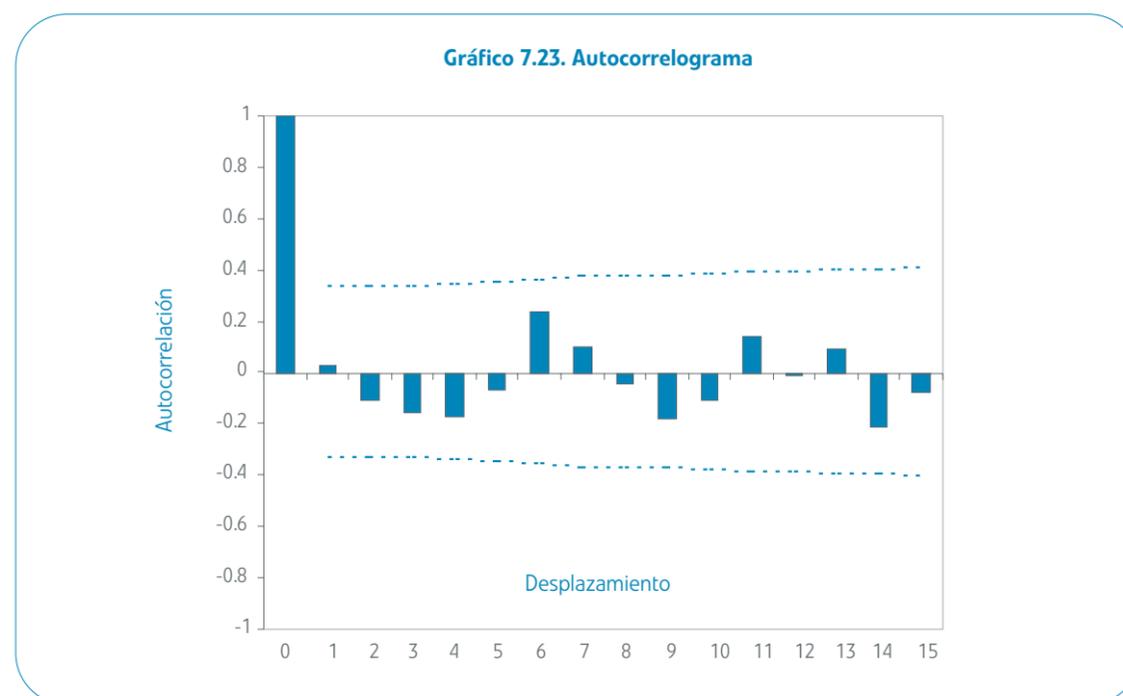
La longitud media de racha es superior a los 2,5 trimestres y, nuevamente se observa, que es mayor el porcentaje de rachas que acaban en la estación de verano (ver tabla 7.16).

Tabla 7.16. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	11	6	5
Invierno (EFM)	12	6	6
Primavera (AMJ)	15	7	8
Verano (JAS)	18	9	9

7.7.3. Nivel anual

Los resultados son semejantes a los obtenidos en los casos anteriores. El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de Pedrezuela se presenta en el gráfico 7.23. Ninguno de los coeficientes de autocorrelación supera el nivel de significación del 5 por ciento.



No se encuentran relaciones entre las aportaciones de un año y las del siguiente. El test de rachas concluye que la hipótesis de aleatoriedad es válida y la tabla de contingencia entre años consecutivos, divididos estos en terciles según su aportación, da como resultado que no existe dependencia entre ellos.

7.8. Navacerrada

Se ha analizado la serie de datos a partir de octubre de 1970, periodo de tiempo en el que las aportaciones mensuales se han obtenido por agregación de datos diarios. Los datos anteriores presentan problemas de validación.

7.8.1. Nivel mensual

A pesar de lo limitado de la serie se mantienen tendencias estadísticamente significativas en 5 meses: abril, mayo, junio, agosto y septiembre. Esta tendencia probablemente, no es más que la incidencia de los años secos de los 90 en una serie relativamente corta.

La correlación de aportaciones de un mes con las del anterior es positiva y significativa para todos los meses salvo octubre.

La clasificación respecto de las medianas mensuales proporciona 203 meses secos y 208 meses húmedos. Se forman 120 rachas según esta clasificación. En la hipótesis nula, aleatoriedad de la serie, el número de rachas se distribuiría según una normal de media y desviación típica 206,5 y 10,1 respectivamente. No es necesario hacer ningún cálculo más para establecer que el número de rachas observado, 120, es completamente inverosímil en la hipótesis de aleatoriedad de la serie.

La longitud media de las rachas se aproxima a los cuatro meses. Sorprende la existencia de una racha excepcional de 41 meses "húmedos", que comienza en junio de 1977 y se prolonga hasta septiembre de 1980. La siguiente racha en longitud es de 15 meses. Es posible que esta racha excepcional sea debida a alguna anomalía en los datos, pero aun en este supuesto, la formación de rachas en el resto de la serie no puede considerarse aleatoria: si sustituimos esa racha por 41 meses aleatorios, tendríamos un número total de rachas en el entorno de 160.

7.8.2. Nivel trimestral

Hay una clara tendencia descendente en los trimestres de primavera y verano. Esta es el reflejo de la detectada en el nivel mensual para los meses correspondientes y está en consonancia con las identificadas en otras series de aportaciones como las del Lozoya, dada la correlación espacial esperable entre series de aportaciones próximas. En el gráfico 7.24 se presenta la serie de aportaciones de primavera.

A diferencia de lo observado en la mayoría de los casos analizados, la correlación de las aportaciones de un trimestre con las de un periodo anterior es, en general, mala, salvo para el trimestre de verano.

En el análisis de rachas sobre las medianas, sin embargo, el número de rachas obtenido, 51, es significativamente menor que el correspondiente a la hipótesis nula (69,5 con desviación típica de 5,8). El valor de significación correspondiente es de 0,0015, 2 colas, que permite rechazar la hipótesis nula. Es decir, las rachas trimestrales no son aleatorias.

A la vista de los datos de la tabla 7.17, se comprueba que el trimestre más persistente es la primavera, lo cual está de acuerdo con los resultados del análisis de correlación.

Gráfico 7.24. Navacerrada. Aportaciones trimestrales abril-junio

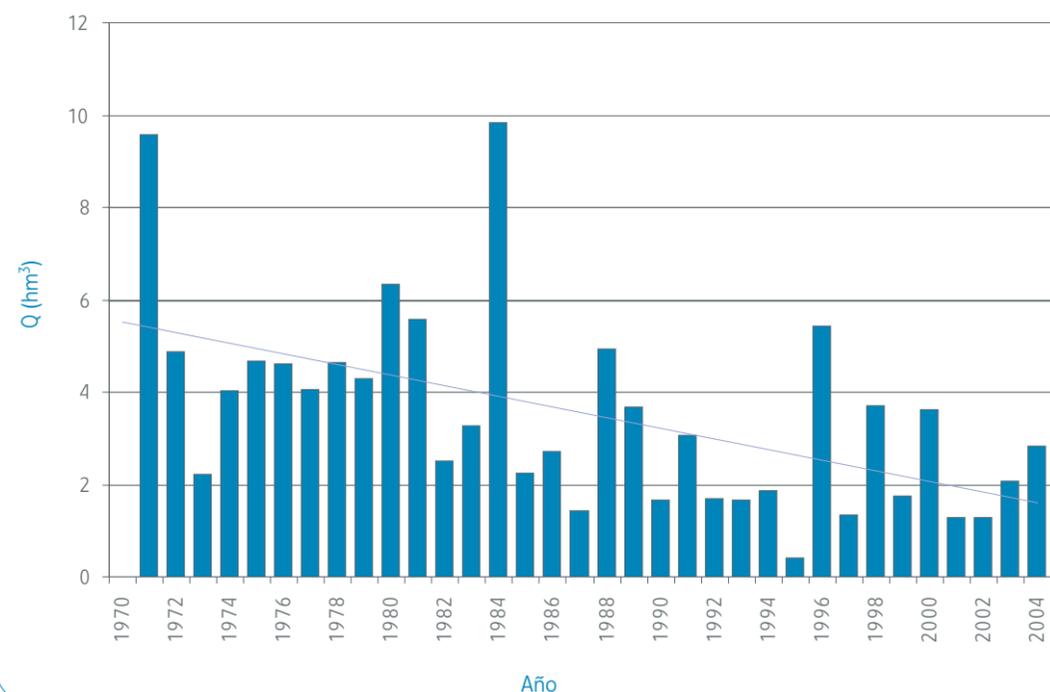


Tabla 7.17. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	14	7	7
Invierno (EFM)	12	6	6
Primavera (AMJ)	8	4	4
Verano (JAS)	17	9	8

Como ya se ha dicho, los trimestres de primavera y verano presentan una fuerte tendencia decreciente. De ahí que la distribución de trimestres secos y húmedos respecto de la mediana a lo largo de la serie es bastante desequilibrada: la 1ª mitad de la serie, hasta primavera de 1988, tiene 45 trimestres húmedos y 23 secos. La segunda mitad, en cambio, tiene 24 trimestres húmedos y 45 secos. Así pues, parece necesario analizar el efecto que puede tener la tendencia en la formación de rachas en el nivel trimestral.

El análisis comparativo del número de rachas sobre las medias y sobre las líneas de tendencia produce los resultados que se muestran en la tabla 7.18.

Tabla 7.18. Comparación del número de rachas sobre las medias y sobre las líneas de tendencia

Rachas respecto de	Medias	Tendencias
Trimestres secos	78	85
Trimestres húmedos	59	52
Número de rachas en la hipótesis nula		
Media	68,2	65,5
Desviación típica	5,7	5,5
Rachas observadas		
Número	45	55
Valor de significación	0,0001	0,055

Se comprueba que el peso de la tendencia en la formación de rachas es importante (10 rachas de diferencia). Con todo, el número de rachas sobre la línea de tendencia sigue siendo considerablemente menor que el valor esperado en la hipótesis nula y tiene un valor de significación que, aunque queda por encima del umbral del 5 por ciento, no permite aceptar la hipótesis nula sin reservas.

Se puede concluir, por tanto, que existe cierta persistencia en el nivel trimestral. Esta es, probablemente, más débil que en otros casos, aunque también la menor longitud de la serie no permite identificarla con tanta claridad.

7.8.3. Nivel anual

La serie validada tiene una longitud de 34 años, probablemente demasiado corta para detectar comportamientos persistentes. Con todo, se realiza el mismo análisis que en el resto de series.

La serie de aportaciones anuales al embalse de Navacerrada desde el año hidrológico 1970-71 presenta tendencia decreciente significativa, la cual es el reflejo de la observada en el nivel trimestral y se puede explicar por la acumulación de años hidrológicos muy secos en la parte final de la serie: 1991, 1992, 1994, 1998, 1999 y 2001 (ver gráfico 7.25). Conviene señalar que estos años no son tan secos en relación con las precipitaciones registradas en Retiro.

