

# Cuadernos de I+D+i

# 22

**Canal**   
de Isabel II **gestión**

Régimen de precipitaciones en la  
Cuenca del Lozoya y adyacentes

© Canal de Isabel II Gestión 2015

#### **Autores**

*Luis García Amor*  
*Rafael Menéndez Mellado*  
*Paulino Tardáguila Calvo*

#### **Dirección del estudio**

*Juan Carlos Ibáñez Carranza*

#### **Agradecimientos**

Expresamos nuestro agradecimiento a D. José Antonio Hinojal, Jefe de Servicio SAIH de la Confederación Hidrográfica del Tajo, por facilitar el acceso a los registros de precipitación de los pluviómetros de la red SAIH, imprescindibles para complementar las fuentes numéricas para el tratamiento estadístico de los datos y el desarrollo del estudio.

ISSN de la edición impresa: 2254-8955

ISSN de la edición en soporte electrónico: 2340-1818

Depósito Legal: M-29607-2015



Esta versión digital forma parte de la Biblioteca Virtual de la Consejería de Empleo, Turismo y Cultura de la Comunidad de Madrid y las condiciones de su distribución y difusión se encuentran amparadas por el marco legal de la misma

[www.madrid.org/publicamadrid](http://www.madrid.org/publicamadrid)  
[culpubli@madrid.org](mailto:culpubli@madrid.org)



# 22

Régimen de precipitaciones  
en la Cuenca del Lozoya y adyacentes



## 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 Gestión S.A.

Tanto Canal de Isabel II Gestión S.A. 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 Gestión S.A. forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo de su Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde la Empresa 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.

Los títulos aparecidos en la colección de Cuadernos de I+D+i son los que figuran en la tabla siguiente.

## TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I

Nº colección	Año	Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados
1	2007	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	2008	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	2009	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	2008	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	2008	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	2008	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	2008	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	2010	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	2010	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de pez Cebra
10	2010	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	2010	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	2010	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	2011	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II
14	2011	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección
15	2012	Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II
16	2012	Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento de Canal de Isabel II, mediante modelos de aportación diaria
17	2012	Mejora de la capacidad de pronóstico de aportaciones mensuales y estacionales en el ámbito de Canal de Isabel II
18	2013	Aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla. Incidencia en el proceso de eutrofización
19	2013	Un nuevo criterio para el cálculo del caudal de agua residual urbana
20	2014	Gestión de Ideas en Canal de Isabel II Gestión: la experiencia <i>GENYAL</i>

<i>Nº colección</i>	<i>Año</i>	<i>Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados</i>
21	2014	Investigación sobre técnicas para la medición de subsidencias relacionadas con la explotación de acuíferos

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1. RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>10</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS</b>	<b>27</b>
2.1. PLANTEAMIENTO	28
2.2. OBJETIVOS	28
<b>3. DATOS DEL PROYECTO</b>	<b>29</b>
3.1. DATOS PLUVIOMÉTRICOS	30
3.1.1. Selección inicial	30
3.1.2. Preparación de los datos	31
3.1.3. Selección definitiva	35
3.2. OTROS DATOS	42
3.2.1. Precipitación “ <i>Hirlam</i> ” AEMET	42
3.2.2. Cota de nieve	44
3.2.3. Ventanas de oportunidad	46
<b>4. MÉTODOS</b>	<b>48</b>
4.1. DEFINICIÓN DE AGUACERO EN LA SERIE DE UN PLUVIÓMETRO INDIVIDUAL	49
4.2. VISUALIZACIÓN DE CAMPOS DE PRECIPITACIÓN	50
4.3. TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIONES	52
4.4. ANÁLISIS “ <i>CLUSTER</i> ”	55
4.5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES, PCA	56
4.6. ANÁLISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS	59

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>61</b>
5.1. REPRESENTATIVIDAD DE LOS DATOS	62
5.2. SITUACIONES DE NIEVE POTENCIAL Y TEMPORADA DE NIEVE	62
5.3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE PRECIPITACIONES EN PLUVIÓMETROS	65
5.3.1. Agregados anuales	65
5.3.2. Estadística básica por aguaceros	68
5.4. CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE LAS PRECIPITACIONES	69
5.4.1. Regionalización mediante análisis “ <i>Cluster</i> ”	69
5.4.2. Análisis de Componentes Principales PCA con datos de pluviómetros	72
5.4.3. Análisis de Componentes Principales PCA con campos “ <i>Hirlam</i> ”	79
5.5. RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN OBSERVADA Y PRECIPITACIÓN <i>HIRLAM</i>	82
5.5.1. Análisis de correlaciones canónicas entre pluviómetros y “ <i>Hirlam</i> ”	82
5.5.2. Análisis de residuos de las correlaciones canónicas	89
5.5.3. Particularización para ventanas de oportunidad	91
5.5.4. Aplicación para la evaluación de actuaciones de estimulación de nubes	99
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>100</b>
<b>7. ANEXOS</b>	<b>103</b>
ANEXO 7.1. ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE AGUACEROS POR PLUVIÓMETRO	104
ANEXO 7.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
ANEXO 7.3. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS	144
ANEXO 7.4. ÍNDICE DE FIGURAS	145
ANEXO 7.5. ÍNDICE DE TABLAS	150

# 1. Resumen Ejecutivo



## Ficha Técnica

<b>Título del proyecto</b>	Caracterización del régimen de precipitaciones de la Cuenca del Lozoya y adyacentes.
<b>Línea de investigación</b>	Aseguramiento del equilibrio entre disponibilidades y demandas.
<b>Unidades de Canal de Isabel II Gestión implicadas</b>	Subdirección I+D+i.
<b>Participación externa</b>	MeteoLógica S.A.
<b>Objeto y justificación del proyecto</b>	<p>Canal de Isabel II Gestión está investigando las posibilidades de la estimulación de nubes para incrementar la precipitación, en forma de nieve, en las cuencas alimentadoras de los embalses del sistema Lozoya.</p> <p>Un requisito previo a la prueba de este tipo de sistemas es una caracterización detallada del régimen de precipitaciones en las zonas potencialmente afectadas. Esta caracterización debería servir para evaluar los efectos de eventuales actuaciones de estimulación de nubes.</p>
<b>Contribución al estado del arte</b>	<p>En el estudio se han aplicado diversas técnicas de análisis estadístico multivariante a series de datos de precipitación horaria, y se ha comprobado su eficacia en la identificación de patrones espaciales.</p> <p>Se ha empleado el análisis de correlaciones canónicas para obtener una descripción matemática de las relaciones entre precipitaciones observadas y campos de precipitación generados por el modelo de predicción numérica <b>Hirlam</b> de AEMET. Esta descripción matemática se ha aprovechado para diseñar una medida de conformidad entre un campo de observaciones y el correspondiente del modelo.</p>
<b>Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes</b>	<p>Se han recopilado, unificado y revisado series de datos de precipitación con alta resolución temporal de tres fuentes, Canal de Isabel II Gestión, SAIH Tajo y AEMET.</p> <p>Se han caracterizado los aguaceros en cada pluviómetro. Se ha evaluado la frecuencia de situaciones propicias para la precipitación en forma de nieve y su distribución estacional. Mediante análisis <b>cluster</b> y análisis de componentes principales se han estudiado las características de la distribución espacial de las precipitaciones en el ámbito de estudio.</p> <p>El análisis de correlaciones canónicas ha permitido individualizar las relaciones matemáticas entre los campos de precipitaciones horarias y los campos de precipitación <b>Hirlam</b>. A partir de estas relaciones se han investigado metodologías para evaluar el grado de conformidad de un campo de precipitación observada con el campo <b>Hirlam</b> correspondiente. Estas metodologías se han probado en las ventanas de oportunidad para la estimulación de nubes identificadas en una investigación previa.</p>
<b>Resumen de resultados obtenidos</b>	<p>Se dispone de una caracterización detallada del régimen de aguaceros en cada uno de los pluviómetros seleccionados en el ámbito del estudio.</p> <p>Se han identificado los patrones espaciales relevantes que permiten describir las precipitaciones en el ámbito de estudio.</p> <p>Se ha diseñado una medida de conformidad de los campos de precipitación observada que es potencialmente aplicable para evaluar los efectos de eventuales actuaciones de estimulación de nubes.</p>
<b>Líneas de Investigación abiertas para la continuación de los trabajos</b>	<p>El proyecto de actuaciones sobre la fase atmosférica del ciclo hidrológico, para incrementar la precipitación en forma de nieve en la cuenca del río Lozoya, continuará con una fase experimental de siembra de nubes con material nucleante, cuando se den las condiciones identificadas como adecuadas para la estimulación de la precipitación. El presente trabajo proporciona la metodología para la evaluación de los eventuales efectos producidos por dichas actuaciones.</p>

## Resumen Ejecutivo

### INTRODUCCIÓN

Canal de Isabel II Gestión está desarrollando un proyecto de investigación encaminado a evaluar las posibilidades de la estimulación de nubes, para incrementar la precipitación en forma de nieve en las cuencas alimentadoras de los embalses del sistema Lozoya. El proyecto ha permitido identificar las condiciones meteorológicas en las que es prometedor realizar la estimulación (*“ventanas de oportunidad”*) y las técnicas de estimulación adecuadas en cada caso.

La siguiente fase del proyecto, pendiente de autorización administrativa, es la eventual prueba en casos reales. Un requisito previo para estas pruebas es una caracterización detallada de las precipitaciones en las zonas potencialmente afectadas por el experimento. El presente estudio aborda dicha caracterización. La caracterización de las precipitaciones se orienta a generar el conocimiento necesario para investigar los efectos de eventuales ensayos de estimulación de nubes, que pueden manifestarse tanto en la cantidad de precipitación como en su distribución espacial.

El ámbito espacial del estudio es la cuenca del Lozoya, que sería, en caso de autorización, la zona objetivo de los ensayos de estimulación de nubes, junto con otras cuencas limítrofes con las del estudio: cabecera del Jarama, las cuencas del Sorbe y del Bornova, vertiente opuesta de la Sierra de Guadarrama y la parte alta de las cuencas de Manzanares y Guadarrama.

El ámbito temporal se centra en las épocas del año más susceptibles a presentar episodios de nieve y especialmente en las ventanas de oportunidad identificadas en anteriores estudios.

## DATOS

### A. Datos de precipitación

El tipo de caracterización que se ha llevado a cabo requiere datos pluviométricos de alta resolución temporal y con buena cobertura espacial. Se han identificado tres redes pluviométricas que proporcionan datos con resolución, al menos, horaria:

- Pluviómetros propios de Canal de Isabel II Gestión (Canal Gestión), ubicados en las presas.
- Estaciones del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Tajo, que ha cedido los datos para este estudio.
- Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas, de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), de la cual se han adquirido datos para 6 pluviómetros.

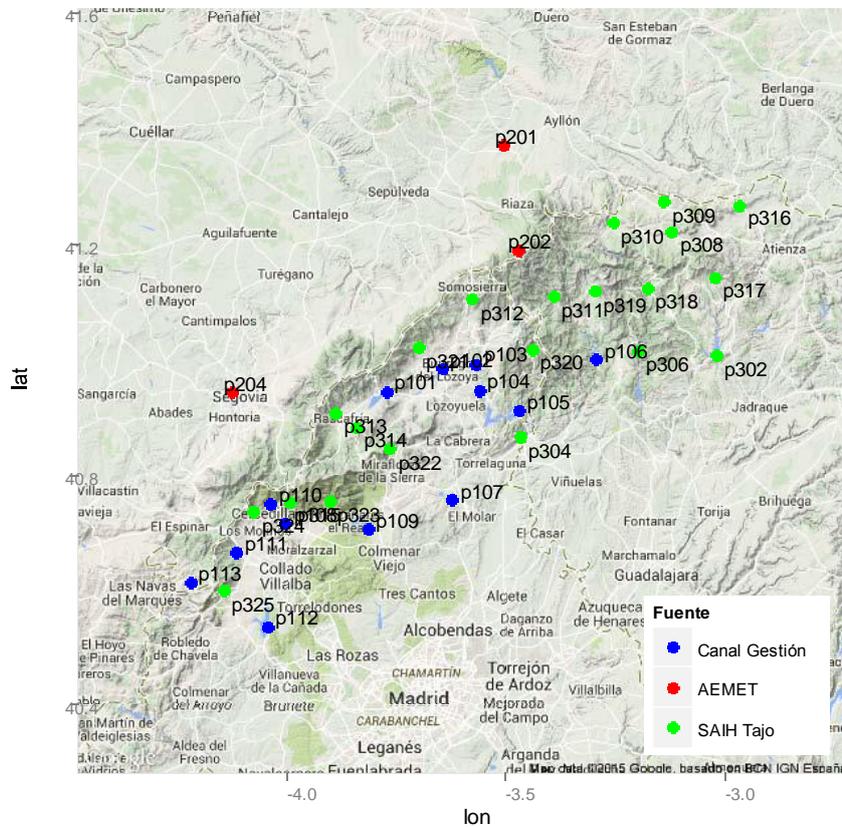
Se han recopilado las series de precipitación horaria de un total de 44 pluviómetros de estas redes, ubicados en el ámbito de estudio para el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2010 y el 31 de julio de 2014.

Las series de datos pluviométricos se han convertido a horario UTC, se han agregado por horas (en los casos en que tenían mayor resolución temporal) y se han revisado para detectar lagunas y datos anómalos.

Ocasionalmente (menos del 0,05% de los casos) se han sustituido datos anómalos por datos estimados, apoyándose en registros de pluviómetros próximos.

Finalmente, se han seleccionado las series que ofrecen una cobertura espacial suficiente sin que haya duplicidades ni lagunas importantes. En la Figura 1 se muestra la selección definitiva, que consiste en un conjunto de 37 pluviómetros.

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PLUVIÓMETROS SELECCIONADOS



Para la aplicación de determinadas técnicas estadísticas (análisis *cluster*, análisis de componentes principales, análisis de correlaciones canónicas), los datos de precipitación horaria se han transformado según  $z = \log(1 + x)$ .

Adicionalmente, en varios análisis se han seleccionado sólo los casos con, al menos, cierto número de pluviómetros con precipitación >0. La transformación y la selección tienen por objeto reducir el sesgo hacia la derecha, natural en los datos de precipitación, que puede distorsionar los resultados de las técnicas estadísticas basadas en la varianza.

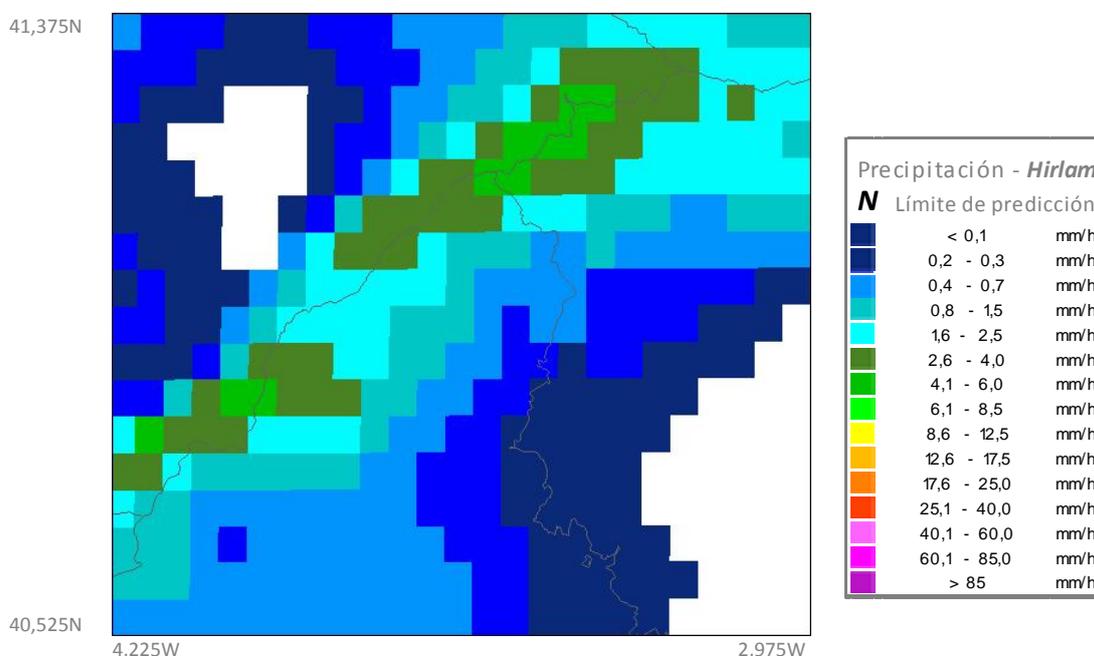
## B. Otros datos

Se han recopilado los campos de precipitación horaria predicha por el modelo *Hirlam* de AEMET, en una ventana de 17 x 25 celdas, que cubre el ámbito de estudio (ver Figura 2). *Hirlam* es un modelo de predicción numérica del tiempo, de área limitada, promovido por un consorcio de países europeos en el que participa España a través de AEMET.

AEMET opera 3 implementaciones de *Hirlam*. La que se ha utilizado en el estudio es la que cubre la Península Ibérica con resolución espacial de 0,05 grados geográficos, resolución temporal de salida de una hora, 36 alcances y 4 pasadas diarias (0, 6, 12 y 18 UTC).

Se ha recopilado un histórico de campos de precipitación *Hirlam* para los alcances H+0 a H+11, de las pasadas de las 0 y de las 12.

**FIGURA 2. EJEMPLO DE CAMPO DE PRECIPITACIÓN *HIRLAM* EN LA VENTANA SELECCIONADA ESTUDIO**



Adicionalmente, se ha utilizado un histórico de campos de cota de nieve para clasificar los episodios de precipitación en lluvia o nieve.

Las cotas de nieve utilizadas se basan en una relación empírica con el espesor entre 1.000 y 850 hectopascales (hPa):

$$z_N = a + b \cdot (z_{850} - z_{1000})$$

Donde  $Z_N$  es la cota de nieve (m);  $Z_{850}$  y  $Z_{1000}$  son los niveles de presión 850 hPa y 1.000 hPa, respectivamente (m) y  $a$  (m) y  $b$  (adimensional) son dos parámetros, que en su día fueron determinados empíricamente.

Los valores de nivel de 850 y 1.000 hPa utilizados provienen de las predicciones del modelo **HRES** del ECMWF. Los campos de cota de nieve se cruzan con la topografía del modelo digital del terreno de **Hirlam**, para clasificar la precipitación en cada celda **Hirlam**, como lluvia o nieve.

Finalmente, se ha dispuesto de la relación de ventanas de oportunidad identificadas durante las campañas 2010-2011 y 2011-2012. Las ventanas de oportunidad son los intervalos de tiempo en los que se dan circunstancias favorables para la estimulación de nubes, según un conjunto de criterios basados en observaciones y predicciones meteorológicas. Del conjunto inicial de ventanas de oportunidad (21) se han retenido 16 para el análisis, habiéndose descartado 5 por duración excesivamente corta o datos incompletos en los pluviómetros.

## ANÁLISIS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Situaciones de nieve potencial y temporada de nieve

Dada la motivación del estudio, el análisis se ha centrado fundamentalmente en las precipitaciones en forma de nieve o, al menos, en las situaciones en las que se pueden producir precipitaciones en forma de nieve. En este sentido, y a efectos de análisis dentro del estudio, se ha definido el concepto de “situación con precipitación potencialmente en forma de nieve”, o “situación de *nieve potencial*”, como aquella en que se cumplen simultáneamente los dos criterios siguientes:

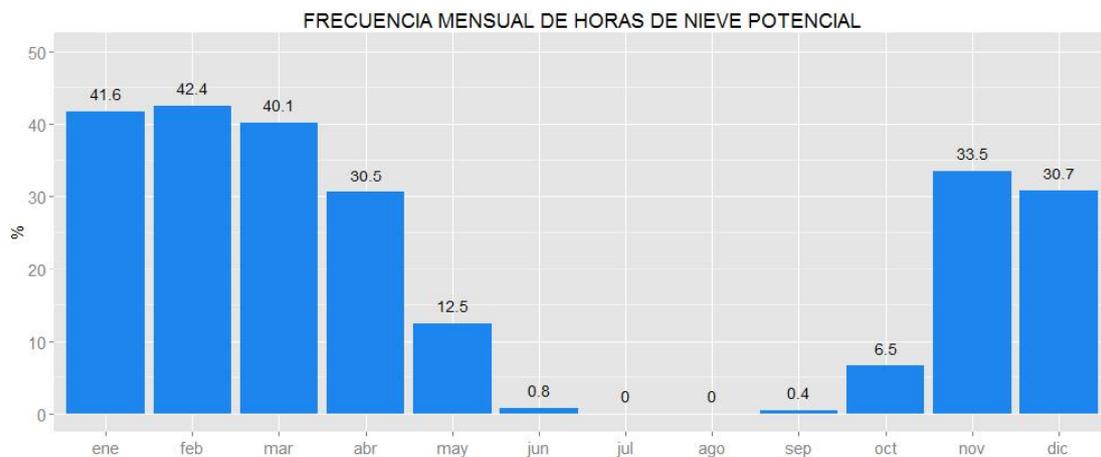
- a) Se registra precipitación en alguno de los pluviómetros seleccionados, y
- b) la cota de nieve está por debajo del **MDT Hirlam** en algún punto de la ventana seleccionada.

La frecuencia general de situaciones de *nieve potencial*, en el histórico es del 20,6%.

Por meses, la frecuencia general de *nieve potencial* se muestra en el gráfico de la Figura 3.

Los meses de noviembre a abril acumulan el 91,4% de las situaciones de *nieve potencial*. En cada uno de esos meses, la frecuencia de situaciones de *nieve potencial* supera el 30%; mientras que en el resto, oscila entre 0 y 12,5%.

El periodo noviembre-abril se utiliza en este estudio bajo la denominación de “*invierno extendido*”, como referencia de la temporada normal de nieve.

**FIGURA 3. FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS DE NIEVE POTENCIAL**

## 2. Caracterización general de precipitaciones en pluviómetros

En una primera fase de análisis se ha realizado una caracterización general de las series de precipitación horaria de los pluviómetros considerados individualmente.

La revisión de la precipitación media anual ha permitido poner en relación el periodo de datos con el contexto climatológico del ámbito del estudio y comprobar la relación entre la precipitación total con la altitud y la posición geográfica. La pluviometría es mayor en zonas más altas y, en general, próximas a la dorsal de la Sierra de Guadarrama. A sotavento del macizo de Ayllón se registran las precipitaciones menos cuantiosas de entre los pluviómetros estudiados.

En un nivel más detallado se han estudiado las características de los aguaceros en cada serie de precipitación. A efectos de análisis se ha considerado que un aguacero es una secuencia de valores de precipitación horaria, consecutivos, mayores que cero, separada por valores de precipitación cero, en ambos extremos. Con los aguaceros de cada serie se han elaborado unas estadísticas elementales que ofrecen una caracterización básica del régimen de precipitaciones que reflejan los datos.

Los resultados se han presentado en gráficos como los de las figuras 4 y 5.

FIGURA 4. ESTADÍSTICA ELEMENTAL DE AGUACEROS, POR MESES, EN EL PLUVIÓMETRO DE PINILLA

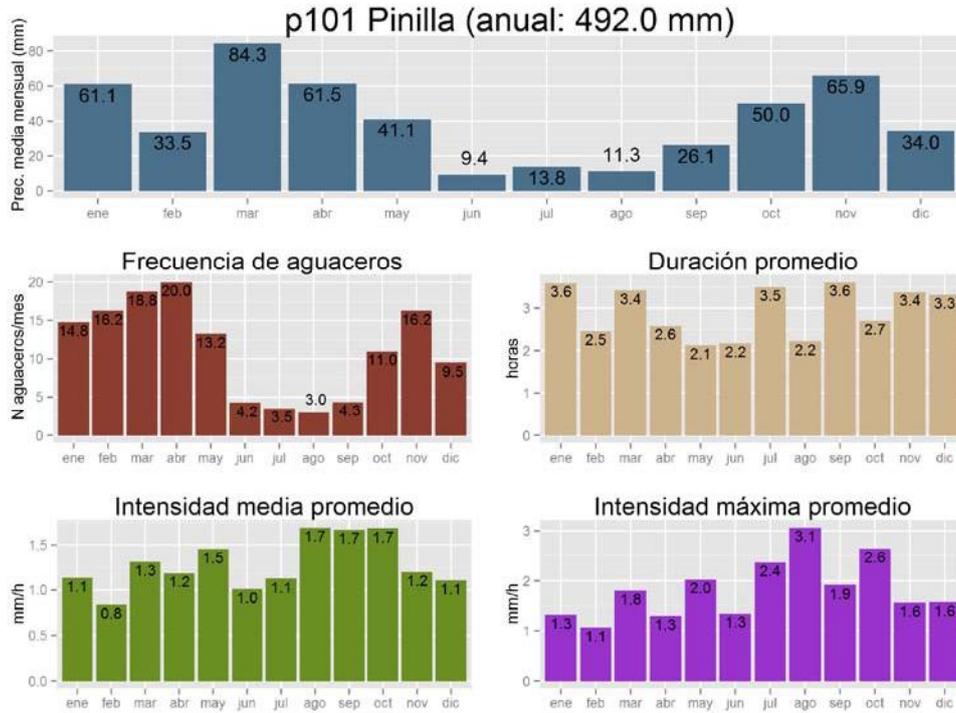
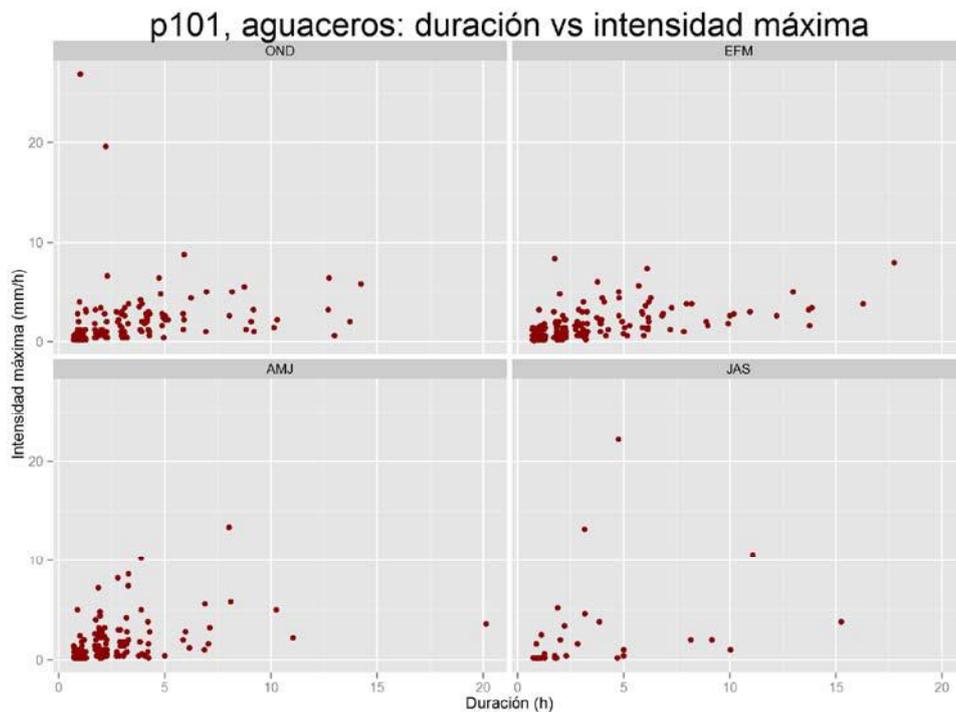


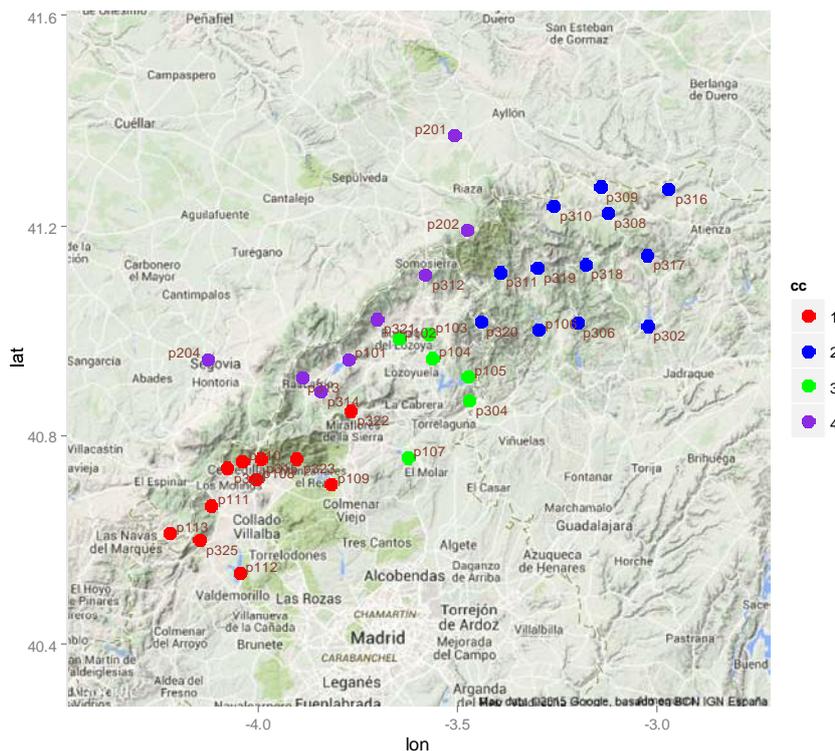
FIGURA 5. RELACIÓN ENTRE DURACIÓN E INTENSIDAD MÁXIMA, POR TRIMESTRES, PARA LOS AGUACEROS REGISTRADOS EN EL PLUVIÓMETRO DE PINILLA



### 3. Caracterización espacial de las precipitaciones

El análisis *cluster* de las series de precipitación horarias proporciona una clasificación de los pluviómetros en grupos, consistentes y con cierto sentido geográfico (ver Figura 6).

**FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CUATRO GRUPOS DE PLUVIÓMETROS RESULTANTES DEL ANÁLISIS CLUSTER, PARA LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DEL INVIERNO EXTENDIDO**



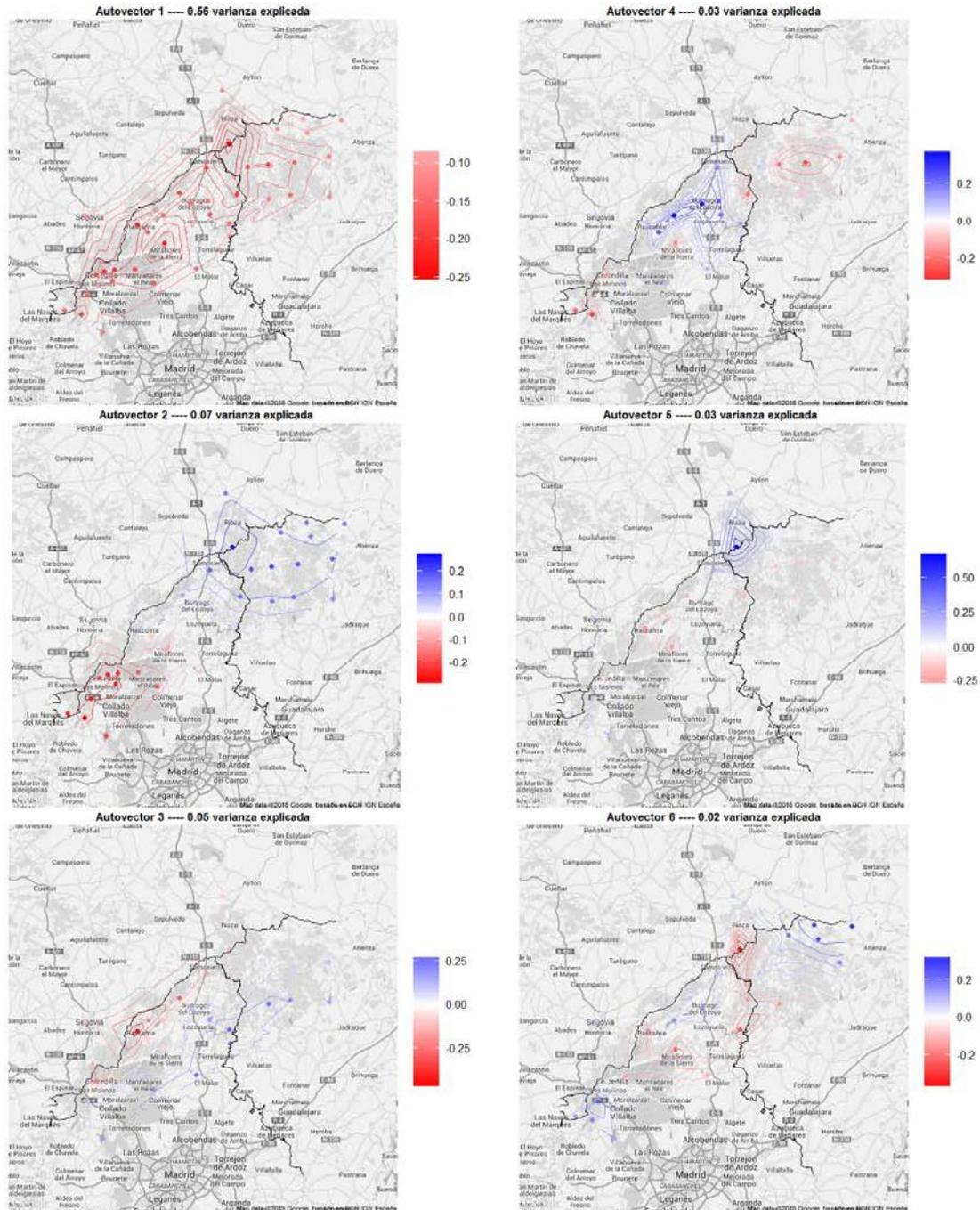
El análisis de componentes principales (PCA), ofrece una visión más sofisticada de las relaciones espaciales entre las series de precipitación.

Las seis primeras componentes principales capturan el 75% de la variabilidad total, y cada una de ellas presenta un patrón espacial consistente y susceptible de interpretación.

La Figura 7 muestra estos patrones espaciales y la relación siguiente ofrece una interpretación plausible de ellos:

- CP 1 Magnitud general de la precipitación en el conjunto del ámbito.
- CP 2 Gradiente de precipitación SW-NE, o balance entre Guadarrama-Manzanares y Jarama-Sorbe-Bornova.
- CP 3 Gradiente de precipitaciones NW-SE, o balance entre sierra y vertiente del Duero, por un lado, y vertiente del Tajo, por otro.
- CP 4 Balance entre Cuenca del Lozoya y resto.
- CP 5 Balance entre macizo de Ayllón y resto.
- CP 6 Balance alrededor de la Cuenca del Lozoya y resto.

**FIGURA 7. MAPAS DE REPRESENTACIÓN DE LOS PESOS DE CADA PLUVIÓMETRO, EN CADA UNA DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES, PRECIPITACIONES HORARIAS DE NOVIEMBRE A ABRIL**



*Se han añadido isólinas para realizar la configuración espacial de cada una de ellas.  
Se indica la fracción de varianza explicada por cada componente.*

Se ha ensayado la rotación *VARIMAX* sobre estas seis primeras componentes principales para intentar alcanzar una estructura más simple, y más interpretable, en cuanto a significado geográfico.

Las seis componentes resultantes se pueden describir como sigue:

- CR 1. Zonas altas de la Sierra
- CR 2. Cabeceras de Guadarrama y Manzanares
- CR 3. Jarama, aguas abajo de El Vado
- CR 4. Cuenca del Lozoya
- CR 5. Macizo de Ayllón
- CR 6. Cabeceras de Sorbe y Bornova

#### 4. Relación entre precipitación observada y precipitación *Hirlam*

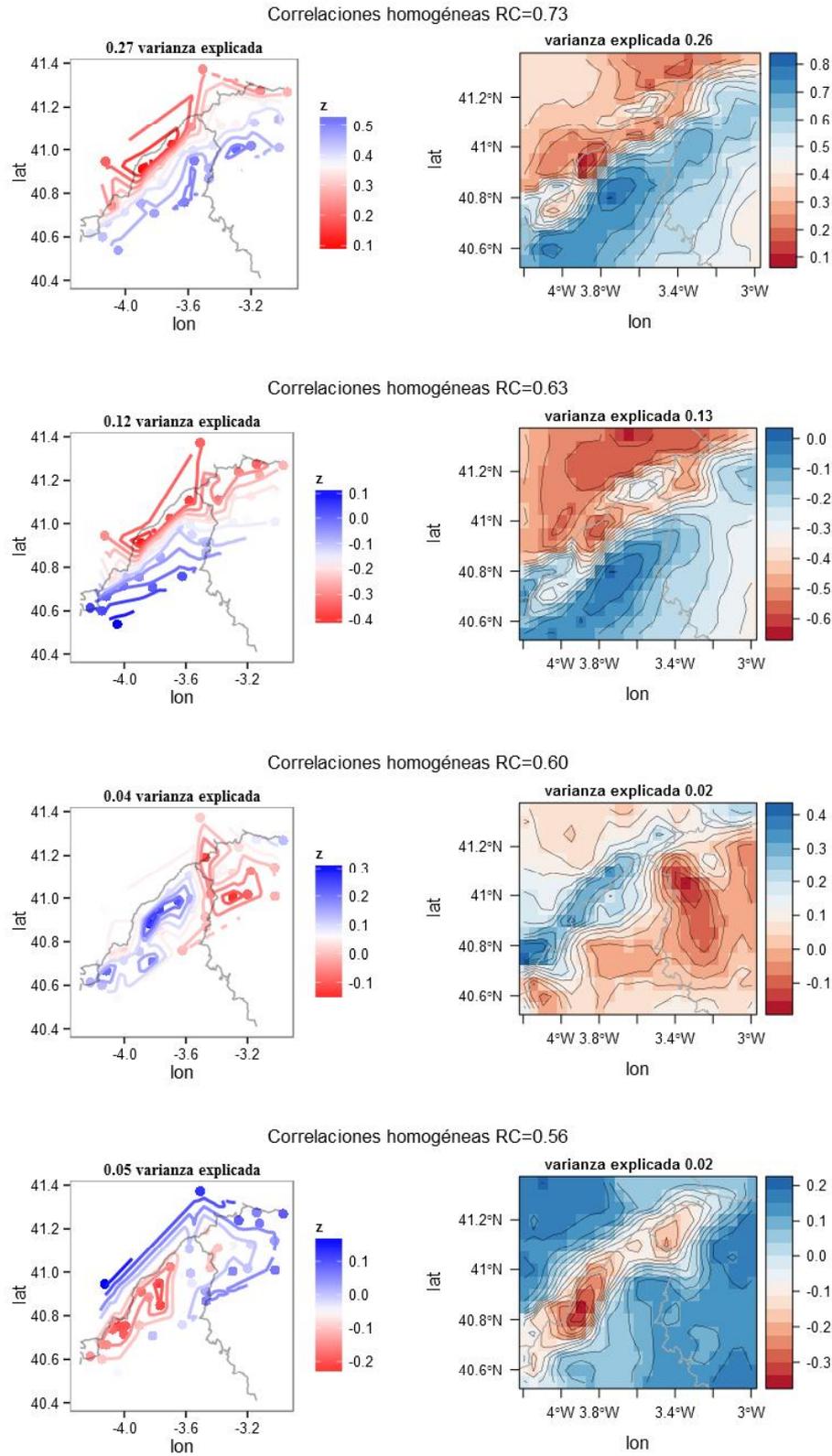
El análisis de correlaciones canónicas, CCA, proporciona una descripción matemática detallada de la relación entre las precipitaciones observadas y los campos de precipitación *Hirlam*. El análisis se realiza como punto de partida para una estrategia de diagnóstico de los efectos de las actuaciones de estimulación de nubes. La idea es que, por una parte, debe existir una relación bastante estrecha entre precipitaciones observadas y *Hirlam* y, por otra, las eventuales actuaciones de estimulación de nubes pueden afectar sólo a una de las partes, la precipitación, pero no a la predicción *Hirlam*. En la medida en que las precipitaciones observadas tras una actuación de estimulación de nubes se aparten de la relación normal con el campo *Hirlam* podrá inferirse que la actuación ha tenido cierto efecto sobre las precipitaciones.

Como resultado de CCA se obtienen 37 pares de variables canónicas, una por cada pluviómetro, ordenadas de mayor a menor correlación. La primera correlación canónica alcanza un valor de 0,72 y hay cuatro con coeficiente de correlación superior a 0,5. En la Figura 8 se muestra la configuración espacial de las variables correspondientes a los cuatro primeros pares canónicos mediante las llamadas correlaciones homogéneas, que indican cómo se correlaciona cada variable canónica con las variables originales de las que procede. La similitud, en cada par, entre la configuración de la variable canónica correspondiente a pluviómetros (mapa de la izquierda) y la correspondiente a *Hirlam* (mapa de la derecha) indica que existe sintonía entre ambos conjuntos.

#### 5. Identificación del efecto de las actuaciones de estimulación de nubes

Se parte de la hipótesis de que es posible identificar alteraciones artificiales en el campo de precipitaciones observadas, evaluando los residuos de las correlaciones canónicas entre un campo de precipitaciones observadas y el campo *Hirlam* correspondiente: unos residuos anormalmente grandes señalarían un desacoplamiento entre el campo observado y el campo *Hirlam* que podría atribuirse a una alteración en el campo de precipitaciones, como por ejemplo, la que puede producir una eventual actuación de estimulación de nubes.

**FIGURA 8. CORRELACIONES HOMOGÉNEAS DE LOS PRIMEROS CUATRO PARES DE VARIABLES CANÓNICAS (INVIERNO EXTENDIDO, CASOS DE NIEVE POTENCIAL)**

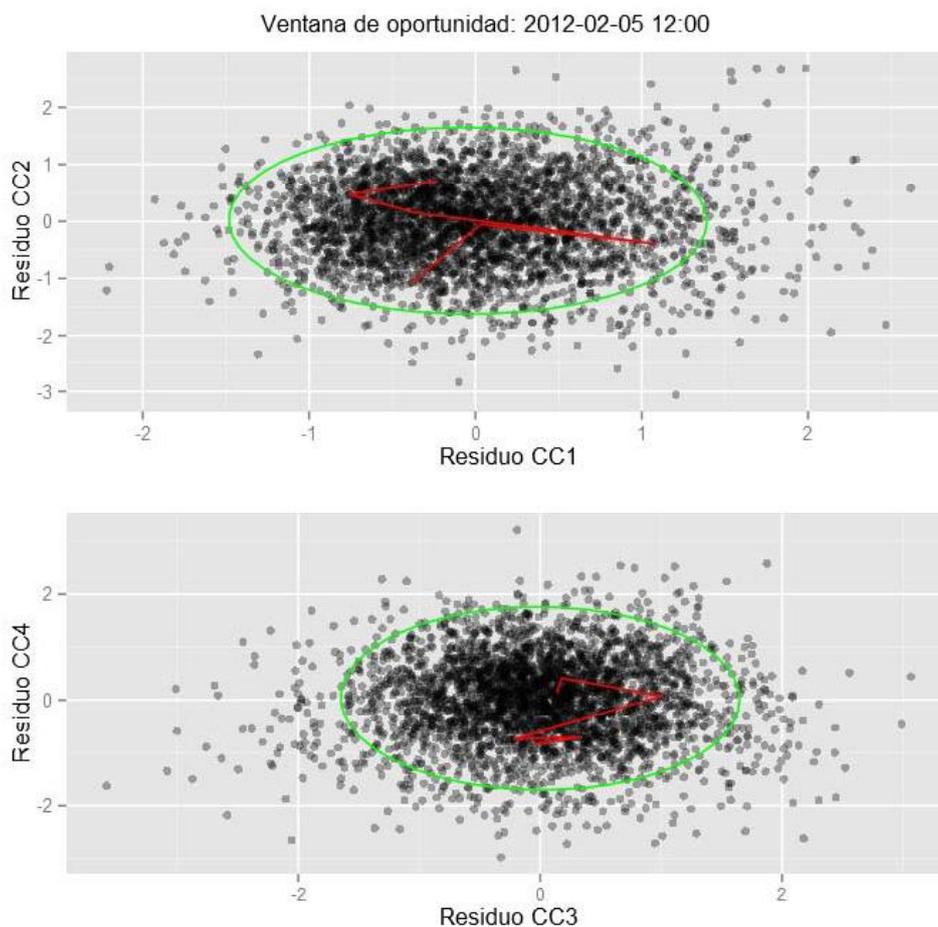


En las gráficas se indica, además, el valor del coeficiente de correlación entre las variables del par y la varianza explicada por cada una de ellas en el conjunto correspondiente.

Cada par canónico (U, V), donde U es la variable canónica procedente del campo *Hirlam* y V la variable canónica procedente de los pluviómetros, tiene asociada una regresión V sobre U. Esta regresión proporciona, para los casos de análisis, un conjunto de valores  $V^*$  que estiman el conjunto de valores de V con unos residuos  $V^*-V$ . Considerando un subconjunto de k correlaciones canónicas se obtiene un conjunto k-dimensional de residuos. Este conjunto constituye una muestra de la distribución de k residuos, que puede servir de base para hacer inferencias sobre el grado de alteración de un campo de precipitación observada como se explica a continuación.

En la Figura 9 se representa el espacio de residuos de las cuatro primeras correlaciones canónicas y, dentro de él, la trayectoria de las horas correspondientes a una ventana de oportunidad. Los puntos grises representan cada uno de los casos de análisis, y las líneas rojas unen los puntos correspondientes a las 6 horas de la ventana de oportunidad. La distancia al origen, en el espacio de residuos (normalizando en cada eje por la desviación típica correspondiente) se toma como medida de la “excentricidad” de un campo de precipitaciones, es decir, de cómo se separa de lo esperable en relación al campo *Hirlam* correspondiente.