La aportación anual mediana es de 10,54 hectómetros cúbicos. Respecto de esta mediana hay un total de 18 rachas, de longitudes entre 1 y 5 años, con una distribución de longitudes más o menos equilibrada entre las rachas "secas" y las "húmedas". La longitud media de la racha es de prácticamente 2 años.

El número esperado de rachas aleatorias coincide con el obtenido, 18, por lo que es completamente compatible con la hipótesis nula. Es decir, las rachas observadas se pueden explicar perfectamente como resultado de la aleatoriedad. El análisis de rachas, por tanto, no detecta ningún tipo de dependencia entre aportaciones de un año para otro.

El autocorrelograma que se incluye como gráfico 7.26 presenta un comportamiento muy similar al de las otras series estudiadas: no existen autocorrelaciones significativas de ningún orden (nivel de significación: 0,05).

Gráfico 7.25. Aportación Navacerrada vs precipitación Retiro

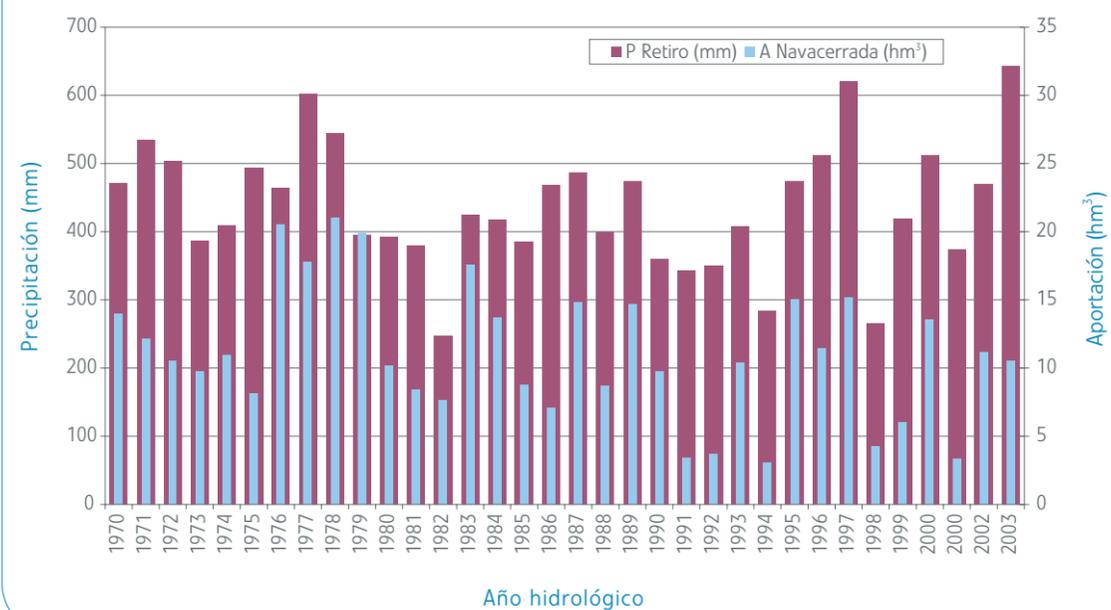
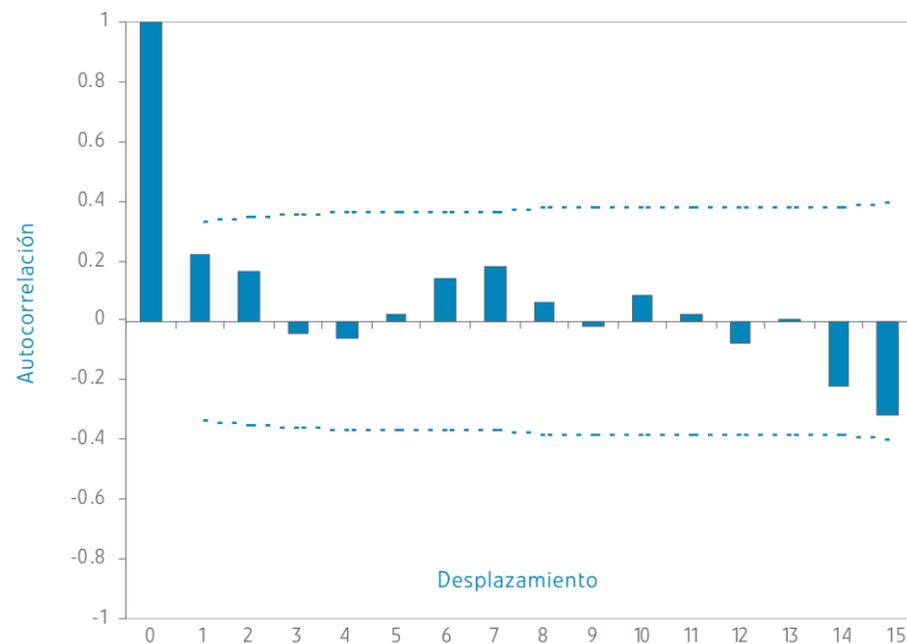


Gráfico 7.26. Autocorrelograma



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

La tabla de contingencia se presenta como tabla 7.19. El test de χ^2 sobre esta tabla de contingencia proporciona un valor p de 0,523, es decir, nada significativo.

Tabla 7.19. Tabla de contingencia

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	4	1	5	10
Actual - N**	4	4	3	11
Actual - S***	3	5	4	12
TOTAL	11	10	12	33

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

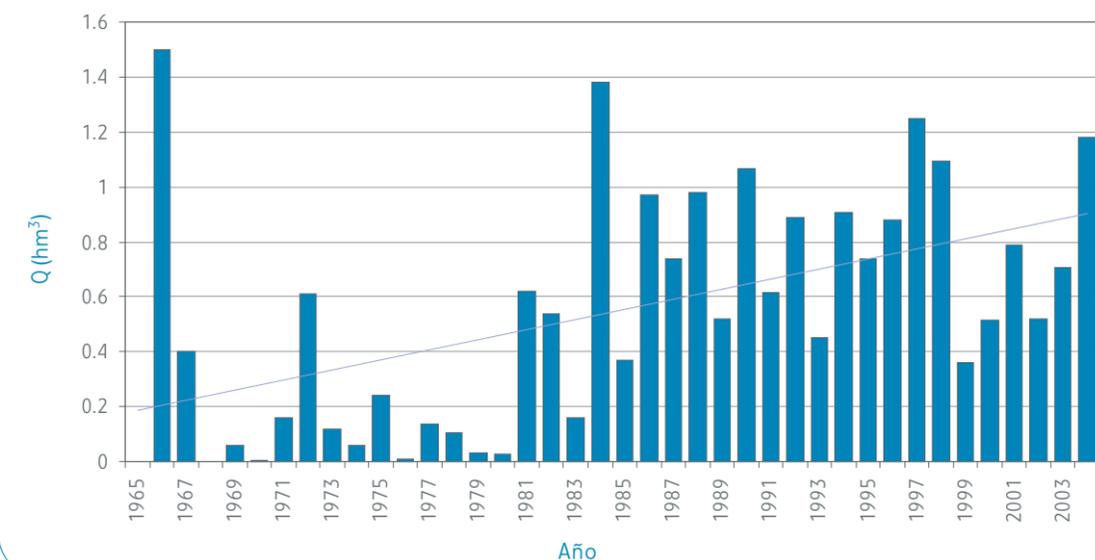
7.9. Manzanares

Se analiza la serie de aportaciones a Manzanares desde el año hidrológico 1965. Los datos de los años comprendidos entre 1940 y 1965 presentan problemas de validación y se ha preferido descartarlos aun sacrificando longitud de serie.

7.9.1. Nivel mensual

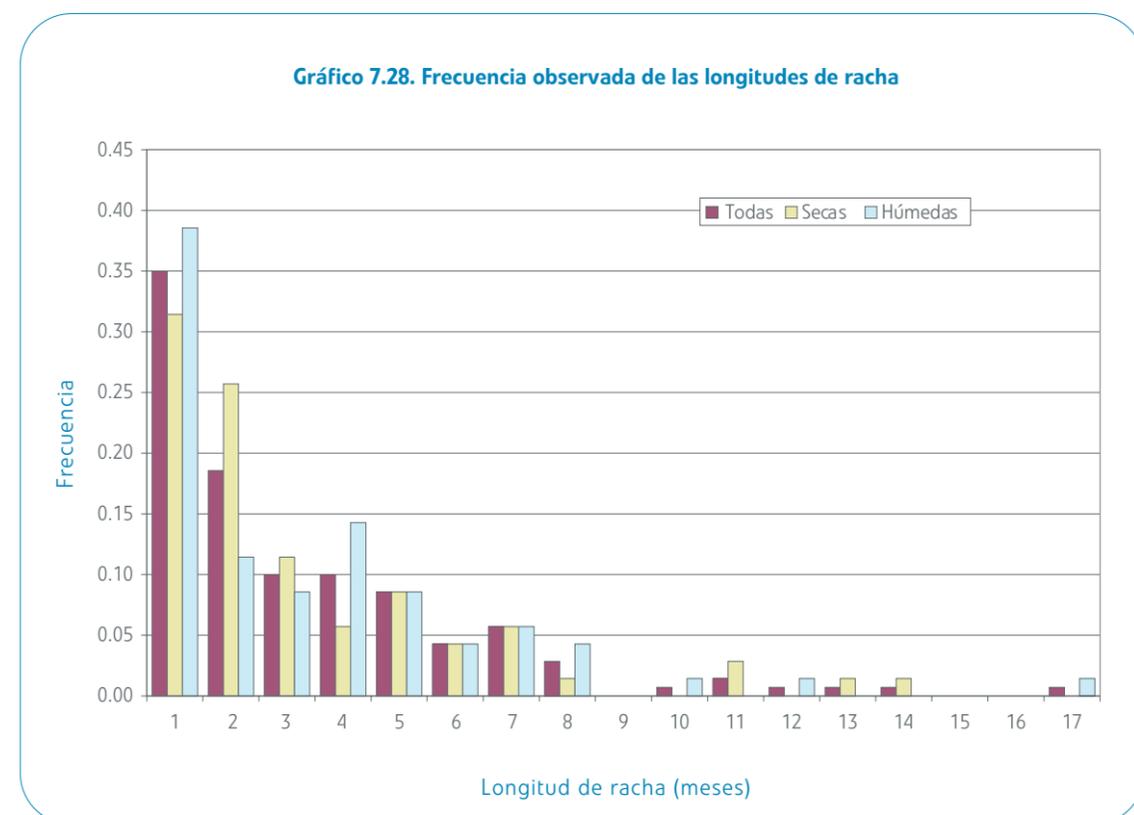
Sólo el mes de agosto presenta tendencia significativa, de signo positivo. En el gráfico 7.27, se pone de manifiesto que la tendencia detectada es el resultado del salto en el nivel de los datos de aportación que se produce entre 1981 y 1984, que debe considerarse anómalo.

Gráfico 7.27. Manzanares el Real. Aportaciones mensuales de agosto



Todos los meses, salvo abril y septiembre, correlacionan sus aportaciones con las del mes anterior.

Se cuentan 140 rachas sobre las medianas mensuales, con una longitud media de 3,36 meses. La distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes se muestra en el gráfico 7.28.



El número de meses "secos" y "húmedos" es de 231 y 240 respectivamente. En la hipótesis nula, (aleatoriedad de la serie), el número de rachas se distribuiría según una normal de media 236,4 y desviación típica 10,8 respectivamente en la cual, el número de rachas observado, resulta completamente inverosímil.

7.9.2. Nivel trimestral

No hay tendencia significativa en ninguno de los trimestres.

La correlación de la aportación trimestral con la del trimestre anterior es débil y no es significativa en ninguno de los trimestres. Sí se observan correlaciones significativas con el bimestre o mes anterior, aunque también débiles.

El número de rachas sobre las medianas es de 56, significativamente menor que la media correspondiente a la distribución aleatoria (79,5, con desviación típica de 6,2), lo que excluye la posibilidad de que las aportaciones no estén condicionadas entre sí. Los trimestres más persistentes son otoño e invierno.

Tabla 7.20. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

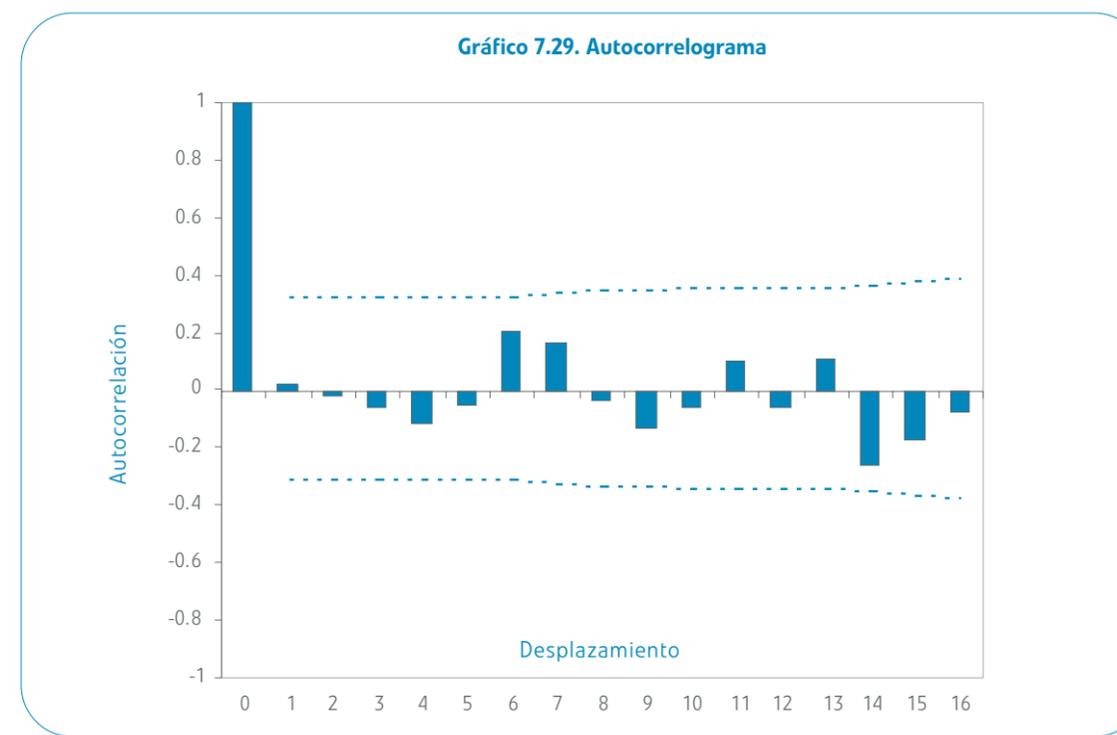
Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	11	6	5
Invierno (EFM)	12	6	6
Primavera (AMJ)	18	9	9
Verano (JAS)	15	7	8

7.9.3. Nivel anual

La serie de aportaciones desde 1965 no presenta tendencia estadísticamente significativa.

Se obtienen 17 rachas sobre la mediana, mientras que la distribución aleatoria de rachas tiene una media de 20,5 y una desviación típica de 3,1. El nivel de significación que le corresponde a 17 rachas en esta distribución es $p=0,257$. El análisis de rachas no detecta, por tanto, persistencia en las aportaciones anuales.

El autocorrelograma, (gráfico 7.29), no muestra ninguna autocorrelación significativa. La tabla de contingencia, que se presenta como tabla 7.21, no muestra ningún desequilibrio aparente. El test de χ^2 sobre esta tabla de contingencia proporciona un valor p de 0,802. La tabla puede explicarse perfectamente por pura aleatoriedad.



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

Tabla 7.21. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	4	5	3	12
Actual - N**	4	5	4	13
Actual - S***	4	3	6	13
TOTAL	12	13	13	38

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

7.10. Navalmedio

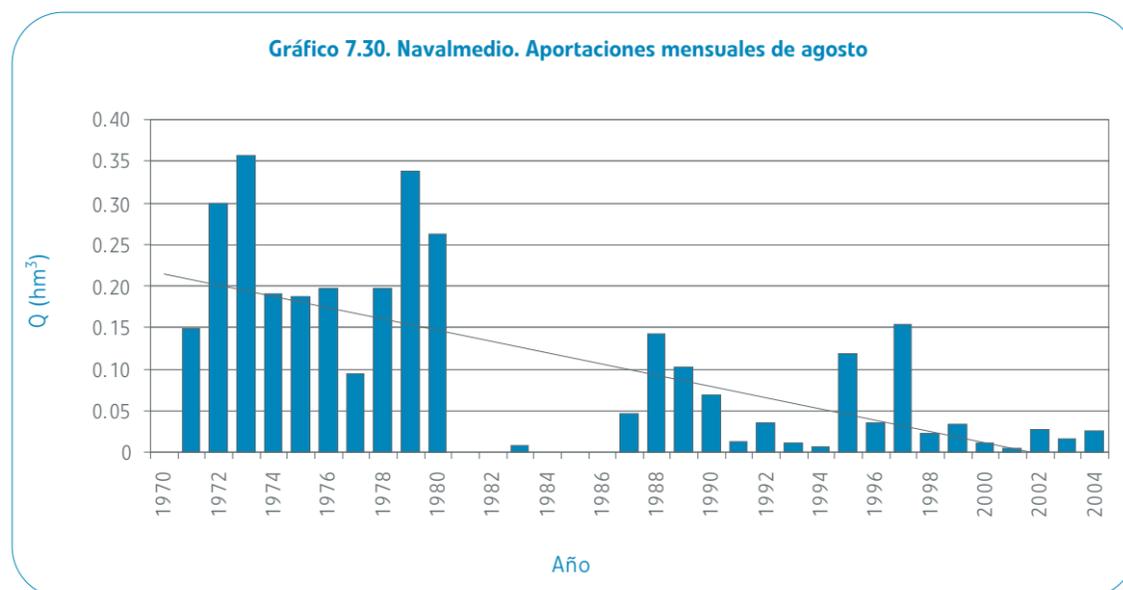
Las aportaciones al embalse de Navalmedio tienen una relevancia limitada en relación con el conjunto del sistema de Canal de Isabel II. Con todo, se han analizado al mismo nivel que el resto de series.

La serie analizada comienza en octubre de 1970, fecha a partir de la cual existen balances diarios de explotación del embalse. Los datos anteriores se descartan por falta de homogeneidad con el resto de la serie.

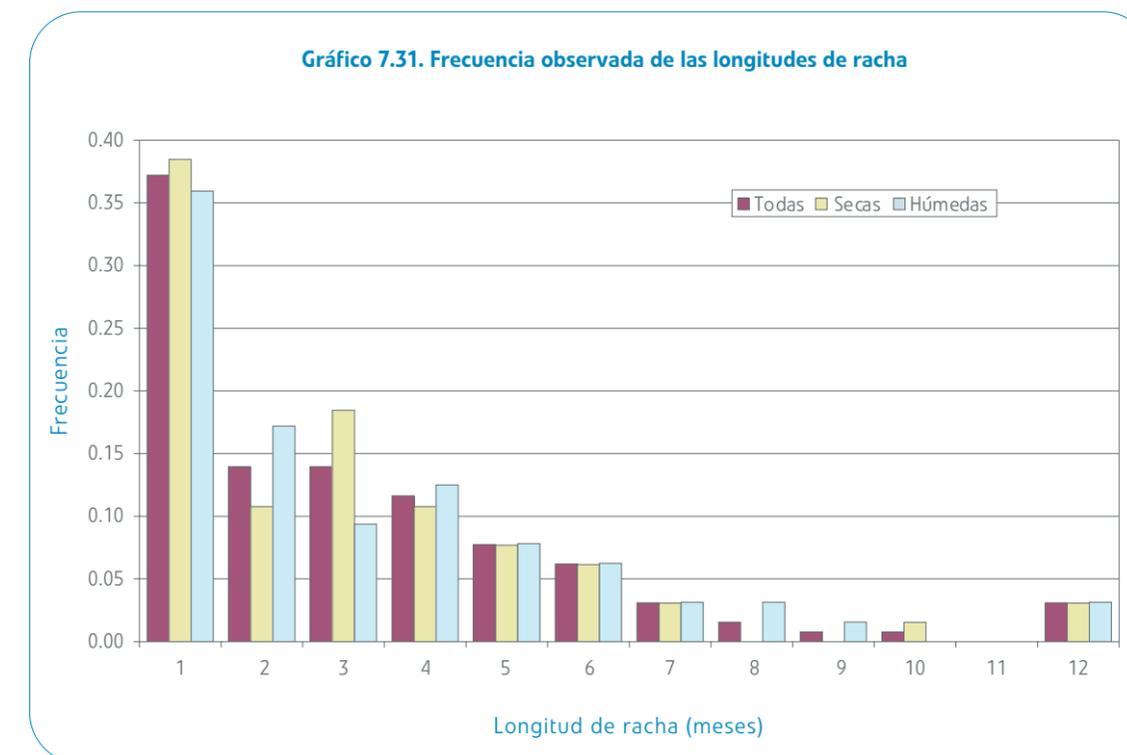
7.10.1. Nivel mensual

Julio, agosto y septiembre presentan tendencias significativas de signo negativo. La tendencia detectada es más bien el resultado del salto de nivel de los datos de aportación que se produce entre 1981 y 1987 (ver gráfico 7.30). En cambio, diciembre presenta tendencia creciente significativa.