**FIGURA 9. TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 18 (05-02-2012)**

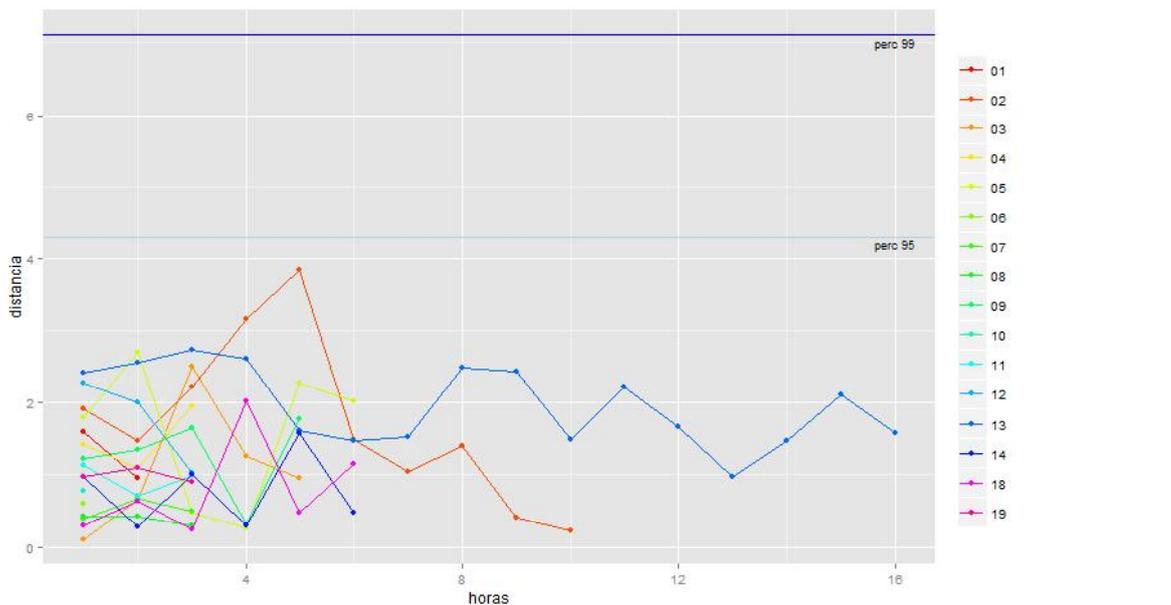


Los cuatro residuos canónicos correspondientes a un campo de precipitación se representan mediante dos puntos, uno en el gráfico superior (residuos de CC1 y CC2), y otro en el inferior (residuos de CC3 y CC4). Los puntos grises representan los 3169 casos de análisis y las líneas rojas unen los puntos correspondientes a la ventana de oportunidad, en el orden en que se suceden en el tiempo.

El conjunto de distancias al origen calculadas para todos los casos de prueba (todos los puntos grises de la Figura 9) permite formar una distribución empírica para dicha variable. Para un caso concreto de par sincrónico, precipitación en pluviómetros – campo *Hirlam*, la posición de la distancia correspondiente en esta distribución empírica permite atribuir un valor de significación estadística a la hipótesis nula: “el campo de precipitación no ha sido alterado”.

Se han calculado las distancias al origen en el espacio de residuos para todas las horas de las 16 ventanas de oportunidad retenidas para el análisis, que se han tomado como referencia para estudiar el comportamiento del estadístico propuesto. La Figura 10 muestra estas distancias en relación con los niveles correspondientes a los percentiles 95 y 99 de la distribución empírica. Se comprueba que ninguna de las horas de las ventanas de oportunidad supera el percentil 95 de la distribución empírica. Es decir, en ningún caso se podría rechazar la hipótesis nula con un nivel de significación de 0,05.

**FIGURA 10. DISTANCIAS EN EL ESPACIO DE RESIDUOS, HORA A HORA, PARA LAS VENTANAS DE OPORTUNIDAD**

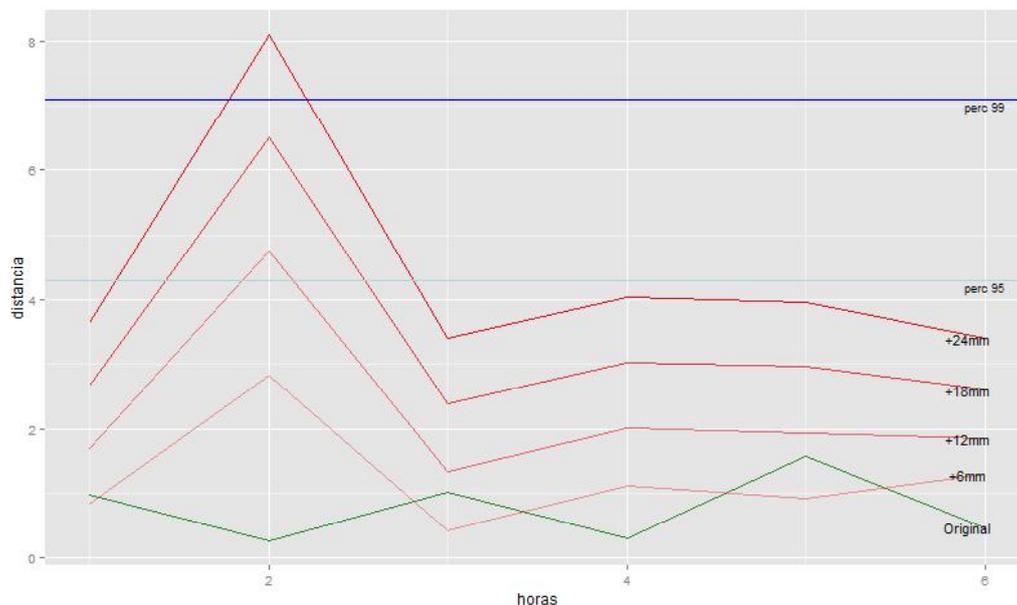


*Cada ventana de oportunidad está representada por una línea quebrada que arranca en la hora 1 y se prolonga hacia la derecha tantas horas como su duración.*

*La abscisa de cada punto es el número de orden de la hora que representa y la ordenada es la distancia al origen en el espacio de residuos. Las líneas horizontales señalan los percentiles 95 y 99 de la distribución empírica de distancias.*

Finalmente, se ha realizado una prueba de sensibilidad del estadístico de conformidad propuesto. Se ha tomado como referencia la ventana de oportunidad 14 (27/01/2012, horas 4 a 10), que está inserta en un episodio de precipitación poco abundante, distribuida predominantemente por las zonas altas de la Sierra. La prueba ha consistido en alterar arbitrariamente los campos de precipitación observados y recalcular las distancias en el espacio de residuos para comprobar hasta qué punto la alteración se manifiesta en el valor del estadístico. Se supone que la actuación de estimulación de nubes produce un incremento de precipitación en la cuenca alta del Lozoya, observable en los pluviómetros **p101**, **p102**, **p313**, **p314** y **p321**. Por simplicidad, el incremento de precipitación se reparte uniformemente en el tiempo y en el espacio. Los resultados, que se muestran en la Figura 11, muestran que alteraciones de cierta magnitud en el campo de precipitación observado son detectables por el estadístico propuesto.

**FIGURA 11. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SENSIBILIDAD A LA ALTERACIÓN DEL CAMPO DE PRECIPITACIONES DURANTE LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 14**



*La línea verde representa la secuencia de distancias, en el espacio de residuos, para los campos de precipitación observados. Las líneas rojas representan la misma secuencia para los campos de precipitación alterados (incremento de 6, 12, 18 y 24 milímetros, en 6 horas). Las líneas horizontales señalan los percentiles de distancia 95 y 99.*

El ensayo realizado con la ventana de oportunidad 14 sirve de guía para establecer una metodología de diagnóstico de una actuación de estimulación de nubes.

Los pasos a seguir serían los siguientes:

1. Recopilar los campos **Hirlam** correspondientes a las horas de la ventana de oportunidad en la que se ha actuado (o, más general, el conjunto de horas en que se supone que la estimulación de nubes puede tener efecto).
2. Recopilar las observaciones de precipitación horaria en los 37 pluviómetros estudiados y para las mismas horas.
3. Para la hora primera, con los valores de la precipitación **Hirlam** calcular las 4 primeras variables canónicas del lado "x",  $U_1, \dots, U_4$ .
4. Con las 4 primeras regresiones canónicas, calcular el valor estimado de las 4 primeras variables canónicas del lado "y",  $V_1^*, \dots, V_4^*$ .
5. Con los datos de precipitación observados, calcular el valor observado de las 4 primeras variables canónicas del lado "y",  $V_1, \dots, V_4$ .
6. Calcular los 4 residuos  $V_1 - V_1^*, \dots, V_4 - V_4^*$ . En el espacio de residuos, calcular la distancia al origen del punto correspondiente,  $d_1$  (normalizando con la desviación típica en cada dimensión).
7. Repetir los pasos 3 a 6 con las horas segunda y siguientes. Se obtienen las distancias en el espacio de residuos  $d_2, \dots, d_N$ .
8. Cotejar los valores de las distancias  $d_1, \dots, d_N$  con sus umbrales de significación del 5% o del 1%. En la medida en que una o más de las distancias  $d_1, \dots, d_N$  superen estos umbrales se podrá inferir que la actuación de estimulación de nubes ha afectado a la precipitación.

## CONCLUSIONES

El estudio ha proporcionado una caracterización general del régimen de precipitación en los pluviómetros del ámbito de estudio, en términos de frecuencia, duración e intensidad de los aguaceros y estacionalidad de estas características. La consideración de la cota de nieve ha permitido establecer la temporada de Noviembre a Abril, ambos inclusive, como "*temporada de nieve*" a efectos del estudio, e identificar las situaciones de nieve potencial en el histórico.

Se han explorado las relaciones espaciales entre pluviómetros mediante análisis **cluster** y las características espaciales de los campos de precipitación mediante análisis de componentes principales.

El análisis de correlaciones canónicas ha permitido obtener una descripción matemática detallada de la relación entre el campo de precipitaciones observadas en pluviómetros y el campo de predicciones **Hirlam**. En este sentido, la magnitud de los residuos de las correlaciones canónicas indica cuán conforme es un campo de precipitaciones observadas con el correspondiente campo **Hirlam**. Partiendo de esta idea se ha propuesto un estadístico para comprobar la hipótesis nula de que el campo de precipitación no está alterado y, mediante dicho estadístico, se ha desarrollado una metodología que permite diagnosticar si una actuación de estimulación de nubes ha tenido efecto.

## 2. Planteamiento y objetivos



## 2.1. PLANTEAMIENTO

Canal de Isabel II Gestión está desarrollando un proyecto de investigación encaminado a evaluar las posibilidades de la estimulación de nubes, para incrementar la precipitación, en forma de nieve, en las cuencas alimentadoras de los embalses del sistema Lozoya. El proyecto ha permitido identificar las condiciones meteorológicas en las que es prometedor realizar la estimulación y las técnicas de estimulación adecuadas en cada caso.

La siguiente fase del proyecto, pendiente de autorización administrativa, es la eventual prueba en casos reales. Un requisito previo para estas pruebas es una caracterización detallada del régimen de precipitaciones en las zonas potencialmente afectadas por el experimento. El presente estudio aborda dicha caracterización.

## 2.2. OBJETIVOS

La finalidad del estudio es proporcionar una caracterización del régimen de precipitaciones en la cuenca del Lozoya, que en caso de autorización, sería la zona objetivo de los ensayos de estimulación de nubes, y otras zonas limítrofes. La caracterización de las precipitaciones se orienta a generar el conocimiento necesario para investigar los efectos, si los hay, de los eventuales ensayos de estimulación de nubes. Estos efectos pueden manifestarse tanto en cantidad de precipitación como en su distribución espacial.

El ámbito espacial del estudio comprende la zona objeto de la estimulación de nubes, que es la cuenca del Lozoya, y las zonas adyacentes a la misma en las que dicha estimulación de nubes podría también alterar las precipitaciones. Con este criterio, el ámbito espacial queda constituido por:

- a) La cuenca del Lozoya.
- b) Hacia el Este, la cabecera del Jarama y las cuencas del Sorbe y del Bornova.
- c) Hacia el Norte, la vertiente opuesta de la Sierra de Guadarrama, al menos en las cabeceras de Eresma, Pirón, Cega y Duratón.
- d) Hacia el Suroeste, la parte alta de las cuencas de Manzanares y Guadarrama.

El estudio debe centrarse en las situaciones propicias para la precipitación en forma de nieve en las que es factible la estimulación de nubes. En estudios anteriores, estas situaciones, o "**ventanas de oportunidad**", se han identificado en un periodo histórico reciente (años hidrológicos 2010 a 2012). El ámbito temporal del estudio se centrará en las épocas del año en las que se pueden producir precipitaciones en forma de nieve y especialmente en las ventanas de oportunidad identificadas.

### 3. Datos del proyecto



### 3.1. DATOS PLUVIOMÉTRICOS

#### 3.1.1. Selección inicial

El estudio está enfocado a episodios de precipitación con duraciones relativamente cortas y en un ámbito espacial relativamente reducido. Los datos de precipitación necesarios para caracterizar las precipitaciones en este nivel deben ser de alta resolución temporal (al menos horaria) y proporcionar una buena cobertura espacial.

Se han identificado tres redes meteorológicas que pueden aportar datos con resolución temporal horaria, o superior, en el ámbito espacial del estudio:

- Pluviómetros propios de Canal de Isabel II Gestión, ubicados en las presas.
- Estaciones del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), de la Confederación Hidrográfica del Tajo, que ha cedido los datos para este estudio.
- Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), de la cual se han adquirido datos para 6 pluviómetros.

La Figura 12 muestra la distribución espacial del conjunto de las redes y 44 pluviómetros seleccionados inicialmente (13 de Canal Gestión, 25 de SAIH y 6 de AEMET).

La red del SAIH del Tajo permite mejorar la cobertura de la cuenca del Lozoya y, sobre todo, cubre la zona oriental del ámbito del estudio.

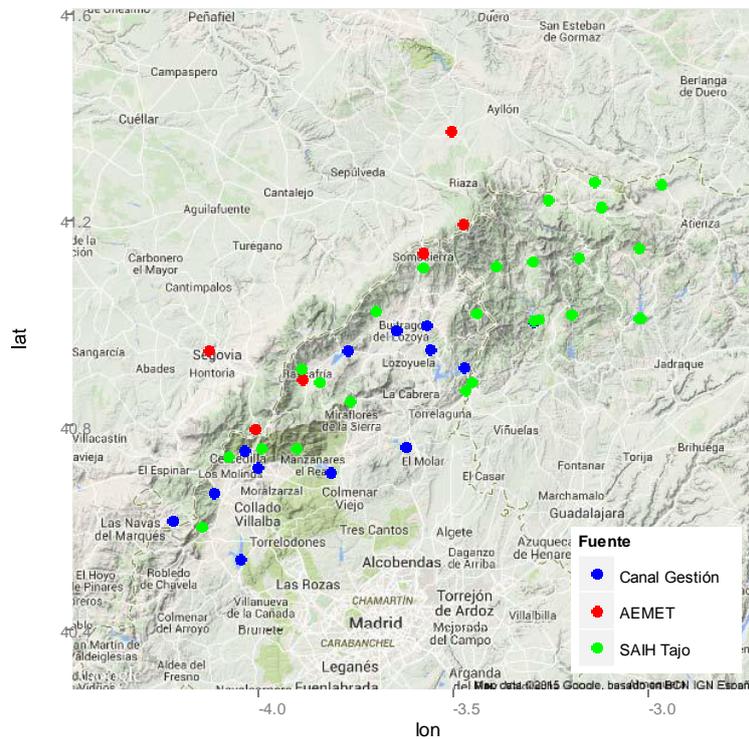
La red de AEMET es la única de las tres que proporciona datos en la parte vertiente al Duero, aunque la densidad espacial es muy baja<sup>1</sup>. Además, mejora la cobertura de las zonas altas de la Sierra.

El periodo de datos que se ha recopilado comprende todos los meses completos, desde el año hidrológico 2010-2011, hasta la fecha de inicio de los trabajos, es decir, desde el 1 de octubre de 2010, hasta el 31 de julio de 2014, ambos inclusive. Son un total de 1.400 días, que cubren casi cuatro años hidrológicos. El periodo incluye cuatro inviernos completos.

---

<sup>1</sup> La vertiente del Duero está bien cubierta por la red de pluviómetros del SAIH del Duero, pero ésta es muy reciente, y las series disponibles son demasiado cortas.

FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS TRES REDES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS



### 3.1.2. Preparación de los datos

Con las series de datos pluviométricos brutos se han realizado varias operaciones para facilitar el trabajo posterior:

#### Agregación horaria

Los datos de Canal Gestión y de AEMET son horarios, mientras que los datos de SAIH son 15-minutales (un dato cada cuarto de hora). Para unificar la resolución temporal de todas las series, los datos SAIH se han agregado para formar con ellos datos horarios.

Sólo se ha admitido la agregación cuando existen los cuatro datos 15-minutales de la hora. Si falta alguno de ellos, el dato horario también se ha considerado faltante.

Para nombrar las horas se ha seguido el criterio de datos de Canal Gestión: la marca de tiempo hh:59 designa la precipitación acumulada en la hora que comienza a las hh:00.

### Cambio a horario UTC

Los datos de AEMET están en horario UTC, pero los de las otras dos fuentes están en horario local. El horario local tiene el inconveniente de que cada año hay que manejar un día de 23 horas (en el cambio a horario de verano) y un día de 25 horas (el cambio a horario de invierno). Se ha preferido pasar todos los datos a horario UTC.

En los datos de Canal Gestión y de SAIH, los días de cambio a horario de verano tienen 23 horas como corresponde pero los días de cambio a horario de invierno están incompletos, con sólo 24 horas. En los datos de Canal Gestión los datos registrados corresponden a la primera vez que el reloj marca las 3. En los datos de SAIH, en cambio, los datos corresponden a la segunda vez que el reloj marca las 3. Para el estudio, las horas faltantes por cambio de hora se han rellenado interpolando entre el dato anterior y el posterior. Salvo en 2010, estas horas faltantes han coincidido con periodos sin precipitación y la interpolación es trivial.

### Revisión y tratamiento de datos anómalos

Todas las series de datos se han revisado de forma sistemática para intentar detectar datos anómalos que no se consideran válidos. Se han chequeado los siguientes aspectos:

- a. Valores individuales, demasiado altos.
- b. Secuencias de horas con precipitaciones demasiado largas.
- c. Secuencias de horas, con un valor repetido de precipitación, demasiado largas.

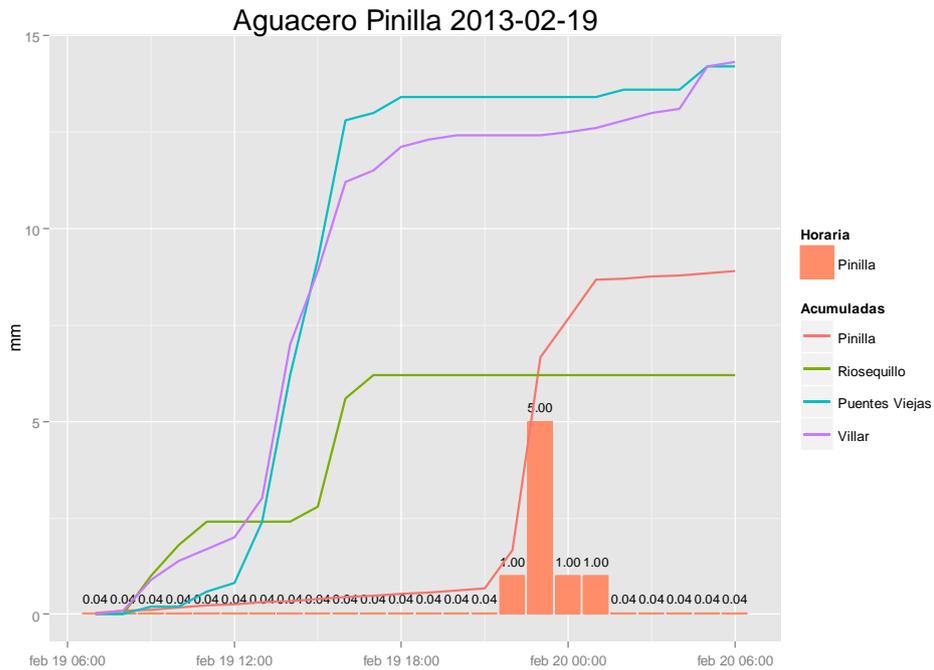
No se ha encontrado ningún caso en la categoría (a), y se ha identificado una secuencia en la categoría (b), y catorce en la categoría (c). En cada uno de estos casos los datos originales se han sustituido por estimas basadas en datos sincrónicos de pluviómetros próximos. La determinación de las estimas, a partir de pluviómetros próximos, sigue los siguientes criterios generales:

1. Si los pluviómetros cercanos no registran precipitación en esas horas, los valores estimados son también 0, (se ha dado en 6 de los 15 casos).
2. Si se registran precipitaciones en pluviómetros próximos, se toman uno, o varios, como referencia para formar una distribución horaria promedio que se aplica a la precipitación total acumulada en la secuencia anómala.

La estrategia (2) se apoya en que en todos los casos encontrados la precipitación acumulada total de la secuencia es un valor razonable, generalmente consistente con la de los pluviómetros cercanos, y en que las distribuciones horarias en los pluviómetros cercanos son similares entre sí.

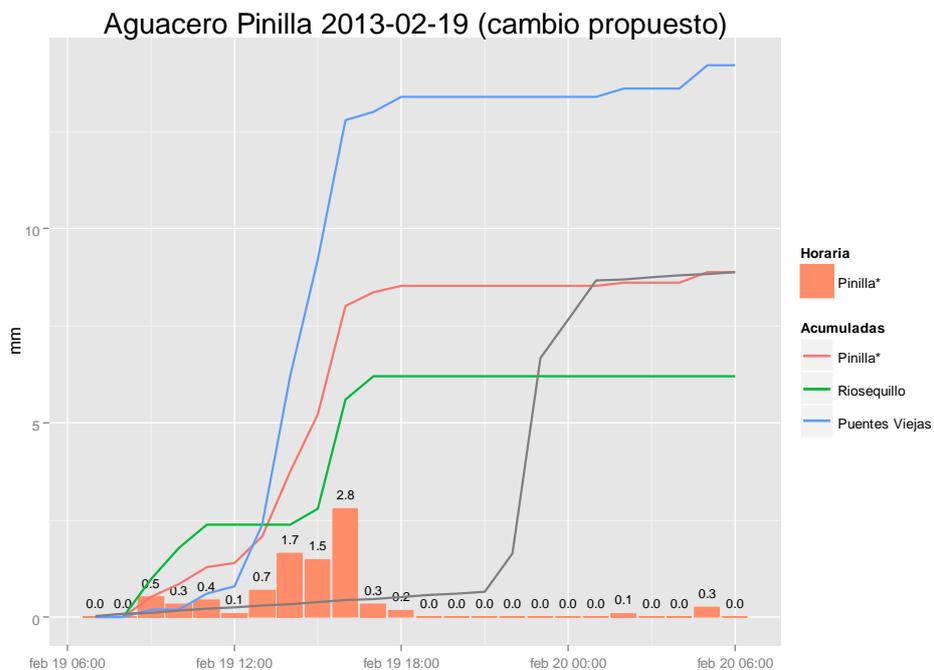
En las figuras 13 y 14 se puede ver un ejemplo de secuencia anómala sustituida por estimas.

FIGURA 13. AGUACERO ANÓMALO EN PINILLA (CANAL GESTIÓN)



Las secuencias de valores 0,04 mm tienen un aspecto demasiado artificial. Las horas donde se concentran las precipitaciones son discordantes con las de observatorios próximos.

FIGURA 14. MODIFICACIÓN EFECTUADA EN LOS DATOS DEL AGUACERO ANÓMALO EN PINILLA



La línea gris es la precipitación acumulada original. El hietograma propuesto acumula la misma precipitación total que el original y se distribuye según el promedio de los hietogramas de Riosequillo y Puentes Viejas.

Los cambios realizados se resumen en la Tabla 1. En conjunto, los datos sustituidos por estimas de esta manera suponen una fracción minúscula del total (menos del 0,05%).

**TABLA 1. ACCIONES DE SUSTITUCIÓN POR ESTIMAS EN SECUENCIAS ANÓMALAS DETECTADAS EN LAS SERIES DE DATOS**

<i>Punto</i>	<i>Intervalo de fechas</i>	<i>Problema</i>	<i>Acción</i>
Villar (Canal Gestión)	2010-12-20 21:59 a 2010-12-24 4:59	80 horas consecutivas con $P>0$ y aspecto artificial	Se adopta la distribución horaria promedio de Puentes Viejas y Atazar
Pinilla (Canal Gestión)	2011-03-10 5:59 a 2011-03-11 5:59	25 valores consecutivos de $P=0,22$	Sustituir por $P=0$ (no llueve en pluviómetros próximos)
Pinilla (Canal Gestión)	2013-02-19 6:59 a 2013-02-20 5:59	Aguacero de 24 horas de aspecto artificial, con 20 repeticiones de $P=0,04$	Se adopta la distribución horaria promedio de Riosequillo y Puentes Viejas
Valmayor (Canal Gestión)	2013-10-03 6:59 a 2013-10-04 4:59	23 horas consecutivas con $P=2$	Se adopta la distribución horaria promedio de La Jarosa y Navalmedio
La Aceña (Canal Gestión)	2013-03-04 19:59 a 2013-03-05 5:59	11 horas consecutivas con $P=3$	Se adopta la distribución horaria de La Jarosa
La Aceña (Canal Gestión)	2013-03-17 11:59 a 2013-03-18 2:59	14 repeticiones de $P=0.2$ con un dato $P=0,4$ y un dato $P=0$ intercalados	Se adopta la distribución horaria de La Jarosa
AC08 (SAIH)	2013-10-04 05:59 a 2013-10-07 04:59	72 repeticiones consecutivas de $P=1,6$	Sustituir por $P=0$ los datos a partir del 5º de la serie (coincide con $P=0$ en AR16)
AC10 (SAIH)	2013-02-11 10:59 a 2013-02-11 21:59	12 repeticiones consecutivas de $P=2,4$	Sustituir por $P=0$ (no llueve en pluviómetros próximos)
E_10 (SAIH)	2012-07-25 20:59 a 2012-07-26 06:59	11 repeticiones consecutivas de $P=3,2$	Sustitución parcial por $P=0$ (referencia en pluviómetros cercanos)
PN20 (SAIH)	2014-03-01 09:59 a 2014-03-03 05:59	57 repeticiones consecutivas de $P=0,8$	Se adopta la distribución de aguacero de $P_{19}$
PN22 (SAIH)	2013-03-17 00:59 a 2013-03-19 04:59	51 repeticiones consecutivas de $P=0,8$	Se toma como referencia 3111D de AEMET
PN28 (SAIH)	2013-07-21 15:59 a 2013-07-23 08:59	41 repeticiones casi consecutivas de $P=8,8$	Se sustituye por el promedio de $P_{27}$ y Navalmedio
P_14 (SAIH)	2013-05-17 21:59 a 2013-05-20 03:59	55 repeticiones consecutivas de $P=1,6$	Se sustituye por el promedio de AC09, PN15 y $P_{18}$
P_27 (SAIH)	2013-02-11 10:59 a 2013-02-11 21:59	12 repeticiones consecutivas de $P=2,4$	Sustituir por $P=0$ (no llueve en pluviómetros próximos)
P_31 (SAIH)	2013-02-11 10:59 a 2013-02-11 21:59	12 repeticiones consecutivas de $P=3,2$	Sustituir por $P=0$ (no llueve en pluviómetros próximos)

### 3.1.3. Selección definitiva

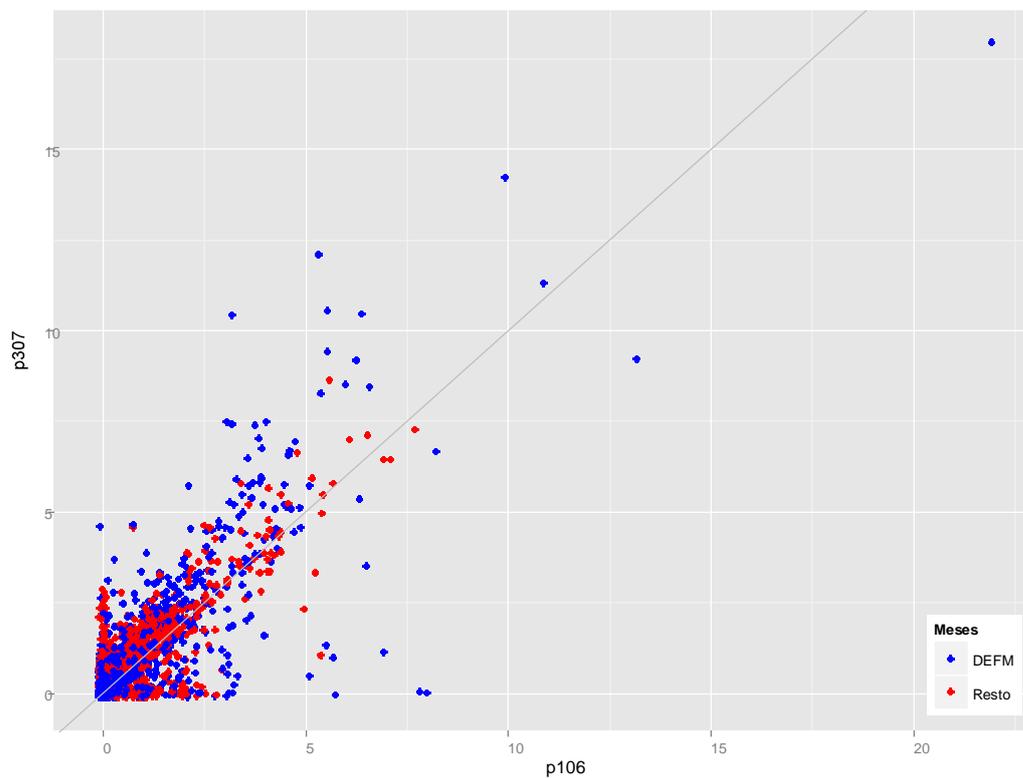
En una segunda fase del tratamiento de la información se han examinado las series de datos pluviométricos con la vista puesta en el conjunto. Esto ha conducido a descartar algunos de los pluviómetros seleccionados inicialmente, por los criterios que se describen a continuación.

#### Comparación de pluviómetros próximos

Hay varios casos de pluviómetros muy próximos que aconsejan simplificar la lista, prescindiendo de alguno de ellos. En cada caso se ha comprobado que existe una correlación razonable entre los dos puntos y se ha optado siempre por el que tiene datos más completos. Cuando ha sido viable, las lagunas de datos en el pluviómetro retenido se han completado con datos del pluviómetro descartado.

Las figuras 15 y 16 muestran ejemplos de las comparaciones entre series que se han realizado.

**FIGURA 15. RELACIÓN ENTRE DATOS HORARIOS DE CANAL GESTIÓN, EL VADO (P106) Y SAIH E\_13 (P307)**



*Se diferencia entre datos del cuatrimestre Diciembre a Marzo (puntos azules), y del resto de meses (puntos rojos). Ambos pluviómetros están instalados en la presa de El Vado. El de SAIH se ha descartado del análisis por tener datos menos completos.*

**FIGURA 16. COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MENSUALES EN LOS PLUVIÓMETROS DE CANAL GESTIÓN, EL VADO (P106) Y SAIH E\_13 (P307)**



*Ambos pluviómetros están instalados en la presa de El Vado. El del SAIH se ha descartado del análisis por tener datos menos completos.*

Los pluviómetros de los que se ha prescindido, por proximidad a otros, son los que se relacionan a continuación.

- SAIH E\_09 (Alcorlo), por proximidad a SAIH AC09 (Riegos Bornova) y datos menos completos (además, se rellenan 7 datos faltantes de AC09, con datos de E\_09).
- SAIH E\_13 (El Vado), por proximidad a Canal Gestión El Vado y datos menos completos.
- SAIH AC10 (Sorbe-Jarama), por proximidad a Canal Gestión El Vado y datos menos completos.
- SAIH AC08 (Canal de El Atazar), por proximidad a SAIH AR16 (Jarama en Valdepeñas), y datos menos completos.
- AEMET 3111D (Somosierra), por datos muy incompletos y relativa proximidad a SAIH PN22 (Robregordo).
- AEMET 3104Y (Rascafría, El Paular), por proximidad a SAIH PN23 (Depósitos La Dehesa), y datos incompletos.

### Series muy incompletas

Con la excepción de los datos faltantes en los días de cambio de hora de octubre, los datos de Canal Gestión están completos y los datos SAIH casi completos (menos de 0,1% de datos faltantes).

Los datos de AEMET vienen en registros diarios con 24 datos cada uno y todos los registros suministrados están completos. Sin embargo, en ningún observatorio se dispone del total de 1.400 registros diarios correspondientes al periodo de datos. En la Tabla 2 se indica para cada observatorio el número de registros suministrado y el porcentaje que representa respecto del total.

**TABLA 2. PORCENTAJE DE DATOS COMPLETOS EN LOS PLUVIÓMETROS DE AEMET**

<i>Indicativo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Nº de registros</i>	<i>%</i>
2135A	FRESNO DE CANTESPINO	1.234	88,1%
2150H	LA PINILLA, ESTACIÓN DE ESQUÍ	1.166	83,3%
2462	NAVACERRADA, PUERTO	1.223	87,4%
2465	SEGOVIA	1.397	99,8%
3104Y	RASCAFRÍA, EL PAULAR	1.240	88,6%
3111D	SOMOSIERRA	1.062	75,9%

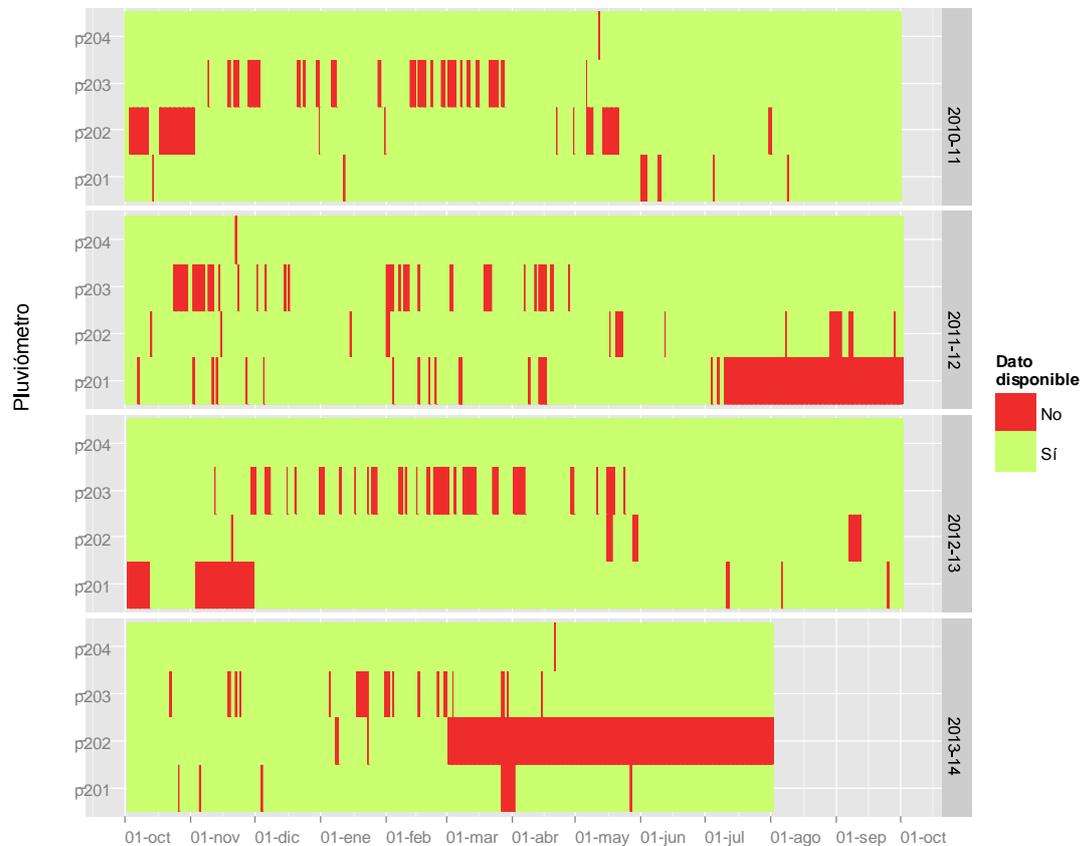
*Porcentaje de datos completos en los pluviómetros de AEMET, la serie completa constaría de 1.400 registros diarios*

Dos de las series de AEMET, 3104Y y 3111D, ya se han descartado a favor de las de otros pluviómetros próximos.

La Figura 17 muestra la disponibilidad de datos de los cuatro observatorios de AEMET que aún no se han descartado. Se observa que:

- 2135A (Fresno de Cantiespino) tiene periodos largos sin datos en julio, agosto, septiembre y noviembre de 2012, y partes importantes de octubre 2012 y abril 2013. En el resto tiene lagunas dispersas. Así pues, la mayor parte de los datos de invierno están completos. Se ha mantenido este observatorio en el análisis.
- 2150H (La Pinilla, Estación de Esquí) tiene periodos largos sin datos en octubre y noviembre de 2010, mayo y junio de 2011, y a partir de marzo de 2014. En la temporada de invierno presenta lagunas ocasionales. Se ha mantenido este observatorio en el análisis.
- 2462 (Navacerrada, Puerto) presenta muchas lagunas en la época invernal, que es la que más interesa al estudio. Por otra parte, no está lejos de otros observatorios (aunque todos en la vertiente del Tajo). Se ha descartado este pluviómetro en el análisis.
- 2465 (Segovia), como se ha dicho, está prácticamente completo y se ha mantenido en el análisis.

**FIGURA 17. DISPONIBILIDAD DE DATOS EN LOS PLUVIÓMETROS AEMET 2135A (P201), 2150H (P202), 2462 (P203) Y 2465 (P204)**

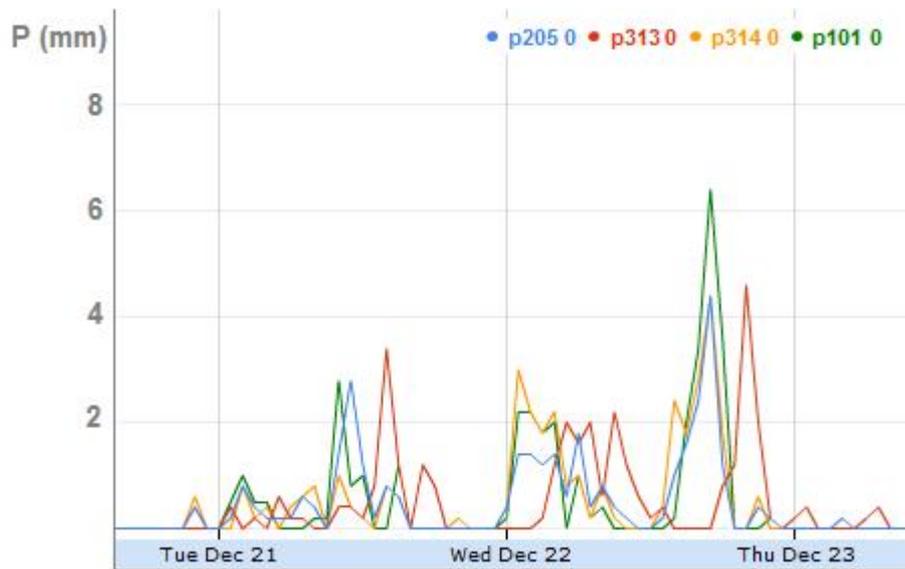


*Con excepción del último pluviómetro 2465 (P204), los otros tres presentan lagunas de datos frecuentes y extensas*

#### Filtrado manual posterior

El trabajo con los datos posterior a este análisis ha permitido identificar algunas anomalías adicionales a las que se ha dado un tratamiento específico en cada caso:

- **SAIH P\_27 Cruz Roja**, 16 horas a partir de 2014-05-19, 16:59: precipitaciones elevadas entre las que destacan 8 horas consecutivas con 36 mm/h, y que totalizan 454,6 mm en 16 horas. Este aguacero es completamente inverosímil. Se han sustituido estos datos por el promedio entre Canal Gestión Santillana y SAIH P\_13, próximos y relativamente bien correlacionados.
- **SAIH PN23**, en varios aguaceros de diciembre de 2010, febrero de 2011 y marzo de 2011 los datos parecen retrasados respecto de otros pluviómetros próximos (ver Figura 18). No se ha hecho ningún cambio en estos datos.

**FIGURA 18. SERIE PARCIAL DE PRECIPITACIONES HORARIAS DE SAIH-PN23 Y PRÓXIMOS**

Serie parcial de precipitaciones horarias de SAIH PN23 (p313, línea roja), y tres pluviómetros próximos de AEMET 3104Y Rascafría-El Paular (p205, línea azul), SAIH PN24 (p314, línea amarilla) y Canal Gestión Pinilla (p101, línea verde). Varios días de diciembre de 2010. Los datos de PN23 parecen retrasados 3 horas.

#### Selección definitiva

Después de descartar algunos pluviómetros por tener series muy poco completas, o por redundancia con otros, se llega a un conjunto definitivo de 37 pluviómetros:

- 💧 13 de Canal Gestión,
- 💧 3 de AEMET, y
- 💧 21 de SAIH Tajo.

Para facilitar el trabajo se ha asignado a los pluviómetros una codificación unificada:

#### **p + número de tres cifras**

Los pluviómetros de Canal Gestión se numeran a partir del 101, los de AEMET a partir de 201, y los pluviómetros de SAIH a partir de 301.

La Tabla 3 recoge la selección final de pluviómetros, con indicación de las lagunas de datos y los datos sustituidos por estimas en cada uno.

En la Figura 19 se muestra la ubicación de los pluviómetros en un mapa.

**TABLA 3. RELACIÓN DE PLUVIÓMETROS DE LA SELECCIÓN DEFINITIVA**

Código	Fuente	Descripción	Código externo	UTM30 X	UTM30 Y	Z	Lagunas	Estimas
p101	Canal Gestión	Pinilla	E001CPL042	434945	4533163	1089	0	53
p102	Canal Gestión	Riosequillo	E002CPL090	445585	4537456	1010	0	4
p103	Canal Gestión	Puentes Viejas	E003CPL052	452051	4538356	956	0	4
p104	Canal Gestión	Villar	E004CPL031	452718	4533297	904	0	86
p105	Canal Gestión	Atazar	E005CPL030	460232	4529291	870	0	4
p106	Canal Gestión	Vado	E006CPL050	475185	4539154	923	0	4
p107	Canal Gestión	Pedrezuela	E007CPL050	447348	4512130	828	0	4
p108	Canal Gestión	Navacerrada	E034CPL022	415202	4507792	1156	0	4
p109	Canal Gestión	Santillana	E008CPL020	431085	4506683	894	0	4
p110	Canal Gestión	Navalmedio	E035CPL030	412355	4511641	1289	0	4
p111	Canal Gestión	Jarosa	E036CPL021	405643	4502372	1087	0	4
p112	Canal Gestión	Valmayor	E031CPL010	411447	4487967	831	0	27
p113	Canal Gestión	Aceña	E037CPL020	396781	4496675	1316	0	15
p201	AEMET	Fresno de Cantiespino	2135A	457583	4580264	993	3984	0
p202	AEMET	La Pinilla, estación esquí	2150H	460145	4560174	1860	5614	0
p204	AEMET	Segovia	2465	405190	4533293	1005	72	0
p302	SAIH Tajo	Riegos Bornova	AC09	498150	4539775	913	24	11
p304	SAIH Tajo	Jarama en Valdepeñas	AR16	460450	4524175	694	24	4
p306	SAIH Tajo	Pozo de los Ramos	E_10	483246	4540625	902	45	15
p308	SAIH Tajo	Condemios de Arriba	PN15	489750	4563700	1363	24	4
p309	SAIH Tajo	Campisábalos	PN16	488200	4569300	1366	29	4
p310	SAIH Tajo	Cantalojas	PN17	478400	4565350	1320	24	4
p311	SAIH Tajo	Cabida	PN20	467050	4551200	1352	24	50
p312	SAIH Tajo	Robregordo	PN22	451450	4550850	1428	24	22
p313	SAIH Tajo	Depósitos la Dehesa	PN23	425100	4529200	1218	24	4
p314	SAIH Tajo	Albergue	PN24	429000	4526300	1372	24	4
p315	SAIH Tajo	La Barranca	PN28	416150	4512050	1396	24	49
p316	SAIH Tajo	Miedes de Atienza	P_13	502600	4568700	1166	24	4
p317	SAIH Tajo	Gascueña de Bornova	P_14	498000	4554900	1244	24	60
p318	SAIH Tajo	Umbralejo	P_18	485000	4552850	1251	24	4
p319	SAIH Tajo	Majaelrayo	P_19	475000	4552200	1224	24	4
p320	SAIH Tajo	Puebla de la Sierra	P_21	462900	4541000	1184	24	4
p321	SAIH Tajo	Navamojada	P_25	441050	4541500	1196	24	4
p322	SAIH Tajo	Olla del Quinón	P_26	435400	4522050	1279	24	4
p323	SAIH Tajo	Cruz Roja	P_27	423801	4512050	1072	24	32
p324	SAIH Tajo	Cercedilla	P_30	409100	4510200	1242	29	4
p325	SAIH Tajo	Prado Doctor	P_31	403150	4495050	1135	24	17



## 3.2. OTROS DATOS

### 3.2.1. Precipitación *Hirlam* AEMET

El sistema *Hirlam* (High Resolution Limited Area Model) es un modelo de predicción numérica de área limitada, desarrollado a lo largo de varios años por un consorcio internacional de agencias meteorológicas en el que participa AEMET<sup>2</sup>.

La AEMET, a su vez, opera tres implementaciones del sistema en su versión **A**, en sendos dominios: un área euroatlántica, con 0,16º de resolución horizontal; y dos más, centradas en la Península Ibérica y Canarias, de 0,05º de resolución.

Los resultados de estos modelos se incluyen en el catálogo de productos de predicción que distribuye AEMET<sup>3</sup>.

Para este estudio se han utilizado los campos de predicción horaria de precipitación del modelo *Hirlam* 0,05 de AEMET, para la Península Ibérica. Las características operativas de este modelo que determinan las características de los datos son:

- 💧 Ámbito espacial: Península Ibérica y Baleares.
- 💧 Resolución espacial: 0,05º geográficos (aproximadamente 5 km de paso de malla).
- 💧 Resolución temporal: horaria.
- 💧 Alcance: 36 horas.
- 💧 Frecuencia de refresco: 4 pasadas diarias (00UTC, 06UTC, 12UTC y 18UTC).

Se han recopilado los campos de predicción de precipitación *Hirlam* 0,05, sobre la Península Ibérica, de los 12 primeros alcances horarios de las pasadas 00UTC y 12UTC, desde la de 2010-10-01 00UTC, hasta la de 2014-07-31 12UTC. De estos campos se ha recortado la ventana comprendida entre longitudes 4,225W y 2,975W y latitudes 40,525N y 41,375N (17 filas y 25 columnas), que incluye el ámbito geográfico del estudio, según refleja la Figura 20.

Este conjunto constituye, por tanto, una serie completa de campos de precipitación horaria durante todo el ámbito temporal del estudio. La precipitación es predicha, no observada, pero siempre con alcance no superior a 12 horas. En esos alcances cortos los modelos como *Hirlam* presentan una precisión bastante buena. Por otra parte, por su naturaleza, el campo de precipitación *Hirlam* integra la configuración meteorológica general, en relación con la precipitación, tal como las ve el modelo.

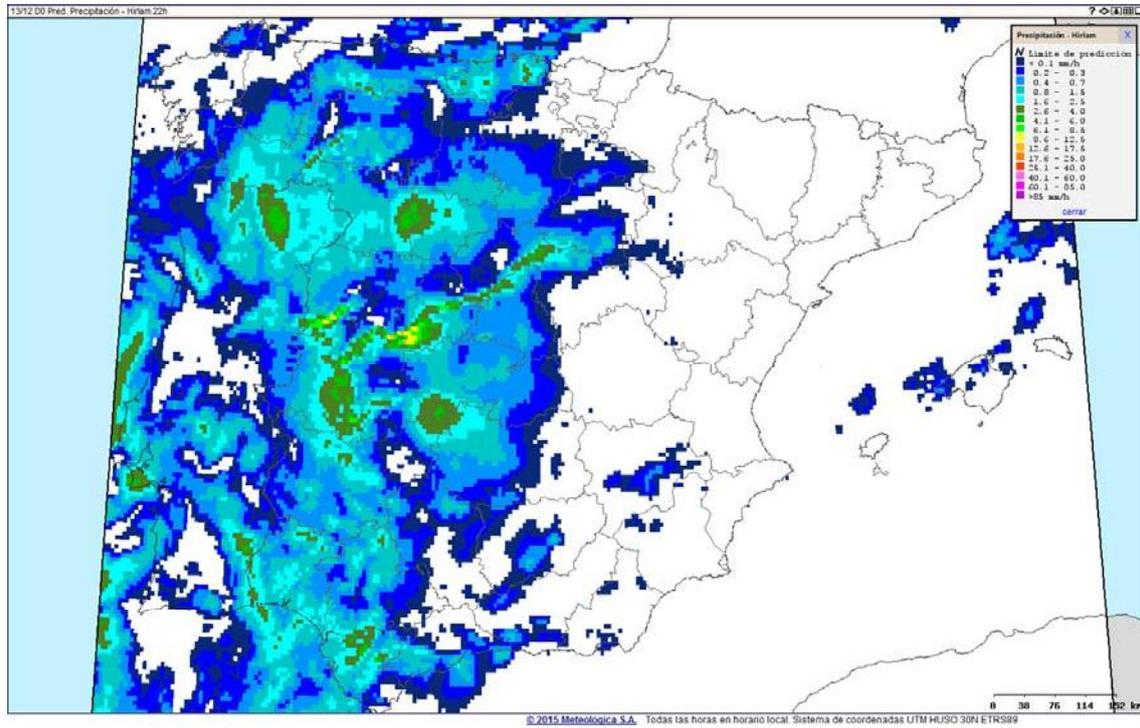
AEMET distribuye los datos del modelo *Hirlam* en formato GRIB. Para su manejo se han transformado a formato GeoTIFF.

---

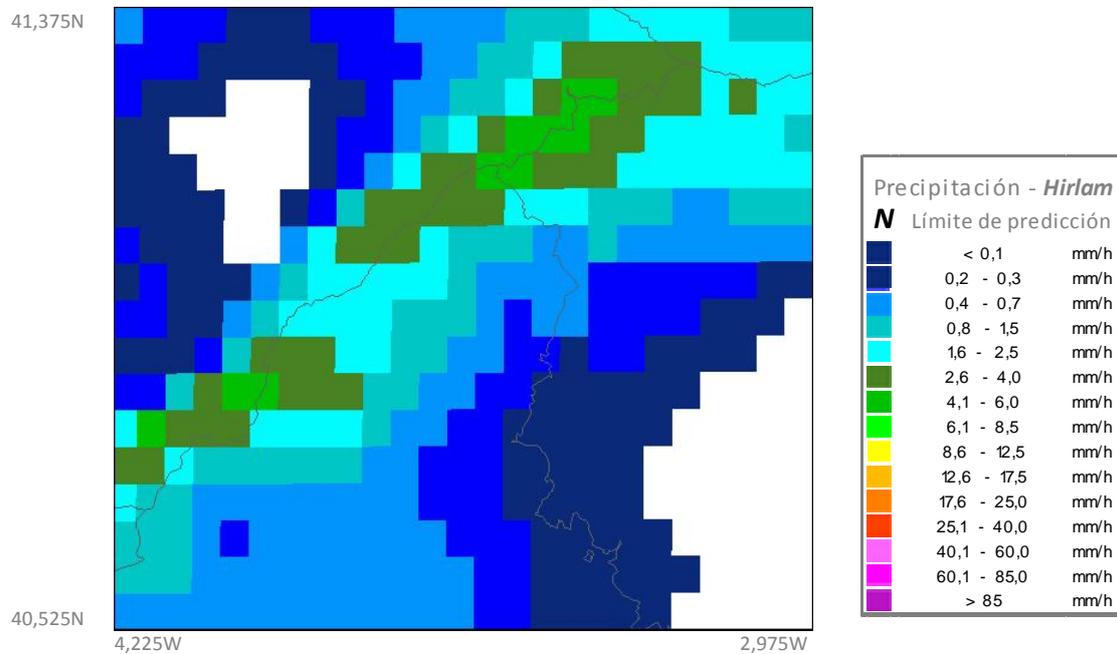
<sup>2</sup> El consorcio *Hirlam* lo componen los servicios meteorológicos nacionales de Dinamarca, Estonia, España, Finlandia, Holanda, Irlanda, Islandia, Lituania, Noruega y Suecia. Météo-France mantiene acuerdos de cooperación científica con el consorcio.

<sup>3</sup> En estas dos direcciones de internet se puede obtener información sobre las características generales del sistema *Hirlam* y de las implementaciones que opera AEMET:  
<http://www.hirlam.org/index.php/hirlam-programme-53/general-model-description/synoptic-scale-hirlam>  
[http://www.aemet.es/es/idi/prediccion/prediccion\\_numerica](http://www.aemet.es/es/idi/prediccion/prediccion_numerica)

FIGURA 20. EJEMPLO DE CAMPO DE PRECIPITACIÓN HORARIA HIRLAM 0,05 PENÍNSULA IBÉRICA



(a)



(b)

Ejemplo de campo de precipitación horaria Hirlam 0,05 Península Ibérica: 2014-12-13 21UTC (pasada 2014-12-13 00UTC). Ventana completa (a). Ventana seleccionada para el estudio (b).

### 3.2.2. Cota de nieve

Para discriminar entre precipitación en forma de lluvia y precipitación en forma de nieve se ha utilizado el concepto “*cota de nieve*”, que se define como la altitud mínima a partir de la cual las precipitaciones son en forma de nieve.

Cuando en un lugar y tiempo dados la cota de nieve es inferior a la cota del terreno, las precipitaciones que se produzcan serán en forma de nieve. La cota de nieve varía en el tiempo, y de un lugar a otro, dependiendo de las condiciones atmosféricas.

Una aproximación tradicional para discriminar entre precipitación en forma de lluvia, o en forma de nieve, en entornos de predicción es recurrir a valores de espesor entre determinados niveles isobáricos (Esteban et al. 2011, Svoma 2011, Hepner 1992). En esta línea, MeteoLógica tiene implementado operativamente un método propio de determinación de la cota de nieve mediante una relación de primer orden con el espesor entre 1.000 y 850 hPa:

$$z_N = a + b \cdot (z_{850} - z_{1000})$$

Donde  $Z_N$  es la cota de nieve (m),  $Z_{850}$  y  $Z_{1000}$  son los niveles de presión de 850 hPa y 1.000 hPa respectivamente (m) y  $a$  (m) y  $b$  (adimensional) son dos parámetros, que en su día fueron determinados empíricamente.

Mediante la anterior relación empírica, MeteoLógica produce diariamente mapas horarios de predicción de cota de nieve a la resolución de trabajo de *Hirlam* 0,05, para 36 horas de alcance a partir de los campos de niveles de presión de 1.000 y 850 hPa del modelo HRES del ECMWF.

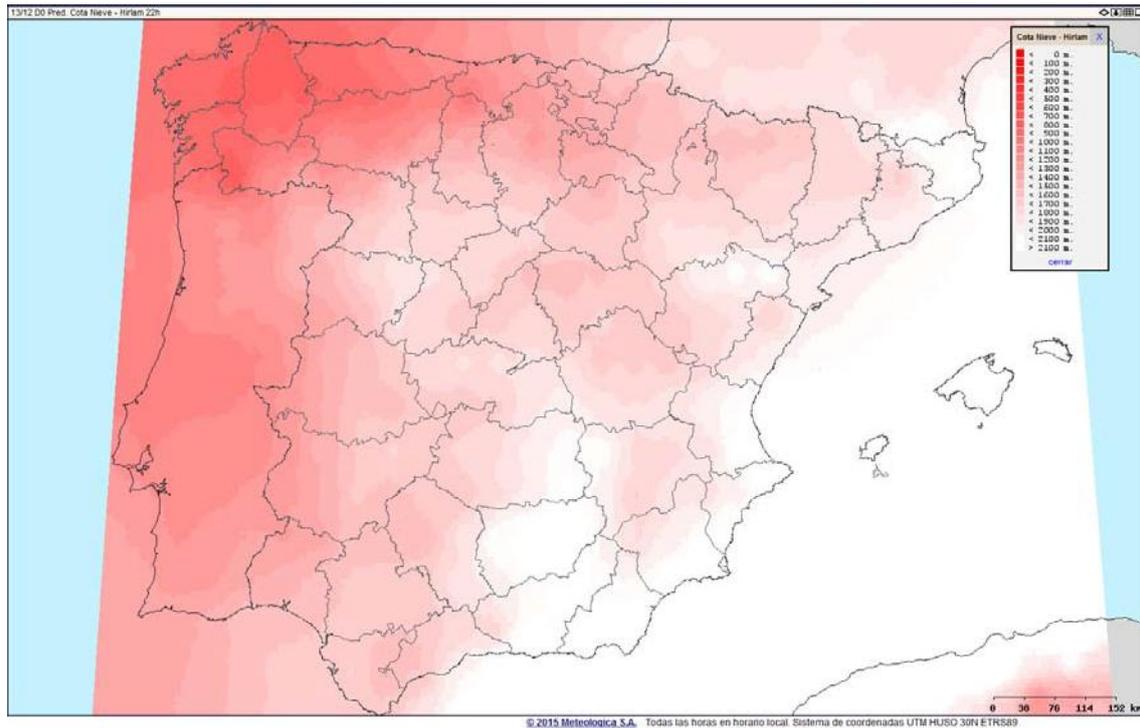
Los campos de niveles de presión de HRES se llevan a la resolución espacial y temporal necesarias mediante interpolación bilineal y lineal respectivamente. La Figura 21 muestra un ejemplo de mapa del campo de cota de nieve producido por esta metodología.

Los campos de cota de nieve se cruzan con el modelo digital del terreno que utiliza *Hirlam* para determinar en cada celda la forma de precipitación correspondiente. Esta información, a su vez, se superpone a la precipitación *Hirlam* sincrónica para clasificar la precipitación predicha en lluvia o nieve. La Figura 22 muestra un ejemplo de mapa de predicción de nieve elaborado de esta manera.

Para este estudio se han recopilado los campos de *cota de nieve* elaborados por MeteoLógica coincidentes en alcance, pasada, y periodo de tiempo, con los campos de precipitación *Hirlam* descritos en el epígrafe anterior 3.2.1, así como el MDT de *Hirlam*.

La combinación de un campo de *cota de nieve* con el MDT permitirá discriminar entre lluvia, o nieve, de la misma manera que en la predicción operativa de MeteoLógica.

FIGURA 21. MAPA DE PREDICCIÓN DE COTA DE NIEVE PARA 2014-12-13 21UTC



Las cotas de nieve rondan los 1.650 m en la Sierra de Guadarrama, y los 1.580 m en la Sierra de Ayllón, indicando la posibilidad de nevada en zonas altas.

FIGURA 22. MAPA DE PREDICCIÓN DE NIEVE HIRLAM PARA 2014-12-13 21UTC



Mapa de predicción de nieve *Hirlam* para 2014-12-13 21UTC, es decir, sincrónico con los de las figuras 20 y 21. Se predice nieve en las celdas en las que coincide predicción de precipitación >0 y cota de nieve por debajo de la cota del MDT *Hirlam*.

### 3.2.3. Ventanas de oportunidad

En las investigaciones realizadas por Canal de Isabel II Gestión se han determinado los criterios que permiten identificar, *a priori*, las situaciones atmosféricas en las cuales se espera que la siembra de nubes proporcione un incremento adecuado de precipitación en forma de nieve. Los intervalos de tiempo en los que se cumplen estos criterios se han denominado "**ventanas de oportunidad**".

El sistema completo de identificación y detección de la ventana de oportunidades se divide en dos bloques: uno de predicción y otro de medida en tiempo real.

La predicción es integrada con el seguimiento, en tiempo real, de las condiciones atmosféricas mediante un radiómetro instalado en el Valle del Lozoya.

Los requisitos considerados *favorables* para el incremento de las precipitaciones, mediante la estimulación de nubes incluyen:

- Predicción de precipitación en forma de nieve, con dirección del viento noroeste, u oeste, durante al menos tres horas consecutivas, en cotas superiores a 1.500 metros de altitud.
- Contenido de agua líquida en la columna de aire (LWP) igual o superior a  $0,1 \text{ kg/m}^2$  (mm), al menos el 80% del tiempo de la hora anterior, y superior a  $0,5 \text{ kg/m}^2$  (mm) durante, al menos, el 20% de la hora anterior.
- Espesor de las nubes comprendido entre 2.000 y 6.000 metros durante, al menos, el 80% de la hora anterior.
- Base de las nubes situada por debajo de los 2.000 m (al menos el 80% de la hora anterior), de manera que ésta se encuentre cercana a las cumbres de las montañas garantizando así la liberación del material de siembra en el interior de la nube.

En las investigaciones previas, Canal de Isabel II Gestión ha identificado las **ventanas de oportunidad** de las campañas 2010-11 y 2011-12, las cuales se recogen en la Tabla 4.

**TABLA 4. VENTANAS DE OPORTUNIDAD DE LAS CAMPAÑAS 2010-2011 Y 2011-2012**

<i>Ventana de oportunidades 2010-2011</i>		<i>Ventana de oportunidades 2011-2012</i>	
<i>Fecha</i>	<i>Posibilidades de Siembra (Intervalo de siembra)</i>	<i>Fecha</i>	<i>Posibilidades de Siembra (Intervalo de siembra)</i>
30/11/2010	16:00 - 18:00	16/01/2012	00:00 - 07:00
01/12/2010	04:00 - 14:00	27/01/2012	04:00 - 10:00
02/12/2010	11:00 - 14:00 y 22:00 - 23:00	01/02/2012	16:00 - 19:00
05/12/2010	06:00 - 12:00 y 22:00 - 24:00	02/02/2012	17:00 - 22:00
20/12/2010	21:00 - 24:00	04/02/2012	14:00 - 19:00
23/12/2010	18:00 - 24:00	05/02/2012	12:00 - 18:00
27/01/2011	19:00 - 24:00	07/02/2012	00:00 - 03:00
28/01/2011	09:00 - 10:00		
13/02/2011	15:00 - 18:00		
15/02/2011	00:00 - 00:03		
16/02/2011	15:00 - 18:00		
04/03/2011	06:00 - 22:00		
05/03/2011	00:00 - 00:04		

## 4. Métodos



Para el análisis se han empleado diversas herramientas gráficas y estadísticas, especialmente de estadística multivariante.

En los apartados que siguen se explica cada una de estas metodologías, indicando la finalidad específica para la que se ha utilizado en el estudio, se detallan los criterios metodológicos con que se han aplicado y se comentan las herramientas de software que se han utilizado en cada caso.

#### 4.1. DEFINICIÓN DE AGUACERO EN LA SERIE DE UN PLUVIÓMETRO INDIVIDUAL

Para la caracterización general de precipitaciones en un pluviómetro se ha procedido a separar en las series los episodios de precipitación o “*aguaceros*”, definidos como una secuencia de datos horarios  $P > 0$  consecutivos, precedida y seguida por, al menos, un dato  $P = 0$ .

El criterio de separación entre *aguaceros* es, naturalmente, arbitrario y se corresponde con el intervalo mínimo de trabajo, sin menoscabo de que dentro de una misma hora la precipitación puede ser intermitente.

Para estos *aguaceros* se ha definido un conjunto de características según los criterios que se indican:

- a) **Mes:** para facilitar la caracterización de la estacionalidad del régimen de precipitaciones, cada aguacero se asigna a un mes. Se toma, arbitrariamente, el mes correspondiente a la primera hora del aguacero.
- b) **Duración (h):** es el número de horas que componen el *aguacero*. Esta es la referencia de duración que proporcionan los datos horarios; si bien no es estrictamente la duración del intervalo en que ha estado lloviendo, al margen de que la precipitación pueda ser intermitente dentro de cada hora, el instante inicial y el final de la precipitación no se corresponden necesariamente con el inicio y el final de la primera hora y la última del aguacero, respectivamente.
- c) **Intensidad media (mm/h):** cociente entre la precipitación acumulada total del *aguacero* y su duración.
- d) **Intensidad máxima (mm/h):** valor máximo en la secuencia de precipitaciones horarias del aguacero. De nuevo, no se corresponde con la intensidad máxima instantánea, o la que podría evaluarse en datos con mayor resolución temporal.

## 4.2. VISUALIZACIÓN DE CAMPOS DE PRECIPITACIÓN

Además de los análisis estadísticos aplicados a los datos, se ha considerado útil disponer de una herramienta que permita visualizar los campos de las variables relevantes de una forma ágil. Para ello se ha desarrollado una aplicación web basada en **shiny** de **RStudio** (versión 0.8.0, shiny.rstudio.com).

La aplicación permite ver, hora a hora sobre un mapa, las precipitaciones en los pluviómetros y los campos de precipitación **Hirlam**. Es una herramienta de carácter complementario en el análisis, que se ha utilizado como apoyo visual en el estudio de la distribución espacial de las precipitaciones (observadas y predichas por **Hirlam**) y su evolución temporal durante los episodios de precipitación.

La aplicación muestra una ventana de visor donde se presentan sobre un mapa y de forma conjunta la siguiente información para una hora determinada:

- Observaciones de precipitación, y
- Predicciones de precipitación **Hirlam**, con indicación de si son en forma de *agua* o de *nieve* (en función de la cota de nieve y la cota del terreno).

Además, dos controles permiten navegar por las distintas fechas y horas del histórico.

En la Figura 23 se muestra una pantalla de la aplicación.

Los mapas compuestos que muestra la aplicación constan de los siguientes elementos:

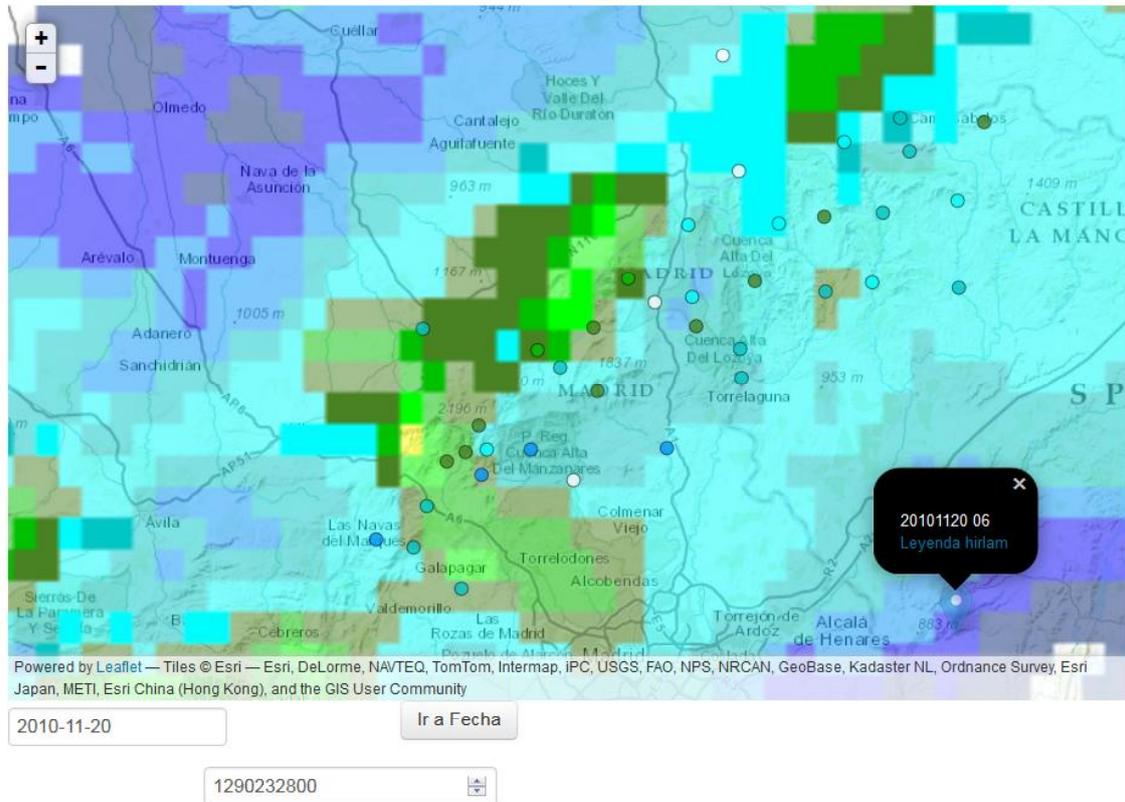
- a) Base cartográfica dinámica de **Leaflet** (leaflet.com).
- b) Campo de precipitación **Hirlam**, con coloración especial para diferenciar la precipitación en forma de nieve.

Se han utilizado funciones **GDAL** (www.gdal.org) para formar las imágenes en formato **png**, a partir de los campos **Hirlam**, los de cota de nieve y el modelo digital del terreno de **Hirlam**.

- b) Capa de puntos correspondientes a los pluviómetros, coloreados según el valor de precipitación observada. Se ha utilizado el paquete **Rcharts** de **R** para representarlos.
- d) Un marcador que indica la fecha y hora del mapa, y da acceso a la leyenda

FIGURA 23. PANTALLA DE LA APLICACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE CAMPOS DE PRECIPITACIÓN

## Visor de aguaceros



Pantalla de la aplicación de visualización de campos de precipitación (observada y *Hirlam*). Se muestra la hora 06 de 2010-11-20.

En la figura anterior, los círculos son los observatorios de precipitación, y se colorean según el valor de precipitación de esa hora, de acuerdo con la leyenda de colores (el blanco significa precipitación = 0, y el color negro ausencia de datos).

La malla coloreada es el campo de precipitación *Hirlam*, coloreado según la misma leyenda. En las celdas en las que la *cota de nieve* está por debajo de la cota del terreno, el color se muestra, tal cual, (indicando precipitación en forma de nieve); y, en el resto de celdas, se muestra atenuado (indicando precipitación en forma de lluvia).

Debajo de la imagen un control permite seleccionar una fecha, y otro más, avanzar o retroceder hora a hora.

### Leyenda de colores para la precipitación en el visor de campos de precipitación

N Límite de predicción	
	< 0,1 mm/h
	0,2 - 0,3 mm/h
	0,4 - 0,7 mm/h
	0,8 - 1,5 mm/h
	1,6 - 2,5 mm/h
	2,6 - 4,0 mm/h
	4,1 - 6,0 mm/h
	6,1 - 8,5 mm/h
	8,6 - 12,5 mm/h
	12,6 - 17,5 mm/h
	17,6 - 25,0 mm/h
	25,1 - 40,0 mm/h
	40,1 - 60,0 mm/h
	60,1 - 85,0 mm/h
	> 85 mm/h

### 4.3. TRANSFORMACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

La distribución de los datos de precipitación para un punto es naturalmente sesgada hacia la derecha. Este sesgo es tanto más pronunciado cuanto menor sea la resolución temporal, y se ve acentuado por la presencia, muy frecuente, de datos = 0.

En estas condiciones, el concepto de varianza tiene un valor limitado y las técnicas de análisis estadístico basadas en la varianza, como el análisis de componentes principales, tienen una validez menos clara.

Una de las formas de tratar este inconveniente es aplicar una transformación tendente a reducir el sesgo positivo de la distribución original. Este tipo de transformaciones, además de adecuar las características estadísticas de los datos, también suele servir a un objetivo más genérico, es decir, en muchas aplicaciones la relación entre la magnitud de la precipitación y la relevancia de su efecto es convexa (la diferencia entre una precipitación de 20 mm, y una de 25 mm, puede significar menos que la diferencia entre una precipitación de 1 mm, y una de 6 mm, aun cuando el valor numérico de dicha diferencia sea de 5 mm, en ambos casos). De cualquier manera, la presencia masiva de datos = 0 no se solventa con una transformación, y se tendrá que tratar de otra manera.

Se han considerado varias transformaciones posibles:

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| a. Normalización              | $z = F_N^{-1}(F_E(x))$  |
| b. Transformación logarítmica | $z = \log(1 + x)$   |
| c. Transformación Box-Cox     | $z = \begin{cases} \frac{(1+x)^\lambda - 1}{\lambda} & \text{para } \lambda \neq 0 \\ \log(1 + x) & \text{para } \lambda = 0 \end{cases}$ |

En donde  $x$  es el valor original,  $z$  es el valor transformado,  $F_N$  es la función de distribución normal estándar,  $F_E$  es una función de distribución empírica,  $\lambda$  es un parámetro y  $\log$  es el logaritmo natural.

Las transformaciones: logarítmica (b), y Box-Cox (c), son una versión adaptada para admitir el valor  $0$ , y transformarlo en  $0$ , se aplica la transformación original a  $x+1$  en lugar de a  $x$ .

La transformación de Box-Cox es, como se puede apreciar inmediatamente, una generalización de la transformación logarítmica y exige la determinación de un parámetro. Se ha comprobado que la transformación logarítmica proporciona resultados muy "normales" (ver Figura 25), por lo que se ha descartado la transformación Box-Cox.

La normalización (a) no transforma  $x = 0$  en  $z = 0$ . Esto, se podría solventar añadiendo un desplazamiento:

$$-F_N^{-1}(F_E(0))$$

Pero en cualquier caso, la transformación logarítmica resulta mucho más sencilla, no es dependiente de la distribución empírica particular de cada observatorio, y se ha comprobado que proporciona resultados satisfactorios. Por estos motivos se prefiere también la transformación logarítmica a la normalización.

La transformación logarítmica adoptada se representa en la Figura 24.

Un ejemplo del resultado que produce se puede ver en los gráficos cuantil-cuantil de la Figura 25, que se refieren al pluviómetro p101 (Canal Gestión Pinilla): los datos transformados se asemejan mucho a una distribución normal truncada en  $z = 0$ .

Se ha comprobado que el efecto es parecido en los demás pluviómetros.

**FIGURA 24. TRANSFORMACIÓN LOG (1+X)**

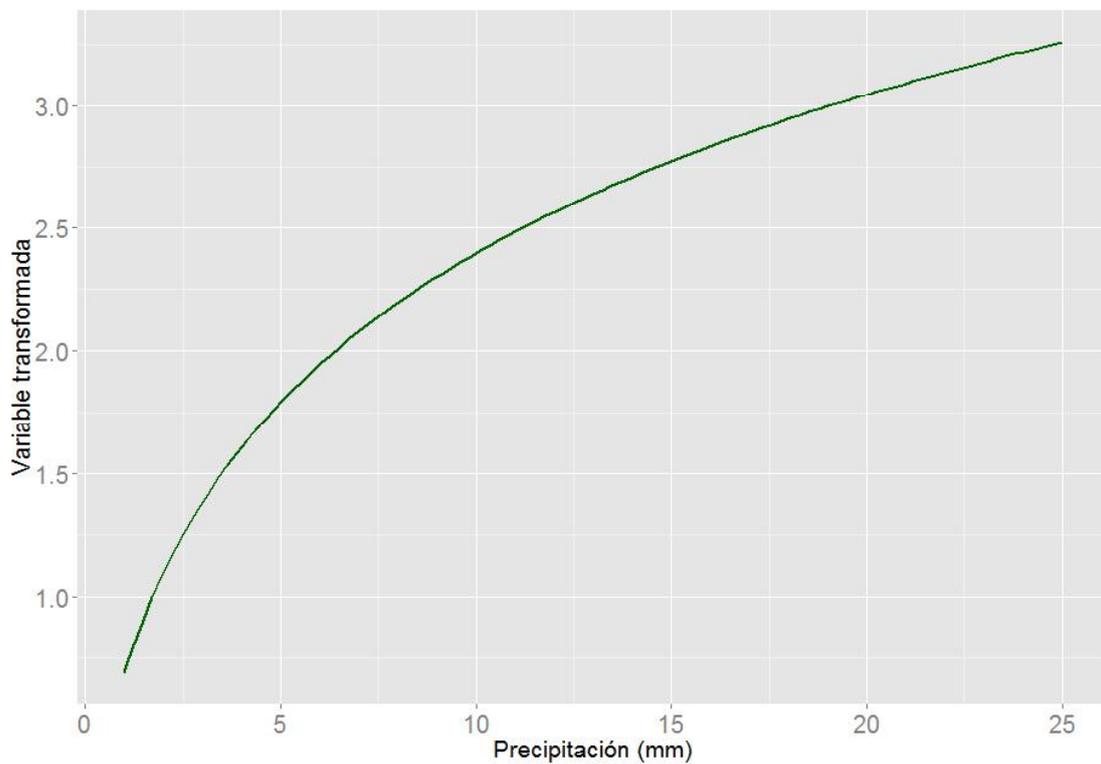
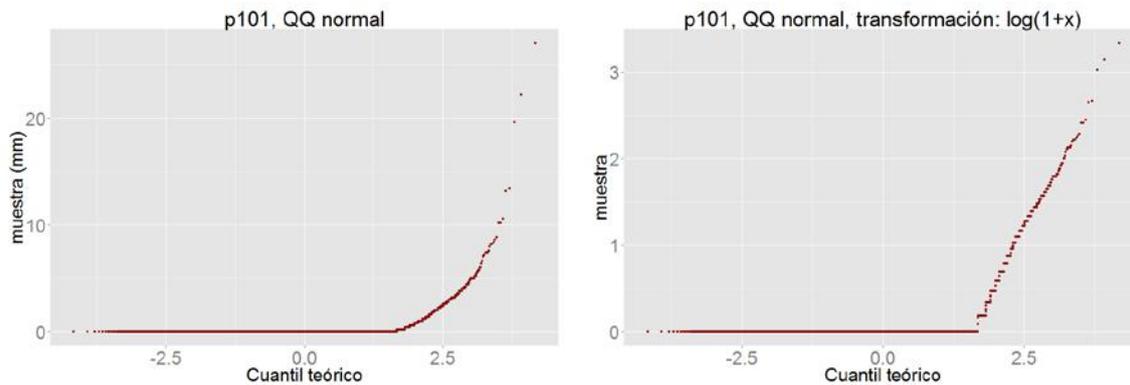


FIGURA 25. EJEMPLO DE COMPROBACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN LOG (1+X)



Gráficos cuantil-cuantil normal de los datos horarios de precipitación de p101 (Canal Gestión-Pinilla), sin transformar (izquierda) y transformados mediante  $\log(1+x)$  a la derecha. En esta representación, las distribuciones normales son rectas. Se comprueba que la transformación aproxima los datos a una normal truncada en 0.

Formalmente, la transformación logarítmica exigiría un parámetro de escala, para eliminar la dimensión del argumento del logaritmo. Si añadimos este parámetro, la transformación quedaría así:

$$z = \log\left(1 + \frac{x}{b}\right)$$

Donde **b** es el parámetro de escala y lleva las mismas unidades que los datos. Se han probado varios valores de **b** con esta transformación logarítmica “enriquecida”, y por lo general, no proporcionan un mejor comportamiento que el de la transformación original, que implícitamente supone **b** = 1mm.

La aplicación de transformaciones logarítmicas a datos de precipitación de alta resolución temporal (diarios, horarios) es habitual. Se han encontrado en la literatura ejemplos con diferentes criterios para tratar los valores **0** y para establecer el valor del parámetro de escala (Benzi et al. 1997, Romero et al. 1999, Hyndman and Grundwald 2000). La transformación que se propone en este estudio:

$$z = \log(1+x)$$

Esta transformación, forma parte del esquema general propuesto por Yeo y Johnson para generalizar la transformación de Box-Cox, para datos no estrictamente positivos (Yeo & Johnson 2000, Weisberg 2001).

#### 4.4. ANALISIS CLUSTER

El análisis *cluster*, análisis de conglomerados o **CA** (por sus siglas en inglés, *cluster analysis*) comprende un conjunto de técnicas de estadística multivariante, encaminadas a separar los individuos de un conjunto en grupos, tratando de maximizar la homogeneidad interna de los grupos y la heterogeneidad entre grupos. A diferencia de otras técnicas de clasificación como el análisis discriminante, las clases no están determinadas de antemano.

La estratificación que resulta de la aplicación del análisis es una clasificación empírica que puede mostrar patrones de agrupamiento que, de otro modo podrían pasar desapercibidos, o que pueden sugerir una base física para estructuras observadas en los datos.

En este trabajo se ha utilizado **CA** para formar grupos homogéneos de pluviómetros que faciliten la caracterización de precipitaciones puntuales.

Se ha utilizado agrupamiento jerárquico por el método de la mínima varianza de Ward (Ward, 1963), que es una de las técnicas de **CA** más extendidas.

Las técnicas de **CA** jerárquico parten del conjunto de **N** elementos, considerando que está dividido en **N** grupos de un único elemento cada uno. Entonces buscan los dos elementos más parecidos entre sí y los agrupan: en este estadio se tienen **N-1** grupos, de los cuales 1 tiene 2 elementos, y el resto 1.

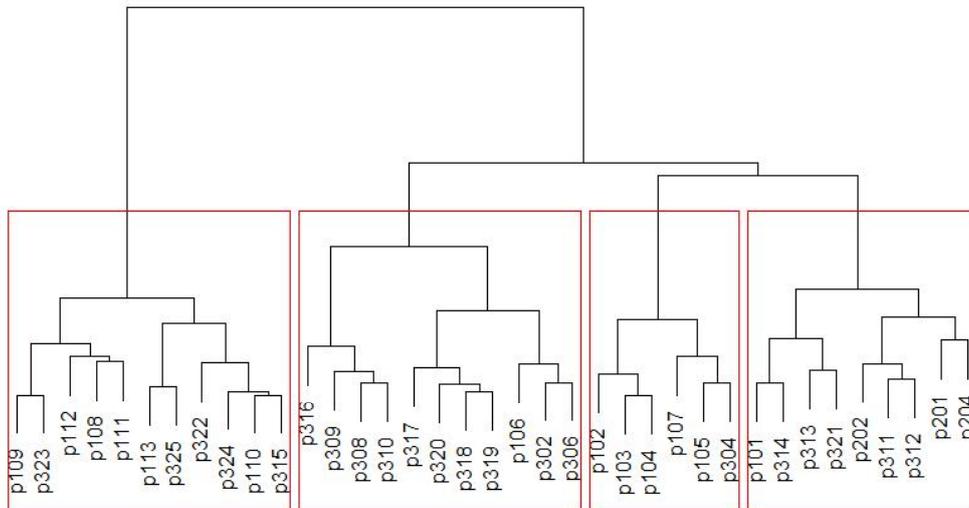
En pasos subsiguientes se procede igual, es decir, se identifica el par de grupos más parecidos y se agrupan en uno solo. El proceso concluye tras **N-1** pasos con un único grupo que contiene todos los elementos. Cada uno de los pasos define un posible agrupamiento con **N**, **N-1**, ..., 1 grupos.

En el método de mínima varianza de Ward, el criterio para elegir qué par de grupos se unen en cada paso es el siguiente: a partir de un agrupamiento de **k+1** grupos, de todos los agrupamientos de **k** grupos que se pueden formar, juntando dos de los grupos, se elige el que minimiza la suma de distancias euclídeas, elevadas al cuadrado, de cada elemento al centroide de su grupo.

El centroide del grupo es el promedio de los miembros del grupo.

En la Figura 26 se muestra un dendrograma que representa un ejemplo de *análisis cluster* jerárquico, aplicado a los 37 pluviómetros del estudio. Cada elemento del conjunto es la serie de precipitaciones horarias de un pluviómetro. La altura de las bifurcaciones representa el orden en que se han efectuado los emparejamientos: el primer emparejamiento es el más bajo y el último es el más alto. A posteriori se ha decidido adoptar la agrupación de 4 grupos, que son los que se señalan con las cajas rojas.

Para **CA** se ha utilizado la función "*hclust*" del paquete "*stats de R (v3.1.2)*" con la opción, `method="ward.D2"`, pasándole la matriz de distancias que proporciona la función "*dist*" (paquete *stats*). Los datos de precipitación horaria se transforman, según la transformación logarítmica descrita en el apartado 4.3, y la serie resultante de cada pluviómetro se escala por la desviación típica de la serie para homogeneizarlas, en relación con la magnitud general de las precipitaciones.

**FIGURA 26. DENDROGRAMA DE UN ANÁLISIS CLUSTER SOBRE EL CONJUNTO DE PLUVIÓMETROS**

Ejemplo de dendrograma de un **análisis cluster** sobre el conjunto de pluviómetros, con selección posterior de la solución con 4 grupos (las cajas rojas). La altura de cada bifurcación indica la jerarquía del agrupamiento, de manera que si, por ejemplo, la solución con 5 grupos implica dividir el grupo 2 en {p316, p309, p308 y p310}, por un lado, y {p317, p320, p318, p319, p106, p302 y p306}, por otro.

#### 4.5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

El análisis de componentes principales, o **PCA** (*Principal Component Analysis*), es una de las técnicas de estadística multivariante más comúnmente utilizadas en análisis de variables meteorológicas<sup>4</sup>.

La idea central de la técnica consiste en reducir la dimensión de un conjunto de datos, compuesto de muchas variables interrelacionadas, procurando retener el máximo posible de la variabilidad presente en el conjunto original, con la esperanza de que la fracción de variabilidad retenida represente, de una forma más simple, las características relevantes del comportamiento de los datos. Esta reducción de la dimensión del problema se logra mediante una transformación lineal de las variables originales en otras: las “*componentes principales*”.

De una manera sucinta, las *componentes principales* son los autovectores de la matriz de varianzas-covarianzas de los datos.

Cada componente principal representa una dirección en el espacio **N-dimensional** de las variables originales, que es ortogonal a las demás.

<sup>4</sup> Wilks 2011, p.519.

Las *componentes principales* determinan un cambio de coordenadas en ese espacio **N-dimensional**, las variables originales se sustituyen por las proyecciones de los datos en cada una de las componentes principales. La clave reside en que estas nuevas variables exhiben las siguientes propiedades:

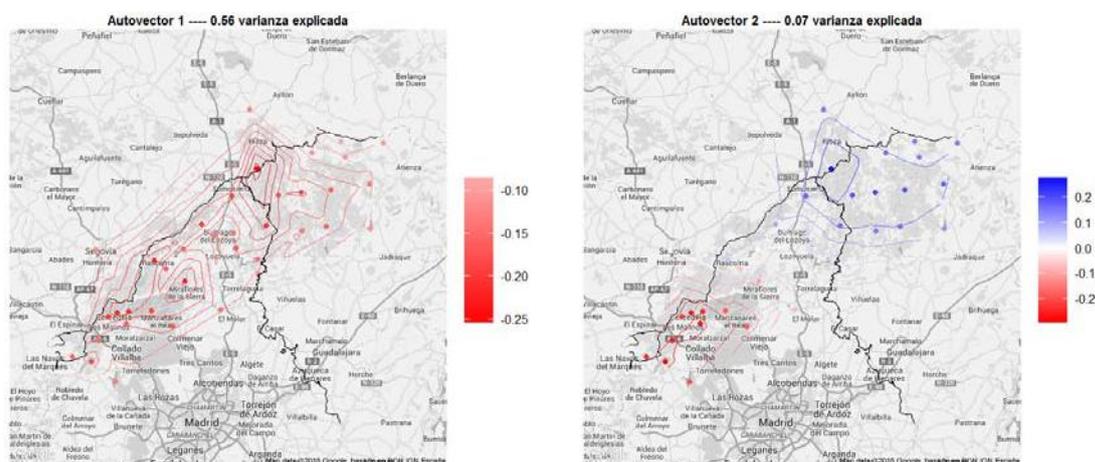
- a. No tienen correlación entre sí.
- b. Están ordenadas de mayor a menor varianza explicada. La primera componente principal acumula el máximo de la varianza original que se puede proyectar en una sola dirección, la segunda acumula el máximo de la varianza restante que se puede proyectar en una dirección perpendicular a la anterior, etc.

Típicamente se selecciona un subconjunto de las primeras **k < N** componentes principales, para representar lo esencial del comportamiento de los datos (en cierto modo la fracción de varianza que no es retenida por estas **k** primeras **CP** se descarta como “ruido”). Evidentemente, la posibilidad de explicar la parte interesante de la variabilidad de los datos mediante un conjunto de **CP**, significativamente menor que el de variables, existe cuando dichas variables presentan correlaciones entre ellas, es decir, comparten parte de su variabilidad. Hay diversos criterios para orientar la elección de **k**, pero se trata siempre de una cuestión específica del problema y sujeta a apreciación subjetiva.

La reducción del problema a un conjunto menor de variables, incorreladas entre sí, no sólo sirve para facilitar el tratamiento del problema. La formación de las componentes principales explota las relaciones internas entre las variables originales, de modo que el **PCA** permite explorar las relaciones entre las variables del problema.

En el caso de este estudio, los datos son series temporales de precipitación en pluviómetros o en puntos de rejilla, y el **PCA** se utiliza para intentar identificar y caracterizar patrones espacio-temporales de precipitación. Los patrones espaciales, por ejemplo, se pueden poner de manifiesto representando, sobre un mapa, los autovectores de las primeras componentes principales así se ilustra en la Figura 27.

**FIGURA 27. REPRESENTACION ESPACIAL DE COMPONENTES PRINCIPALES PCA SOBRE LOS DATOS DE LOS PLUVIÓMETROS, PARA EL PERIODO NOVIEMBRE-ABRIL**



*Ejemplo de representación espacial de componentes principales. PCA realizado sobre los datos de los pluviómetros para el periodo noviembre-abril. La escala de color indica el valor de la coordenada del autovector en cada pluviómetro, o bien el coeficiente de la combinación lineal que transforma los datos en pluviómetros en el valor de la componente principal.*

En ocasiones, cuando la interpretación física prima sobre el objetivo de reducir la dimensión del problema, puede ser deseable rotar el conjunto de las **k CP** seleccionadas.

La idea general es la siguiente, una vez seleccionado el subespacio de **k < N** dimensiones, que acumula la variabilidad relevante de los datos, se pueden relajar los criterios que definen las **CP**, para aproximarse a lo que se conoce como “estructura simple<sup>5</sup>”, esto es, cada una de las variables originales está explicada en un número, tan reducido, como sea posible de componentes, y cada componente explica la variabilidad de un grupo de variables originales tan reducido como sea posible. En este estudio se ha ensayado la rotación de **CP** mediante la estrategia **VARIMAX**, que es una de las más ampliamente utilizadas.

La utilización de **PCA** en la caracterización de precipitaciones está bastante extendida, en el nivel diario y horario<sup>6</sup>.

Para la aplicación de **PCA** a los datos del estudio se ha utilizado la función **prcomp()** del paquete **stats** (versión 3.1.2) de R, con las opciones **scale=FALSE** y **center=FALSE**.

La opción **center=FALSE** implica que los datos no se centran, respecto de su media, antes de calcular las componentes principales, como es propio en la aplicación de esta técnica. De hecho, la propiedad (**a.**) sólo se cumple estrictamente para variables centradas en **0**. Sin embargo, se ha preferido esta opción por razones de interpretabilidad, así, por construcción, los casos de **P = 0** en todos los pluviómetros se transforman en valor **0** para todas las componentes principales.

Además, aunque la no correlación de las componentes principales (ver propiedad **a.** anterior) no es crucial para los objetivos del análisis, se ha comprobado que se cumple con mucha aproximación para las componentes principales, no centradas, calculadas para los pluviómetros.

La rotación **VARIMAX** ha sido realizada mediante la función **VARIMAX()** del mismo paquete de **R**, aplicada sobre el objeto devuelto por **PRCOMP()**.

Se han implementado varias funciones a medida en **R** que hacen uso de **PRCOMP()** y **VARIMAX()** con los datos del estudio, para permitir evaluar de forma flexible diversos supuestos de selección previa de un subconjunto de los datos (por ejemplo, sólo datos de horas con precipitación, datos de una época del año determinada, etc.).

La presencia muy frecuente de datos **0** puede propiciar resultados anómalos del **PCA**. Para precipitaciones diarias en una región amplia del Este y Sur de la Península Ibérica, Romero et al. 1999 incluye sólo los días con, al menos un 5% de estaciones con registros superiores a 5 mm.

Para precipitaciones diarias en Cerdeña, (Benzi et al. 1997) selecciona los días con al menos un 70% de estaciones con registros superiores a 1mm.

---

<sup>5</sup> Wilks 2011, p. 548

<sup>6</sup> Benzi et al. 1997; K. Windmann & Schaär 1997; Romero et al. 1999; ACA y CRAHI-UPC 2010; Raziei et al. 2012

En este estudio se han seleccionado las horas en las que, al menos, 4 pluviómetros (>10%) registran precipitación >0.

Aunque no son directamente comparables (por la resolución temporal de los datos, por la extensión del ámbito de estudio y por la longitud de los históricos), el criterio adoptado aquí parece menos estricto que los citados. El criterio adoptado está condicionado, en parte, por la necesidad de retener un número suficiente de casos para el análisis (el criterio lo cumplen 3.442 horas del periodo noviembre-abril en el histórico utilizado).

#### 4.6. ANALISIS DE CORRELACIONES CANÓNICAS

El análisis de correlaciones canónicas (**CCA** por sus siglas en inglés) permite investigar las relaciones entre dos conjuntos de datos multivariantes, identificando pares de nuevas variables, que maximizan las correlaciones entre los dos conjuntos. Como en el caso de **PCA**, **CCA** busca nuevas variables combinando linealmente las variables originales, pero en este caso el objetivo es maximizar la correlación.

Si  $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_n\}$  e  $\mathbf{Y} = \{Y_1, \dots, Y_m\}$  son dos conjuntos de variables y  $p = \min \{n, m\}$ ,

**CCA** proporciona  $p$  pares de variables canónicas  $(\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k)$ , donde las  $\mathbf{U}_k$  son combinaciones lineales de  $\mathbf{X}$  y las  $\mathbf{V}_k$  combinaciones lineales de  $\mathbf{Y}$ , que verifican las siguientes propiedades:

1.  $\text{Corr}(\mathbf{U}_1, \mathbf{V}_1) \geq \text{Corr}(\mathbf{U}_2, \mathbf{V}_2) \geq \dots \geq \text{Corr}(\mathbf{U}_p, \mathbf{V}_p) \geq 0$
2. Si  $j \neq k$ ,  $\text{Corr}(\mathbf{U}_j, \mathbf{V}_k) = 0$
3. Si  $j \neq k$ ,  $\text{Corr}(\mathbf{U}_j, \mathbf{U}_k) = 0$
4. Si  $j \neq k$ ,  $\text{Corr}(\mathbf{V}_j, \mathbf{V}_k) = 0$
5.  $\text{Var}(\mathbf{U}_k) = \text{Var}(\mathbf{V}_k) = 1$  para todo  $k$  en  $1..p$

**Corr** y **Var** denotan correlación y varianza, respectivamente. El par  $(\mathbf{U}_1, \mathbf{V}_1)$  es tal que  $\text{Corr}(\mathbf{U}_1, \mathbf{V}_1)$  es la máxima correlación posible entre una combinación lineal de  $\mathbf{X}$  y una de  $\mathbf{Y}$ . El par  $(\mathbf{U}_2, \mathbf{V}_2)$ , a su vez, es el que proporciona la máxima correlación posible, imponiendo correlación nula cada una de las dos variables canónicas con las anteriores,  $\mathbf{U}_1$  y  $\mathbf{V}_1$ .