Las aportaciones de un mes correlacionan positiva y significativamente con las del mes anterior salvo en el caso de octubre. Este es el comportamiento habitual observado en otras series.



Se cuentan 129 rachas sobre las medianas con una longitud media de 3,16 meses. La hipótesis de aleatoriedad de la formación de rachas se puede descartar claramente. En esa hipótesis son esperables 204,4 rachas con desviación típica de 10,1. La distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes se muestra en el gráfico 7.31.



7.10.2. Nivel trimestral

Se observa tendencia negativa significativa para primavera (AMI) y verano (JAS).

Análogamente, la tendencia positiva que se observa en el mes de diciembre se traduce en una tendencia positiva y significativa para el trimestre invernal ($r=0,323$; $p=0,009$).

Las correlaciones con la aportación del trimestre anterior son significativas (al 5 por ciento) en para todos los trimestres excepto el invierno, situación esperable ya que a nivel mensual existen buenas correlaciones entre aportaciones de meses consecutivos a excepción de octubre.

El número de rachas sobre las medianas trimestrales es inferior al esperable en una situación de aleatoriedad: 57 contra un valor esperado de 68,5 y desviación típica de 5,8 en la hipótesis. El valor de significación correspondiente es de 0,047, 2 colas, que permitiría rechazar la hipótesis nula con un umbral de significación del 5 por ciento. Es decir, puede aceptarse que las rachas trimestrales no son aleatorias. Con todo, la serie es probablemente muy corta para extraer conclusiones firmes.

El trimestre menos persistente es el verano, como es habitual en el conjunto de series de aportación analizadas.

Tabla 7.22. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	12	6	6
Invierno (EFM)	14	7	7
Primavera (AMJ)	12	6	6
Verano (JAS)	19	10	9

7.10.3. Nivel anual

Los datos de aportación anual al embalse de Navalmedio desde el año hidrológico 1970 no presenta autocorrelación ni tendencia significativas. La serie se correlaciona bien con las de precipitación de Retiro y de Navacerrada, así como con otras series de aportaciones (como El Vado o Manzanares, el coeficiente de correlación con El Vado es de $r=0,853$).

Respecto del valor de la mediana, 7,05 hectómetros cúbicos, hay un total de 16 rachas de duraciones comprendidas entre 1 y 4 años y la distribución de longitudes entre las rachas "secas" y las "húmedas" es equilibrada. La longitud media es de 2,06 años.

El número esperado de rachas aleatorias es de 17,5, con una desviación típica de 2,8. El número de rachas observado, 16, es claramente compatible con la hipótesis nula. Es decir, las rachas observadas se pueden explicar como resultado de la aleatoriedad.

El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de Navalmedio se presenta en el gráfico 7.32. En ningún caso se superan los niveles de significación de los coeficientes de autocorrelación (nivel de significación: 0,05).

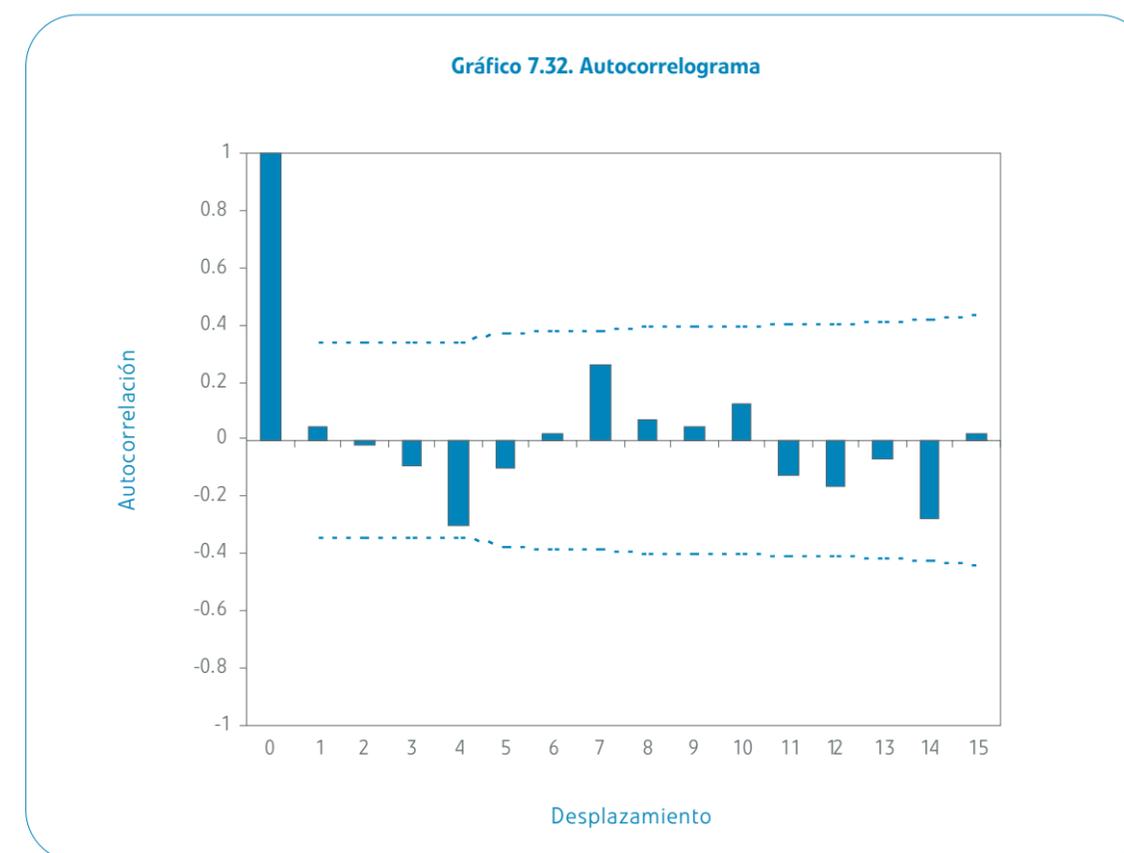
La tabla de contingencia por terciles se presenta como tabla 7.23. y es claramente equilibrada: no se detecta ninguna desviación significativa respecto del comportamiento aleatorio.

Tabla 7.23. Tabla de contingencia anual

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	3	4	4	11
Actual - N**	4	2	4	10
Actual - S***	3	5	3	11
TOTAL	10	11	11	33

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

Gráfico 7.32. Autocorrelograma



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

7.11. La Jarosa

7.11.1. Nivel mensual

Las series de junio, julio, agosto y noviembre presentan una tendencia creciente clara y estadísticamente significativa. La serie del mes de noviembre se presenta en el gráfico 7.33. Es llamativo que, a partir de 1972, se cuentan 9 noviembrees con aportación comprendida entre 1 y 7 hectómetros cúbicos mientras que, en ninguno de los 31 años anteriores, se alcanza 1 hectómetro cúbico de aportación en noviembre (y de hecho, es raro que se supere 0,5 hectómetros cúbicos).

En las series de precipitaciones disponibles, Retiro y Navacerrada Puerto, no se aprecia ninguna tendencia equivalente. Tampoco se conocen otros cambios climáticos o cambios hidrológicos en la cuenca que puedan explicar este patrón de tendencia. Pero tampoco se dispone de argumentos que permitan atribuirlo a anomalías en los datos. Por ejemplo, la correlación entre la serie de aportaciones de 1 mes y la del anterior sigue un comportamiento normal. Es positiva y estadísticamente significativa en 9 de los 12 casos. Las excepciones son marzo, abril y agosto (ver tabla 7.24).

Gráfico 7.33. La Jarosa. Aportaciones mensuales de noviembre

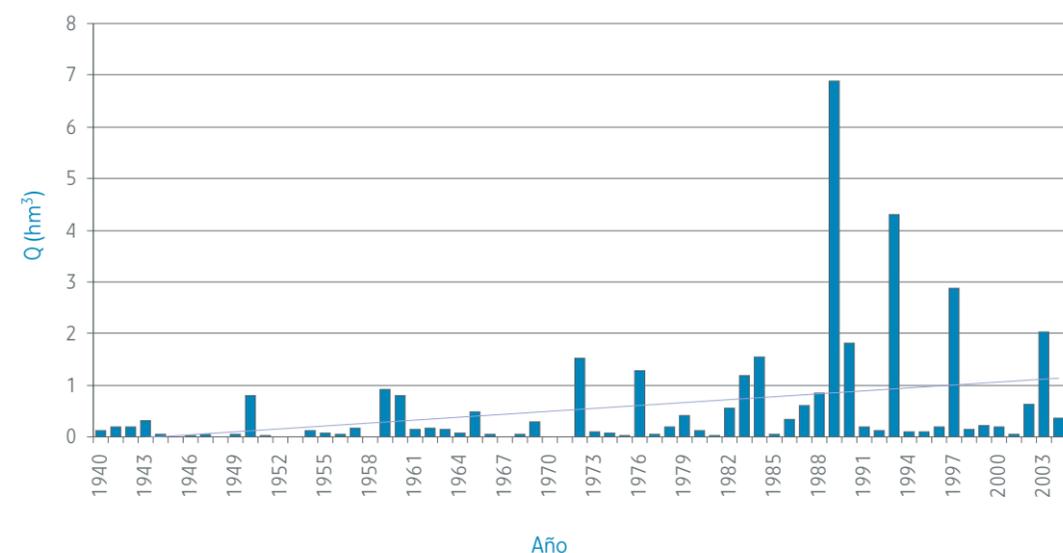
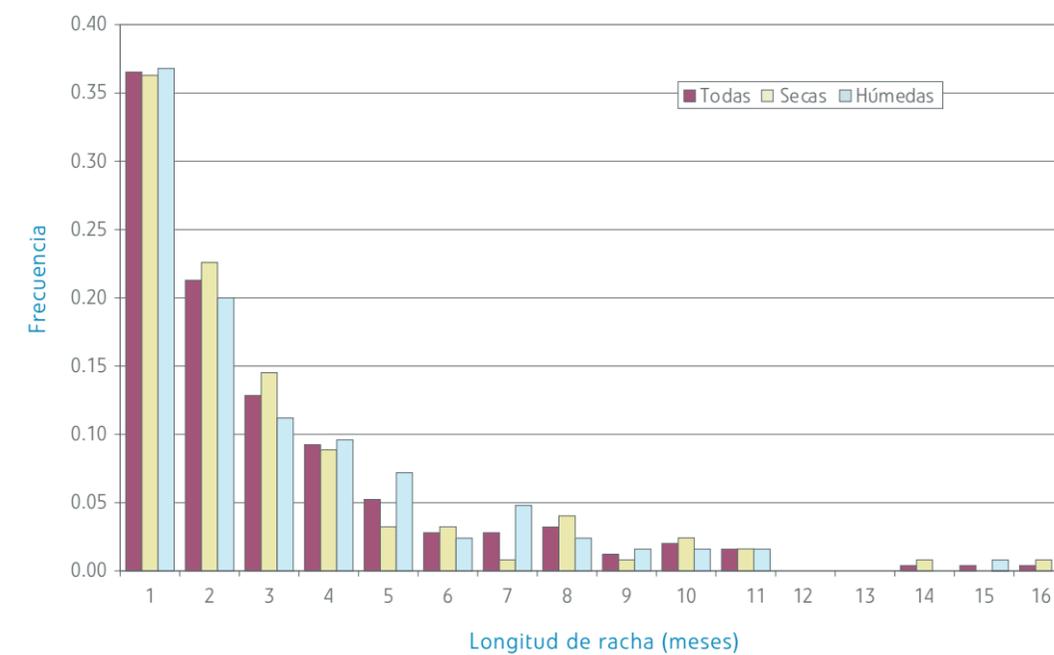