De forma general,  $\text{Corr}(\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k)$  es la máxima correlación posible entre una combinación lineal de  $\mathbf{X}$  y una combinación lineal de  $\mathbf{Y}$ , ambas incorreladas con todas las variables canónicas anteriores,  $\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_{k-1}, \mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_{k-1}$ .

Como en el caso de **PCA**, el análisis de correlaciones canónicas ha sido ampliamente utilizado con datos geofísicos en forma de campos espaciales<sup>7</sup>. En este estudio se ha utilizado para explorar las relaciones entre los campos de precipitación observada, representados mediante los datos pluviométricos, y los campos de precipitación **Hirlam**. Se ha aplicado el mismo criterio de selección de casos que para **PCA** (ver apartado 4.5).

Para calcular correlaciones canónicas se ha utilizado la función **Canocor()** del paquete **Calibrate** (versión 1.7.2) de R. Los únicos argumentos que toma la función son los dos conjuntos de datos,  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ , que en este caso son las 37 series de precipitación horaria ( $\mathbf{Y}$ ) y los correspondientes campos **Hirlam**, formados por 425 celdas ( $\mathbf{X}$ ).

Los resultados de **CCA** entre precipitaciones observadas y campos de precipitación **Hirlam** se han utilizado para caracterizar el grado de coherencia entre aguaceros observados y los campos **Hirlam** sincrónicos. Seleccionando el subconjunto de las  $k$  primeras correlaciones canónicas, cada campo de precipitación compuesto **observaciones-Hirlam**, se puede caracterizar por el conjunto de  $k$  residuos de dichas correlaciones, es decir, los  $k$  valores  $\mathbf{V}_i^* - \mathbf{V}_i$  para el caso problema, donde  $\mathbf{V}_i^*$  es el valor esperado de  $\mathbf{V}_i$  en la regresión sobre  $\mathbf{U}_i$  correspondiente a la  $i$ -ésima correlación canónica, con  $i \leq k$  (nos interesa la manera en que las precipitaciones en pluviómetros pueden estimarse a partir de los campos **Hirlam**, así que utilizamos las regresiones  $\mathbf{V}$  sobre  $\mathbf{U}$ :  $\mathbf{U}$  son las variables canónicas que se originan a partir de  $\mathbf{X}$ , los datos **Hirlam** y  $\mathbf{V}$  las que se generan a partir de  $\mathbf{Y}$ , los datos pluviométricos).

La posición de los puntos correspondientes a un aguacero en el espacio **k-dimensional** de residuos, relativa a la distribución general de puntos para el conjunto de casos, puede indicar cómo de “canónico” es dicho aguacero, es decir, cómo de coherente con las relaciones observación-**Hirlam** que se pueden extraer de los datos.

---

<sup>7</sup> Wilks 2011, p.563

## 5. Resultados y Discusión



### 5.1. REPRESENTATIVIDAD DE LOS DATOS

El periodo de datos con el que se ha contado para el estudio comprende desde el 1 de octubre de 2010 hasta el 31 de julio de 2014. Tratándose de datos de resolución horaria, la longitud de las series es larga, con un total de 33.598 datos para las series completas.

Este número se reduce significativamente si consideramos sólo las situaciones de precipitación, el número de horas con  $P > 0$  oscila entre 1.207 (p102, Riosequillo), y 4.202 (p202, estación de esquí de La Pinilla). La reducción es mayor si nos ceñimos a los meses de noviembre a abril, que se ha considerado en este estudio, como la temporada susceptible de nieve, según se explica en el apartado siguiente, pero aun así, se cuenta con varios miles de campos de precipitación horarios válidos para el análisis.

Aun tratándose de series relativamente largas en cuanto al número de casos, la longitud del histórico se reduce a algo menos de 4 años hidrológicos o, en referencia a las temporadas de nieve, a cuatro inviernos. Esta longitud de histórico puede resultar corta para la determinación fiable de determinadas características del régimen de precipitaciones como la precipitación media anual o las precipitaciones medias mensuales.

Sin embargo, los aspectos relevantes a efectos del presente estudio, como la duración de los aguaceros, la intensidad de precipitación y, especialmente, la distribución espacial y temporal de los aguaceros, sólo pueden evaluarse con datos de alta resolución temporal y en este sentido, el conjunto de datos horarios recopilados se considera suficiente. El número de horas con datos completos en los 37 pluviómetros seleccionados y precipitación, en al menos uno de ellos, es de 7.608; y para los meses noviembre-abril es de 5.858. Se considera que esta es una muestra suficiente para capturar los aspectos más relevantes de las relaciones espaciales y temporales entre pluviómetros durante los aguaceros.

### 5.2. SITUACIONES DE NIEVE POTENCIAL Y TEMPORADA DE NIEVE

Dada la motivación del estudio, el análisis debe centrarse fundamentalmente en las precipitaciones en forma de nieve o, al menos, en las situaciones en las que se pueden producir precipitaciones en forma de nieve. No se dispone de registros históricos de forma de precipitación, los cuales, por otra parte, habrían resultado parciales (la red de pluviómetros cubre mal las zonas altas y de mayor innivación). En cambio, se cuenta con estimas de cota de nieve sobre la rejilla *Hirlam* y con resolución temporal horaria. Con esta información, y con finalidad meramente de análisis, se ha definido el concepto de *situación con precipitación potencialmente en forma de nieve* (en adelante, y por brevedad, situaciones de *nieve potencial*) como aquella en que se cumplen simultáneamente los dos requisitos siguientes:

- a. Alguno de los pluviómetros registra precipitación.
- b. La cota de nieve está por debajo de la cota del MDT de *Hirlam* en alguna de las celdas de la ventana *Hirlam* considerada.

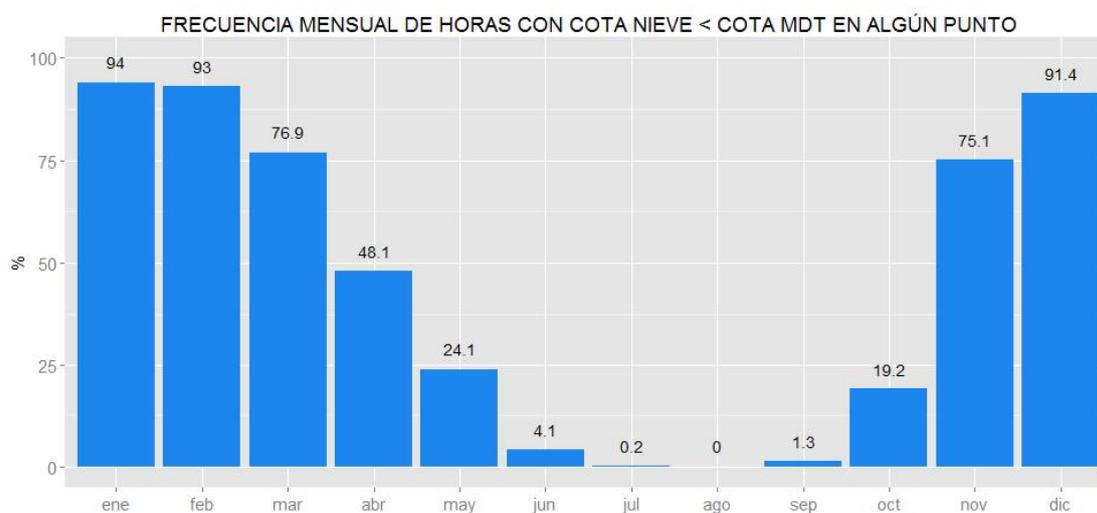
El concepto de *nieve potencial* no es local (no se refiere a un pluviómetro en particular, o a un punto del territorio), sino que se refiere al ámbito geográfico del estudio. No pretende identificar las situaciones en las que efectivamente se han producido precipitaciones en forma de nieve, sino simplemente las situaciones en que es verosímil esperar este tipo de precipitación en algún punto del ámbito de estudio.

En efecto, hay una casuística variada de situaciones, que cumplen el criterio, pero en las que no se presentan nevadas en los pluviómetros o a la inversa:

- 💧 Lluvee en partes del ámbito de estudio que están por debajo de la cota de nieve pero no hay precipitaciones en la parte que queda por encima de dicha cota.
- 💧 Nieva en algunos puntos, pero ningún pluviómetro registra precipitación.
- 💧 Imprecisión en la estima de cota de nieve.

En el periodo de análisis se encuentra algún punto *Hirlam* que cumple el criterio de *cota de nieve* en el 45,6% de las horas, que se distribuyen por meses, según se aprecia en el gráfico de la Figura 28.

**FIGURA 28. FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS QUE CUMPLEN EL CRITERIO COTA DE NIEVE**



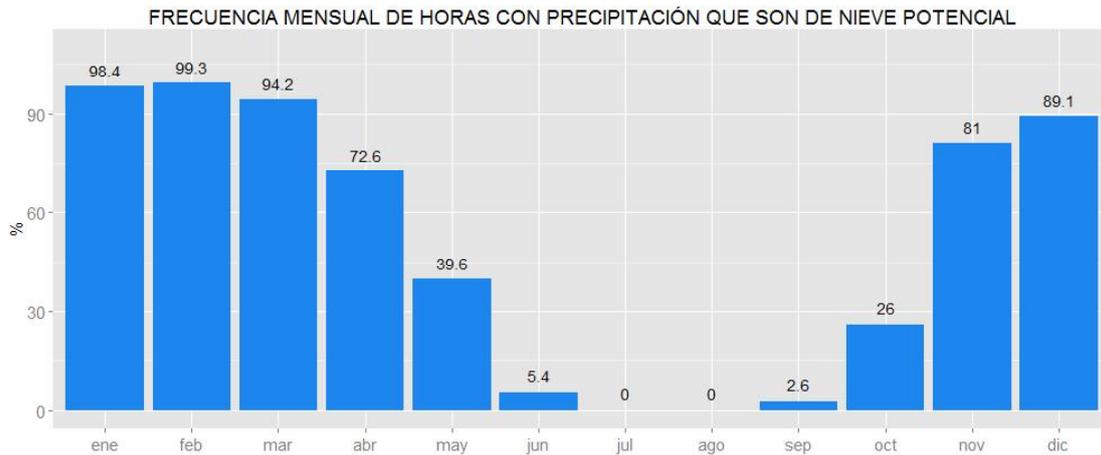
*Frecuencia mensual de horas que cumplen el criterio de cota de nieve (independientemente de si se registra precipitación o no).*

Si atendemos a las horas con algún dato  $P > 0$  en pluviómetros, el porcentaje del total que cumplen el criterio de *cota de nieve* es del 69,0%. Es decir, son horas de *nieve potencial* el 69,0% de las horas en que se registra precipitación en algún punto.

El porcentaje es naturalmente mayor que el de horas que cumplen el criterio de *cota de nieve*, en general porque las horas con precipitación son más frecuentes en los meses fríos.

La distribución por meses de la fracción de horas con precipitación, que son también *horas de nieve potencial* se muestra en el gráfico de la Figura 29.

**FIGURA 29. FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS DE NIEVE POTENCIAL RELATIVA A HORAS CON PRECIPITACION**



*Frecuencia mensual de horas de nieve potencial relativa a las horas con precipitación (al menos un pluviómetro con registro  $P > 0$ ).*

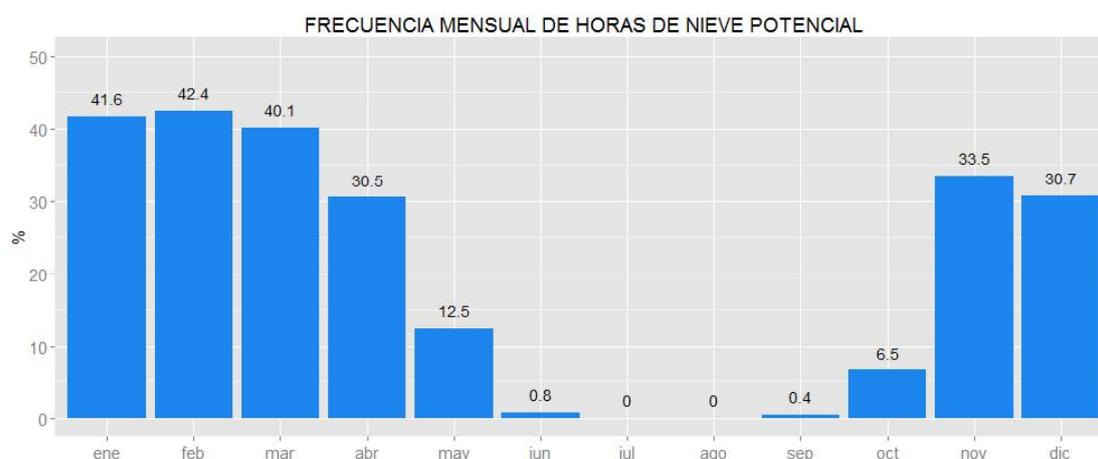
Las frecuencias mensuales en los gráficos de la Figura 29 son casi siempre mayores que las de la Figura 28, indicando que la *cota de nieve* tiende a estar más baja en situación de precipitación que en tiempo seco.

La frecuencia general de situaciones de *nieve potencial* en el histórico es del 20,6%. Por meses, la frecuencia general de nieve potencial se muestra en el gráfico de la Figura 30. Los meses de noviembre a abril acumulan el 91,4% de las situaciones de nieve potencial.

En cualquiera de los gráficos de las figuras 28, 29 y 30 se puede comprobar que para la zona de estudio el periodo noviembre-abril constituye una buena definición de *temporada de nieve*.

En la Figura 30 se comprueba que en estos meses la incidencia de situaciones de *nieve potencial* es superior al 30%; mientras que en el resto de los meses oscila entre 0 y 12,5%.

El periodo noviembre-abril se utiliza en otros lugares de este estudio bajo la denominación de *invierno extendido*, como referencia de la temporada normal de nieve.

**FIGURA 30. FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS DE NIEVE POTENCIAL**

*Frecuencia mensual de horas de **nieve potencial** (horas que cumplen el criterio de cota de nieve en algún punto Hirlam y de dato  $P > 0$  en algún pluviómetro).*

### 5.3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE PRECIPITACIONES EN PLUVIÓMETROS

#### 5.3.1. Agregados anuales

Los datos agregados y los gráficos que se incluyen en este apartado proporcionan una referencia de las características pluviométricas del periodo de datos empleado en el análisis en relación con la precipitación total y su distribución espacial en la zona de estudio.

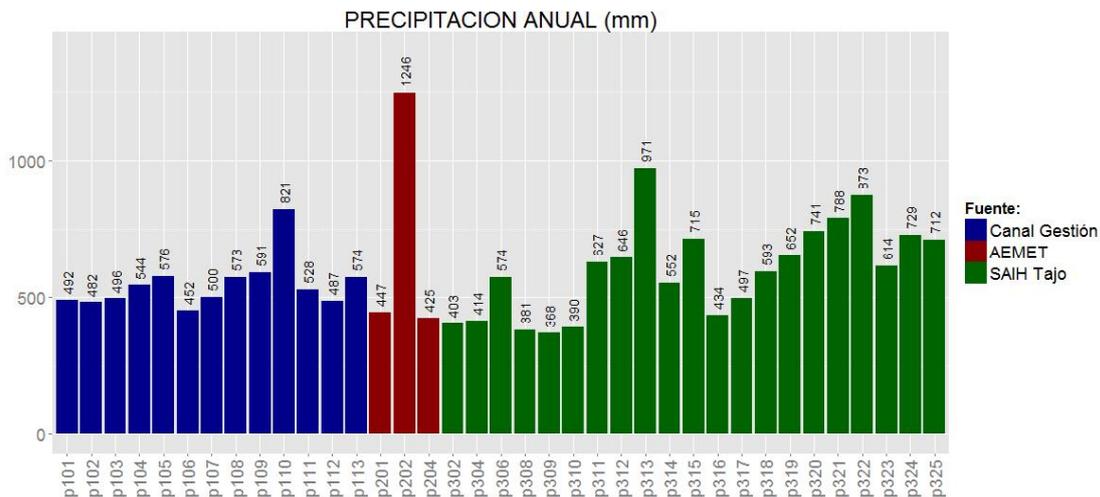
En la Figura 31 se presentan los valores de precipitación media anual del periodo para cada pluviómetro, agrupados por colores, según la fuente de los datos. Destaca claramente sobre los demás el pluviómetro p202 (AEMET 2150H, Estación de La Pinilla). Éste es, con diferencia, el que se encuentra a mayor altitud (1.860 m.s.n.m.), a lo que cabe atribuir parte de la diferencia.

El resto de pluviómetros presentan valores, más o menos concordantes, y aparentemente por debajo de los valores climatológicos: el periodo de análisis (años hidrológicos 2010-11 a 2013-14) parece haber sido relativamente seco.

La relación entre precipitación media anual y altitud se muestra en la Figura 32. Existe una correlación positiva leve entre ambas, si bien algunos pluviómetros se separan bastante de la norma. Los pluviómetros a sotavento del macizo de Ayllón (p308, p309, p310) presentan precipitaciones inferiores a las que cabría esperar según su altitud. Por el otro lado, se desvían los pluviómetros p202, comentado más arriba, y p313, situado en el Valle Alto del Lozoya.

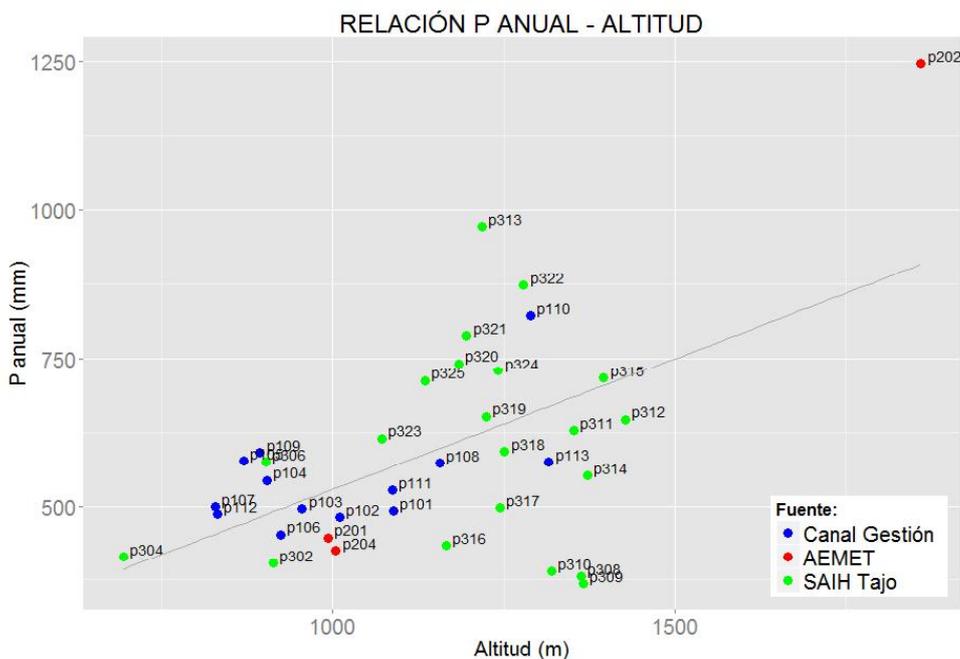
La Figura 33 presenta la distribución espacial de los pluviómetros, con indicación de la precipitación media anual en el tamaño de cada punto. Se comprueba que las precipitaciones más importantes están asociadas a la dorsal de la Sierra de Guadarrama: p202, p313, p322, p323, p320, p110, p325, etc.

**FIGURA 31. PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL POR PLUVIÓMETRO, PERIODO ANÁLISIS (2010-11/2013-14)**

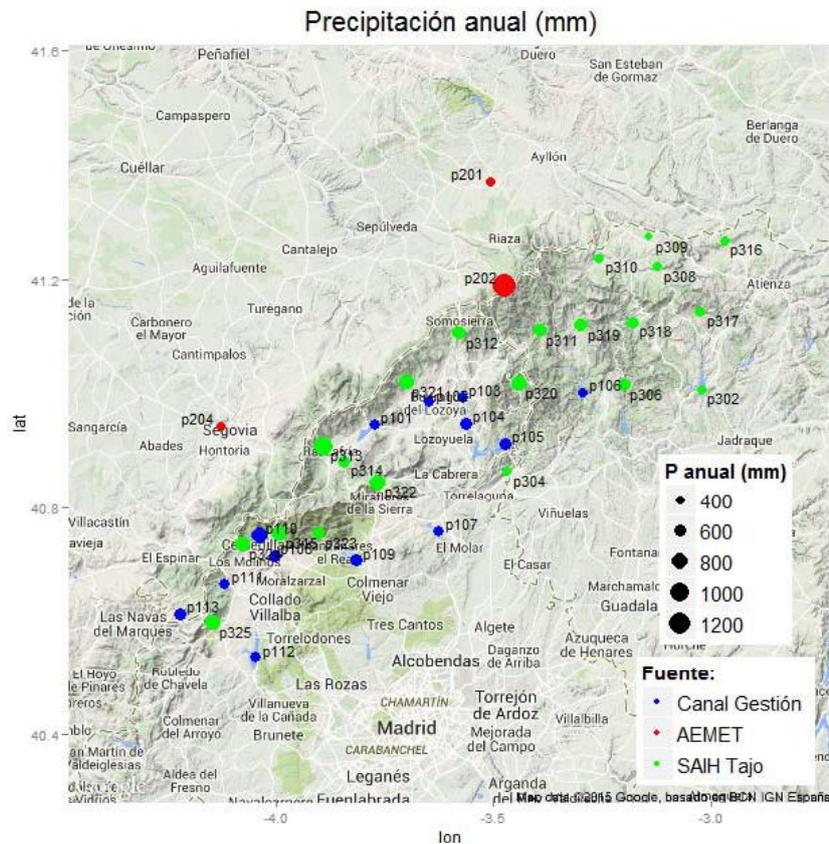


Precipitación media anual por pluviómetros en el periodo de análisis (2010-11 a 2013-14). Los colores agrupan los pluviómetros por la fuente de los datos.

**FIGURA 32. RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (2010-11 A 2013-14) Y ALTITUD, PARA EL CONJUNTO DE PLUVIÓMETROS**

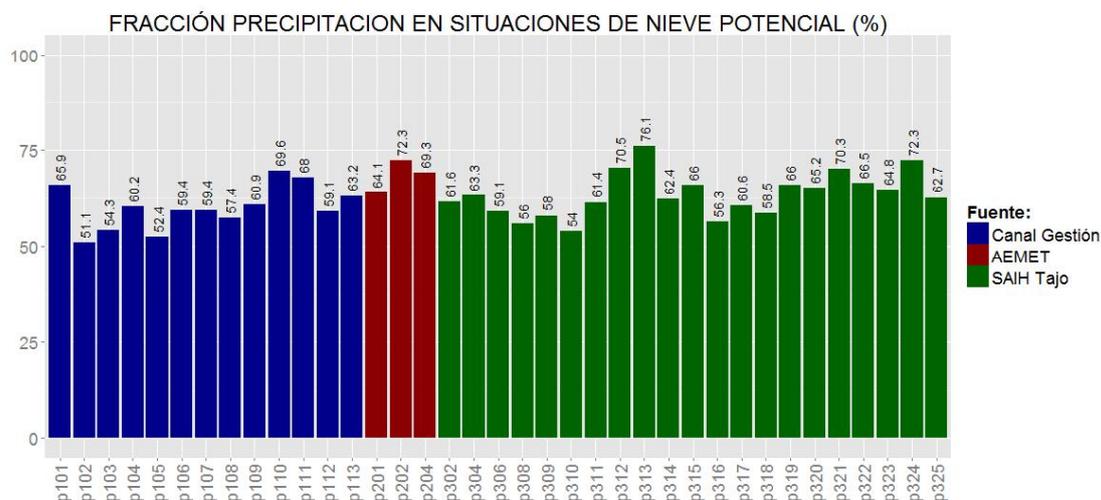


**FIGURA 33. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PLUVIÓMETROS CON INDICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (2010-11 a 2013-14)**



La fracción de precipitación que se produce en situaciones de *nieve potencial* es bastante estable entre pluviómetros, oscilando entre el 51% y el 76% (ver Figura 34). Se insiste en que este ratio no representa la precipitación en forma de nieve de cada pluviómetro, para la que no se dispone de datos, sino la precipitación en cualquier forma que se produce durante los periodos que se han clasificado como de precipitación potencialmente en forma de nieve, según el criterio descrito en el epígrafe 5.2. (Situaciones en que, simultáneamente, se registra precipitación y hay zonas del ámbito de estudio donde las condiciones para la precipitación son de nieve).

FIGURA 34. FRACCIÓN DE PRECIPITACIÓN EN SITUACIONES DE NIEVE POTENCIAL



### 5.3.2. Estadística básica por aguaceros

Se han elaborado unas estadísticas elementales de precipitación y de caracterización de *aguaceros* basadas en los datos pluviométricos recopilados. Las estadísticas se refieren a pluviómetros tratados individualmente. La definición de *aguacero* y de sus características (duración, intensidad media, intensidad máxima) se realiza según los criterios dados anteriormente en el epígrafe 4.1.

Los resultados se han presentado de forma gráfica y se recogen en el Anexo 1. Para cada pluviómetro se presentan los gráficos siguientes:

- Precipitación acumulada promedio mensual, en milímetros, con indicación de la precipitación media anual del periodo.
- Frecuencia de aguaceros por meses: número medio de aguaceros registrados en cada mes.
- Duración media de aguacero por meses (h). Promedio de las duraciones de los aguaceros registrados en cada mes.
- Intensidad media promedio de los aguaceros de cada mes (mm/h). La intensidad media de cada *aguacero* es el cociente entre su precipitación acumulada y su duración.
- Intensidad máxima promedio de los aguaceros de cada mes (mm/h). Se toma como intensidad máxima de cada aguacero el máximo de los datos de precipitación horaria que lo componen.
- Gráficos de dispersión Duración–Intensidad máxima, por trimestres OND, EFM, AMJ y JAS, que se corresponden aproximadamente con otoño, invierno, primavera y verano.

El objetivo general de estos gráficos es proporcionar una visión general del patrón estacional del comportamiento de las precipitaciones en los pluviómetros estudiados. Se aprecian algunos rasgos, por otra parte nada sorprendentes:

- La estacionalidad es evidente en la cantidad de precipitación y en la frecuencia de aguaceros, con un mínimo estival muy marcado (junio – septiembre).
- Se aprecia cierta tendencia, poco marcada, a intensidades de aguacero mayores en los meses de verano y comienzos de otoño
- Se aprecia cierta tendencia, poco marcada, a duraciones menores en los meses de verano.

Por otra parte, no se aprecian diferencias importantes entre pluviómetros, que permitan clasificar el conjunto de forma subjetiva o individualizar alguno de sus miembros, con la salvedad de p202 (estación de esquí La Pinilla), que destaca en cantidad de precipitación.

## 5.4. CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE LAS PRECIPITACIONES

### 5.4.1. Regionalización mediante análisis *Cluster*

Se ha ensayado el análisis *cluster* (CA), tal como se describe en el epígrafe 4.4. para identificar grupos de pluviómetros con comportamiento similar.

Aplicado a los datos de todo el año se obtiene el dendrograma de la Figura 35, que sugiere cuatro grupos o *clusters* bastante equilibrados en cuanto a número de miembros.

La distribución sobre el mapa de los pluviómetros que conforman cada uno de los cuatro grupos se presenta en la Figura 36. Se observa una consistencia espacial notable.

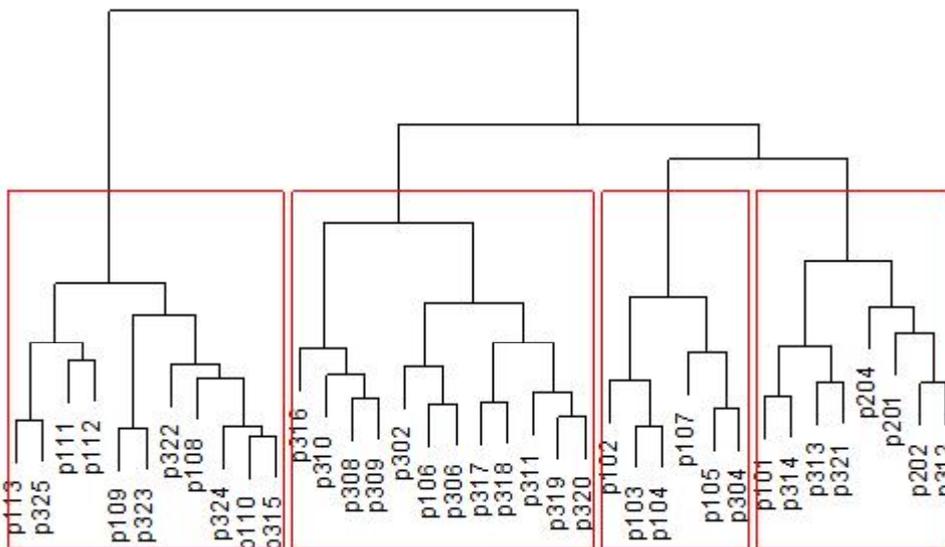
El primer grupo reúne los pluviómetros de las cuencas altas de Manzanares y Guadarrama (con la excepción, al Oeste, de p322, cerca del Puerto de Canencia).

El segundo grupo se ubica en la zona opuesta del ámbito del estudio, comprendiendo las cuencas altas de Jarama, Sorbe y Bornova (con la excepción, al Este, de p320, en Puebla de la Sierra).

El tercero agrupa los pluviómetros de la cuenca media del Lozoya y su prolongación en el Jarama.

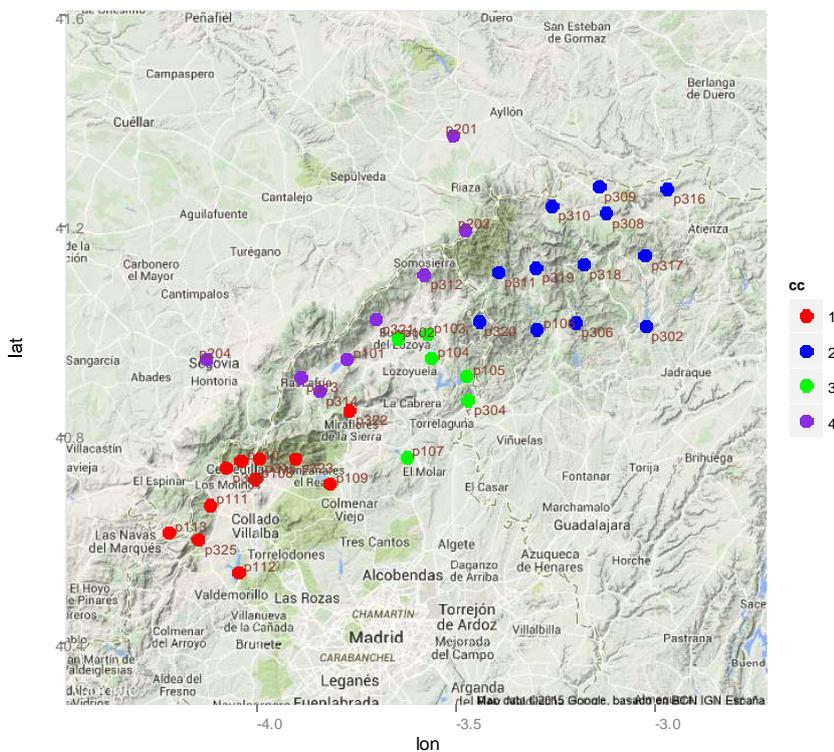
Finalmente, el último grupo comprende la dorsal de la Sierra al NW del Puerto de Navacerrada, incluyendo el Valle Alto del Lozoya y, además, los dos pluviómetros de la vertiente del Duero. Es interesante observar que la siguiente bifurcación del dendrograma divide el grupo 2, separando los cuatro pluviómetros más septentrionales (p308, p309, p310 y p316), es decir, de una manera también muy consistente espacialmente.

FIGURA 35. DENDROGRAMA DEL ANÁLISIS CLUSTER (CA) PARA EL CONJUNTO DE PLUVIÓMETROS



Se han señalado con cajas rojas los cuatro grupos que resultan del tercer nivel de división.

FIGURA 36. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS CUATRO GRUPOS DE PLUVIÓMETROS SEÑALADOS EN EL DENDROGRAMA DE LA FIGURA 35

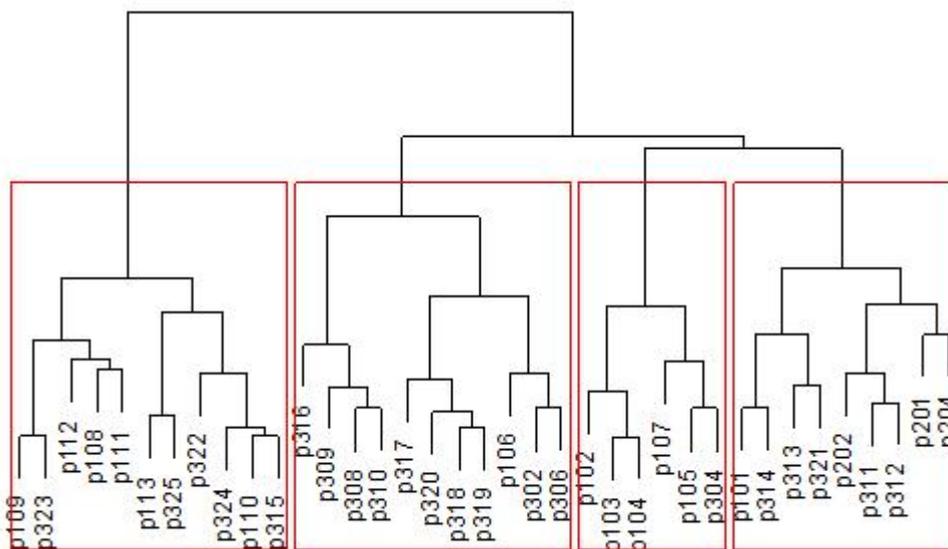


Realizando el mismo análisis con los datos limitados al invierno extendido (meses de noviembre a abril) se obtienen resultados muy parecidos. Esto es natural teniendo en cuenta que la mayoría de las precipitaciones se producen en el periodo noviembre-abril.

El dendrograma correspondiente se presenta en la Figura 37 y la distribución espacial de los grupos en la Figura 38. La única diferencia con el agrupamiento anterior es que el pluviómetro p311 (Cabida) pasa del grupo 2 al grupo 4.

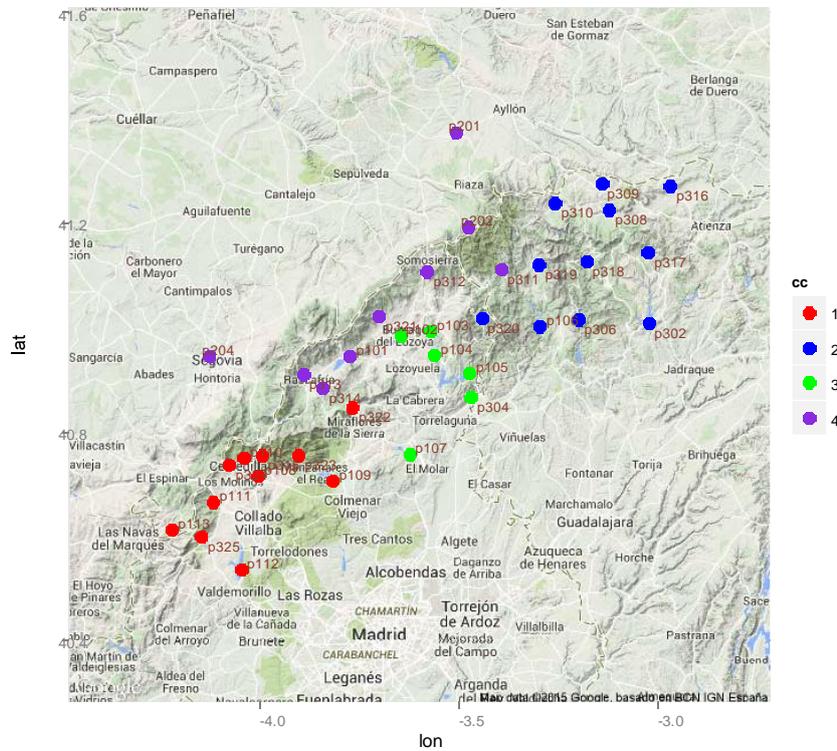
Así pues, el análisis *cluster* permite realizar una clasificación de los pluviómetros del ámbito de estudio con bastante sentido geográfico.

**FIGURA 37.** DENDROGRAMA DEL ANÁLISIS *CLUSTER* (CA) PARA EL CONJUNTO DE PLUVIÓMETROS, RESTRINGIDO AL INVIERNO EXTENDIDO (MESES DE NOVIEMBRE A ABRIL)



*Se han señalado con cajas rojas los cuatro grupos que resultan del tercer nivel de división.*

**FIGURA 38. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS CUATRO GRUPOS DE PLUVIÓMETROS SEÑALADOS EN EL DENDROGRAMA DE LA FIGURA 37**



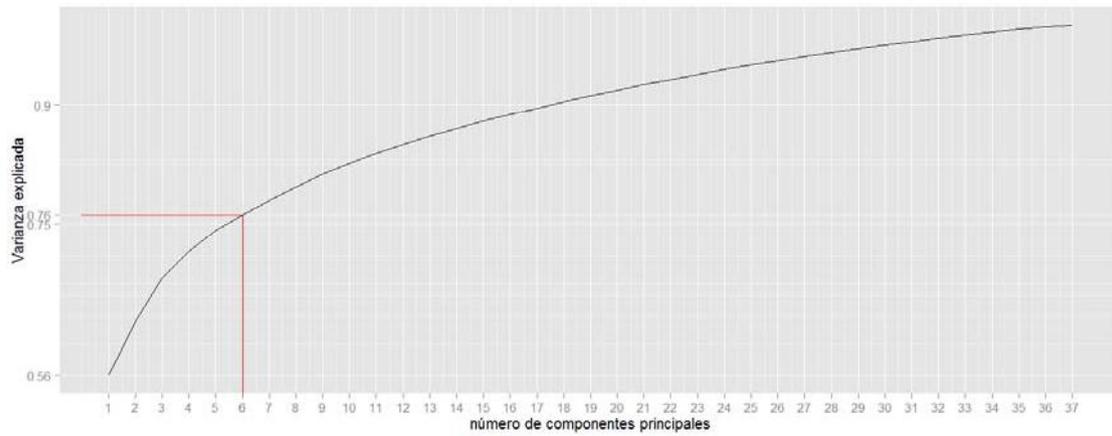
#### 5.4.2. Análisis de Componentes Principales (PCA) con datos de pluviómetros

El análisis de componentes principales o PCA se ha utilizado para explorar las relaciones espaciales entre las series de precipitación de los pluviómetros, en el *invierno extendido* (noviembre-abril). Para la aplicación de PCA se ha procedido a transformar los datos, según se ha descrito anteriormente y se ha restringido la muestra a las horas de noviembre a abril, con datos en todos los pluviómetros y al menos un 10% de pluviómetros con registro >0 (3.436 casos). La Figura 39 representa la varianza explicada en función del número de componentes principales. La primera componente principal acumula un 56% de la varianza total. Con seis componentes principales se supera el 75% de varianza retenida.

A pesar de que se ha optado por no centrar las precipitaciones transformadas, las seis primeras componentes principales están prácticamente incorreladas entre sí, como puede verse en la matriz de correlaciones de la Figura 40.

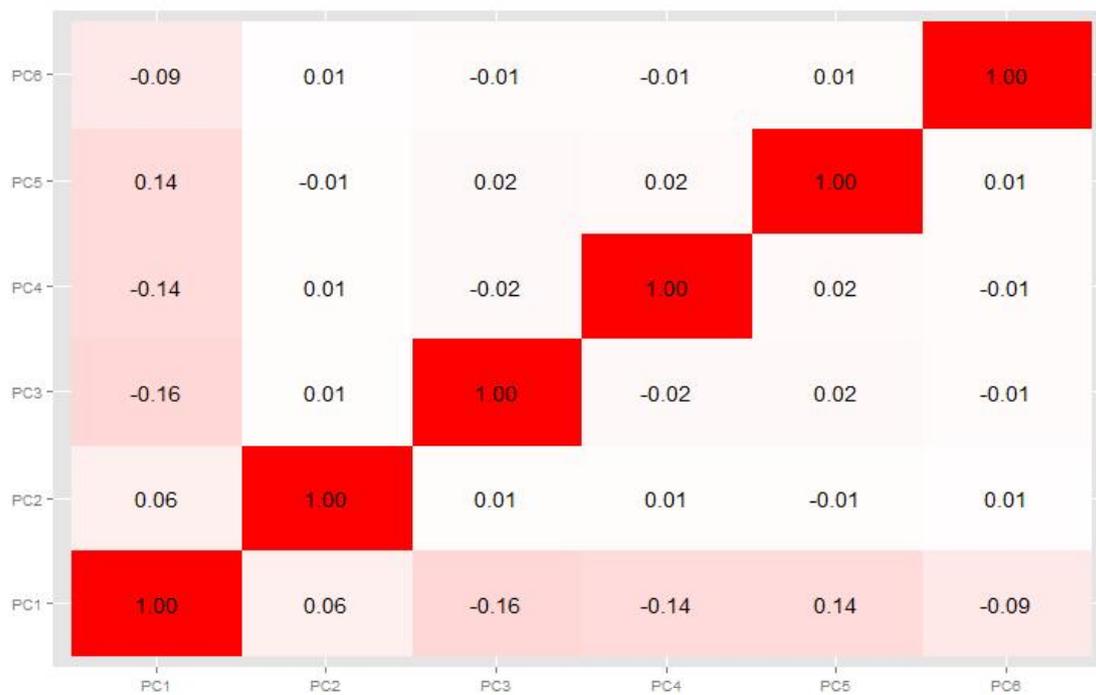
La capacidad de las seis componentes principales para reproducir los datos originales es limitada, ya que sólo explican el 75% de la varianza de las variables transformadas, pero proporcionan una aproximación razonable como se aprecia en los gráficos de las figuras 41 y 42.

**FIGURA 39.** VARIANZA EXPLICADA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPALES, CALCULADAS CON LAS SERIES DE PRECIPITACIONES OBSERVADAS, RESTRINGIDAS A LOS MESES NOVIEMBRE-ABRIL Y A LOS CASOS CON AL MENOS UN 10% DE PLUVIÓMETROS CON REGISTRO DE P>0



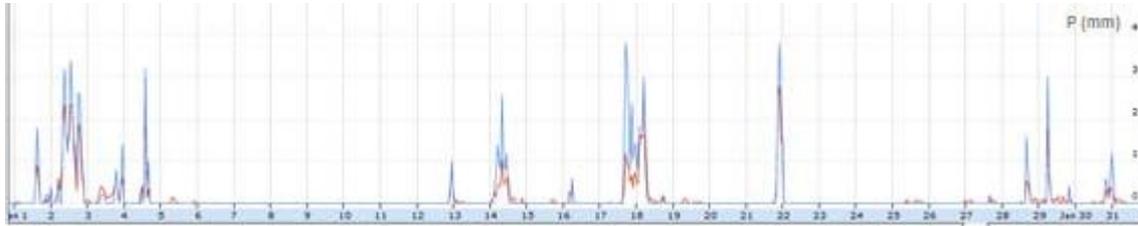
Las seis primeras componentes principales explican el 76% de la varianza total del conjunto original.

**FIGURA 40.** MATRIZ DE CORRELACIONES DE LAS SERIES CORRESPONDIENTES A LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES



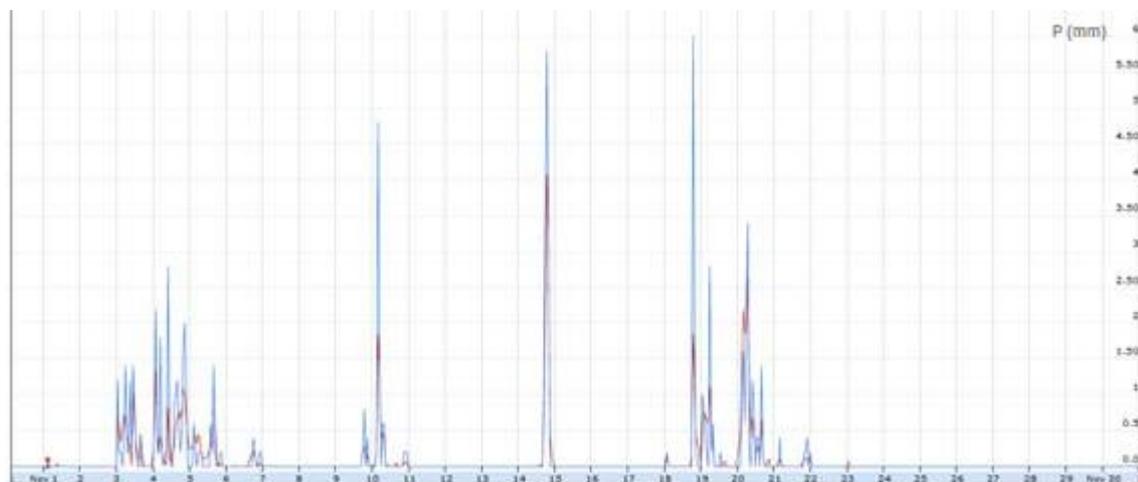
Se comprueba que las correlaciones entre componentes principales son prácticamente nulas.