Tabla 7.24. Correlación de la aportación de un mes con la del anterior

Mes	r	n	t	p
Enero	0,493	64	4,463	0,000
Febrero	0,567	64	5,422	0,000
Marzo	0,169	64	1,353	0,181
Abril	0,126	64	1,003	0,320
Mayo	0,253	64	2,055	0,044
Junio	0,546	64	5,130	0,000
Julio	0,373	64	3,167	0,002
Agosto	0,221	63	1,773	0,081
Septiembre	0,498	63	4,483	0,000
Octubre	0,265	64	2,165	0,034
Noviembre	0,329	65	2,765	0,007
Diciembre	0,464	65	4,158	0,000

El análisis de rachas sobre la mediana de cada mes permite descartar claramente la hipótesis de aleatoriedad de la serie: se obtienen un total de 249 rachas frente a un valor esperado en la hipótesis de aleatoriedad de 386 con una desviación típica de 14. La duración media de las rachas se mantiene por encima de los tres meses (ver gráfico 7.34).

Gráfico 7.34. Frecuencia observada de las longitudes de racha



7.11.2. Nivel trimestral

Para los trimestres de verano (JAS) y otoño (OND) se detecta una tendencia positiva significativa que se corresponde con la observada para los meses de junio, julio, agosto y noviembre.

Las correlaciones con el trimestre anterior son positivas pero débiles y sólo son significativas, al 5 por ciento, para invierno y verano. La correlación de la aportación trimestral con la del bimestre anterior o la del mes anterior mejora, en general, la correlación con el trimestre anterior. Sin embargo, no se obtienen valores significativos para primavera y otoño.

El número de rachas sobre las medianas trimestrales es significativamente menor que el esperado para rachas aleatorias, lo que permite excluir la posibilidad de que las aportaciones no estén condicionadas entre sí. Se obtienen un total de 105 rachas mientras que la hipótesis de aleatoriedad establece una media de 129,5 rachas con una desviación típica de 8,0. El nivel de significación correspondiente es de 0,002. La contabilización de rachas de trimestres "secos" o "húmedos" proporciona el siguiente resultado que se muestra en la tabla 7.25. La longitud media de las rachas es de 2,4 trimestres.

La distribución de las estaciones de finalización de las rachas es equilibrada entre las estaciones de invierno, primavera y verano, pero destaca el escaso número de rachas que finalizan en otoño (tabla 7.26). Es decir, la persistencia tiende a manifestarse principalmente en el tránsito entre otoño e invierno.

Tabla 7.25. Número de rachas trimestrales sobre la mediana

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	46	20	26
2	20	10	10
3	14	8	6
4	12	8	4
5	7	5	2
6	2	0	2
7	0	0	0
8	3	1	2
9	0	0	0
10	1	0	1
TOTAL	105	52	53
Media	2.45	2.48	2.42

Tabla 7.26. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	17	8	9
Invierno (EFM)	30	15	15
Primavera (AMJ)	29	14	15
Verano (JAS)	29	15	14

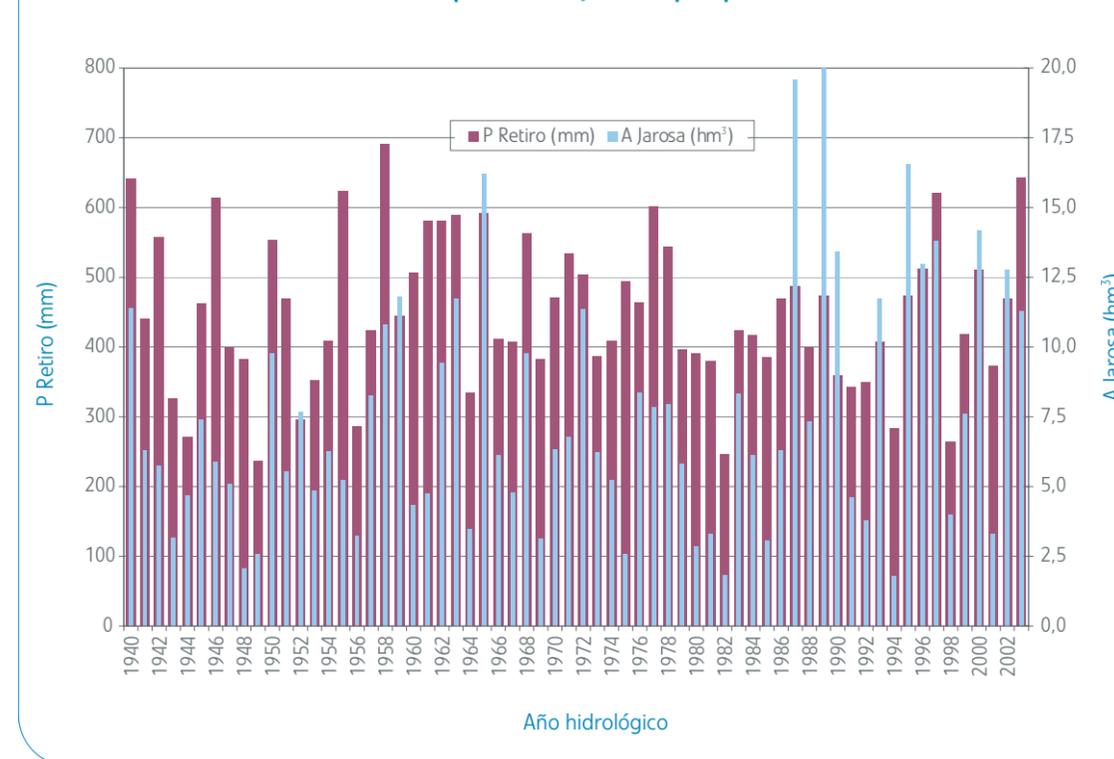
7.11.3. Nivel anual

La serie de aportaciones anuales a La Jarosa entre los años hidrológicos 1940 y 2003 contiene una laguna para el año 1990, debido a que se ha rechazado el dato de aportación de agosto de 1991. Se ha rellenado esta laguna con el valor 13,41 hectómetros cúbicos, que se obtiene considerando para agosto el promedio de aportación de ese mes en el periodo de análisis (0,086 hectómetros cúbicos).

La serie presenta una tendencia creciente débil ($r=0,282$) pero significativa al 5 por ciento ($p=0,014$), para la cual no existe correspondencia en las series de precipitaciones anuales disponibles. No es fácil aventurar razones plausibles para esta tendencia la cual, incluso, podría considerarse fortuita (según el valor de p , hay un 1,4 por ciento de probabilidad de obtener por azar una tendencia tanto o más marcada que la que se ha detectado).

La correlación con la precipitación anual de Retiro es positiva y claramente significativa ($r=0,509$, $p<0,00005$). En el gráfico 7.35 se muestran ambas series. Se puede apreciar la tendencia creciente de las aportaciones en relación con las precipitaciones: años como 1987, 1989, 1990 ó 1995 son excepcionales en cuanto a aportaciones aunque las correspondientes precipitaciones en Retiro no son especialmente cuantiosas. Con los datos disponibles es difícil dar una explicación a este aparente desajuste, pero no debe perderse de vista que el dato de precipitación corresponde a la estación de Retiro, que podría ser poco representativa de la pluviometría en la cuenca de La Jarosa.

Gráfico 7.35. Aportación La Jarosa vs precipitación Retiro

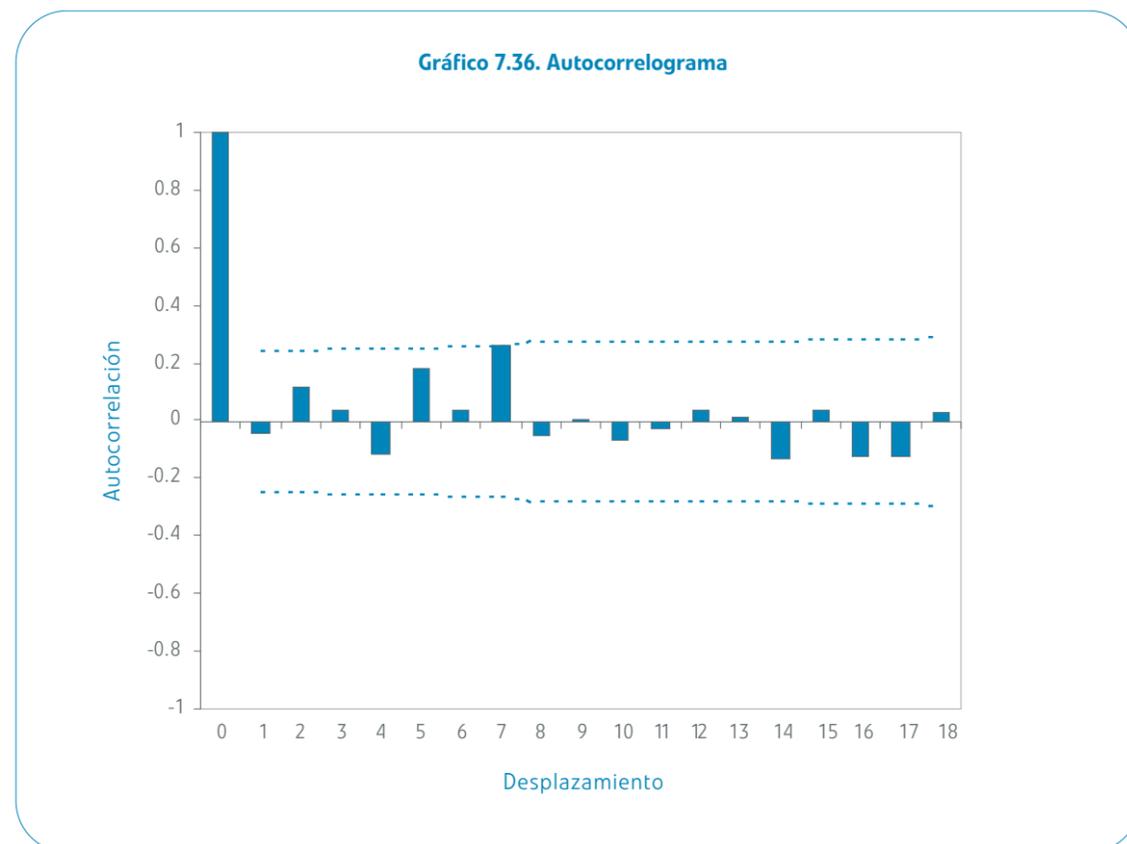


El cómputo de rachas proporciona los resultados de la tabla 7.27. El número de rachas contabilizado, 33, coincide con el valor esperado en el supuesto de formación aleatoria de rachas, por lo que este análisis no detecta ninguna persistencia entre aportaciones de años consecutivos.