**FIGURA 41.** SERIES TEMPORALES DE PRECIPITACIONES HORARIAS OBSERVADA Y RECONSTRUIDA, MEDIANTE SEIS COMPONENTES PRINCIPALES, PARA EL MES DE ENERO DE 2014 EN P101 (PINILLA)



*La línea azul representa las observaciones y la línea roja las estimas mediante componentes principales.*

**FIGURA 42.** SERIES TEMPORALES DE PRECIPITACIONES HORARIAS, OBSERVADA Y RECONSTRUIDA, MEDIANTE SEIS COMPONENTES PRINCIPALES, PARA EL MES DE NOVIEMBRE DE 2011 EN P103 (PUENTES VIEJAS)

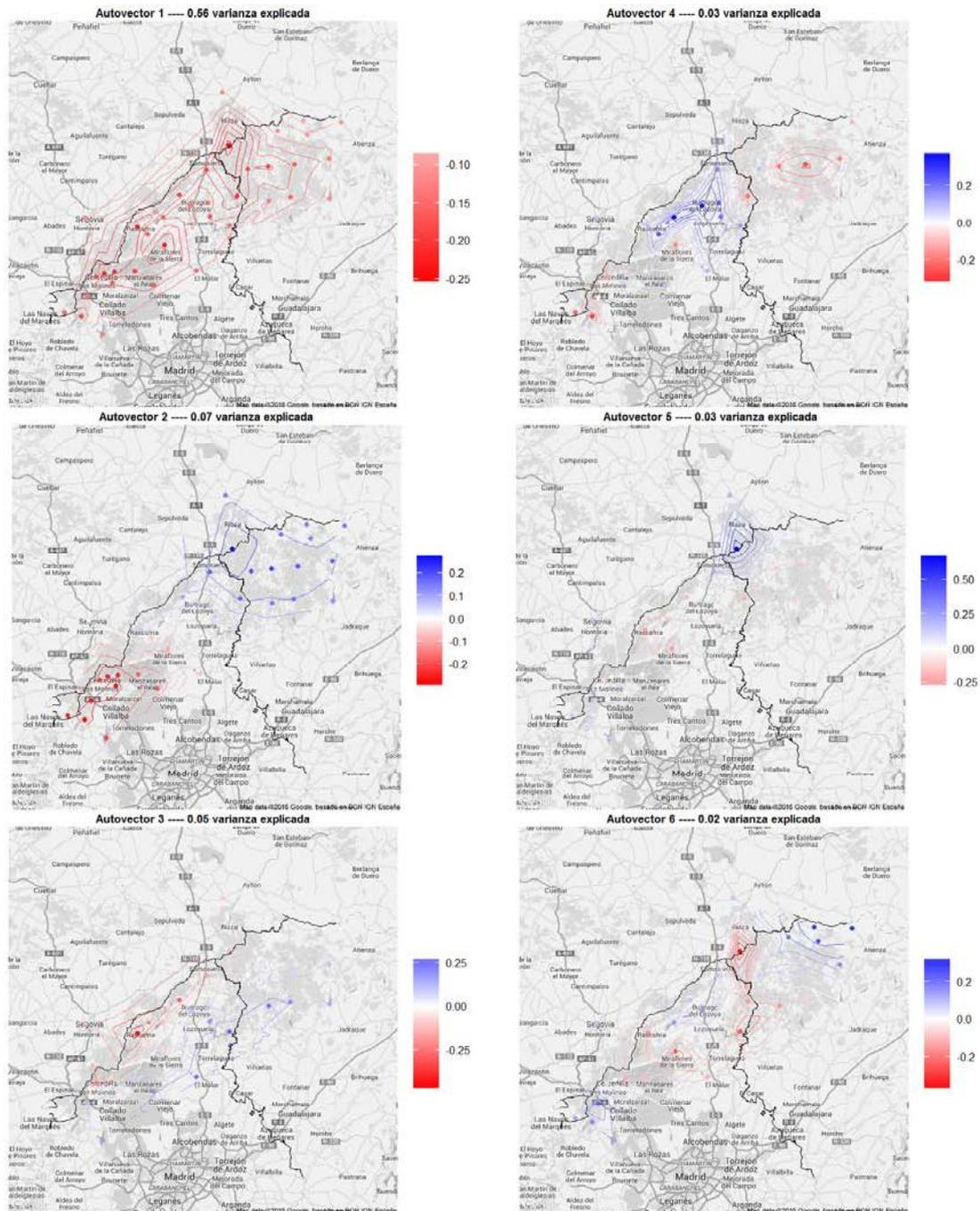


*La línea azul representa las observaciones, y la línea roja las estimas mediante componentes principales.*

En la Figura 43 se muestra la configuración espacial de las seis primeras componentes principales. De forma natural, a medida que las componentes principales van teniendo menos capacidad explicativa presentan patrones espaciales menos consistentes. En el subconjunto de seis seleccionado se mantiene un nivel aceptable de consistencia espacial que admite las siguientes descripciones para cada componente:

- CP1. Magnitud general de la precipitación en el conjunto del ámbito (todos los pesos tienen el mismo signo).
- CP2. Gradiente de precipitación SW-NE, o balance entre Guadarrama-Manzanares (negativo) y Jarama-Sorbe-Bornova (positivo).
- CP3. Gradiente de precipitaciones NW-SE o balance entre sierra y vertiente. Duero, por un lado (negativo) y vertiente Tajo (positivo).
- CP4. Balance entre cuenca del Lozoya (positivo) y resto (negativo).
- CP5. Balance entre macizo de Ayllón (positivo) y resto (negativo).
- CP 6. Balance entre una orla alrededor de la cuenca del Lozoya (positivo) y resto (negativo)

**FIGURA 43. REPRESENTACIÓN EN MAPAS DE LOS PESOS DE CADA PLUVIÓMETRO, EN CADA UNA DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES, PARA LAS PRECIPITACIONES HORARIAS DE NOVIEMBRE A ABRIL**

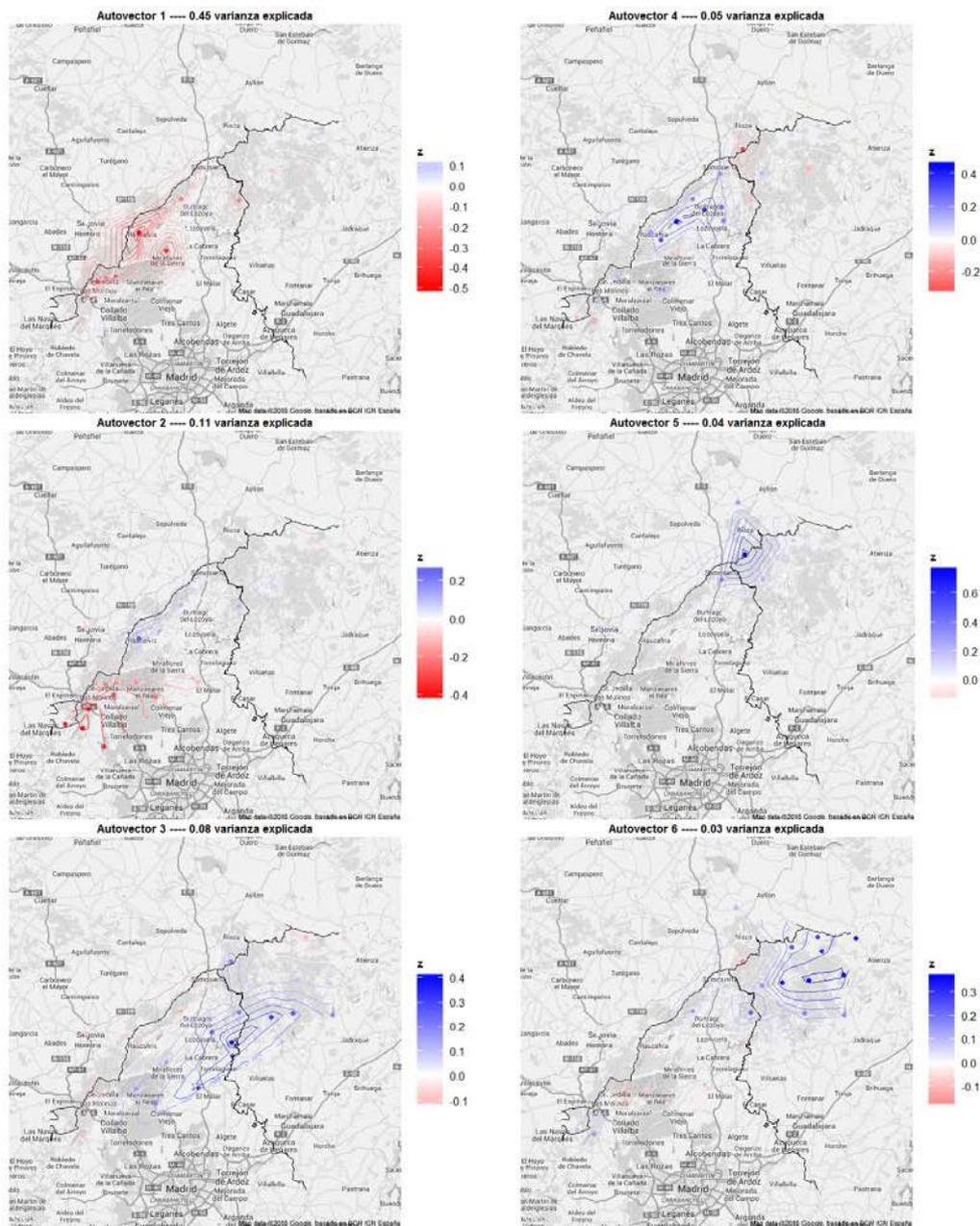


*Se han añadido isólinas, para realzar la configuración espacial. Se indica la fracción de varianza explicada por cada componente.*

La Figura 44 muestra las configuraciones espaciales de las componentes que resultan de aplicar la rotación **VARIMAX** a las seis componentes principales seleccionadas.

Como es esperable del criterio **VARIMAX**, la varianza explicada se reparte más uniformemente entre las componentes rotadas (aunque la primera sigue acumulando casi todo el protagonismo) y cada componente rotada tiende a concentrarse en un subconjunto de pluviómetros a los que asigna pesos del mismo signo. Adicionalmente, la rotación no conserva la propiedad de (casi) ausencia de correlación entre las series correspondientes a cada componente.

**FIGURA 44. REPRESENTACIÓN EN MAPAS DE LOS PESOS DE CADA PLUVIÓMETRO EN CADA UNA DE LAS SEIS COMPONENTES QUE RESULTAN DE LA ROTACIÓN VARIMAX DE LAS SEIS COMPONENTES PRINCIPALES DE LA FIGURA 43**



Se han añadido isólinas, para realizar la configuración espacial. Se indica la fracción de varianza explicada por cada componente.

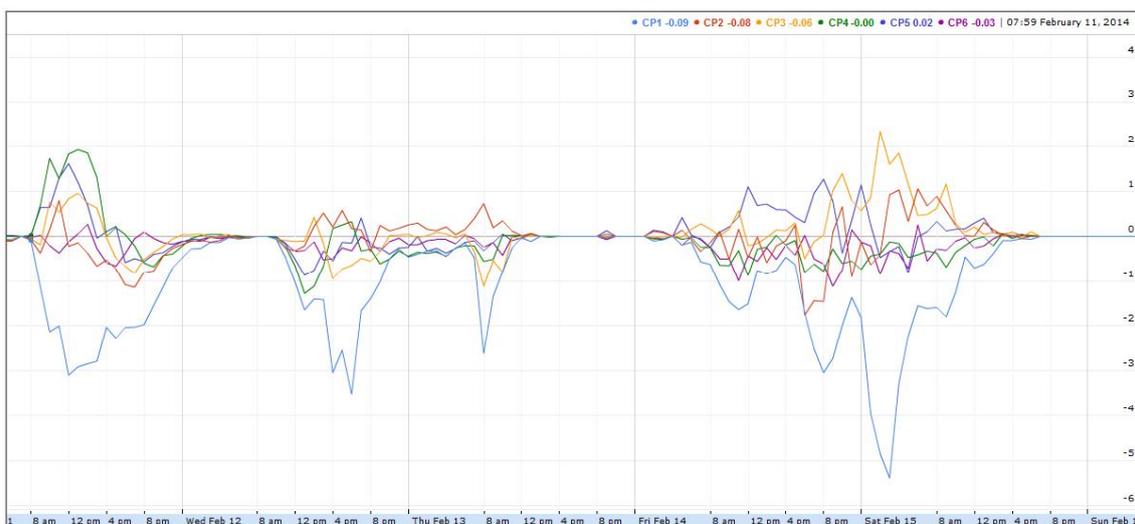
Los pluviómetros del subconjunto en que se concentra cada componente rotada tienden a formar un grupo compacto, facilitando la interpretación espacial de las componentes:

- CR 1. Zonas altas de la Sierra
- CR 2. Cabeceras de Guadarrama y Manzanares
- CR 3. Jarama aguas abajo de El Vado
- CR 4. Cuenca del Lozoya
- CR 5. Macizo de Ayllón
- CR 5. Cabeceras de Sorbe y Bornova

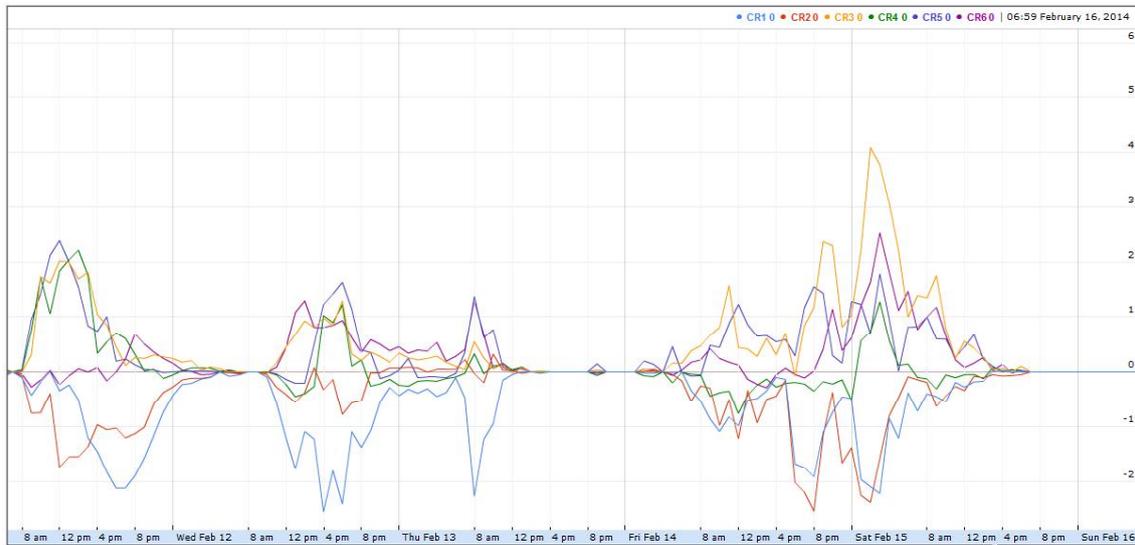
Las componentes principales permiten representar el histórico de precipitaciones en los 37 pluviómetros seleccionados, de forma bastante aproximada, (76% de varianza explicada), a partir de seis series temporales: las de las seis componentes principales seleccionadas, o sus correspondientes rotadas.

En las figuras 45 y 46 se puede ver la representación de la sucesión de tres aguaceros, entre el 11 y el 15 de febrero de 2014.

**FIGURA 45. REPRESENTACIÓN DE LOS AGUACEROS ACAECIDOS ENTRE EL 11 Y EL 15 DE FEBRERO DE 2014, AMBOS INCLUSIVE, A TRAVÉS DE LAS SERIES TEMPORALES DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES**



**FIGURA 46.** REPRESENTACIÓN DE LOS AGUACEROS ACAECIDOS ENTRE EL 11 Y EL 15 DE FEBRERO DE 2014, AMBOS INCLUSIVE, A TRAVÉS DE LAS SERIES TEMPORALES DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES ROTADAS



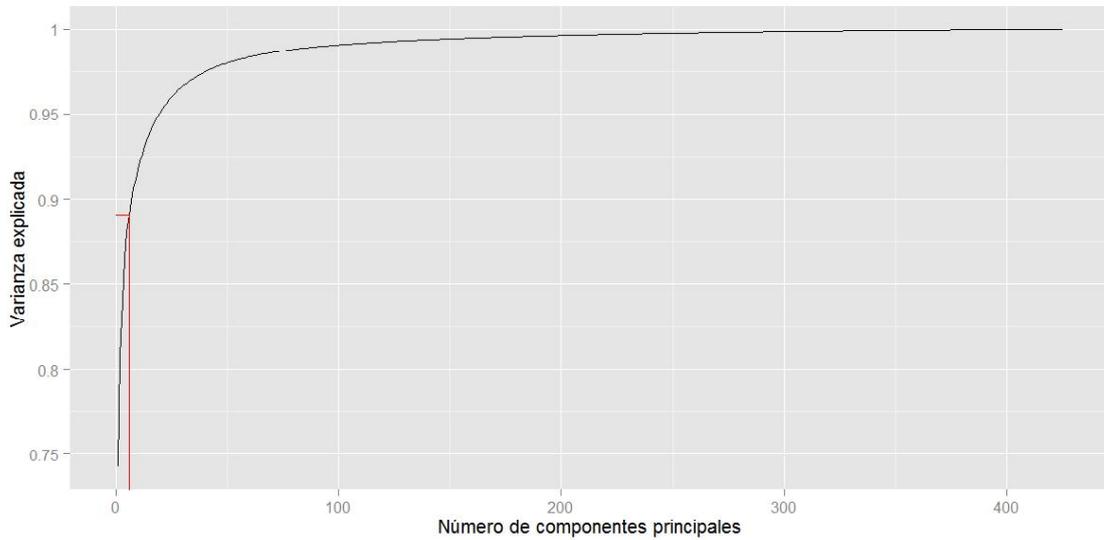
### 5.4.3. Análisis de Componentes Principales PCA con campos *Hirlam*

Se ha realizado el mismo análisis de componentes principales para los campos de precipitación *Hirlam*, simplemente para comprobar que existe coherencia entre la configuración espacial que se deriva de este y la del correspondiente a los pluviómetros.

El análisis se ha realizado con los mismos casos que el **PCA** de pluviómetros, meses, de Noviembre a Abril, en horas con dato en todos los pluviómetros, y al menos un 10% de ellos con registro  $P > 0$ . En este caso, el número de variables originales es el número de celdas del modelo de la ventana considerada ( $17 \times 25 = 425$  celdas).

Los gráficos de las figuras 47 y 48 muestran la relación entre varianza explicada y número de componentes principales. Se comprueba que la acumulación de varianza en las primeras componentes es mayor que en el caso de **PCA** a partir de observaciones. Esto es consistente con el hecho de que las precipitaciones *Hirlam* proceden de un modelo y guardan, por tanto, unas relaciones de consistencia más estrechas que las observaciones.

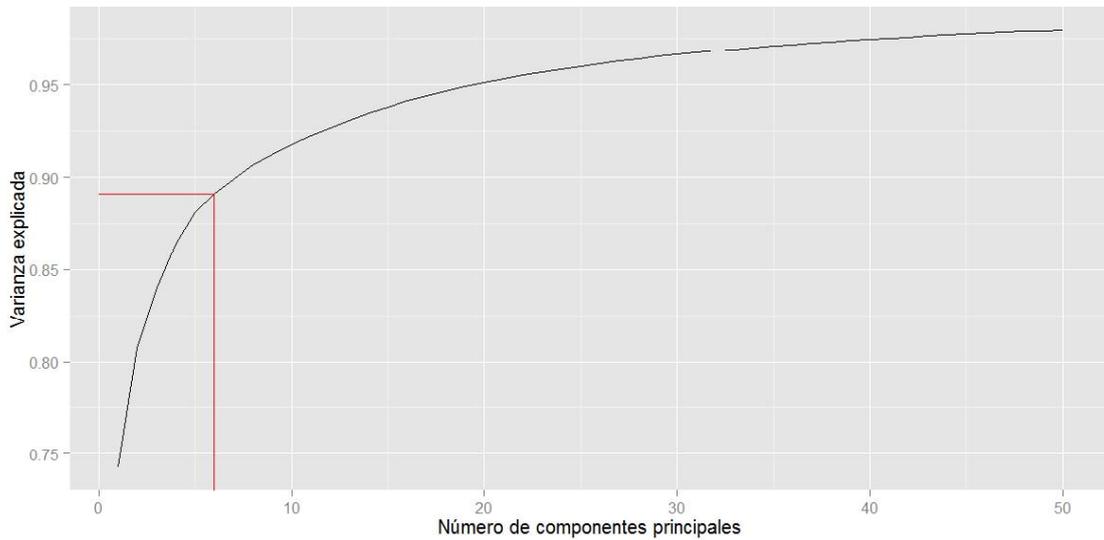
**FIGURA 47. VARIANZA EXPLICADA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPALES CALCULADAS SOBRE LA SERIE DE CAMPOS DE PRECIPITACIÓN *HIRLAM* RESTRINGIDA**



*Varianza explicada en función del número de componentes principales calculadas sobre la serie de campos de precipitación *Hirlam* restringida a los mismos casos que el PCA de observaciones (meses de Noviembre-Abril y horas en que, al menos, un 10% de los pluviómetros registran  $P > 0$ ).*

*Las seis primeras componentes principales explican un 89% de la varianza total.*

**FIGURA 48. DETALLE DEL GRÁFICO DE LA FIGURA 47**



Se selecciona el conjunto de las seis primeras componentes principales para su comparación con el **PCA** de los datos de pluviómetros. En este caso, las seis primeras componentes explican el 89% de la varianza total.

En la Figura 49 se muestran las configuraciones espaciales de cada una de ellas. Estas se pueden describir de la siguiente manera:

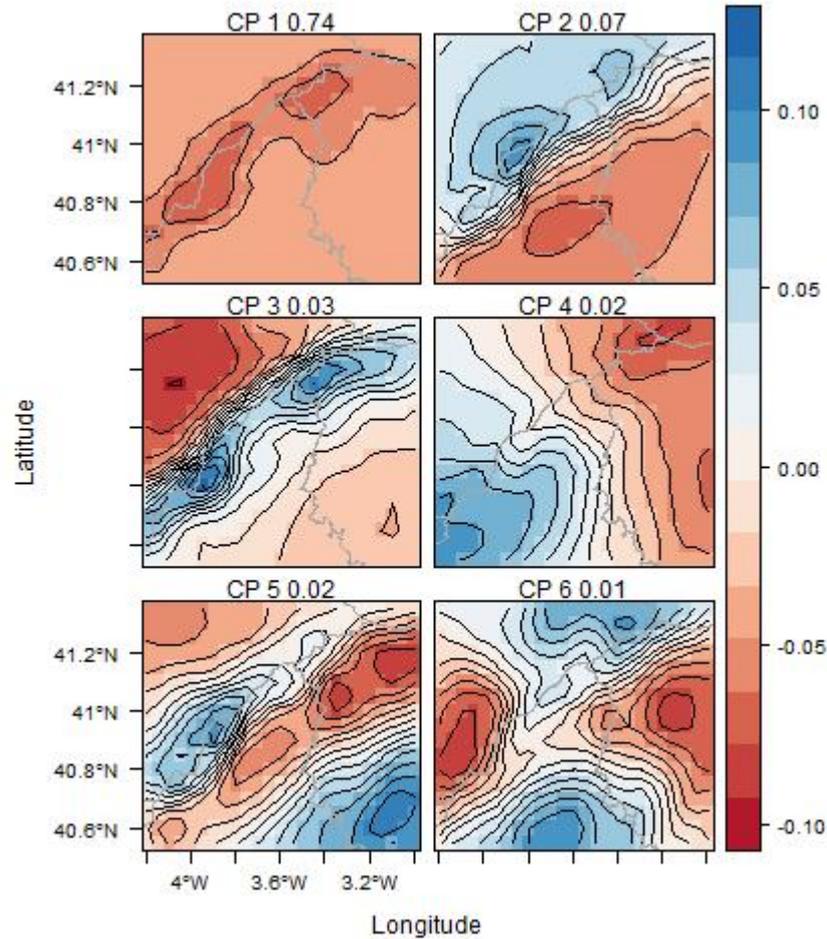
- CP 1. Magnitud general de la precipitación en el conjunto.
- CP 2. Diferencia entre Sierra y vertiente Duero, por una parte, y vertiente Tajo por otra.
- CP 3. Diferencia entre Sierra y meseta norte.
- CP 4. Gradiente SW-NE.
- CP 5. Cuencas altas de Jarama y afluentes.
- CP 6. Diferencia entre los extremos N y S, por un lado, y los extremos E y W por otro.

La primera y la cuarta componentes principales **Hirlam** son esencialmente equivalentes a la primera y segunda de observaciones.

Para el resto no hay correspondencias claras. Las diferencias cabe atribuir las a la diferente naturaleza de los datos (observaciones frente a salida de un modelo numérico), y a la diferencia de ámbito geográfico (la ventana de **Hirlam** comprende un rectángulo completo, con zonas no cubiertas por el conjunto de pluviómetros considerado).

Por otra parte, la resolución espacial de **Hirlam** (0,05° de paso de malla, unos 5 kilómetros) puede no ser suficiente para resolver con suficiente detalle determinados elementos del relieve, como el valle del Lozoya, que parece tener bastante menos protagonismo en el sistema de componentes principales de **Hirlam** que en el de observaciones.

**FIGURA 49.** CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS, PARA CAMPOS DE PRECIPITACIÓN HORARIA *HIRLAM* DE NOVIEMBRE-ABRIL



*Se indica la fracción de varianza explicada por cada componente principal*

## 5.5. RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN OBSERVADA Y PRECIPITACIÓN *HIRLAM*

### 5.5.1. Análisis de correlaciones canónicas entre pluviómetros y *Hirlam*

Se ha empleado el análisis de correlaciones canónicas, CCA, para estudiar las relaciones entre las precipitaciones observadas y los campos de precipitación *Hirlam*. Se arranca de la idea de que, por una parte, debe existir una relación bastante estrecha entre ambas variables y, por otra, las eventuales actuaciones de estimulación de nubes pueden afectar sólo a una de las partes, la precipitación, pero no al modelo.

En la medida en que las precipitaciones observadas tras una actuación de estimulación de nubes se aparten de la relación normal con el campo *Hirlam* podrá inferirse que la actuación ha tenido un efecto sobre las precipitaciones.

El análisis de correlaciones canónicas, por tanto, considera por un lado las 37 series de observaciones de precipitación horaria en pluviómetros y, por otro, las 425 series sincrónicas de precipitación *Hirlam*, correspondientes a cada una de las celdas de la ventana del modelo seleccionada.

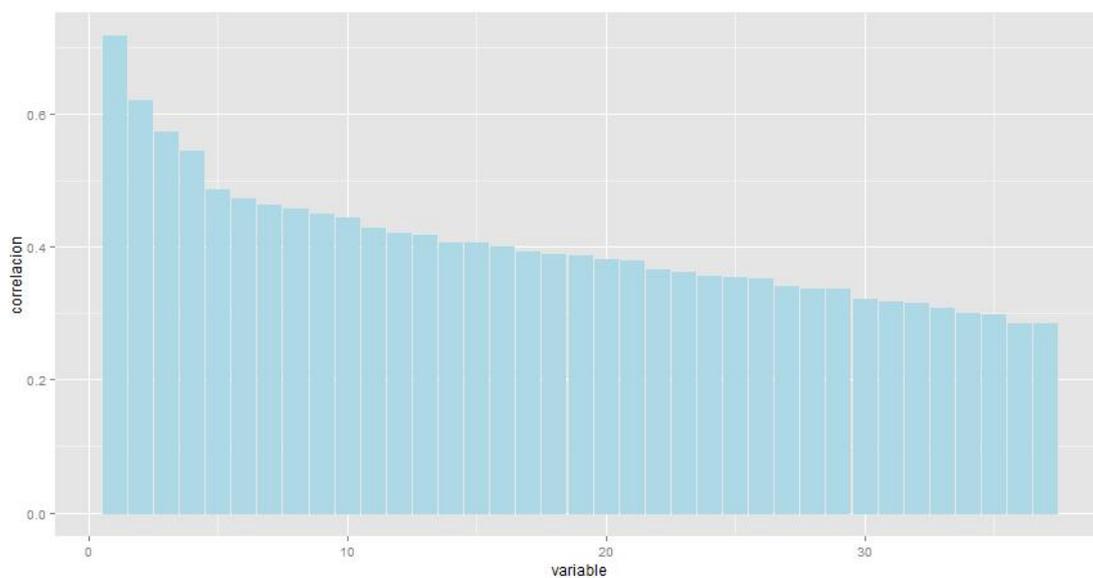
Todos los datos se han transformado según se describe en anteriormente y, como en el caso de PCA, se ha restringido el análisis a los casos de Noviembre a Abril, con datos en todos los pluviómetros y, al menos, un 10% de pluviómetros con registro  $P > 0$  (3.436 casos).

El análisis proporciona 37 pares de variables canónicas, que es el número de series de pluviómetros (hay menos pluviómetros que celdas *Hirlam*).

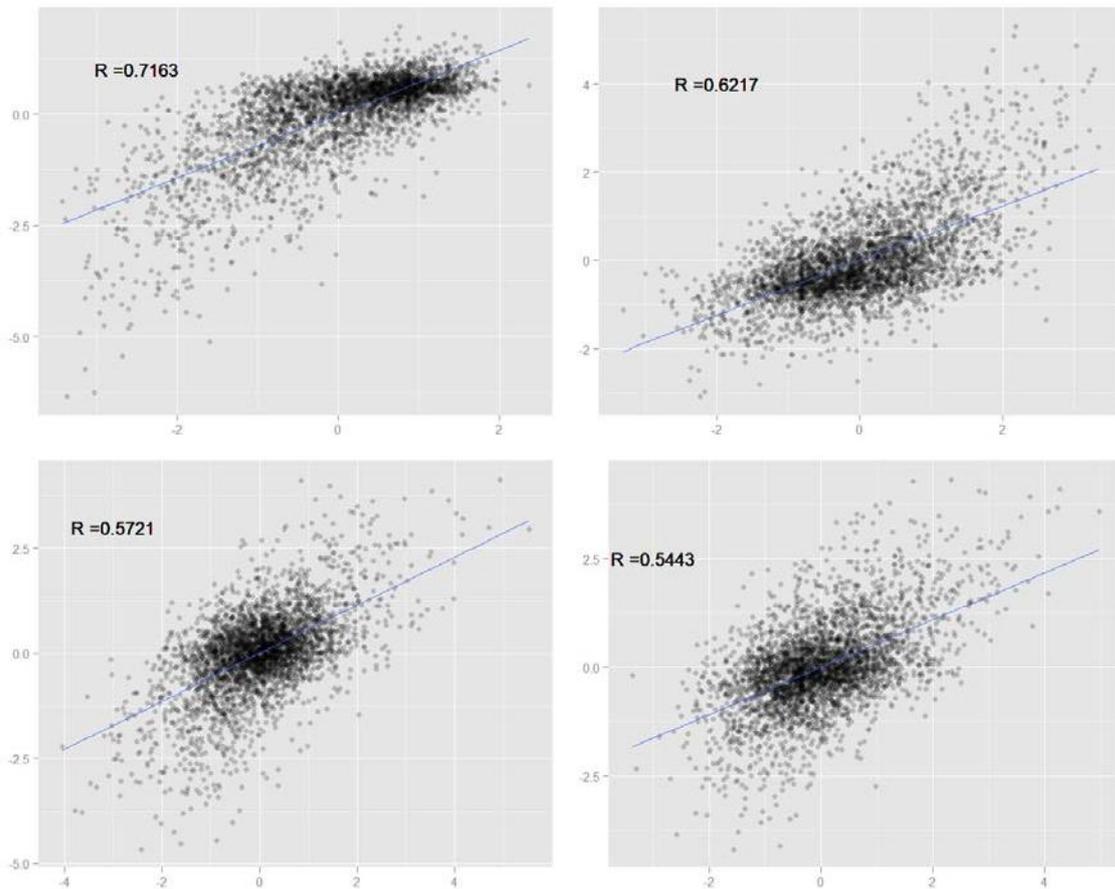
En la Figura 50 se muestran los coeficientes de correlación correspondientes a cada uno de los pares de variables canónicas. La primera correlación canónica alcanza un valor de 0,72 y hay cuatro con coeficiente de correlación superior a 0,5.

En la Figura 51 se muestran los gráficos de dispersión de los cuatro primeros pares de variables canónicas.

**FIGURA 50. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS 37 PARES DE VARIABLES CANÓNICAS**



**FIGURA 51.** DISPERSIÓN ENTRE VARIABLES DE LOS CUATRO PRIMEROS PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL ANÁLISIS CCA ENTRE PLUVIÓMETROS Y PRECIPITACIÓN *HIRLAM* PARA NOVIEMBRE-ABRIL Y HORAS CON PRECIPITACIÓN



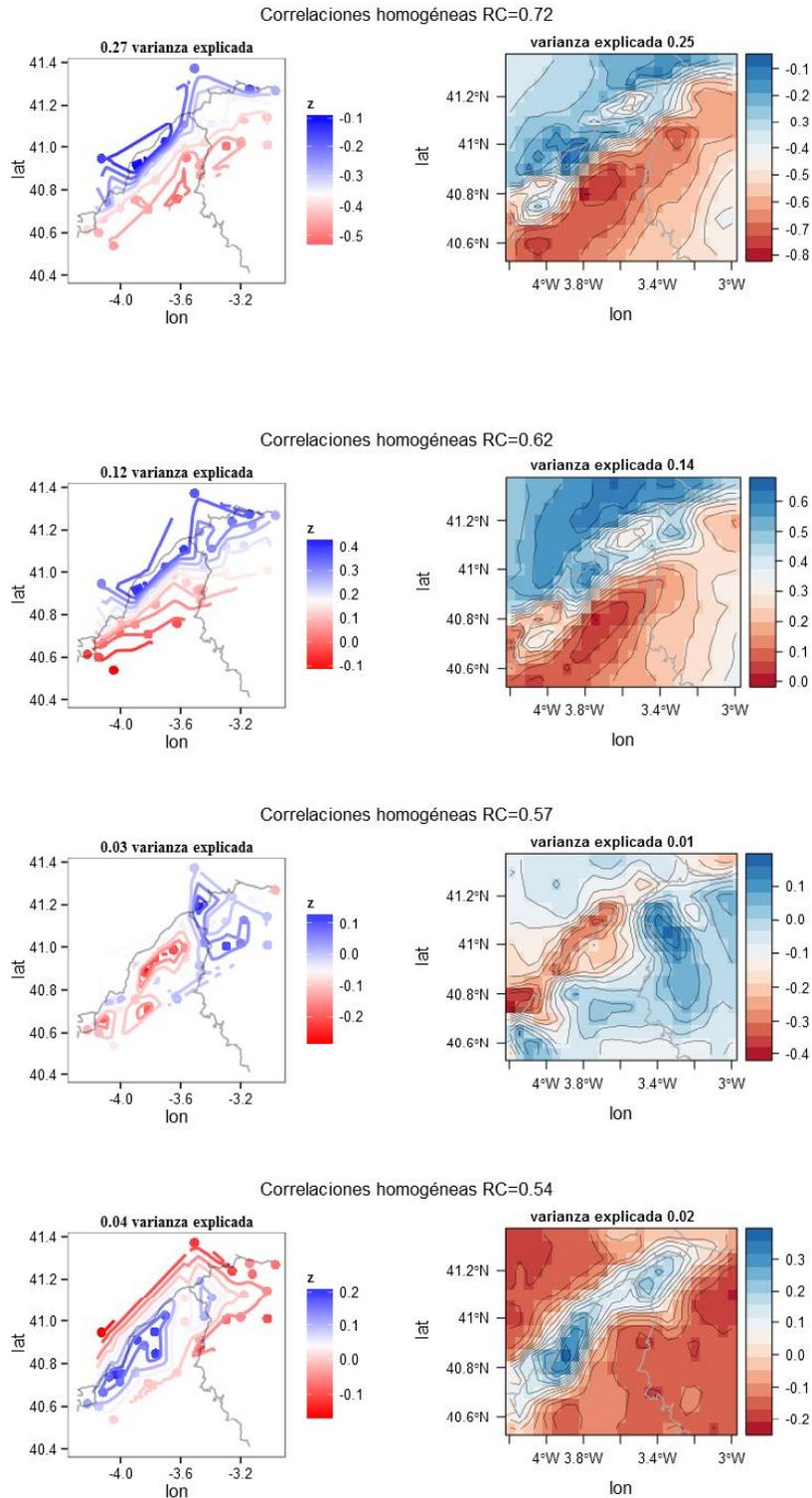
*Cada gráfico se corresponde con un par de variables canónicas y representa, en abscisas la variable canónica correspondiente al campo *Hirlam*, y en ordenadas la correspondiente al conjunto de precipitaciones en pluviómetros.*

Una forma de representar las configuraciones espaciales de las variables canónicas son los mapas de correlaciones homogéneas. Las correlaciones homogéneas de una variable canónica son los coeficientes de correlación entre ésta y cada una de las variables originales del campo a que se refieren.

El mapa de correlaciones homogéneas expresa, mediante dichos coeficientes de correlación, la relación que existe entre la variable canónica y cada una de las variables originales, a partir de las que se construye.

La Figura 52 presenta los mapas de correlaciones homogéneas para los cuatro primeros pares de variables canónicas. En cada par canónico se puede apreciar una correspondencia general entre los patrones espaciales de la variable de pluviómetros (mapa de la izquierda) y la de *Hirlam* (mapa de la derecha), indicando que ambos conjuntos (precipitaciones observadas y precipitaciones *Hirlam*) mantienen cierta sintonía.

**FIGURA 52. CORRELACIONES HOMOGÉNEAS DE LOS PRIMEROS CUATRO PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL ANÁLISIS CCA ENTRE PLUVIÓMETROS Y PRECIPITACIÓN *HIRLAM* PARA NOVIEMBRE-ABRIL Y HORAS CON PRECIPITACIÓN**



*Cada fila contiene los dos mapas correspondientes a un par canónico. El mapa de la izquierda muestra la correlación de cada pluviómetro con la variable canónica de pluviómetros y el mapa de la derecha muestra las correlaciones de cada celda *Hirlam* con la variable canónica de *Hirlam*. Se indica además el valor del coeficiente de correlación entre las variables del par y la varianza explicada por cada una de ellas en el conjunto correspondiente.*

El **CCA** se ha realizado también restringido a los casos de **nieve potencial**. Estos son el subconjunto de los casos utilizados para el **CCA** general (Noviembre a Abril, datos de pluviómetros completos y al menos un 10% de pluviómetros con dato de precipitación  $P > 0$ ).

Que además, cumplen el criterio de **cota de nieve**: al menos en un punto de la ventana **Hirlam** la cota de nieve está por debajo de la cota del **MDT** del modelo (ver epígrafe 5.2).

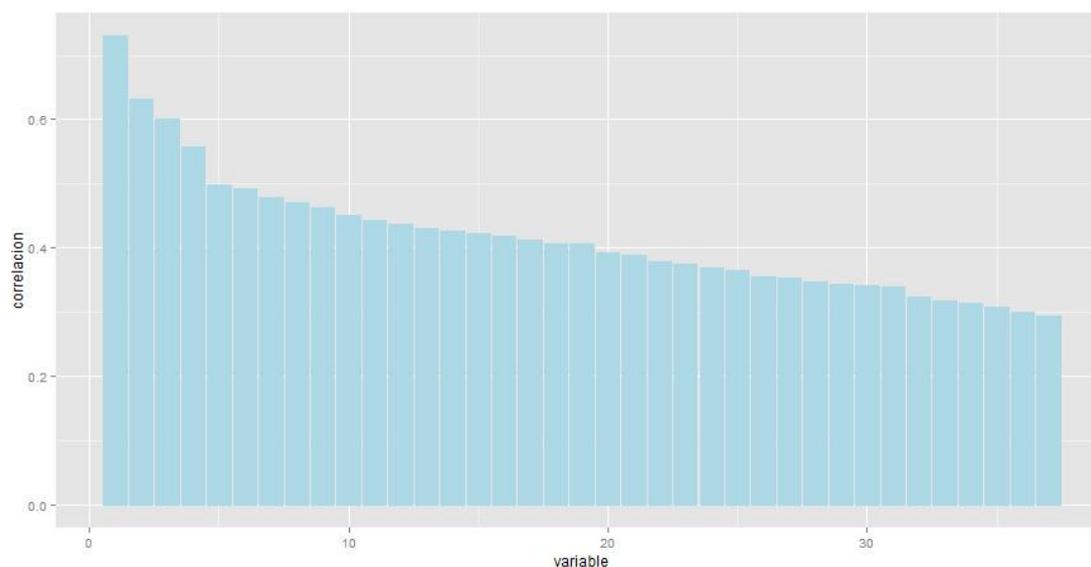
El número de casos para **CCA** en situación de **nieve potencial** es 3.169, sólo un 8% menos que el **CCA** general anterior. La magnitud de la diferencia parece natural pues entre los meses de Noviembre y Abril hay, en casi todo momento, zonas altas de la Sierra que quedan por encima de la cota de nieve.

La Figura 53 refleja los coeficientes de correlación correspondientes a los pares de variables canónicas para **CCA** en situación de **nieve posible**. Los valores son parecidos a los del caso general, pero ligeramente más altos. La primera correlación canónica alcanza un valor de 0,73 y también hay cuatro con coeficiente de correlación superior a 0,5.

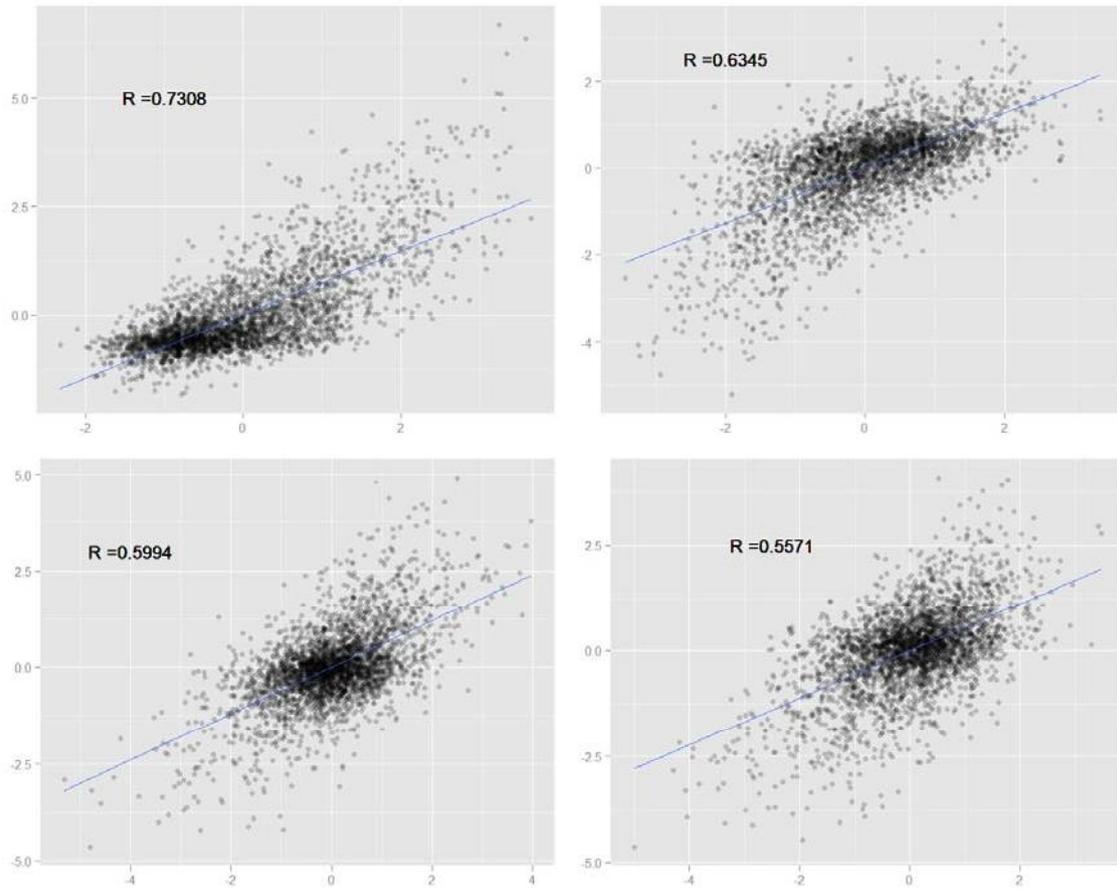
En la Figura 54 se muestran los gráficos de dispersión de los cuatro primeros pares de variables canónicas y, en la Figura 55, sus configuraciones espaciales a través de las correlaciones homogéneas. Se comprueba que los patrones espaciales de las variables canónicas restringidas a **nieve potencial** y los de las anteriores son prácticamente idénticos (aparecen con el signo cambiado, pero esto es irrelevante en **CCA**).

La similitud entre **CCA** general y para **nieve potencial** es natural, teniendo en cuenta que el conjunto de casos se diferencia en apenas un 8%. Como el estudio se centra en las precipitaciones en forma de nieve, de ahora en adelante se utiliza el resultado de **CCA** para **nieve potencial**.

**FIGURA 53. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS 37 PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL CCA RESTRINGIDO A LOS CASOS DE NIEVE POTENCIAL**

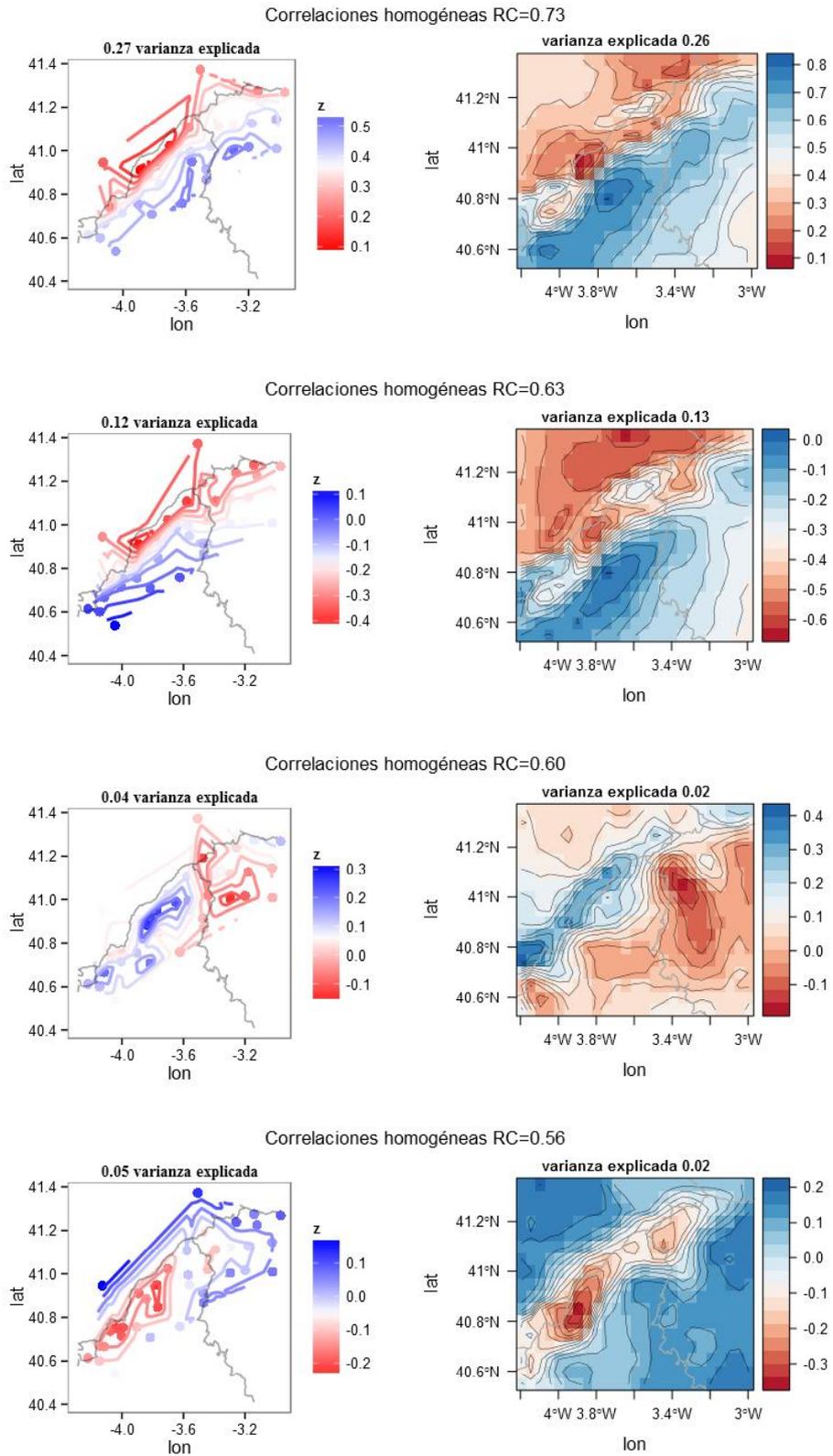


**FIGURA 54.** DISPERSIÓN ENTRE VARIABLES DE LOS CUATRO PRIMEROS PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL ANÁLISIS CCA RESTRINGIDO A LOS CASOS DE NIEVE POTENCIAL



*Cada gráfico se corresponde con un par de variables canónicas y representa, en abscisas la variable canónica correspondiente al campo **Hirlam** y, en ordenadas, la correspondiente al conjunto de precipitaciones en pluviómetros.*

**FIGURA 55. CORRELACIONES HOMOGÉNEAS DE LOS PRIMEROS CUATRO PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL CCA RESTRINGIDO A LOS CASOS DE NIEVE POTENCIAL**



### 5.5.2 Análisis de residuos de las correlaciones canónicas

Se plantea la hipótesis de que es posible identificar alteraciones artificiales en el campo de precipitaciones observadas, evaluando los residuos de las correlaciones canónicas entre precipitaciones observadas y campos *Hirlam* correspondientes: unos residuos anormalmente grandes señalarían un desacoplamiento entre el campo observado y el campo *Hirlam* que podría atribuirse a una alteración en el campo de precipitaciones como, por ejemplo, la que puede producir una actuación de estimulación de nubes.

Existen varios motivos por los que este tipo de análisis debe ser tomado con precaución. Por una parte, las correlaciones entre precipitaciones observadas y *Hirlam* no son muy fuertes (la máxima correlación canónica es 0,73 que implica algo más de un 50% de varianza explicada en esa variable canónica). Por otra, un desacoplamiento entre precipitación observada y *Hirlam* puede tener origen simplemente en una mala predicción del modelo, siendo ésta una causa potencial de confusión. Con todo, se considera que la hipótesis planteada es interesante y que merece la pena explorarla.

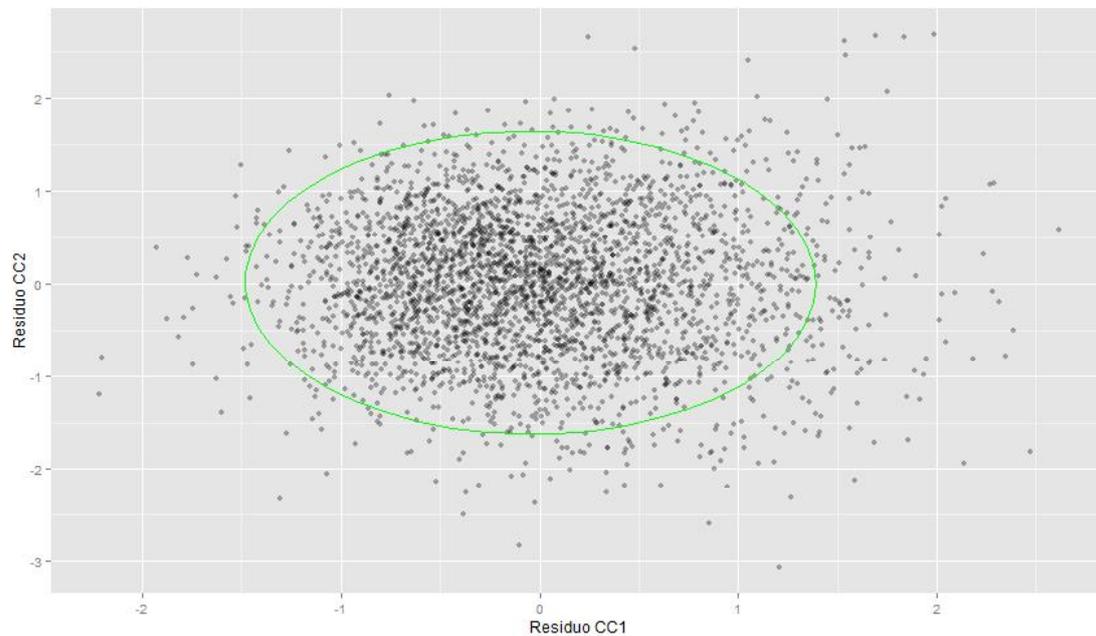
En el *CCA* realizado, a las precipitaciones *Hirlam* se les ha dado consideración de variables “*x*”, es decir, variables explicativas, y a las precipitaciones en pluviómetros se les ha dado consideración de variables “*y*” o variables a explicar a partir de las variables “*x*”.

Entonces, cada par de variables canónicas cuenta con una variable *U* procedente de *Hirlam* y otra *V* procedente de observaciones, y tiene asociada una regresión *V* sobre *U* que proporciona una serie de valores *V\** que estima la serie de valores *V*.

Las líneas de ajuste (ver gráfico de la Figura 54 anterior) representan estas regresiones para las cuatro primeras correlaciones canónicas. En los gráficos, los residuos *V\* - V* son las distancias verticales de cada punto a la recta de regresión correspondiente. Si se consideran las dos primeras correlaciones canónicas, los residuos para los 3.169 casos de prueba se pueden representar en un gráfico de dispersión, que es el que se presenta en la Figura 56. Se comprueba que siguen una distribución centrada alrededor del origen y con densidad decreciente con la distancia a él. Los residuos en cada correlación canónica son independientes de los de las otras.

Se ha representado la elipse que contiene al 95% de los casos y tiene diámetros proporcionales a la dispersión en cada eje. El interior de la elipse puede considerarse la región de “residuos no significativos al 5%”. En general puede considerarse que una mayor distancia al origen en el “plano de residuos”, corregida en cada dimensión por la desviación típica en ese eje, indica una menor conformidad entre las observaciones de precipitación y el campo *Hirlam* correspondiente.

**FIGURA 56. GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE RESIDUOS  $V^* - V$  EN LAS DOS PRIMERAS CORRELACIONES CANÓNICAS**



*Cada punto representa un caso (una hora) del histórico. La elipse contiene al 95% de los puntos y cada diámetro es proporcional a la desviación típica del conjunto de residuos en el eje correspondiente.*

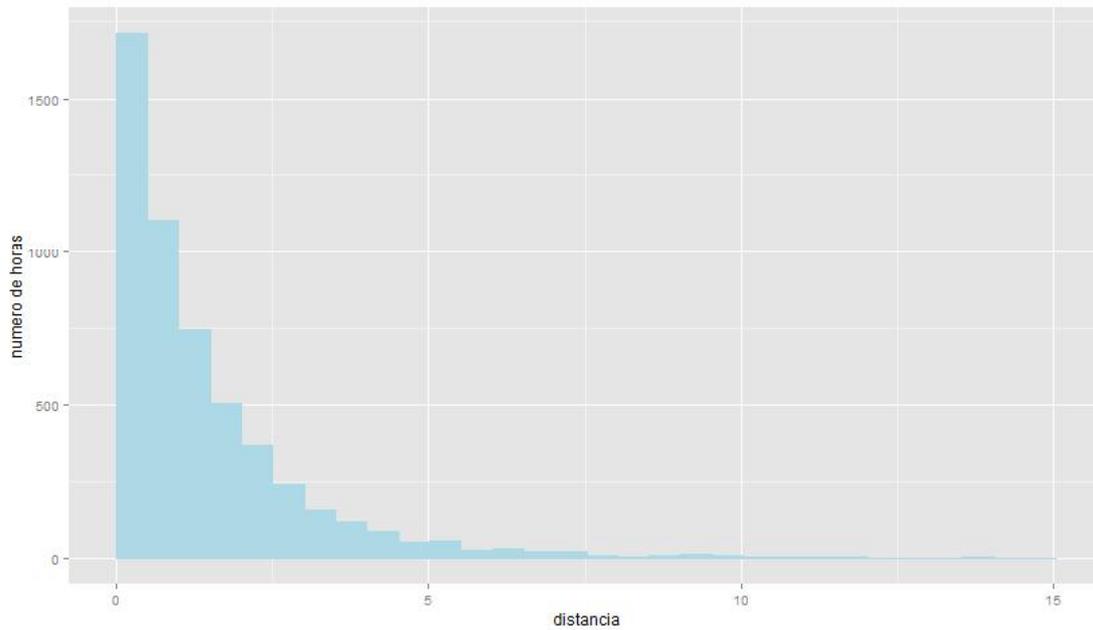
Naturalmente, se puede considerar cualquier otro número de correlaciones canónicas en lugar de dos y formar el “espacio de residuos” en el que evaluar, en él, las distancias al origen. El único inconveniente para más de dos correlaciones canónicas es que la representación gráfica se complica.

Se ha decidido considerar las cuatro primeras correlaciones canónicas, sin ningún criterio especial, aparte de que son las que superan el umbral de 0,5. Con ellas se han calculado las distancias al origen para los 3.169 casos de prueba con las que se ha formado el histograma presentado como Figura 57.

Los percentiles 95% y 99% del conjunto de distancias calculado son 4,306 y 7,107 respectivamente. Estos valores se pueden considerar umbrales de significación al 5% y al 1%, respectivamente, para un test de conformidad de un campo de precipitaciones con el campo **Hirlam** correspondiente.

La hipótesis nula del test es “*el campo de precipitaciones no ha sido alterado*” y el estadístico es la distancia al origen en el espacio de residuos tal como se ha descrito. Como distribución del estadístico en la hipótesis nula se toma la distribución empírica representada de forma simplificada en el histograma de la Figura 57.

**FIGURA 57. HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE LAS DISTANCIAS, EN EL ESPACIO DE RESIDUOS, DE LAS CUATRO PRIMERAS CORRELACIONES CANÓNICAS**



### 5.5.3. Particularización para ventanas de oportunidad

Para un episodio de precipitación cualquiera se pueden calcular los valores de distancia, en el *espacio de residuos*, para cada uno de los campos de precipitación horarios y evaluar, siquiera visualmente, si estos son conformes con los campos de precipitación *Hirlam*. Esto se ha hecho con las ventanas de oportunidad para la estimulación de nubes recopiladas más arriba en el apartado 3.2.3.

Hay un total de 21 ventanas de oportunidad, de las que dos de ellas se han descartado de antemano, por su duración excesivamente corta: 12/02/2011 (3 minutos) y 05/03/2011 (4 minutos). Quedan, por tanto, 19.

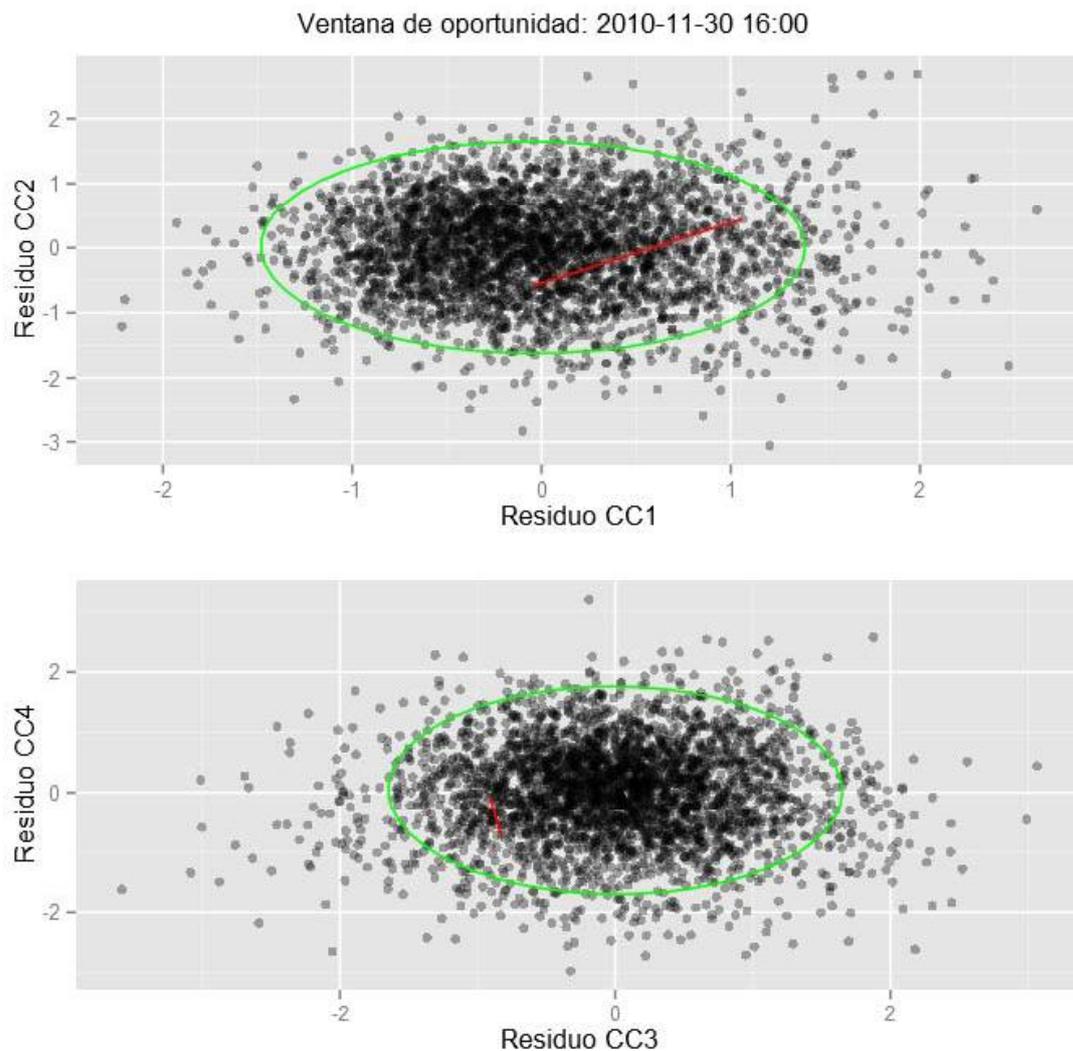
1	30/11/2010 horas 16 a 18	11	13/02/2011 horas 15 a 18
2	01/12/2010 horas 4 a 14	12	16/02/2011 horas 15 a 18
3	02/12/2010 horas 11 a 14	13	04/03/2011 horas 6 a 22
4	02/12/2010 horas 22 a 23	14	27/01/2012 horas 4 a 10
5	05/12/2010 horas 6 a 12	15	01/02/2012 horas 16 a 19
6	05/12/2010 horas 22 a 24	16	02/02/2012 horas 17 a 22
7	20/12/2010 horas 21 a 24	17	04/02/2012 horas 14 a 19
8	23/12/2010 horas 21 a 24	18	05/02/2012 horas 12 a 18
9	27/01/2011 horas 19 a 24	19	07/02/2012 horas 0 a 3
10	28/01/2011 horas 9 a 10		

De éstas, las 15, 16 y 17 de la lista también se han descartado porque los datos pluviométricos en alguna de las horas no estaban completos. Quedan, por tanto, 16 ventanas de oportunidad para el análisis.

En las figuras siguientes se muestran algunos ejemplos de trayectorias en el *espacio de residuos* de la secuencia de campos de precipitación horaria de algunas ventanas de oportunidad. Como estamos trabajando con cuatro pares de correlaciones canónicas, el *espacio de residuos* es cuatridimensional y para su representación se ha desdoblado en dos gráficos de dispersión.

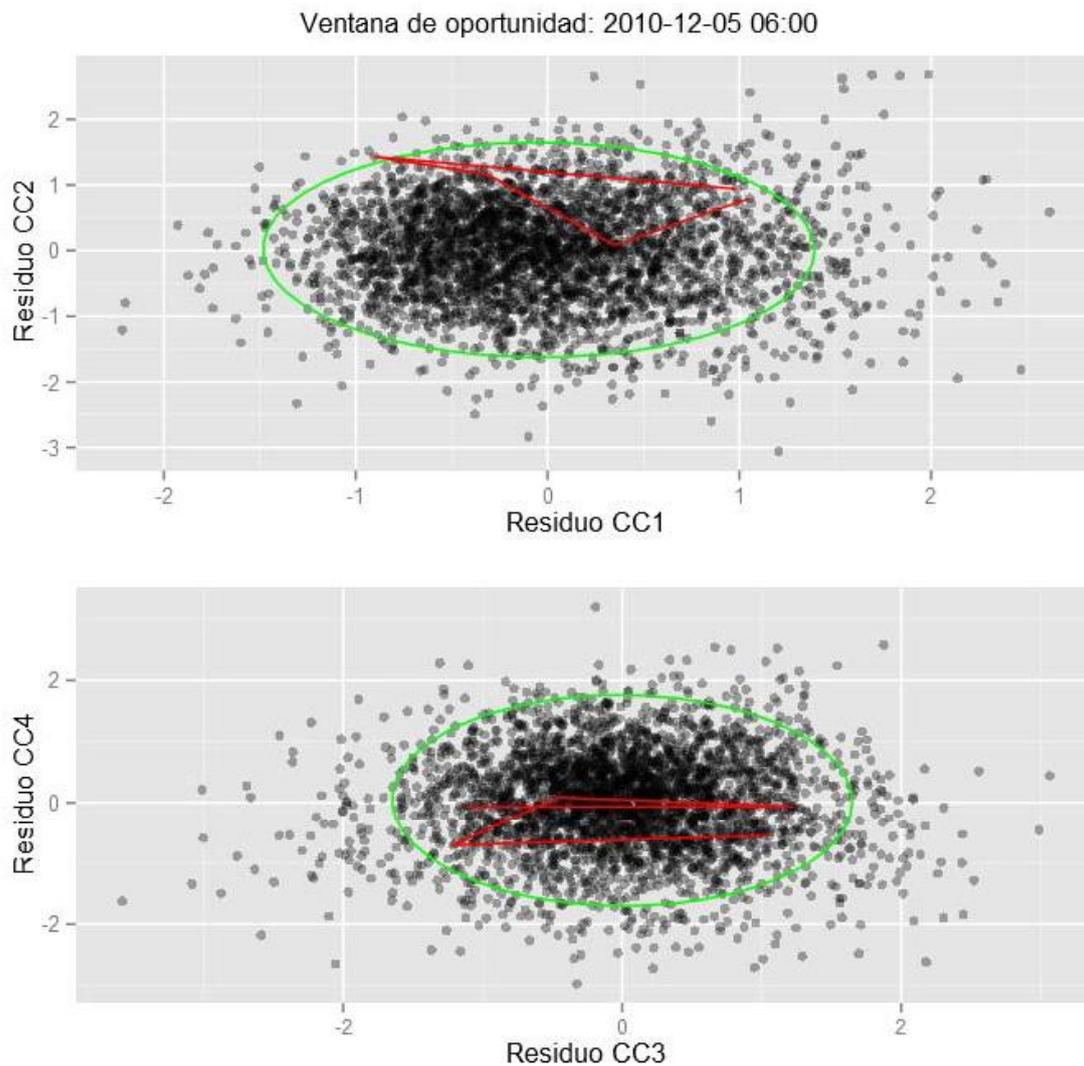
En cada uno de los gráficos del par se ha dibujado una elipse del 95%, si bien su interpretación en este caso no es directa, la distancia se forma con las cuatro dimensiones así que el recinto de 95% es un hiperelipsoide de 4 dimensiones. Un punto puede aparecer fuera de una de las elipses pero estar dentro del hiperelipsoide o estar dentro de las dos elipses y, en cambio, quedar fuera del elipsoide.

**FIGURA 58. TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 1**



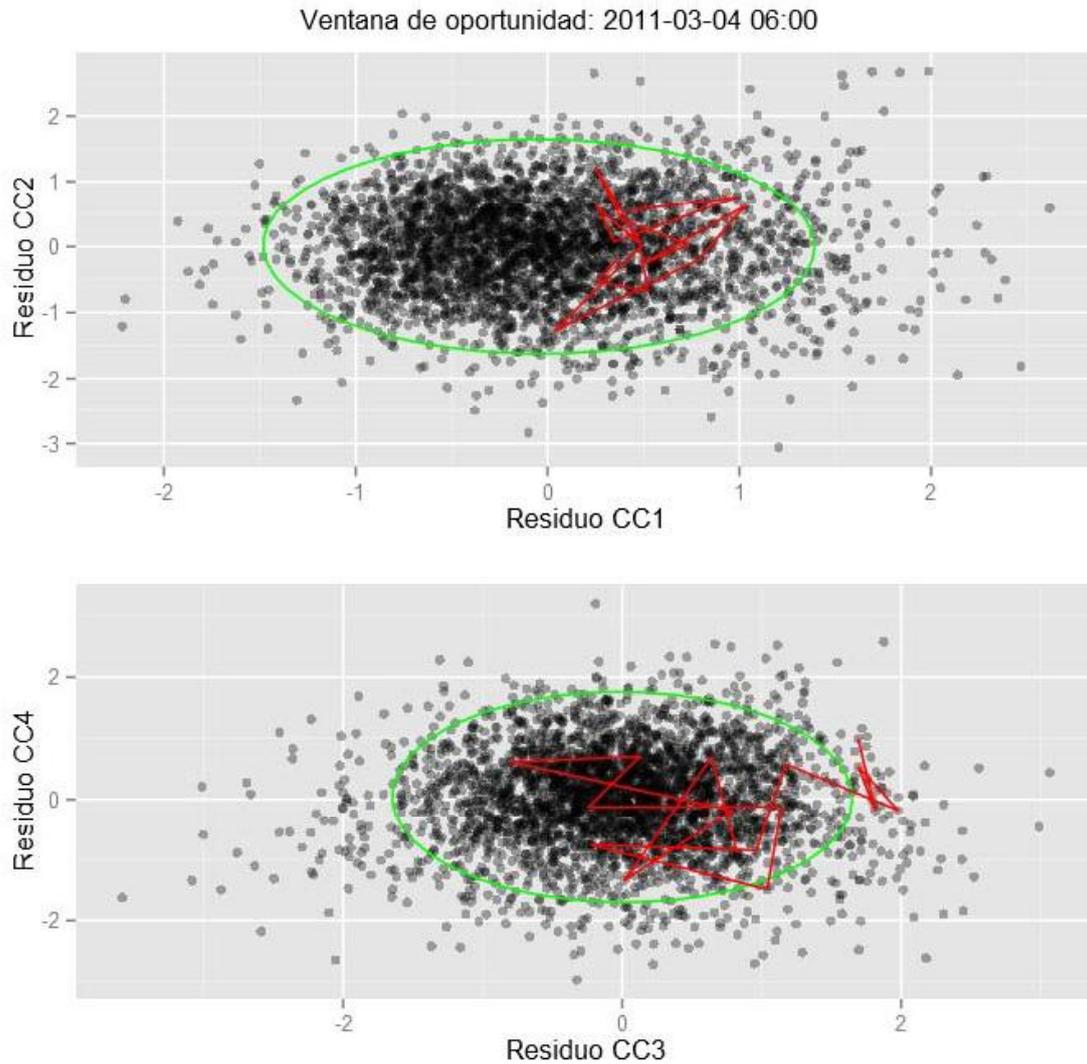
Los cuatro residuos canónicos correspondientes a un campo de precipitación se representan mediante dos puntos, uno en el gráfico superior (residuos de CC1 y CC2) y otro en el inferior (residuos de CC3 y CC4). Los puntos grises representan los 3.169 casos de análisis y las líneas rojas unen los puntos correspondientes a la ventana de oportunidad en el orden en que se suceden en el tiempo.

**FIGURA 59.** TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4, PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 5



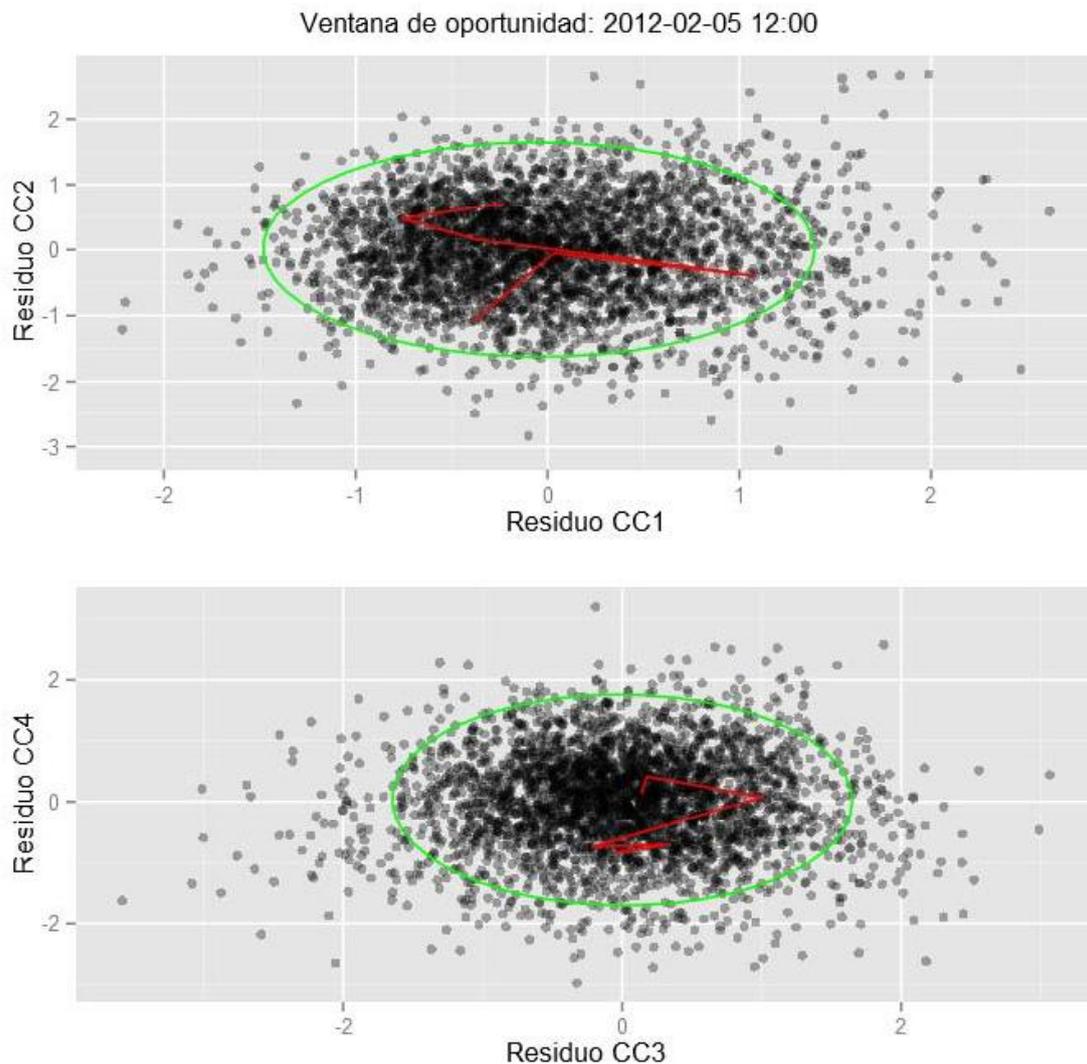
Los cuatro residuos canónicos correspondientes a un campo de precipitación se representan mediante dos puntos, uno en el gráfico superior (residuos de CC1 y CC2) y otro en el inferior (residuos de CC3 y CC4). Los puntos grises representan los 3.169 casos de análisis y las líneas rojas unen los puntos correspondientes a la ventana de oportunidad en el orden en que se suceden en el tiempo.

**FIGURA 60.** TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4, PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 13



Los cuatro residuos canónicos correspondientes a un campo de precipitación se representan mediante dos puntos, uno en el gráfico superior (residuos de CC1 y CC2) y otro en el inferior (residuos de CC3 y CC4). Los puntos grises representan los 3.169 casos de análisis y las líneas rojas unen los puntos correspondientes a la ventana de oportunidad en el orden en que se suceden en el tiempo.

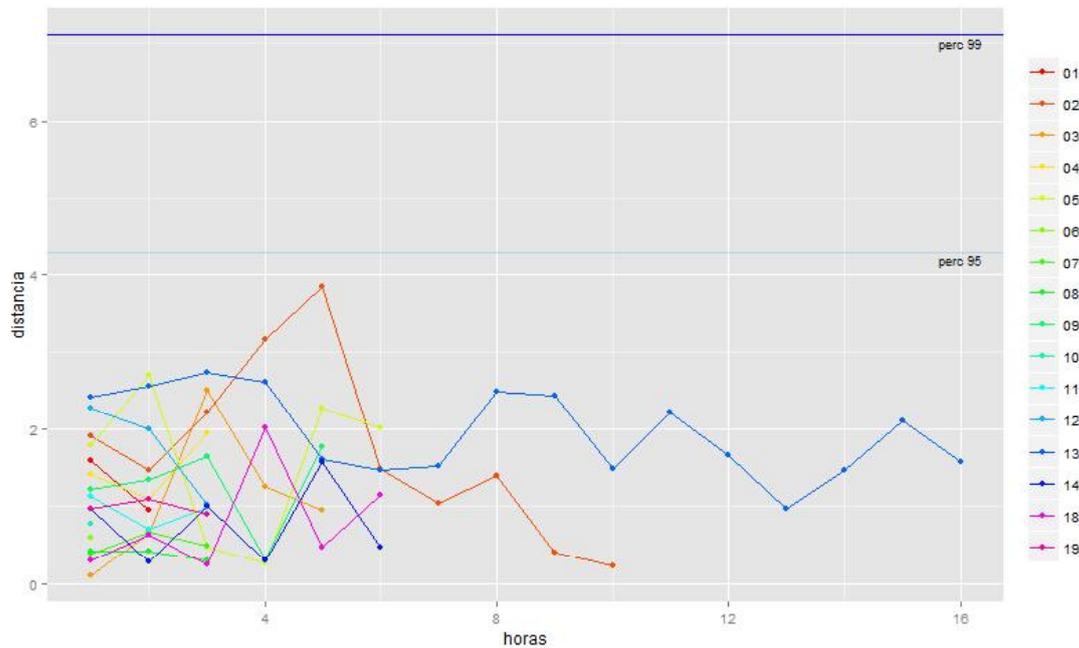
**FIGURA 61.** TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4, PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 18



Los cuatro residuos canónicos correspondientes a un campo de precipitación se representan mediante dos puntos, uno en el gráfico superior (residuos de CC1 y CC2) y otro en el inferior (residuos de CC3 y CC4). Los puntos grises representan los 3.169 casos de análisis y las líneas rojas unen los puntos correspondientes a la ventana de oportunidad en el orden en que se suceden en el tiempo.

Para el conjunto de ventanas de oportunidad se han calculado las distancias en el espacio de residuos de cuatro correlaciones canónicas, para cada una de sus horas, y se han representado en el gráfico de la Figura 62.

Se comprueba que todas las ventanas de oportunidad están constituidas por campos de precipitación “conformes” al 95%. En otras palabras, en ninguno de esos casos se podría rechazar la hipótesis nula “el campo de precipitación no ha sido alterado” con un nivel de significación  $\alpha=0,05$ .

**FIGURA 62. DISTANCIAS EN EL ESPACIO DE RESIDUOS, HORA A HORA, PARA LAS VENTANAS DE OPORTUNIDAD**

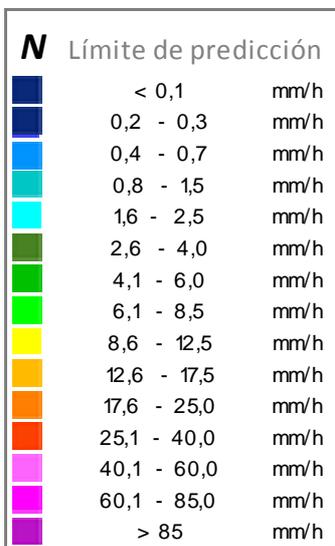
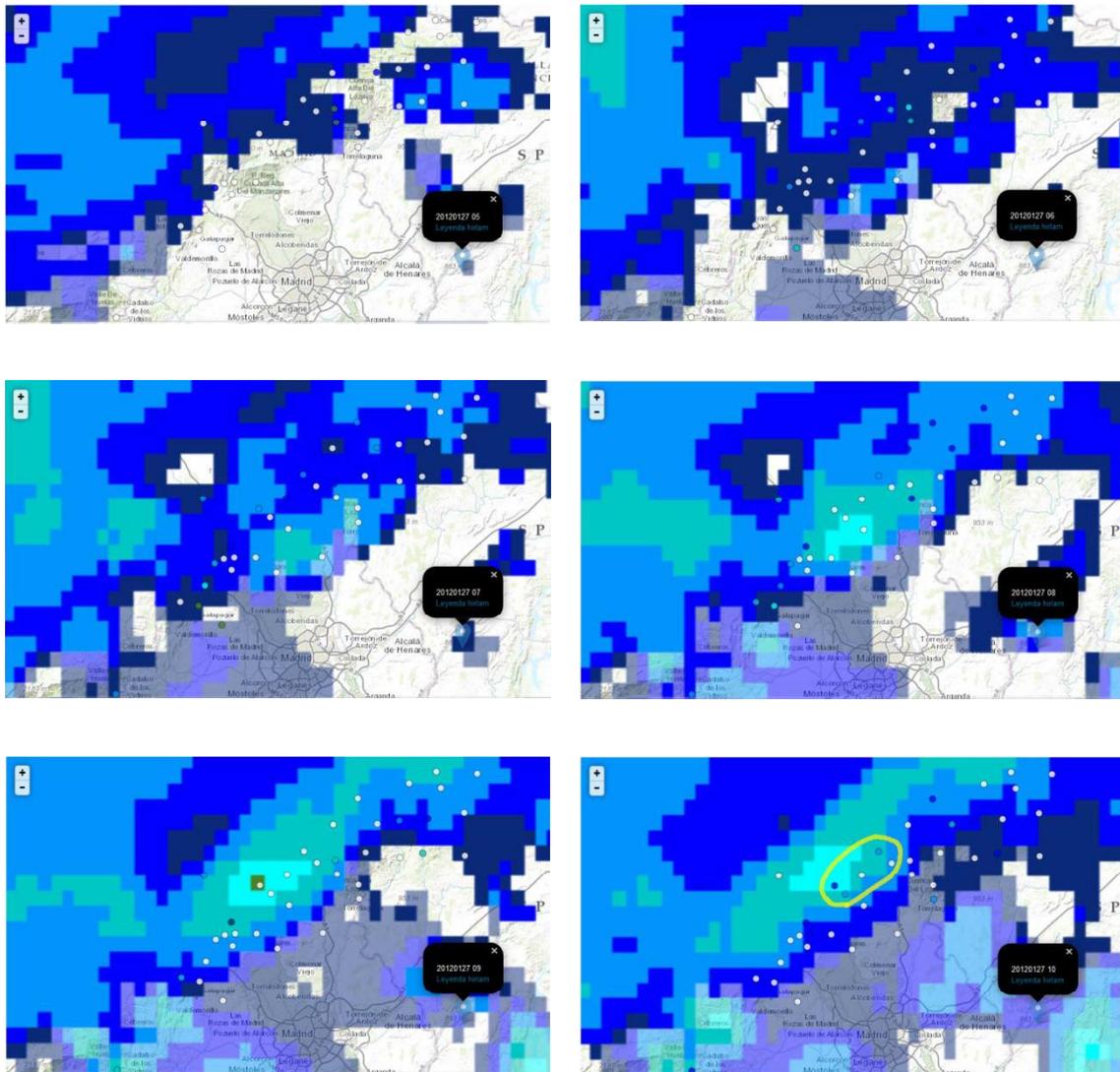
Cada ventana de oportunidad está representada por una línea quebrada que arranca en la hora 1, y se prolonga hacia la derecha tantas horas como su duración. La abscisa de cada punto es el número de orden de la hora que representa, y la ordenada es la distancia en el espacio de residuos. Dos líneas horizontales señalan los percentiles 95 y 99 de la distribución empírica de distancias.

Finalmente, se ha realizado una prueba de sensibilidad del estadístico de conformidad propuesto. Se ha tomado como referencia la ventana de oportunidad 14 (27/01/2012 horas 4 a 10). Las precipitaciones observadas y *Hirlam* de las 6 horas que forman la ventana, según las muestra el visor de aguaceros (ver epígrafe 4.2. “Visualización de Campos de Precipitación”), se presentan en la Figura 63. Se comprueba que la ventana de oportunidad está inserta en un episodio de precipitación poco abundante distribuida predominantemente por las zonas altas de la sierra.

La prueba ha consistido en alterar arbitrariamente los campos de precipitación observados y recalculando las distancias en el **espacio de residuos** para comprobar hasta qué punto la alteración se manifiesta en dichas distancias. Se ha hecho el supuesto de que una eventual actuación de estimulación de nubes ha inducido una mayor precipitación en la cuenca alta del Lozoya, pero no ha alterado las precipitaciones en el resto del ámbito (no se observan precipitaciones importantes en ningún pluviómetro, por lo que no cabe suponer menguas de precipitación fuera del área intervenida). La precipitación en la Cuenca Alta del Lozoya es observable a través de los pluviómetros p101, p102, p313, p314 y p321.

En el último panel de la Figura 63 se han señalado estos pluviómetros. Por simplicidad, se supone que el incremento de precipitación se reparte uniformemente en el tiempo y en el espacio, es decir, produce el mismo incremento en cada uno de los 5 pluviómetros y en cada una de las 6 horas de duración de la ventana de oportunidad.

FIGURA 63. CAMPOS DE PRECIPITACIÓN OBSERVADA Y HIRLAM DE LAS 6 HORAS, VENTANA DE OPORTUNIDAD 14



Los círculos representan los pluviómetros, y están coloreados según la precipitación.

La retícula de color es el campo Hirlam.

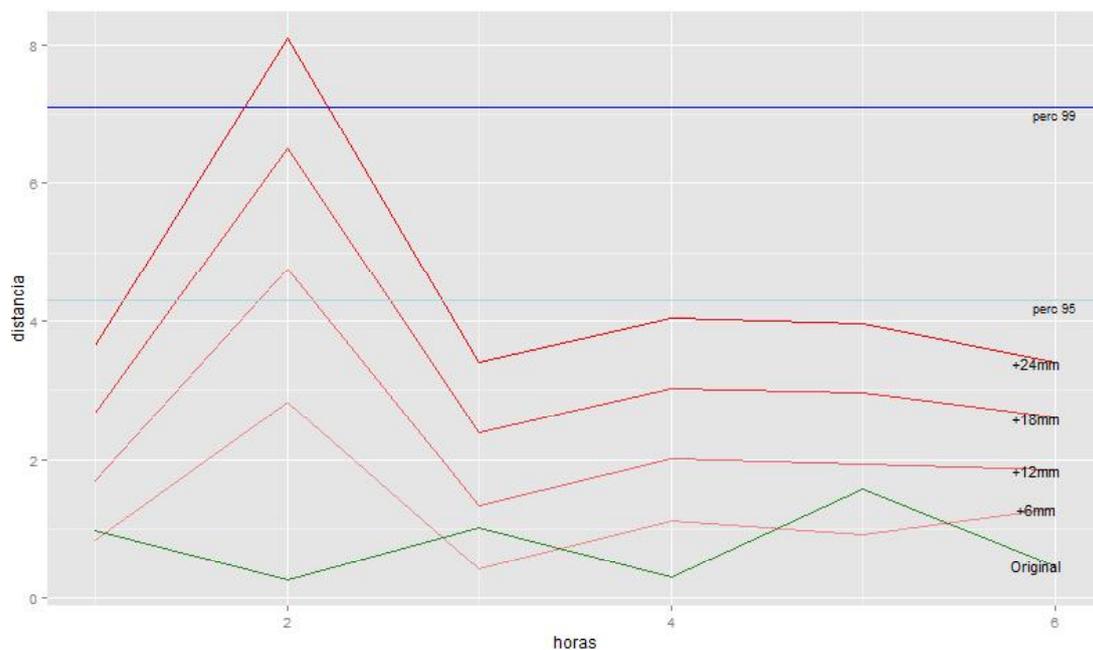
En la última imagen se han encerrado, en un trazo amarillo, los pluviómetros objetivo para la prueba.

Se han ensayado 4 alteraciones de precipitación, correspondientes a incrementos de 6, 12, 18 y 24 milímetros en 6 horas respectivamente (1, 2, 3 y 4 mm/h en toda la duración de la ventana de oportunidad).

La Figura 67 muestra la secuencia de distancias en el *espacio de residuos* para los campos observados y para las 4 secuencias de campos de precipitación alterados. Se comprueba que las distancias son bastante sensibles a alteraciones moderadas de las precipitaciones.

Para el incremento de 12 mm, una hora supera el umbral del 95% y para 24 mm, la misma hora supera el umbral del 99% y otras dos se quedan a las puertas de superar el umbral del 95%. Así pues, una alteración de las precipitaciones de cierta magnitud y localizada en la cuenca alta del Lozoya se manifiesta en las distancias en el *espacio de residuos*.

**FIGURA 64. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SENSIBILIDAD A LA ALTERACIÓN DEL CAMPO DE PRECIPITACIONES EN LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 14**



La línea verde representa la secuencia de distancias en el *espacio de residuos* para los campos de precipitación observados. Las líneas rojas representan la misma secuencia para los campos de precipitación alterados (incremento de 6, 12, 18 y 24 mm en 6 horas). Las líneas horizontales señalan los percentiles de distancia 95 y 99.

#### 5.5.4. Aplicación para la evaluación de actuaciones de estimulación de nubes

El ensayo realizado con la ventana de oportunidad 14 sirve de guía para establecer una metodología de diagnóstico de una actuación de estimulación de nubes.

Los pasos a seguir serían los siguientes:

1. Recopilar los campos **Hirlam** correspondientes a las horas de la ventana de oportunidad en la que se ha actuado (o, más general, el conjunto de horas en que se supone que la estimulación de nubes puede tener efecto).
2. Recopilar las observaciones de precipitación horaria en los 37 pluviómetros estudiados y para las mismas horas.
3. Para la hora primera, con los valores de la precipitación **Hirlam**, calcular las 4 primeras variables canónicas del lado "x",  $U_1, \dots, U_4$ .
4. Con las 4 primeras regresiones canónicas, calcular el valor estimado de las 4 primeras variables canónicas del lado "y",  $V_1^*, \dots, V_4^*$ .
5. Con los datos de precipitación observados, calcular el valor observado de las 4 primeras variables canónicas del lado "y",  $V_1, \dots, V_4$ .
6. Calcular los 4 residuos  $V_1 - V_1^*, \dots, V_4 - V_4^*$ . En el espacio de residuos, calcular la distancia al origen del punto correspondiente,  $d_1$  (normalizando con la desviación típica en cada dimensión).
7. Repetir los pasos 3 a 6 con las horas segunda y siguientes. Se obtienen las distancias en el espacio de residuos  $d_2, \dots, d_N$ .
8. Cotejar los valores de las distancias  $d_1, \dots, d_N$  con los umbrales de significación del 5% o del 1%. En la medida en que una o más de las distancias  $d_1, \dots, d_N$  superen estos umbrales se podrá inferir que la actuación de estimulación de nubes ha afectado a la precipitación.

## 6. Conclusiones



Del estudio realizado se extraen las siguientes conclusiones:

### 🔹 Sobre los datos

Existen datos pluviométricos de alta resolución temporal (horaria o superior) que proporcionan una cobertura espacial suficiente en el ámbito del estudio con la excepción de la vertiente Duero. La calidad de los datos es la adecuada para estudios de caracterización de las precipitaciones como el que se ha llevado a cabo, si bien es necesario someter las series a revisión para detectar y subsanar posibles anomalías. Son relativamente frecuentes las secuencias de datos repetidos. En el caso de los datos de AEMET, son muy frecuentes las lagunas, hasta el punto de que algunas series no se han podido utilizar.

### 🔹 Sobre la caracterización general de las precipitaciones

Las precipitaciones presentan los patrones de estacionalidad esperables en cantidad de precipitación y, de forma menos marcada, en duración e intensidad de los aguaceros.

No se observan diferencias importantes entre pluviómetros, con la salvedad de p202 (Estación de esquí *La Pinilla*) que destaca sobre los demás en cantidad de precipitación.

Los meses de Noviembre a Abril (lo que se ha denominado aquí “*invierno extendido*”) concentran el 91,4% de las situaciones propicias para que se produzca precipitación en forma de nieve (cota de nieve suficientemente baja en algún punto del ámbito del estudio y precipitación observada en alguno de los pluviómetros).

En estos seis meses la incidencia de horas de *nieve potencial* es superior al 30%, mientras que en mayo es del 12,5%, en octubre del 6,5% y el resto de meses es prácticamente insignificante.

Basándose los datos anteriores se ha definido el periodo de Noviembre a Abril, como *temporada de nieve* a efectos de este estudio.

El análisis *Cluster* permite extraer una clasificación de los pluviómetros del ámbito del estudio en cuatro grupos que presentan coherencia espacial y cierto significado físico:

- a) Cuencas altas de Guadarrama y Manzanares
- b) Cuencas altas de Jarama, Sorbe y Bornova
- c) Cuenca media del Lozoya y su prolongación en el Jarama
- d) Sierra al NW del Puerto de Navacerrada, valle alto del Lozoya y vertiente Duero.

El análisis de componentes principales proporciona una caracterización espacial más sofisticada que el análisis “*cluster*” y además, permite reducir notablemente la dimensionalidad del problema. Un conjunto de 6 componentes principales es capaz de representar razonablemente bien (76% de varianza explicada) el campo de precipitaciones observadas en los 37 pluviómetros seleccionados, con la ventaja adicional de la (casi) ausencia de correlación entre componentes principales.

La rotación VARIMAX de las 6 primeras componentes principales proporciona una descripción de la variabilidad espacio-temporal de los campos de precipitación con la misma capacidad explicativa que las componentes principales originales y mediante un conjunto de variables con más sentido físico:

- a) Zonas altas de la sierra de Guadarrama
- b) Cabeceras de Guadarrama y Manzanares
- c) Jarama aguas abajo de El Vado
- d) Cuenca del Lozoya
- e) Macizo de Ayllón
- f) Cabeceras de Sorbe y Bornova

#### Sobre la posibilidad de investigar los efectos de eventuales actuaciones de estimulación de nubes

Los campos de precipitación observada en pluviómetros y los campos de precipitación predicha de **Hirlam** sincrónicos están relacionados y la relación se puede describir matemáticamente mediante análisis de correlaciones canónicas.

Las correlaciones canónicas se pueden utilizar para explicar las precipitaciones observadas a partir de las precipitaciones **Hirlam**. En este sentido, la magnitud de los residuos de las correlaciones señalan cómo de conforme es un campo de precipitación observada con el campo **Hirlam** sincrónico (cómo de bien se puede explicar aquel con la información que proporciona este).