Tabla 7.27. Número de rachas anuales sobre la mediana

Longitud	Todas	Secas	Húmedas
1	15	7	8
2	8	4	4
3	7	3	4
4	3	2	1
5	0	0	0
6	0	0	0
TOTAL	33	16	17
Media	1.94	2.00	1.88

El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de La Jarosa se presenta en el gráfico 7.36. Excepcionalmente, se obtiene una autocorrelación que, aunque por muy poco, supera el nivel de significación de 0,05. Se produce para datos que distan entre sí 7 años. Tratándose de un caso aislado y próximo al umbral, no cabe atribuirlo a otra causa que el azar. La tabla de contingencia se mantiene equilibrada y, por lo tanto, no permite identificar ningún patrón distinto del aleatorio (tabla 7.28).



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

Tabla 7.28. Tabla de contingencia anual

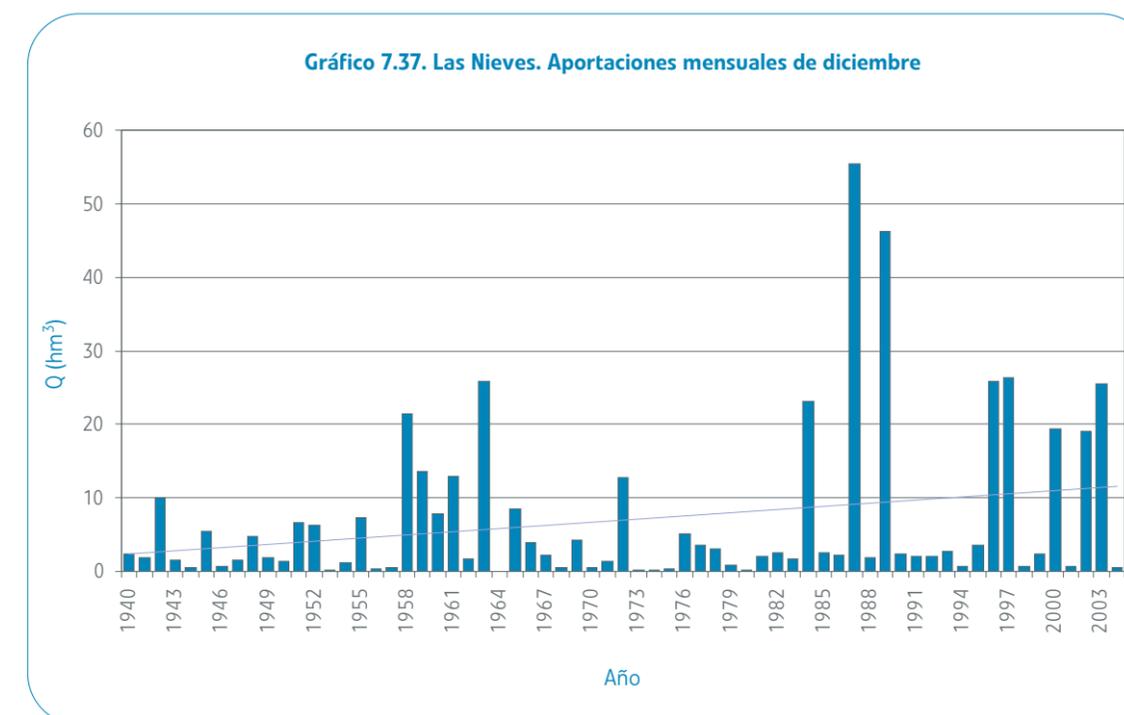
Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***
Actual - H*	6	5	9
Actual - N**	7	8	6
Actual - S***	7	8	7

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

7.12. Las Nieves

7.12.1. Nivel mensual

Las series de aportaciones mensuales de los meses de agosto, septiembre y diciembre presentan tendencia creciente estadísticamente significativa. Para agosto y septiembre, este hecho es poco relevante dada la escasa entidad de las aportaciones estivales. No sucede lo mismo en diciembre, donde la tendencia creciente viene marcada por la aparición de varios diciembres excepcionales a partir de 1985, pero distribuidos aleatoriamente. De los 10 diciembres con mayor dato de aportación, 8 son posteriores a 1980 (ver gráfico 7.37).



La correlación positiva entre las aportaciones de meses consecutivos está bastante generalizada. Destaca la correlación de junio con mayo, excepcionalmente alta ($r=0,945$), inducida por tres años con aportaciones excepcionalmente altas tanto en mayo como en junio: 1941, 1971 y 1988 (ver gráfico 7.38).

Tomando como criterio de división el valor de la mediana de cada mes, se forman 217 rachas con una longitud media de 3,5 meses. El número de meses "secos" y "húmedos" es de 383 y 388 respectivamente. El número de rachas aleatorias se distribuiría según una normal de media y desviación típica 386,5 y 13,9 respectivamente, por lo que dicha hipótesis resulta incompatible con el número de rachas observado.

La distribución de rachas secas y húmedas para las distintas longitudes es equilibrada. En el gráfico 7.39 se muestran el cómputo de rachas mensuales sobre la mediana para cada longitud de racha.

Gráfico 7.38. Las nieves. Aportaciones mensuales de junio vs aportaciones mes anterior

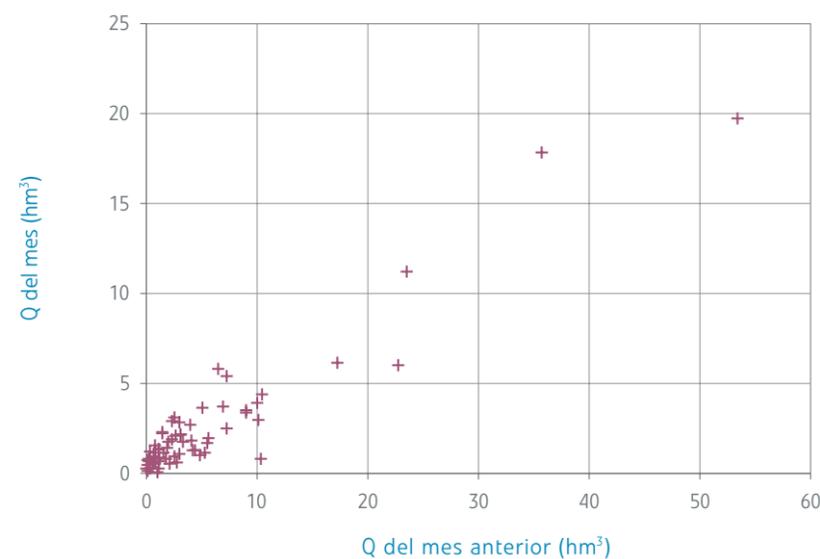
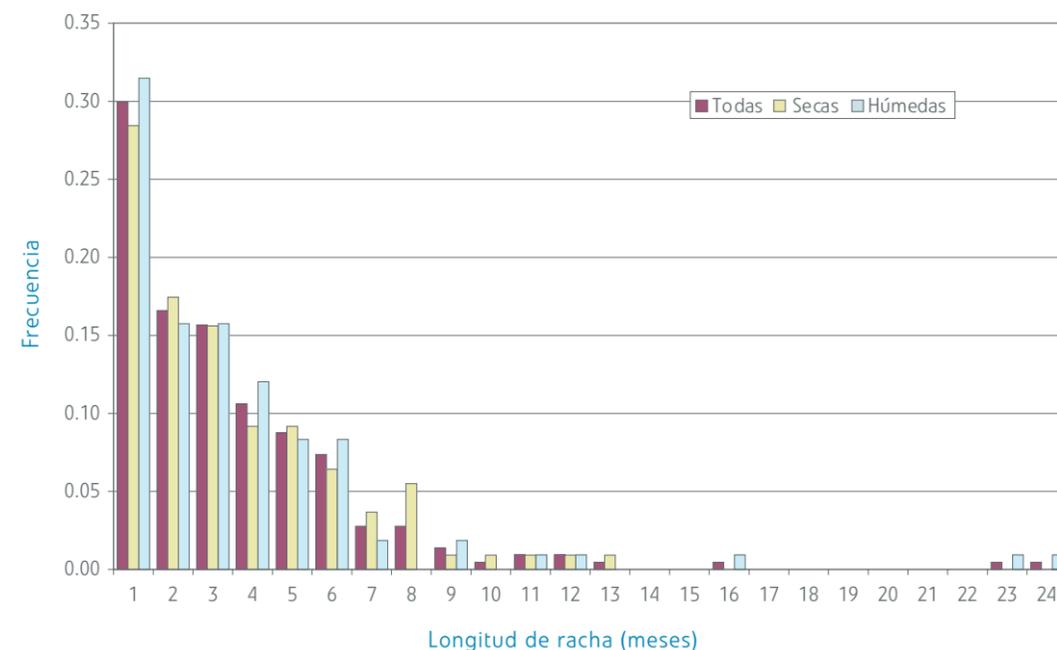


Gráfico 7.39. Frecuencia observada de las longitudes de racha



7.12.2. Nivel trimestral

Las correlaciones con el trimestre anterior son positivas y significativas salvo en el trimestre de otoño (OND). La correlación de la aportación trimestral con la del bimestre anterior o la del mes anterior no son significativamente distintas que las correlaciones con el trimestre anterior (tabla 7.29).