En principio, un campo de precipitación alterado por una eventual estimulación de nubes será menos conforme de lo normal con el campo **Hirlam** sincrónico. Las correlaciones canónicas obtenidas permiten evaluar el grado de conformidad entre ambos y, por tanto, en qué medida se separa de lo esperable en condiciones no alteradas.

Partiendo de esta idea se ha desarrollado una metodología basada en la distancia al origen en el espacio de residuos de las cuatro primeras correlaciones canónicas. Esta metodología, descrita en el epígrafe 5.5.4, del capítulo anterior, se puede emplear para evaluar el efecto que pueda tener una actuación de estimulación de nubes.

La metodología se ha ensayado en el caso particular de las ventanas de oportunidad para estimulación de nubes identificadas por Canal de Isabel II Gestión en las campañas 2010-11 y 2011-12 y parece producir buenos resultados.

## 7. Anexos



## ANEXO 7.1. ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE AGUACEROS POR PLUVIÓMETRO

Para el conjunto de pluviómetros seleccionados se presentan los gráficos de las figuras 65 a 102, organizados en una página por pluviómetro:

- a) Precipitación acumulada promedio mensual, en milímetros (mm), con indicación de la precipitación media anual del periodo.
- b) Frecuencia de aguaceros por meses: número medio de aguaceros registrados en cada mes.
- c) Duración media de aguacero por meses (h). Promedio de las duraciones de los aguaceros registrados en cada mes.
- d) Intensidad media, promedio de los aguaceros de cada mes (mm/h). La intensidad media de cada aguacero es el cociente entre su precipitación acumulada y su duración.
- e) Intensidad máxima promedio de los aguaceros de cada mes (mm/h). Se toma como intensidad máxima de cada aguacero el máximo de los datos de precipitación horaria que lo componen.
- f) Gráficos de dispersión Duración – Intensidad máxima por trimestres OND, EFM, AMJ y JAS, que se corresponden aproximadamente con otoño, invierno, primavera y verano. Para la duración, se ha aplicado en el gráfico una opción “*jitter*” de amplitud 0,3 horas para reducir la superposición de los puntos y apreciar mejor la densidad de casos.

Los gráficos se han elaborado con los datos del periodo de estudio: de 2010-10-01 a 2014-07-31.

Se considera el siguiente concepto de **aguacero**: una secuencia de datos horarios  $P > 0$  consecutivos, precedida por, al menos, un dato horario  $P = 0$  y seguida por, al menos, un dato horario  $P = 0$ . La asignación de los aguaceros a meses se hace según la hora de inicio.

Como duración de **aguacero** se toma la longitud de la secuencia de datos horarios que lo componen, que es la referencia de duración que proporcionan los datos horarios (y que no coincide necesariamente con la duración del intervalo en que se ha estado produciendo precipitación).

Se han incluido también los gráficos correspondientes a un pluviómetro no seleccionado por estar muy alejado del ámbito del estudio: Los Morales, con código p114. Con esta adición se completa el conjunto de pluviómetros de la red de Canal de Isabel II Gestión.

FIGURA 65. PLUVIÓMETRO PINILLA, P101

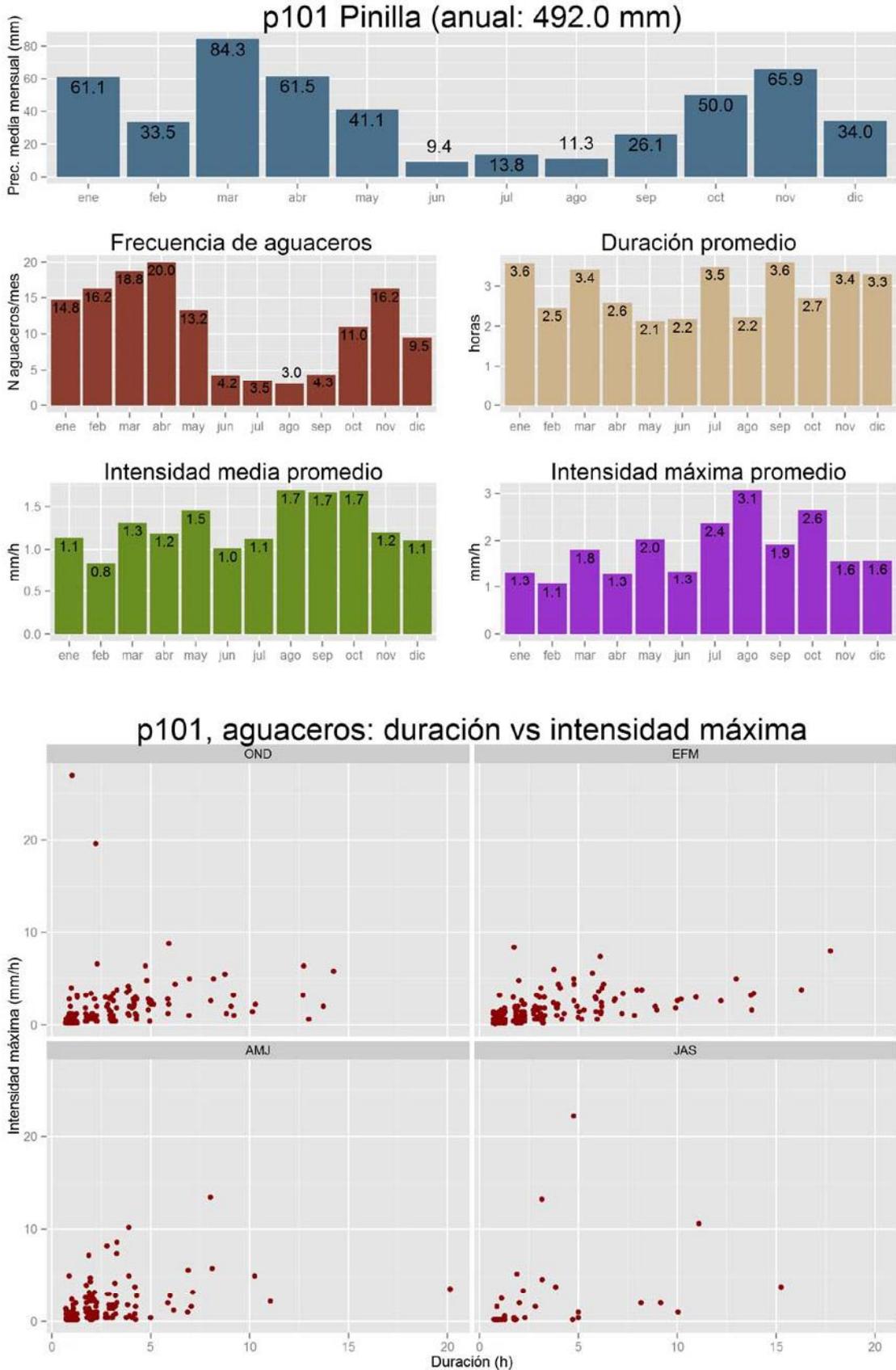


FIGURA 66. PLUVIÓMETRO RIOSEQUILLO, P102

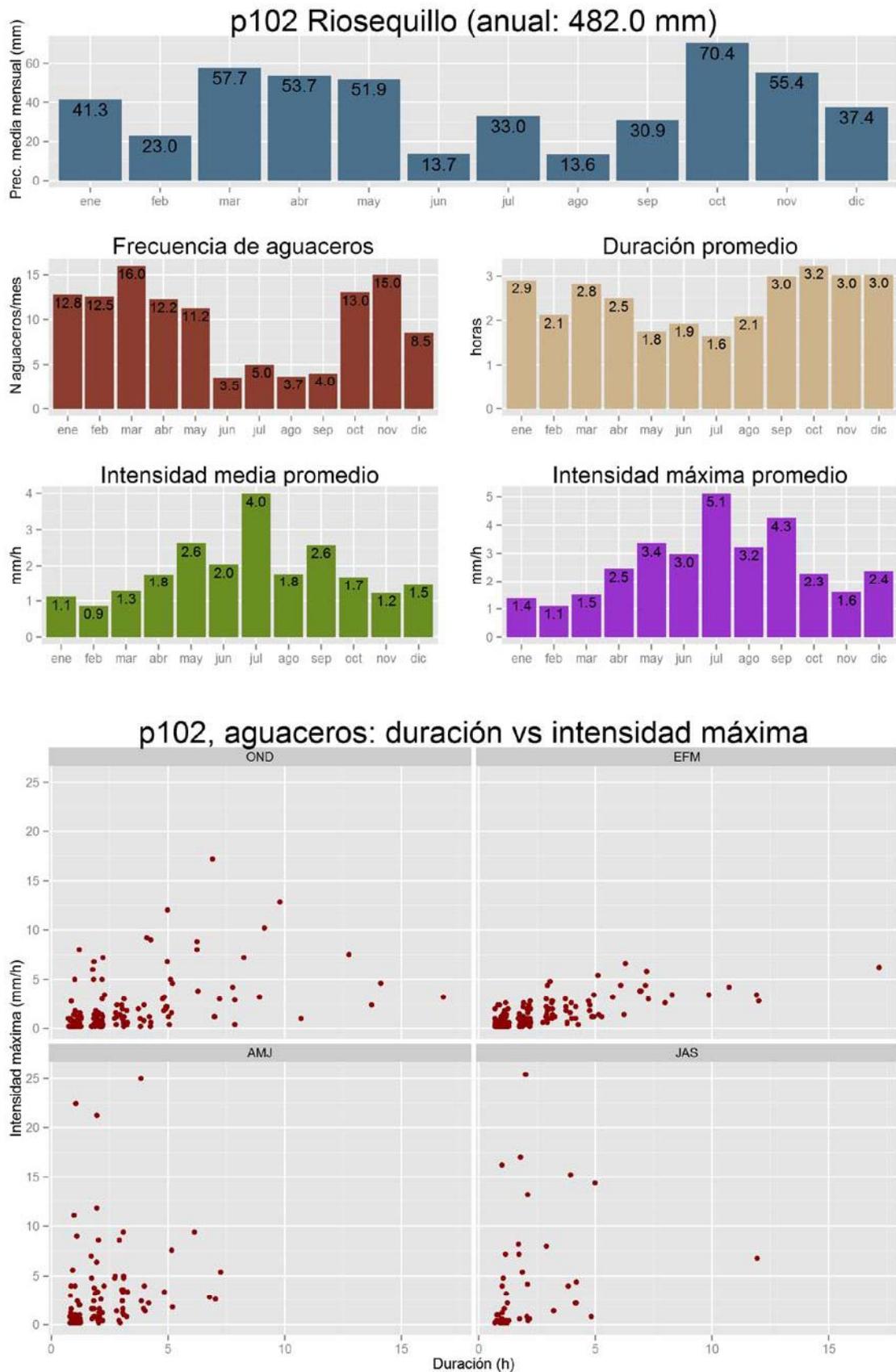


FIGURA 67. PLUVIÓMETRO PUENTES VIEJAS, P103

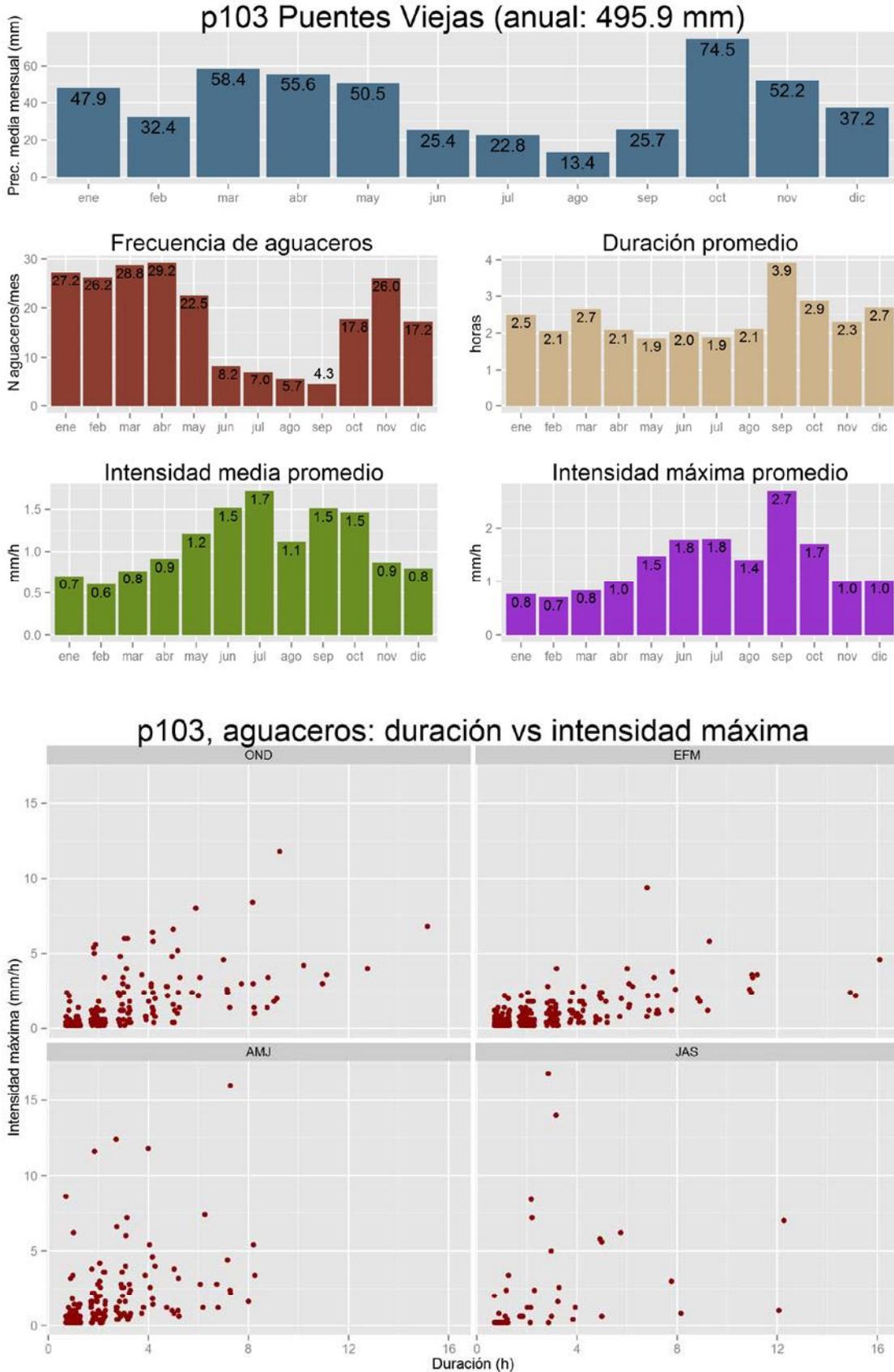


FIGURA 68. PLUVIÓMETRO VILLAR, P104

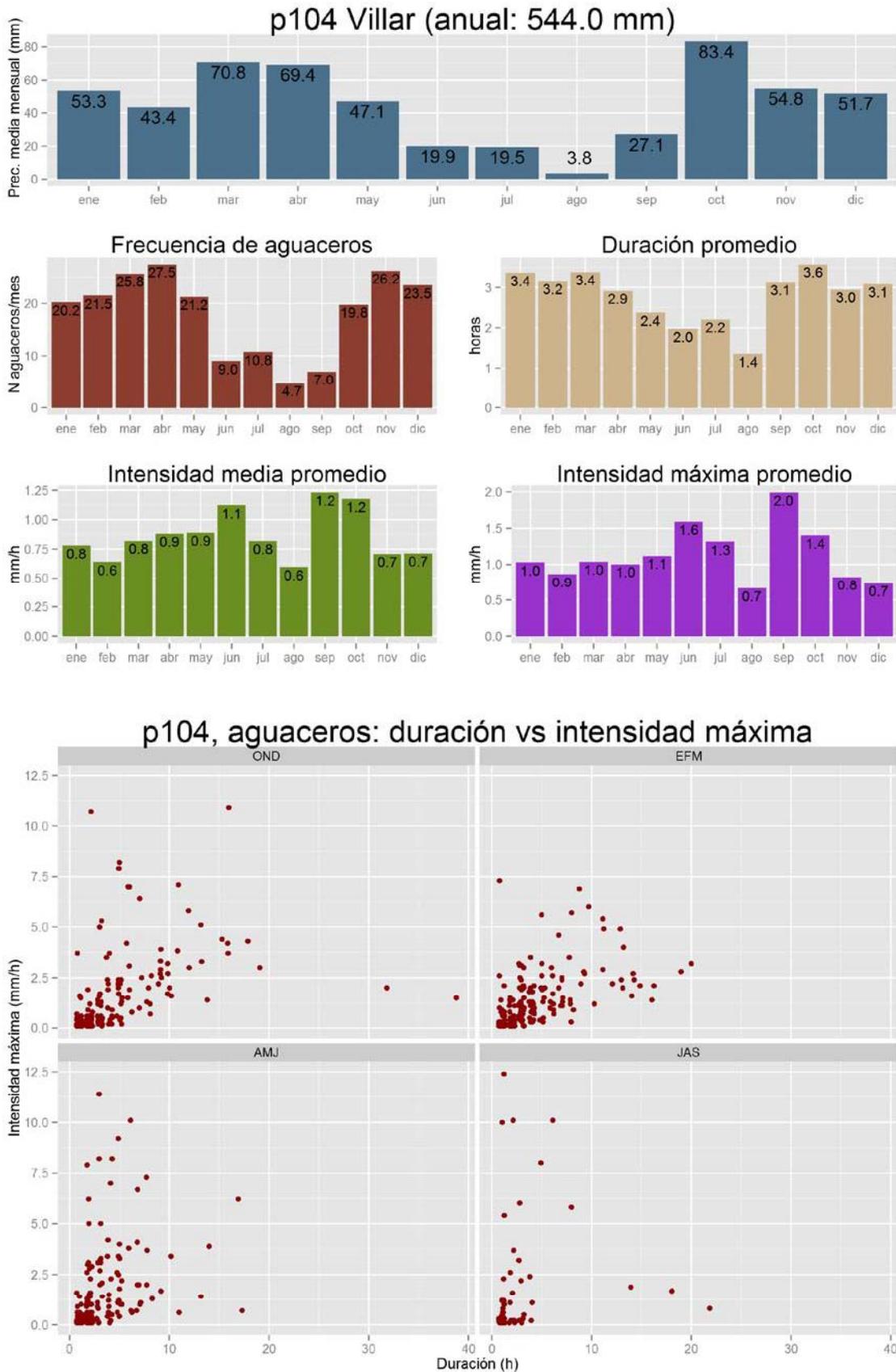


FIGURA 69. PLUVIÓMETRO EL ATAZAR, P105

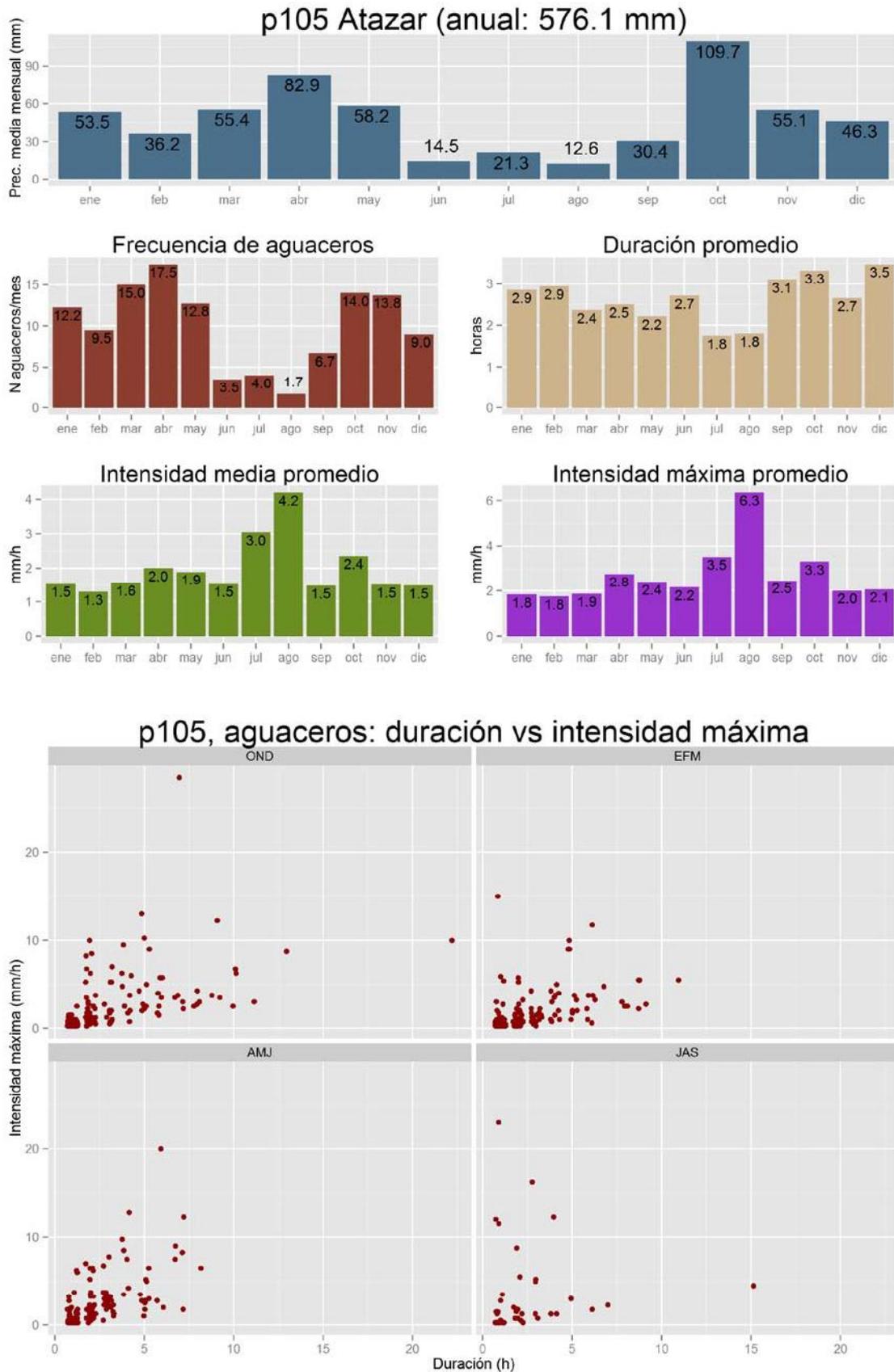


FIGURA 70. PLUVIÓMETRO EL VADO, P106

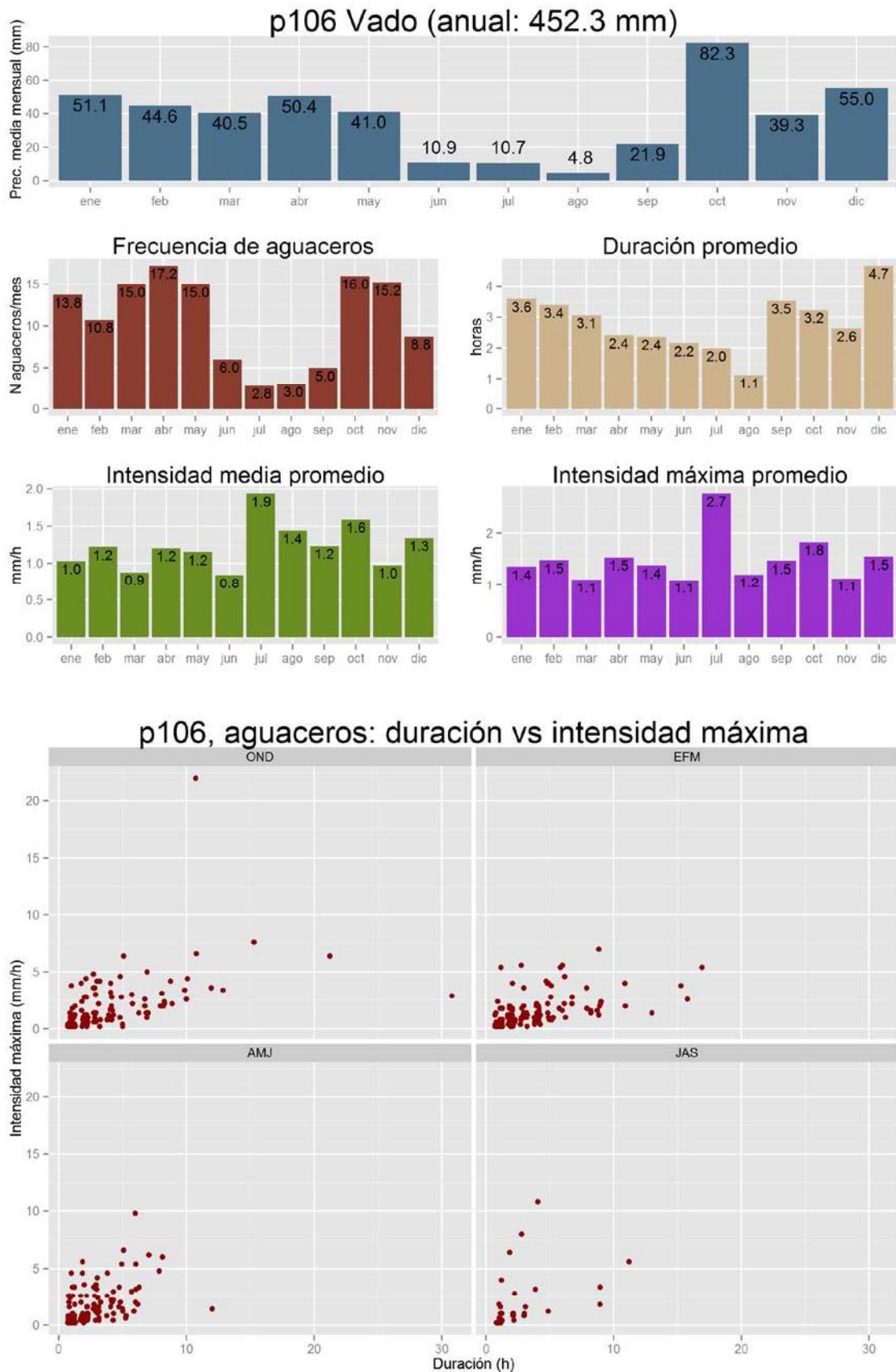


FIGURA 71. PLUVIÓMETRO PEDREZUELA, P107

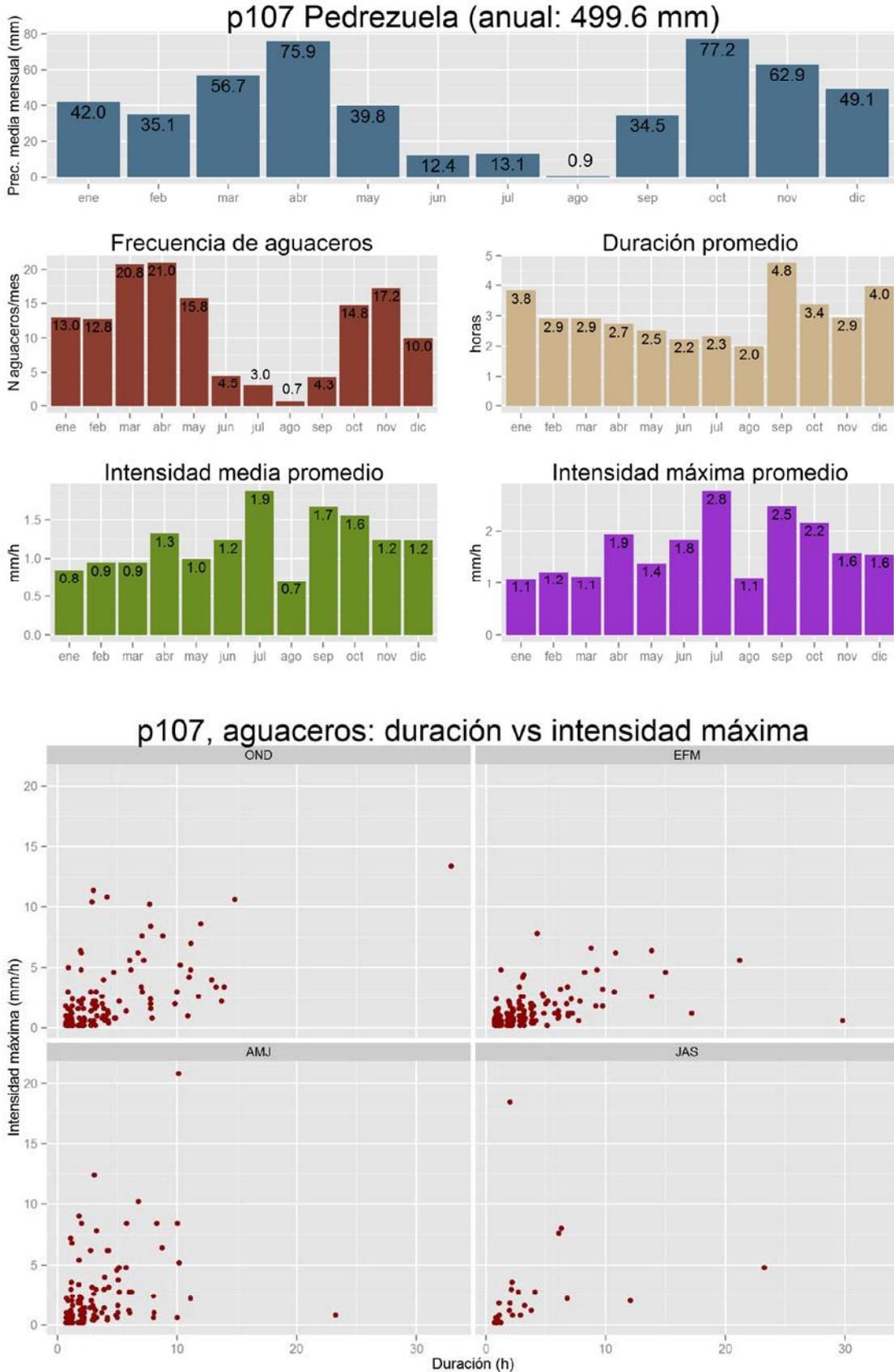


FIGURA 72. PLUVIÓMETRO NAVACERRADA, P108

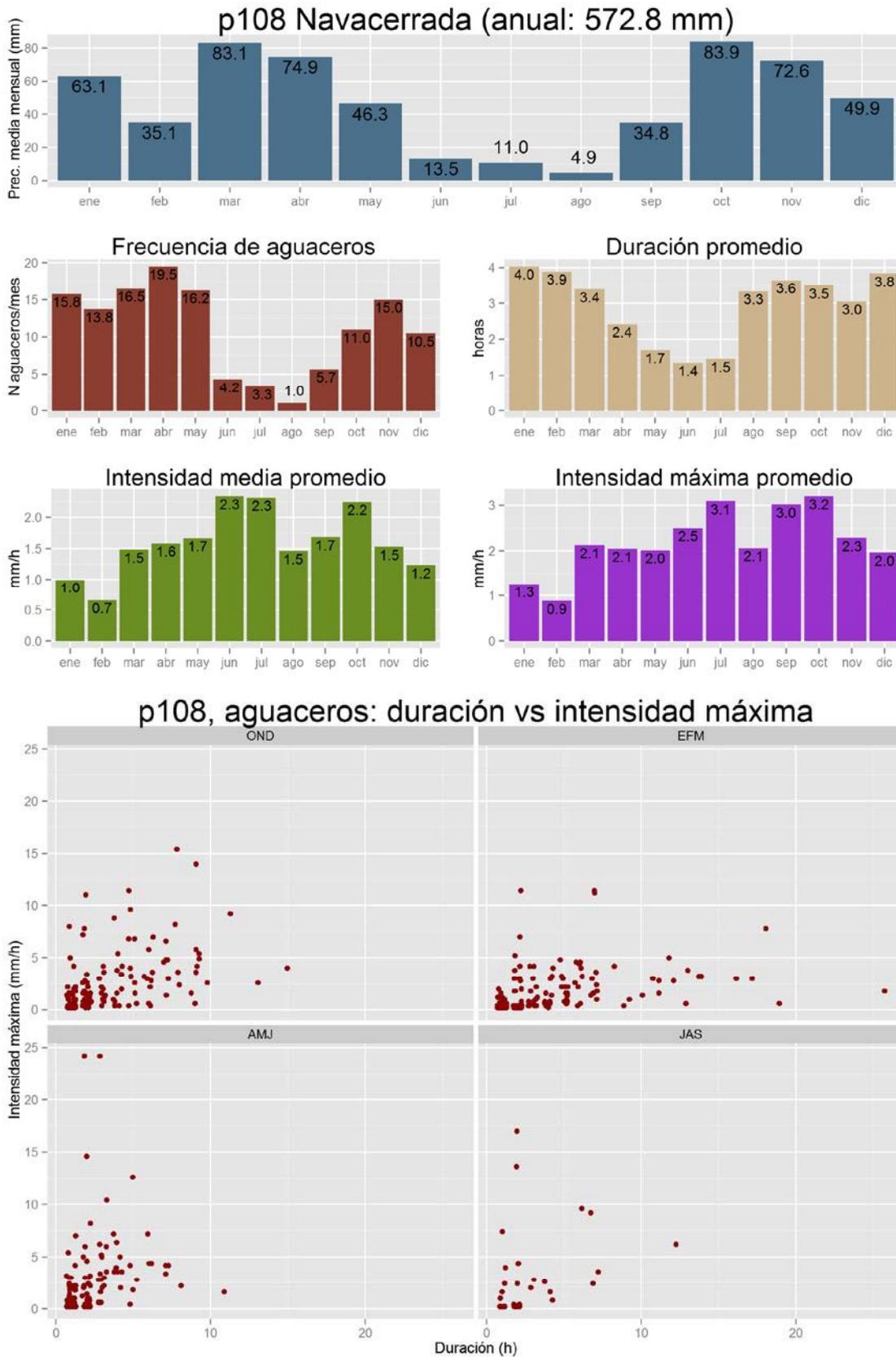


FIGURA 73. PLUVIÓMETRO SANTILLANA, P109

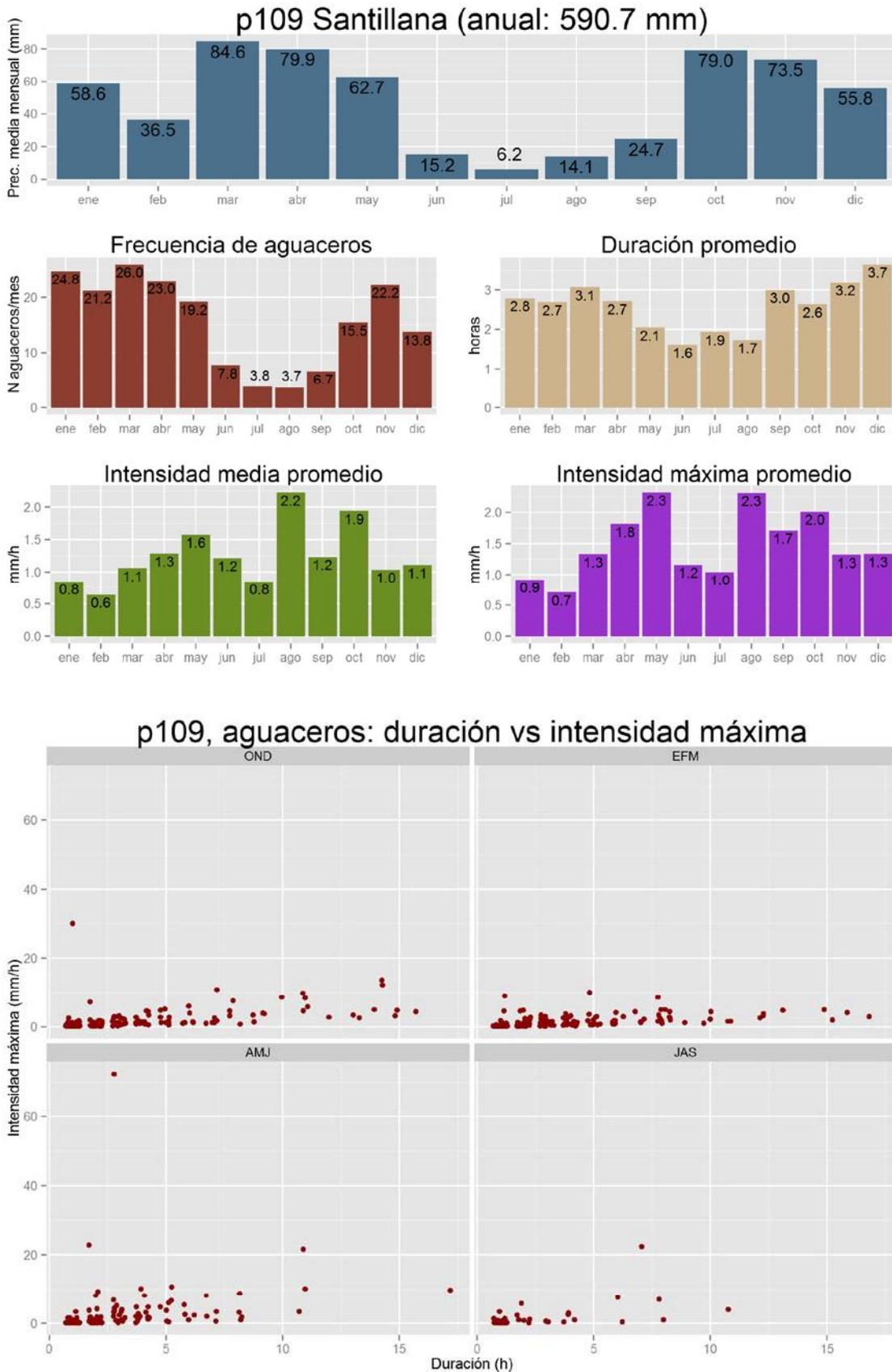


FIGURA 74. PLUVIÓMETRO NAVALMEDIO, P110

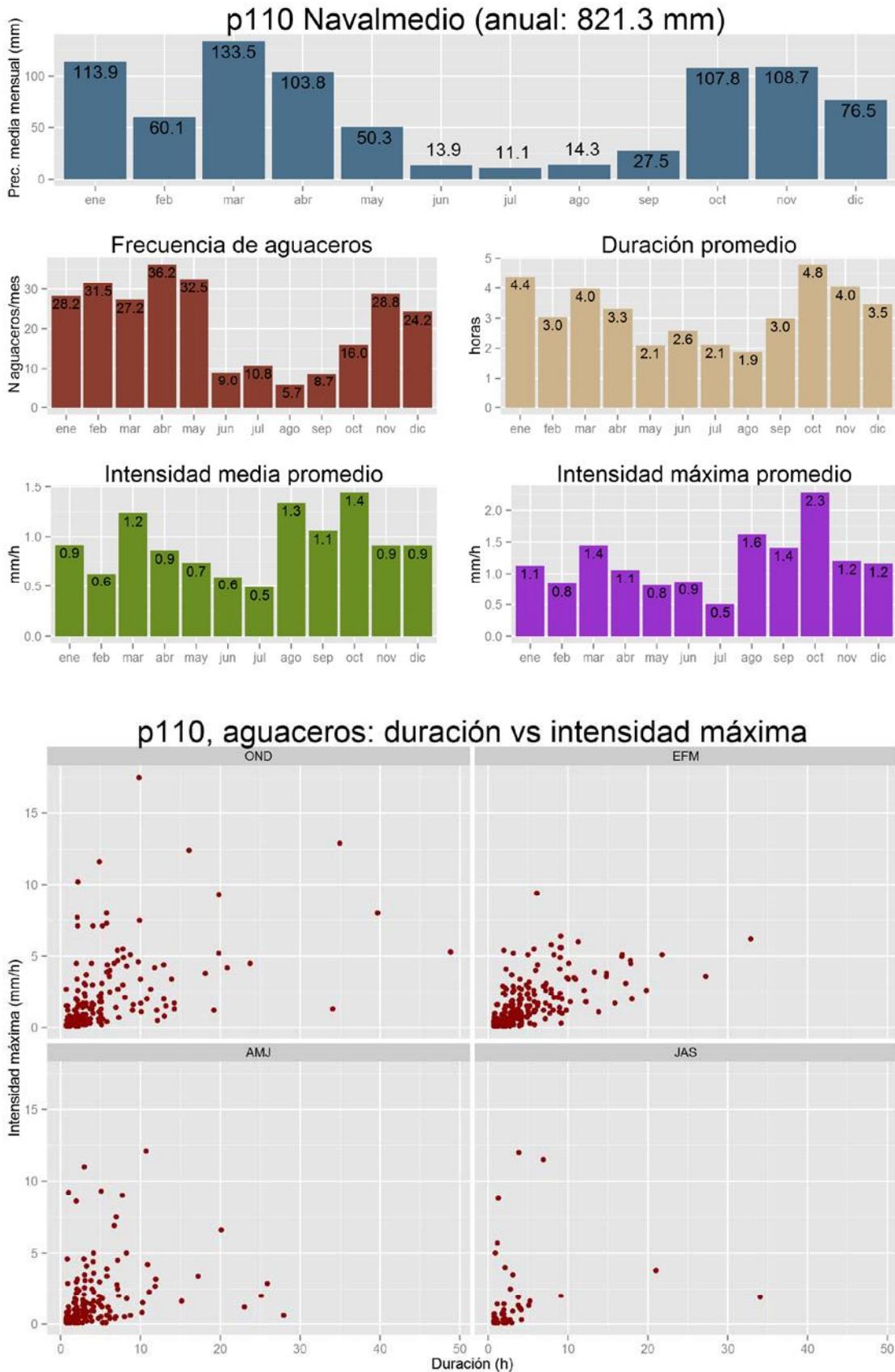


FIGURA 75. PLUVIÓMETRO LA JAROSA, P111

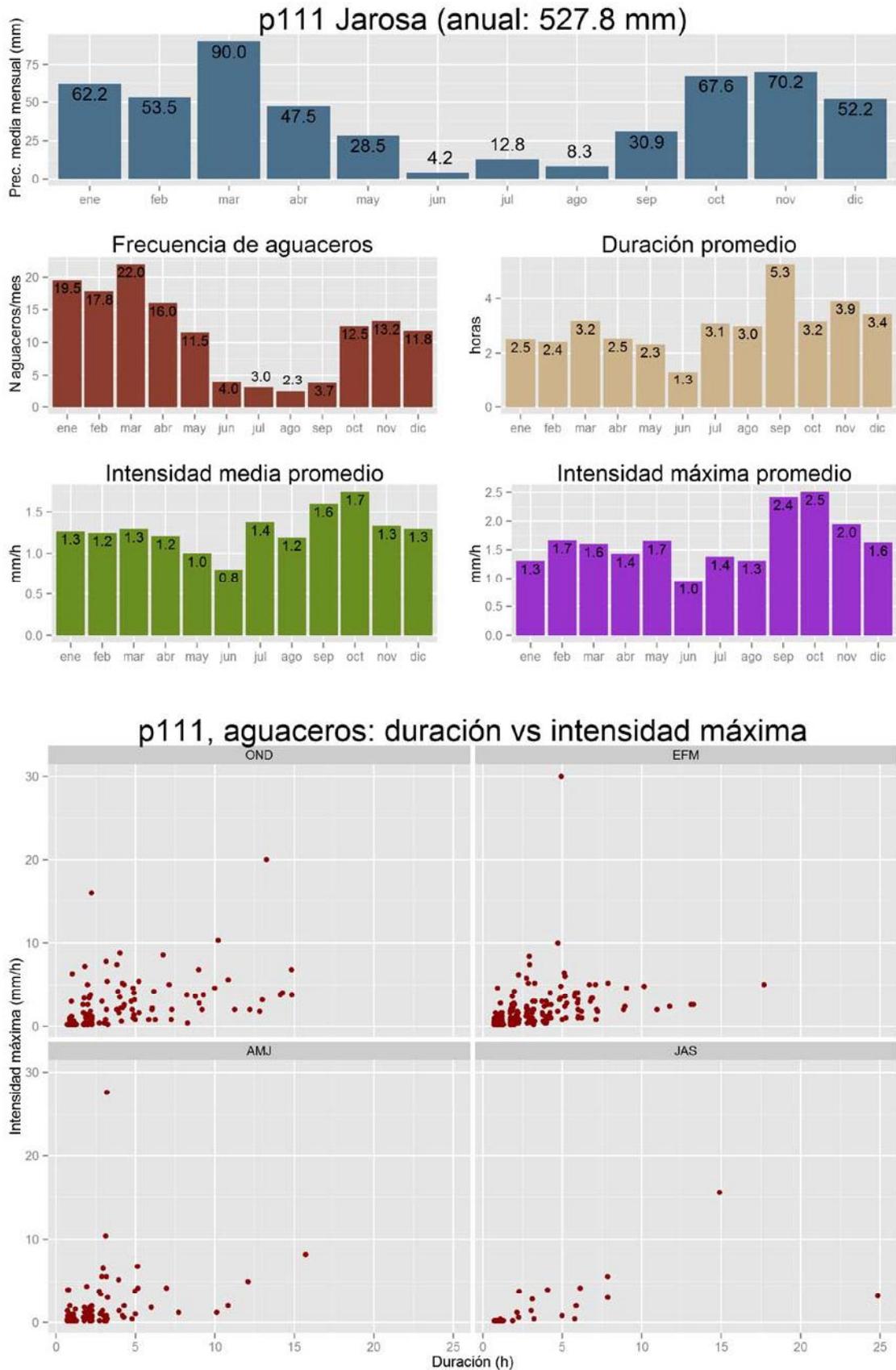


FIGURA 76. PLUVIÓMETRO VALMAYOR, P112

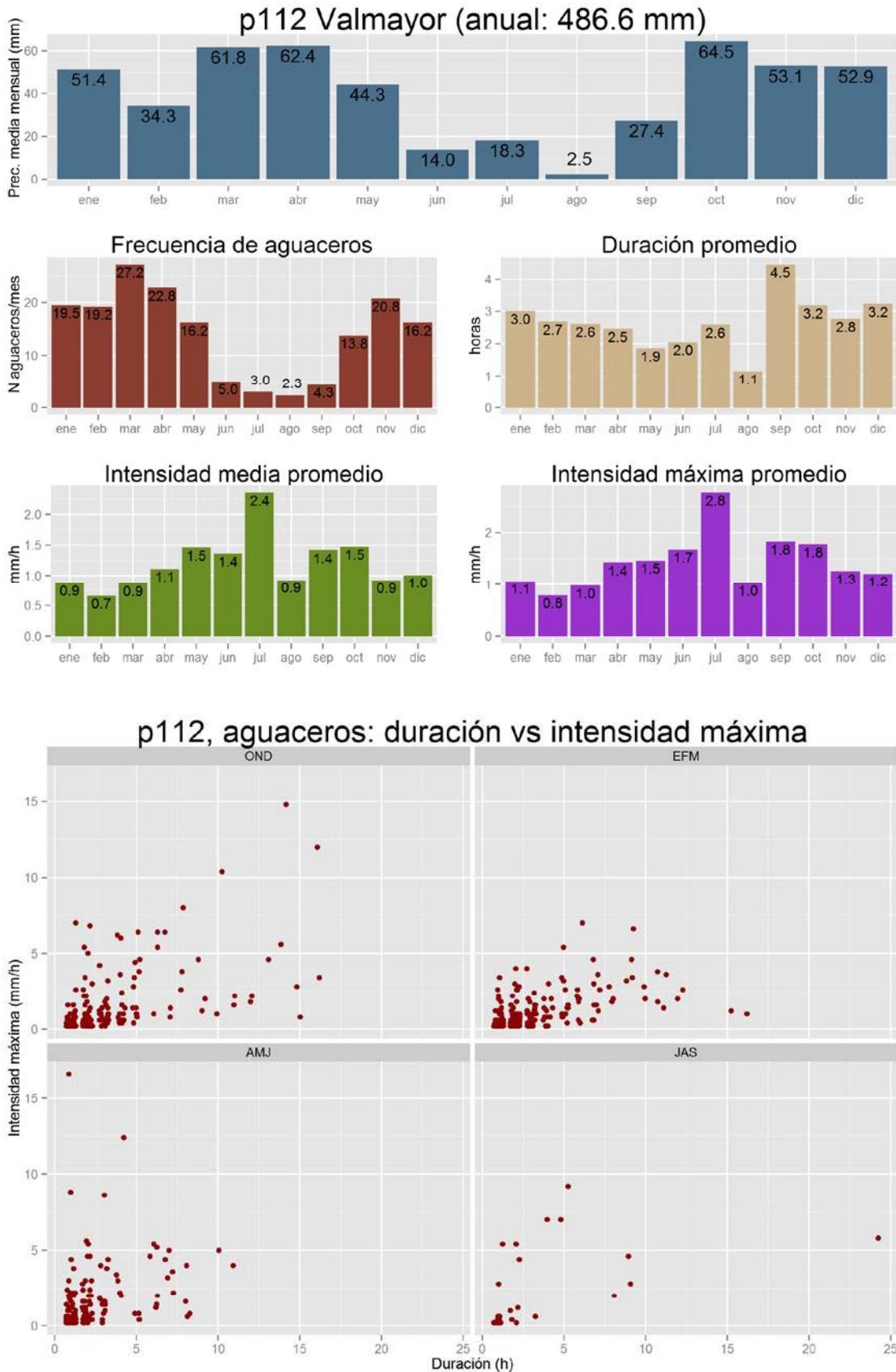
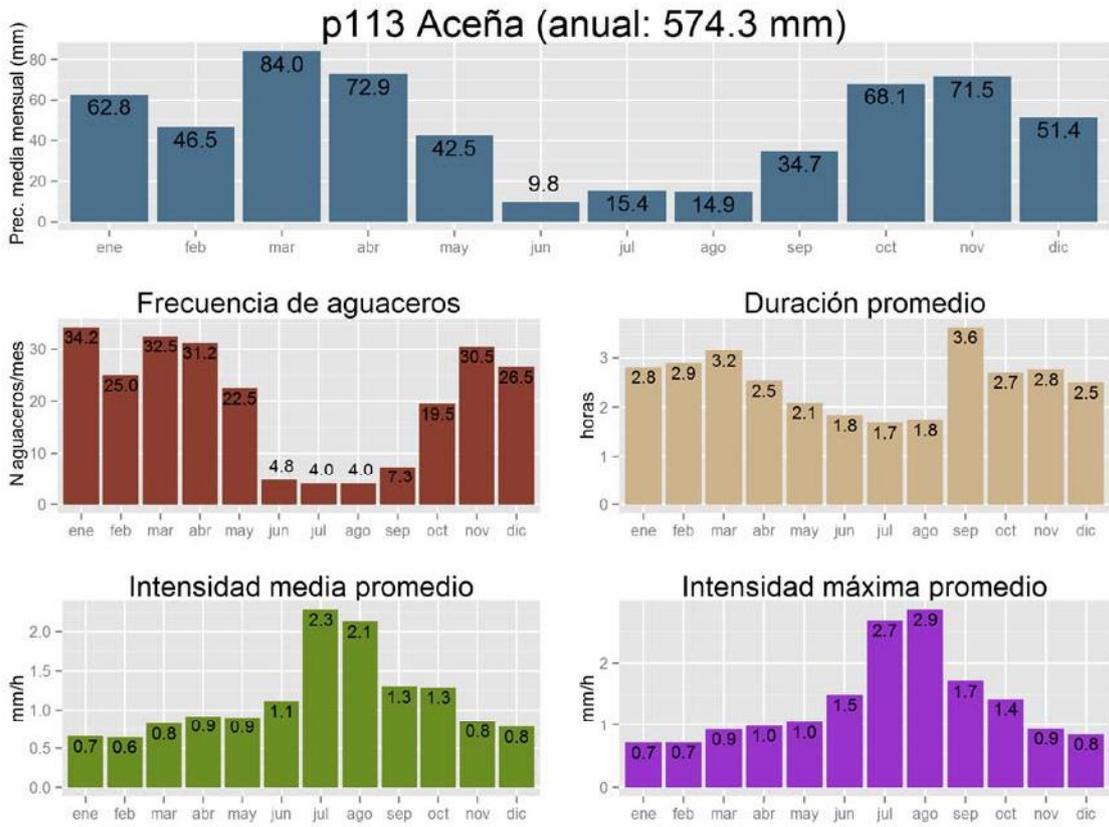