Tabla 7.29. Correlación entre las aportaciones de un trimestre y las del trimestre anterior

Trimestre	EFM	AMJ	JAS	OND
r	0,378	0,389	0,606	-0,054
n	64	64	64	64
t	3,217	3,325	5,998	-0,425
p	0,002	0,001	0,000	0,672

El número de rachas obtenido es inferior al esperable en una situación de aleatoriedad. Queda patente la existencia de una persistencia entre las aportaciones de dos trimestres consecutivos. Se obtienen un total de 104 rachas mientras que la hipótesis de aleatoriedad establece una media de 129,5 rachas con una desviación típica de 8,0. En esta distribución, a 104 rachas le corresponde un valor de significación de 0,0014, 2 colas, que permite rechazar la hipótesis nula.

Se comprueba que el trimestre de verano es el menos persistente (tabla 7.30). De hecho, el número de rachas que concluyen en verano es prácticamente el esperado en condiciones aleatorias.

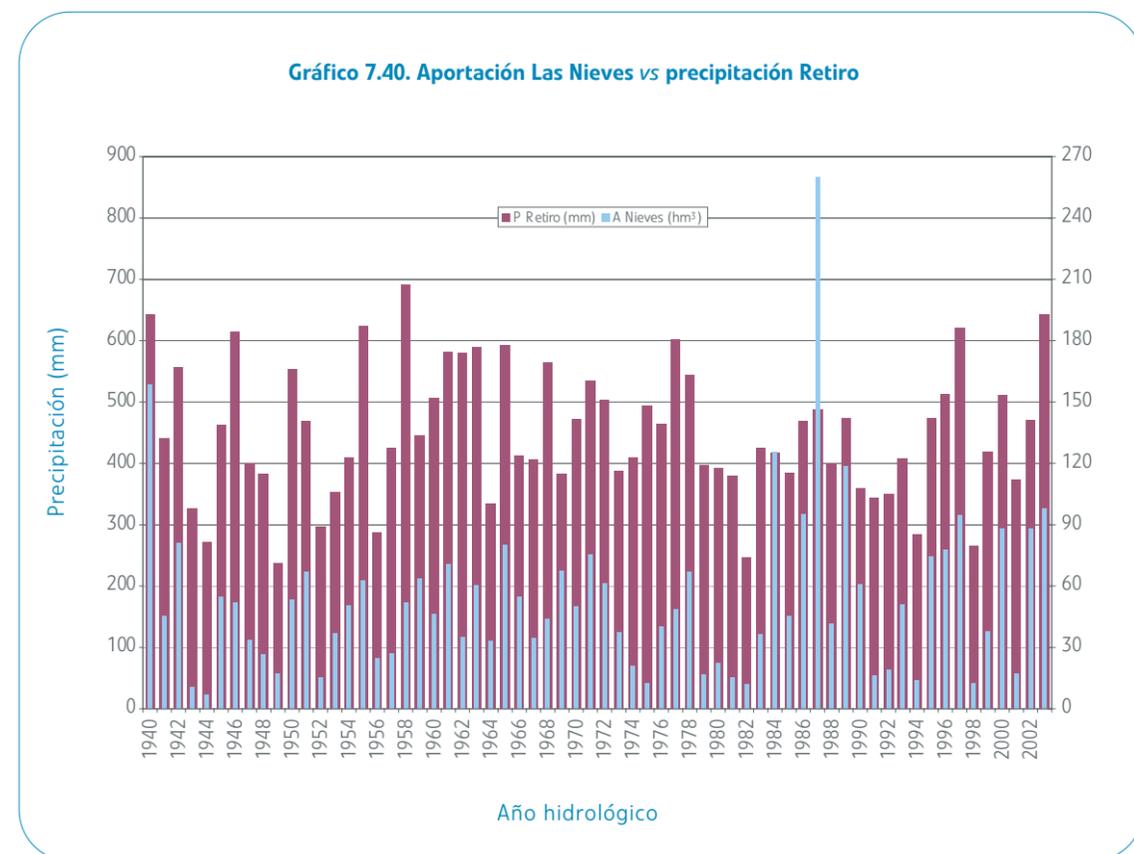
Tabla 7.30. Número de rachas que concluyen en cada trimestre

Trimestre	Todas	Secas	Húmedas
Otoño (OND)	24	12	12
Invierno (EFM)	24	12	12
Primavera (AMJ)	26	13	13
Verano (JAS)	30	15	15

7.12.3. Nivel anual

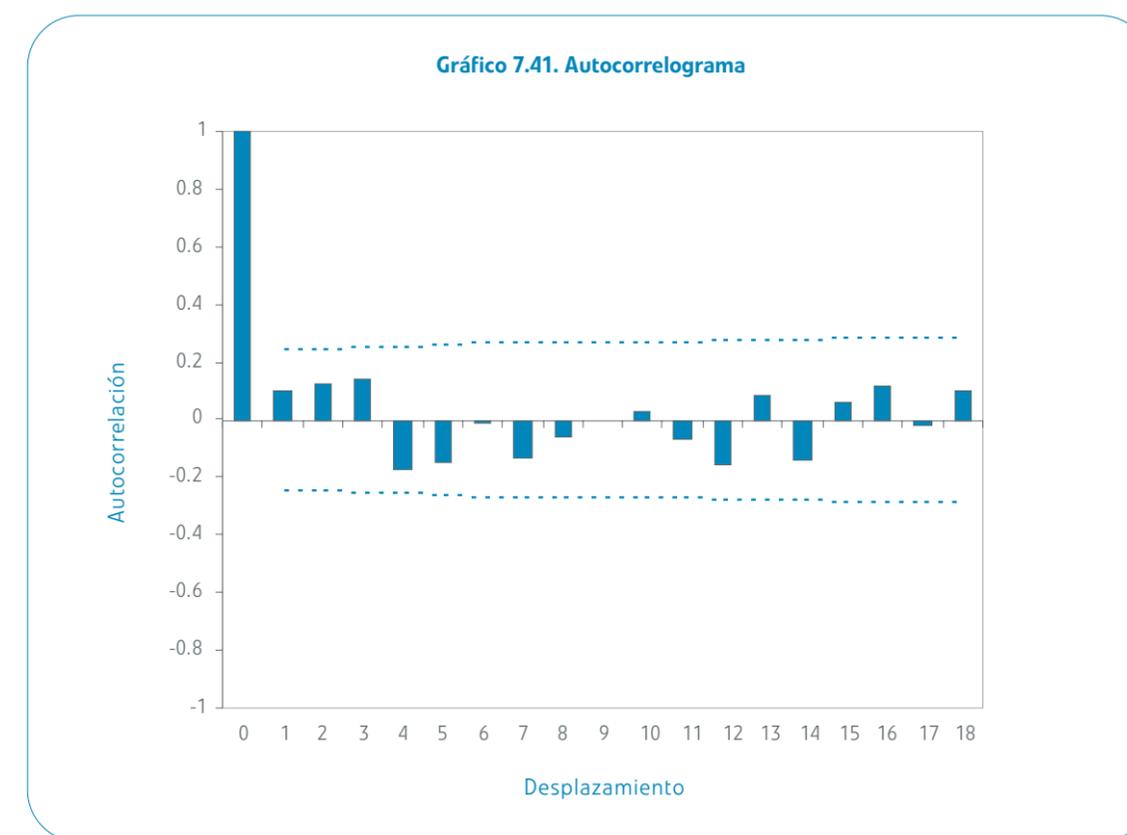
La serie de aportaciones anuales a Las Nieves entre los años hidrológicos 1940 y 2003 no presenta tendencia significativa. La correlación con la precipitación anual de Retiro es débil pero significativa y de signo positivo. Los años hidrológicos 1984, 1987 y 1989 son excepcionales en cuanto a aportaciones registradas en relación con las precipitaciones registradas en Retiro (ver gráfico 7.40).

En relación con la mediana de aportación anual, 47,52 hectómetros cúbicos, se obtienen 35 rachas de duraciones variables entre 1 y 5 años. El número de rachas obtenido es ligeramente superior a la media de la distribución normal aleatoria, 33 valores con desviación típica 4. Esta circunstancia es reseñable fundamentalmente por ser esta la única serie en la que se produce. Estadísticamente, esta situación no tiene ninguna relevancia ya que el número de rachas obtenido es perfectamente compatible con la hipótesis nula.



El autocorrelograma de las aportaciones anuales del embalse de Las Nieves se presenta en el gráfico 7.41 y no presenta ninguna característica reseñable.

La tabla de contingencia por terciles se presenta como tabla 7.31. Los valores límite de los terciles son 34,9 y 61 hectómetros cúbicos. Se aprecian desequilibrios en la distribución. Rara vez un año seco es seguido por un año húmedo, sólo 3 de 22 ocasiones, y un año normal es seguido de otro normal, sólo en 3 de 21 ocasiones. El test de χ^2 aplicado a la tabla de contingencia indica que estos desequilibrios son significativos al 5 por ciento: $p=0,029$. Tratándose de un caso único, no parece que pueda atribuirse a este hecho ninguna relevancia estadística.



Las líneas de puntos representan el umbral de significación del 5%

Tabla 7.31. Tabla de contingencia anual de las aportaciones al embalse de Las Nieves

Tipo año	Anterior - H*	Anterior - N**	Anterior - S***	Total
Actual - H*	5	12	3	20
Actual - N**	8	3	10	21
Actual - S***	7	6	9	22
TOTAL	20	21	22	63

* Año hidrológico húmedo **Año hidrológico normal ***Año hidrológico seco

8

Conclusiones

Las conclusiones que se recogen a continuación sintetizan el conocimiento que, a través del análisis estadístico realizado, se ha adquirido sobre el comportamiento no aleatorio y no estacional de las series de aportaciones para los niveles mensual, trimestral y anual (años hidrológicos).

8.1. En el nivel mensual

a) Se ha comprobado que, en general, existe dependencia entre las aportaciones de un mes y las del mes que le sigue. Los valores de significación de los coeficientes de correlación correspondientes no dejan lugar a dudas. Esta conclusión aparece en el análisis de todas y cada una de las series de datos de aportación analizadas, aunque no necesariamente para todos los meses, y no parece que pueda atribuirse a causas espurias relacionadas con la calidad de los datos.

b) La dependencia entre la aportación de un mes y la del siguiente, cuando existe, es positiva: cuanto mayor es la aportación de un mes (en relación con el nivel habitual de la aportación de ese mes), mayores tienden a ser las aportaciones del mes siguiente (también en relación con la variabilidad propia del mes). Se trata, pues, de una relación de persistencia.

c) El análisis de rachas no hace sino confirmar la conclusión anterior: la persistencia entre meses se manifiesta sistemáticamente en la formación de rachas de meses secos y de meses húmedos significativamente más largas que lo esperado en condiciones aleatorias. También aquí, los valores de significación estadística no dejan lugar a dudas.

d) Se recuerda que los análisis aplicados se han concebido de modo que excluyan el efecto de la estacionalidad: se ha evitado la posible confusión que puede inducir esta característica natural de las aportaciones mensuales.

e) Es posible que exista cierta persistencia en las precipitaciones mensuales. Esta se manifiesta en la formación de rachas de meses más o menos lluviosos que las medianas, pero de forma considerablemente más débil que la persistencia de las aportaciones. En cambio, no se manifiesta en la existencia de correlaciones significativas entre precipitaciones de meses contiguos.

f) Se plantea como hipótesis que la causa predominante para la dependencia de las aportaciones de un mes respecto de las del mes anterior es la "persistencia hidrológica". Las condiciones de humedad de la cuenca en un mes persisten parcialmente en el mes siguiente y condicionan la generación de escorrentía en ese mes, tanto por el desagüe de los almacenamientos de agua de la cuenca como por la distinta respuesta a las precipitaciones.

g) La correlación entre aportaciones mensuales y precipitaciones del mismo mes es, por lo general, significativa y positiva, como cabría esperar. Sin embargo, es frecuente que falte en los meses de verano.

h) La ausencia de correlación entre precipitación estival y aportación puede atribuirse a dos factores:

- El carácter más local de las precipitaciones estivales. Así, las precipitaciones registradas en un pluviómetro (en este caso, el de Retiro, en Madrid) pueden tener muy poco que ver con la cantidad de precipitación caída en la cuenca.
- La sequedad de la cuenca, en virtud de la cual puede haber una franja relativamente amplia de precipitaciones para las que la respuesta hidrológica de la cuenca es prácticamente nula.

i) Las relaciones estadísticas encontradas permiten desarrollar modelos de predicción de aportaciones con alcance de un mes a partir de los datos de aportaciones del mes anterior. Estos modelos, de naturaleza estadística, no pueden ser muy precisos debido a que las relaciones encontradas, aunque claramente significativas, son poco determinantes.

8.2. En el nivel trimestral

a) Se ha comprobado estadísticamente que, en general, existe dependencia entre las aportaciones de un trimestre y las del trimestre que le precede, si bien es claramente más débil que en el nivel mensual. Esta dependencia estadística se manifiesta tanto en los coeficientes de correlación como en la formación de rachas, aunque no de forma tan general ni tan clara como en el nivel mensual.

b) El tipo de relación entre las aportaciones de un trimestre y las del siguiente es, como en el caso mensual, de persistencia.

c) No se detecta ninguna dependencia entre las precipitaciones de trimestres consecutivos (serie de Retiro). Es decir, en el nivel trimestral no parece existir persistencia pluviométrica.

d) En la serie agregada, representativa del conjunto de aportaciones al sistema, se detecta una tendencia al largo plazo decreciente y estadísticamente significativa en las aportaciones de primavera. Esta es el reflejo en el nivel estacional de las que se detectan en el nivel mensual.

e) El tipo de investigación realizado no puede proporcionar explicaciones causales para esta tendencia, por lo que no se puede hacer un pronóstico fiable sobre su evolución futura. Las series de precipitación analizadas no presentan ninguna tendencia equivalente, por lo que se puede descartar que la tendencia decreciente de las aportaciones tenga origen en la precipitación. Entre las causas posibles que podrían investigarse se cuentan las siguientes:

- Cambios en el clima, como aumento de la ETP o cambios en la distribución temporal de los aguaceros.
- Cambios en la cuenca, como mayor desarrollo del suelo y la vegetación forestal.
- Anomalías en los datos, como falta de homogeneidad en la determinación de las aportaciones antes de la puesta en servicio de las presas.

f) Se ha evaluado la posible influencia que, en la formación de rachas no aleatorias, pueda tener la tendencia a largo plazo observada en algunas de las series. En general, esta influencia es pequeña y en ningún caso es suficiente para explicar la aparente persistencia en las aportaciones trimestrales.

g) Como en el caso mensual, se baraja como hipótesis que la causa predominante de la dependencia entre las aportaciones de un trimestre y las del siguiente es la persistencia hidrológica.

h) En ocasiones, las aportaciones de un trimestre correlacionan mejor con las del mes o el bimestre anterior que con las del trimestre anterior. Esto tiene sentido dentro de la hipótesis de persistencia hidrológica: la situación hidrológica de la cuenca al comienzo de un trimestre está mejor representada por las aportaciones del mes anterior que por las del trimestre anterior completo (que incluyen aportaciones más remotas en el tiempo).

i) Se ha comprobado en el análisis de coeficientes de correlación que es muy frecuente que falte dependencia entre las aportaciones del trimestre de otoño (OND) con las de periodos anteriores (trimestre, bimestre o mes anterior). Esto tiene sentido dentro de la hipótesis de persistencia hidrológica: las condiciones hidrológicas que se pueden heredar de un verano, sea este más o menos seco, siempre son de estiaje y, por tanto, comparativamente secas en relación con el otoño.

j) Generalmente existe correlación entre las aportaciones trimestrales y los datos de precipitación trimestrales que se han manejado. Por lo general, esta correlación falta en el trimestre de verano.

k) Las relaciones estadísticas encontradas deben de permitir desarrollar modelos de predicción de aportaciones con alcance trimestral si bien, estos serán aún más imprecisos que en el caso mensual.

8.3. En el nivel anual

a) No se han encontrado dependencias estadísticas que relacionen las aportaciones de un año hidrológico con las del año anterior:

- Las series de aportaciones anuales no presentan autocorrelación de ningún orden significativa al 5 por ciento.
- La formación de rachas de años secos y húmedos no sigue patrones que se separen significativamente del comportamiento aleatorio.
- Las tablas de contingencia que relacionan el tercil del año (seco, normal o húmedo) con el tercil de año precedente no se desvían significativamente del comportamiento aleatorio.

b) En el análisis de rachas, prácticamente en todos los casos el número de rachas anuales observadas es menor que el valor esperado en condiciones aleatorias pero nunca llegan a ser significativos individualmente (con la única excepción de la serie de Puentes Viejas). La coincidencia de la diferencia por defecto podría considerarse indicativa, sin embargo, este argumento entra en una vía muerta en cuanto se toma en consideración la dependencia estadística que existe entre las distintas series de aportaciones. El resultado de la serie de Puentes Viejas puede considerarse fortuito.

c) En definitiva, el análisis realizado no permite rechazar la hipótesis de que las aportaciones de un año hidrológico son estadísticamente independientes de las del año anterior.

d) Dicho de otro modo, no se han encontrado evidencias que permitan afirmar que, por ejemplo, un año hidrológico seco tenga una probabilidad distinta de ser seguido por otro año seco que la que tiene un año cualquiera.

e) Tampoco se han detectado comportamientos cíclicos plurianuales o que impliquen autocorrelaciones de orden superior a 1.

f) El análisis de la serie de precipitación acumulada anual en Retiro tampoco proporciona indicios de comportamientos persistentes o cíclicos de ningún tipo. Sin embargo, la tabla de contingencia que relaciona el tercil del año (seco, normal o húmedo) con el tercil de año precedente presenta un desequilibrio estadísticamente significativo, aunque de difícil interpretación (ver apartado 5.3.5).

g) Se detecta un nivel de correlación bueno entre aportaciones anuales y precipitaciones anuales en Retiro (en general, r entre 0,6 y 0,7). En el nivel anual, la precipitación registrada en Retiro se puede considerar un buen indicador del nivel pluviométrico en las cuencas alimentadoras de los embalses de Canal de Isabel II.

h) Se puede concluir que la persistencia hidrológica en las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II no es suficiente para tener efecto en periodos anuales y que no existen comportamientos cíclicos estadísticamente cuantificables.

i) Como consecuencia de lo anterior, no es posible desarrollar, con los datos disponibles, modelos estadísticos que permitan predecir aportaciones con alcance de un año hidrológico a partir de datos hidrológicos históricos.

j) La conclusión i) no implica que sea imposible la predicción de aportaciones a largo plazo pero, es evidente, que esta requiere más información que la que proporcionan los datos hidrológicos y meteorológicos históricos disponibles. Seguramente haya que esperar a un desarrollo suficiente de la predicción meteorológica estacional.

k) En cuanto a la tendencia a largo plazo, en el nivel anual se aprecia cierta tendencia a la disminución de aportaciones en el periodo analizado pero, en general, no resulta estadísticamente significativa. Con todo, esta tendencia aparente merece cierta consideración si atendemos a que:

- Responde a la traslación al nivel anual de la tendencia observada en las aportaciones de primavera que sí es estadísticamente significativa.
- Tendencias similares se han observado en otras series de aportaciones del entorno geográfico. Ejemplos: Tajo en Bolarque (FLORES et al. 2003), cuencas de la vertiente pirenaica del Ebro (GALLART et al. 2004).
- Resulta llamativo que tal tendencia aparente no se observe en la serie de precipitaciones anuales de Retiro. Es decir, la relación entre precipitación y escorrentía podría no ser estacionaria.

l) Como en el caso de la tendencia de las aportaciones de primavera, su explicación y, con ella, un pronóstico de su posible evolución futura, quedan fuera del alcance del estudio realizado. Con todo, se sugieren algunas de las causas posibles que podrían investigarse:

- Cambios en el clima, como aumento de la ETP o cambios en la distribución temporal de los aguaceros.
- Ciclos climáticos de duración superior a la del periodo analizado.
- Cambios en la cuenca, como mayor desarrollo del suelo y la vegetación forestal (como se sugiere en GALLART et al. 2004 para las cuencas de la vertiente pirenaica del Ebro).



REFERENCIAS



[DOUGLAS et al., 2000](#)

DOUGLAS, E.M.; R.M. VOGEL; C.N. KROLL: Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. Journal of Hydrology, Vol. 240, pp 90-105, Amsterdam 2000.

[FLORES et al. 2003](#)

FLORES-MONTOYA, F.J.; L.M. GARROTE; F.J. MARTÍN-CARRASCO: The Hydrologic Regime of the Tagus Basin in the Last 60 Years. IWRA Xth World Water Congress. Madrid 2003.

[GALLART et al. 2004](#)

GALLART, F.; LLORENS, P.: Observations on Land Cover Changes and Water Resources in the Headwaters of the Ebro Catchment, Iberian Peninsula. Physics and Chemistry of the Earth, 29: 769-773. Oxford 2004.

[LOWRY, R., internet:](#)

LOWRY, R.: Concepts and Applications of Inferential Statistics. Versión electrónica en <http://faculty.vassar.edu/lowry/webtext.html>.

[NIST/SEMATECH, internet](#)

NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. Versión electrónica en <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.

[UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, internet:](#)

Bioestadística: Métodos y Aplicaciones. Facultad de Medicina, Universidad de Málaga. Versión electrónica en <http://www.bioestadistica.uma.es/libro>.

Canal de  Isabel II

www.cyii.es

Canal de Isabel II
Santa Engracia, 125. 28003 Madrid