FIGURA 77. PLUVIÓMETRO LA ACEÑA, P113



p113, aguaceros: duración vs intensidad máxima

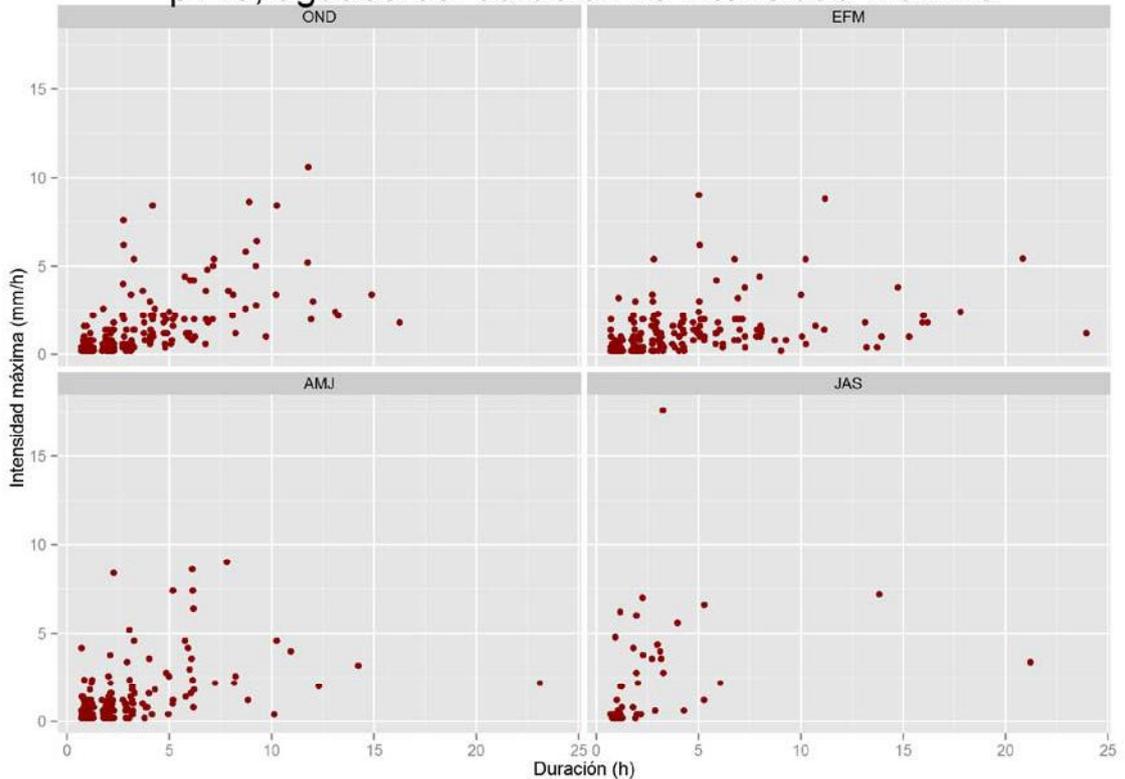


FIGURA 78. PLUVIÓMETRO MORALES, P114

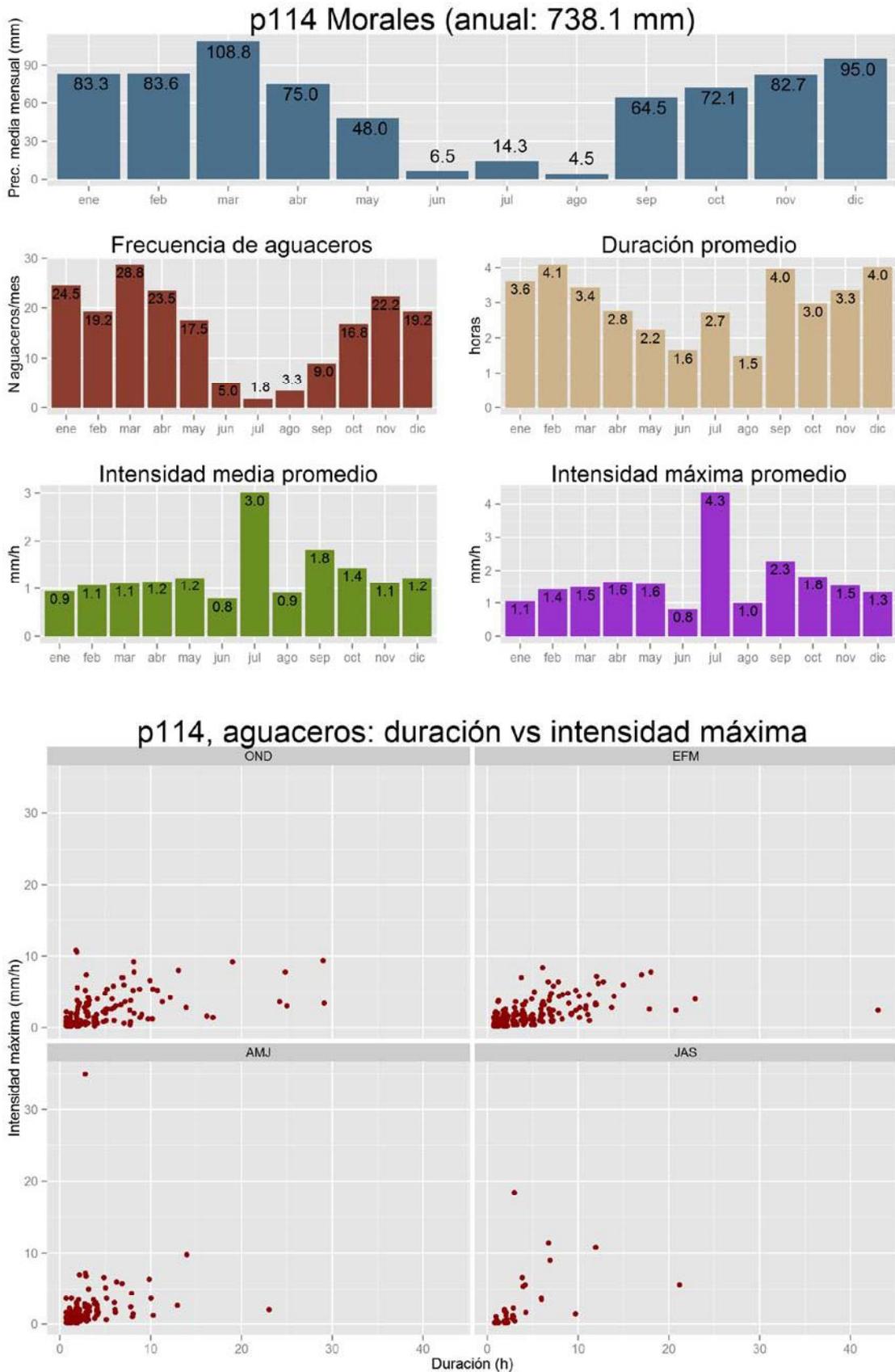


FIGURA 79. PLUVIÓMETRO FRESNO DE CANTIESPINO, P201

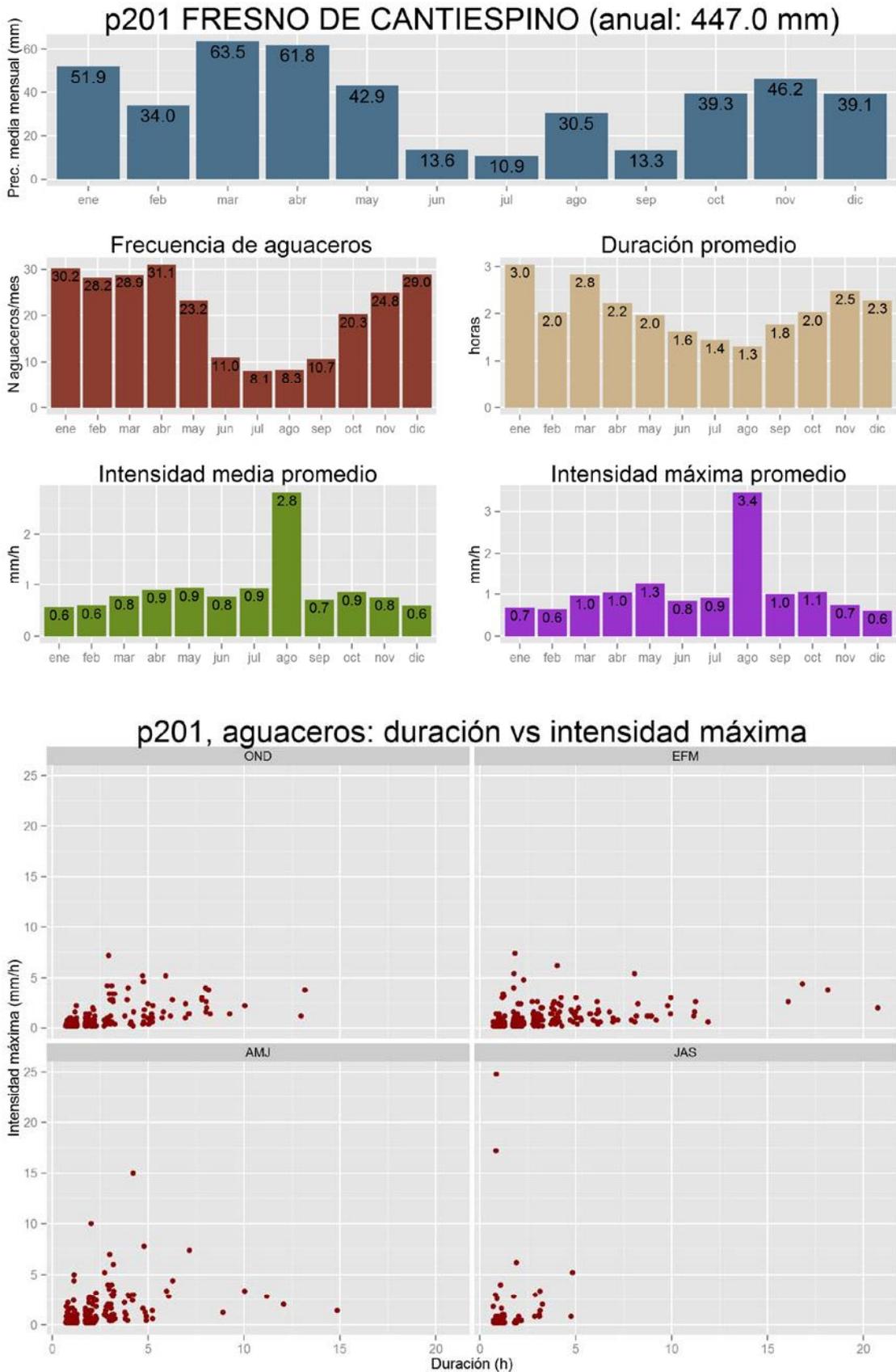


FIGURA 80. PLUVIÓMETRO LA PINILLA ESTACIÓN DE ESQUÍ, P202

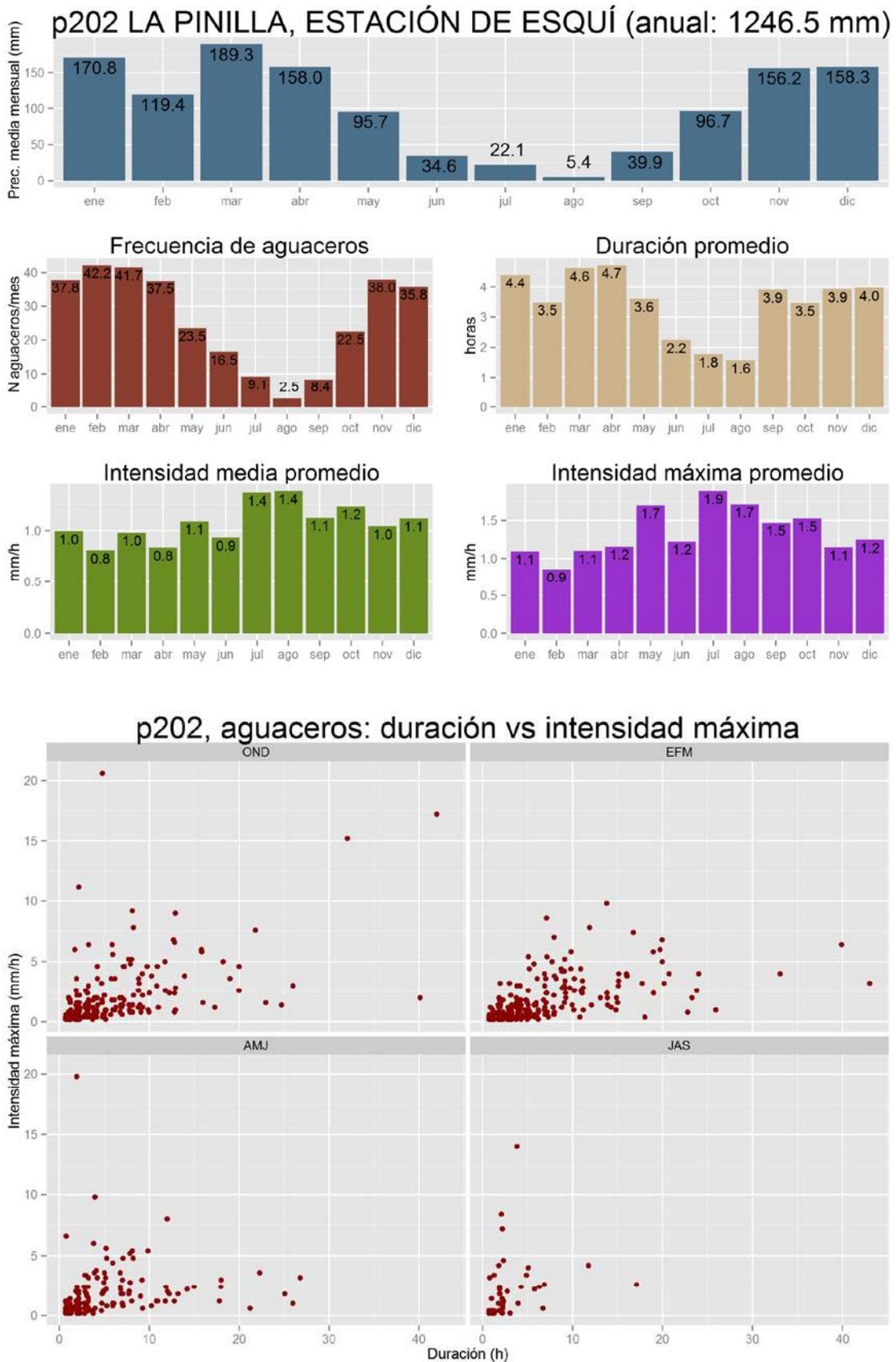


FIGURA 81. PLUVIÓMETRO SEGOVIA, P204

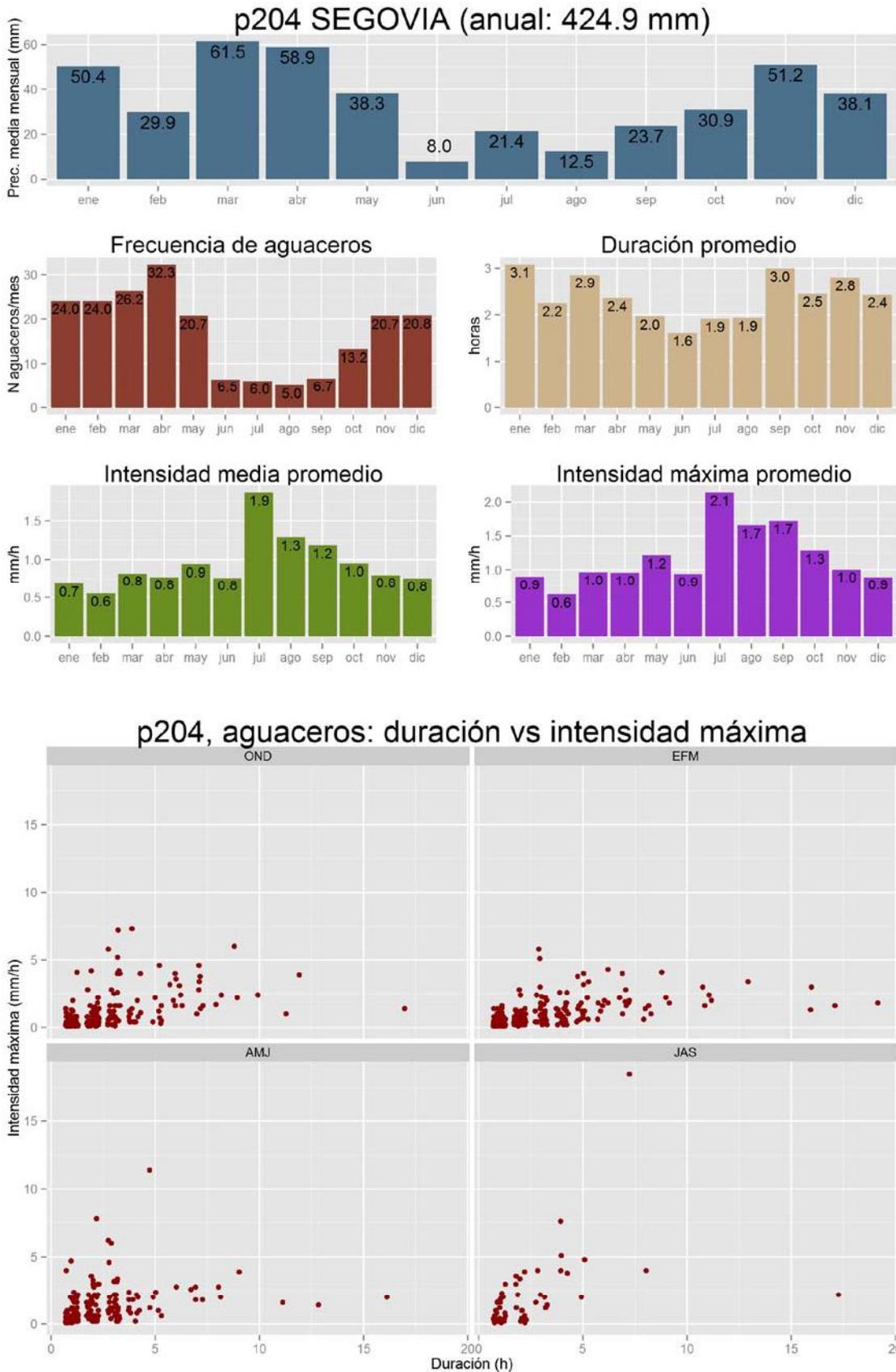


FIGURA 82. PLUVIÓMETRO RIEGOS DE BORNOVA, P302

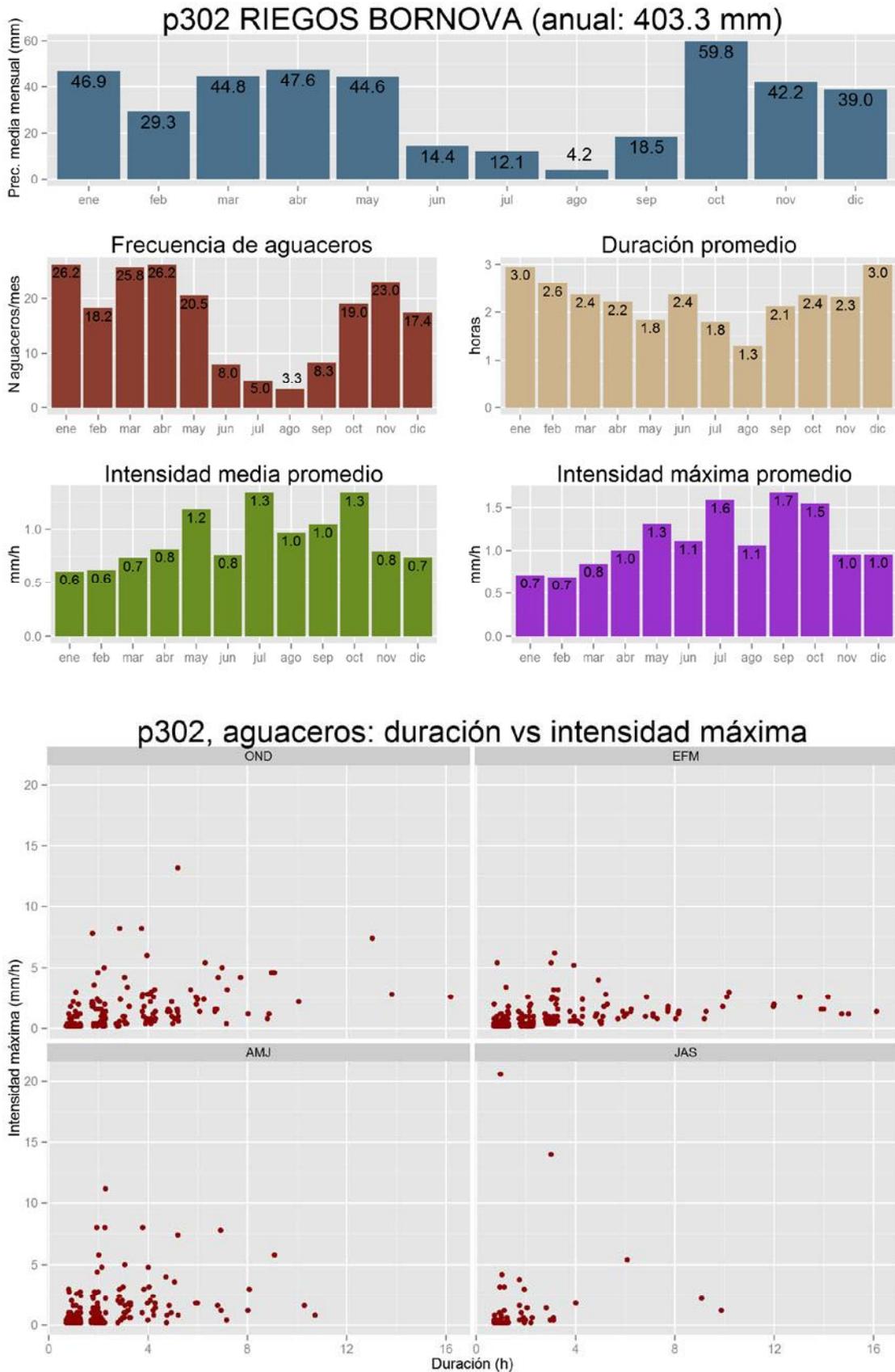


FIGURA 83. PLUVIÓMETRO JARAMA EN VALDEPEÑAS, P304

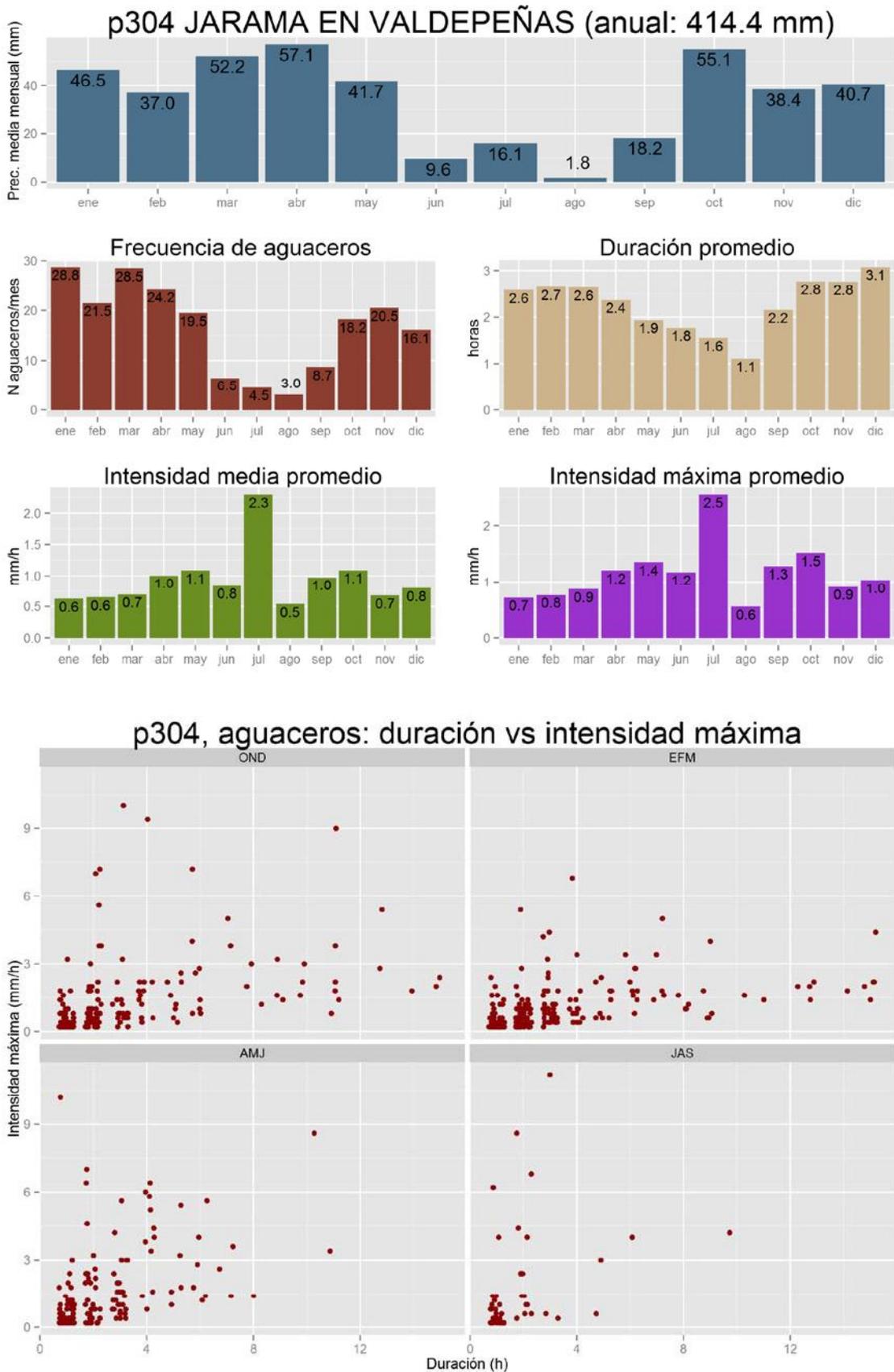


FIGURA 84. PLUVIÓMETRO POZO DE LOS RAMOS, P306

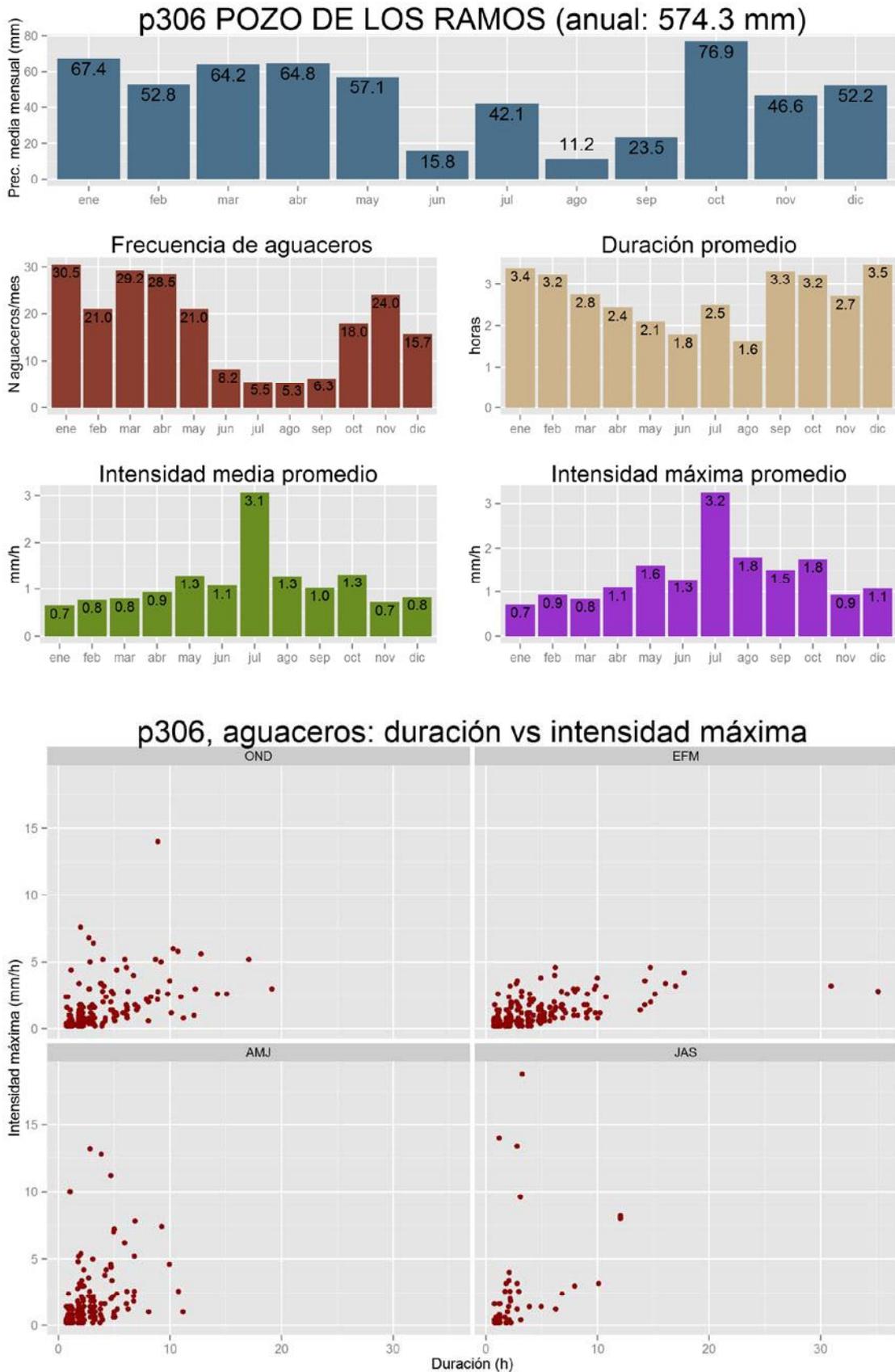


FIGURA 85. PLUVIÓMETRO CONDEMIOS DE ARRIBA, P308

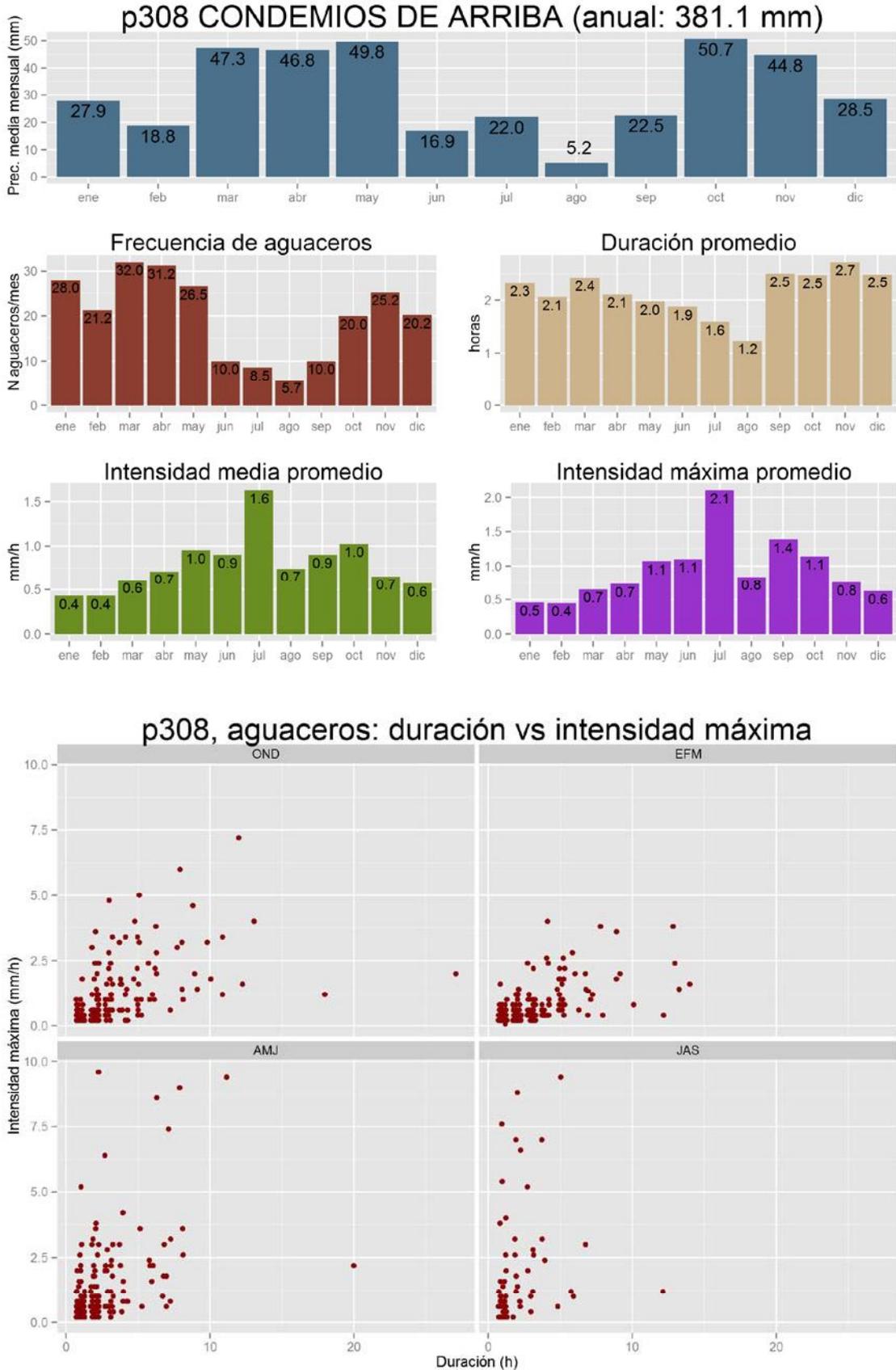


FIGURA 86. PLUVIÓMETRO CAMPISÁBALOS, P309

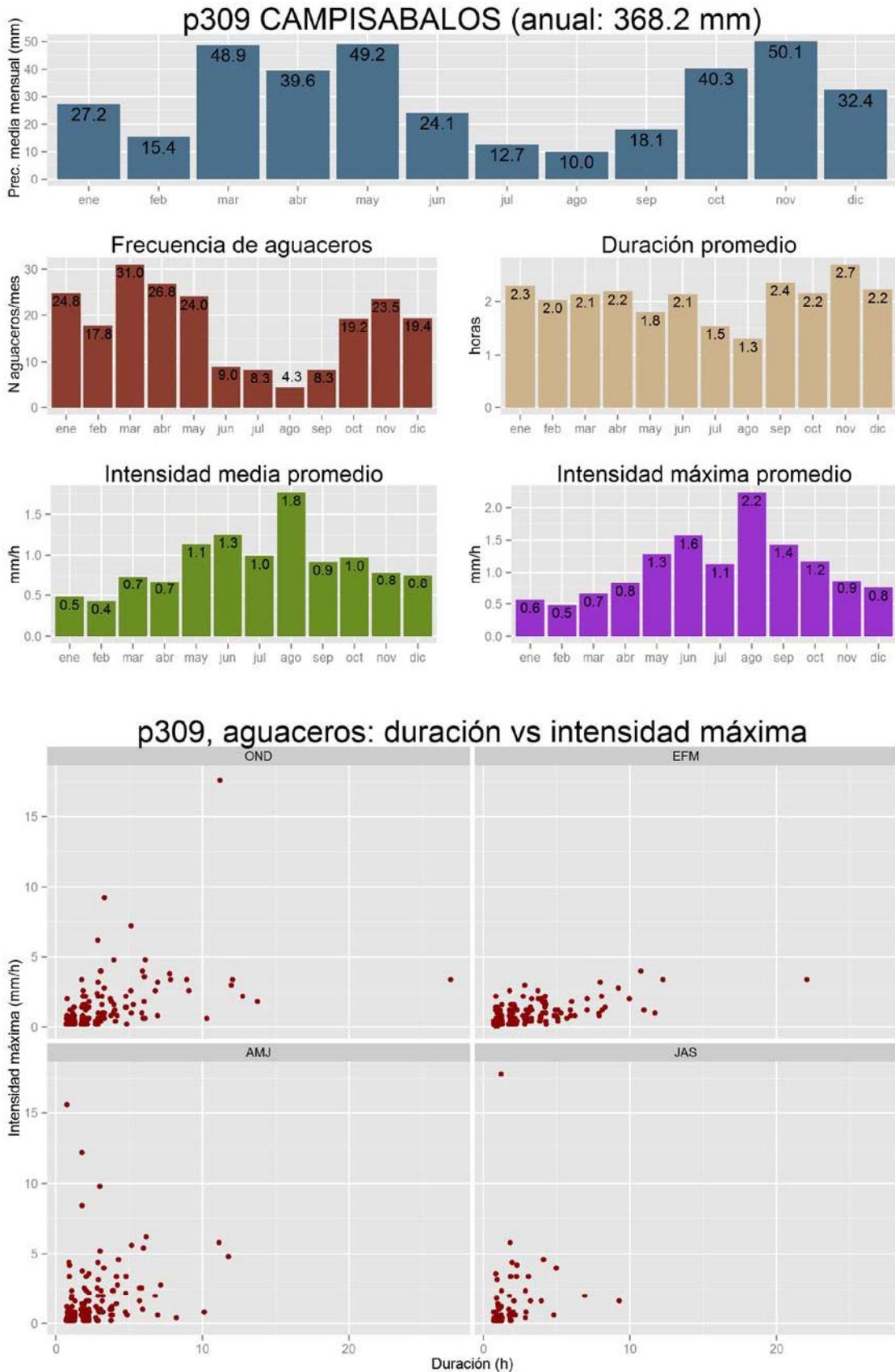


FIGURA 87. PLUVIÓMETRO CANTALOJAS, P310

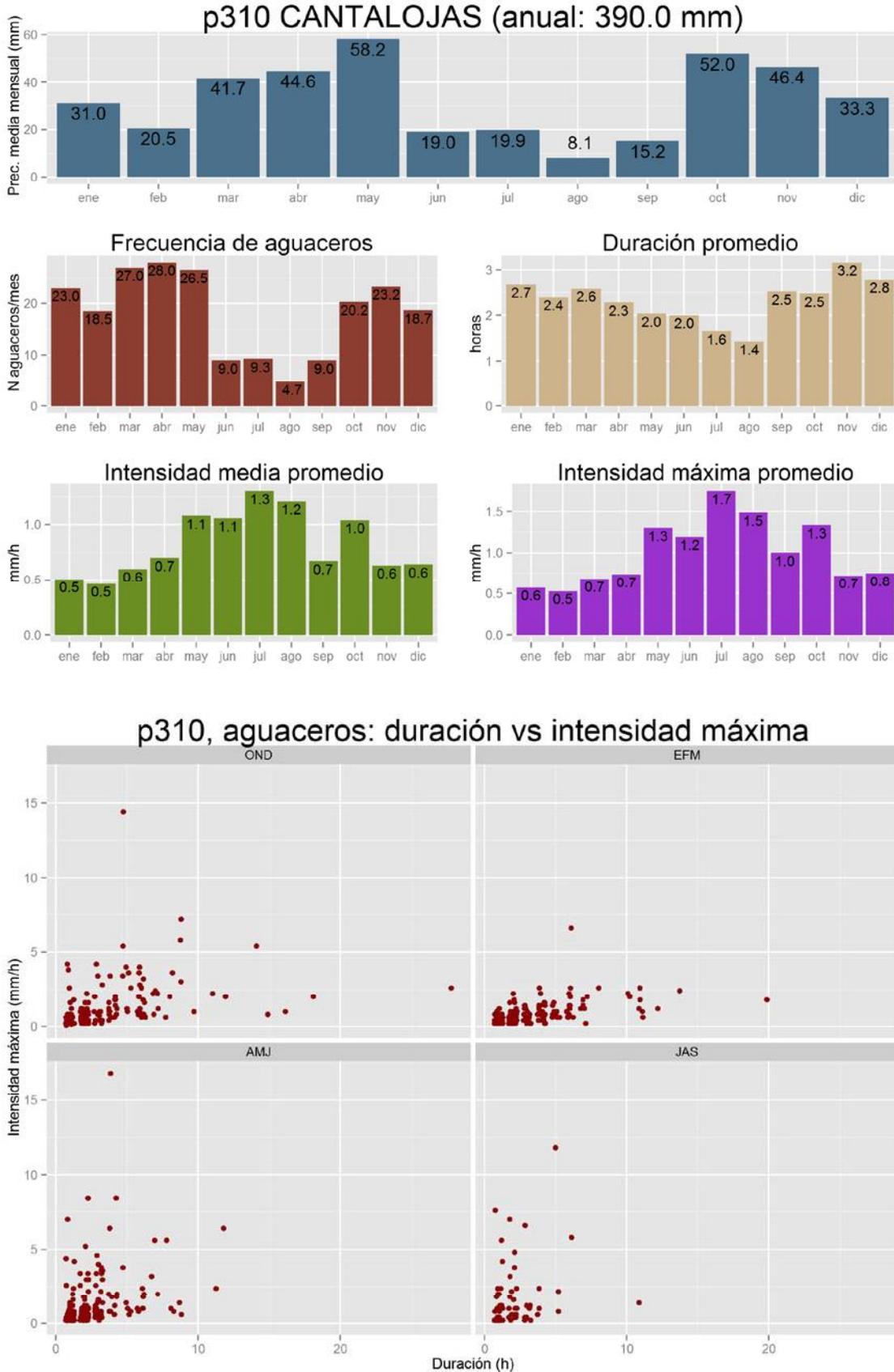


FIGURA 88. PLUVIÓMETRO CABIDA, P311

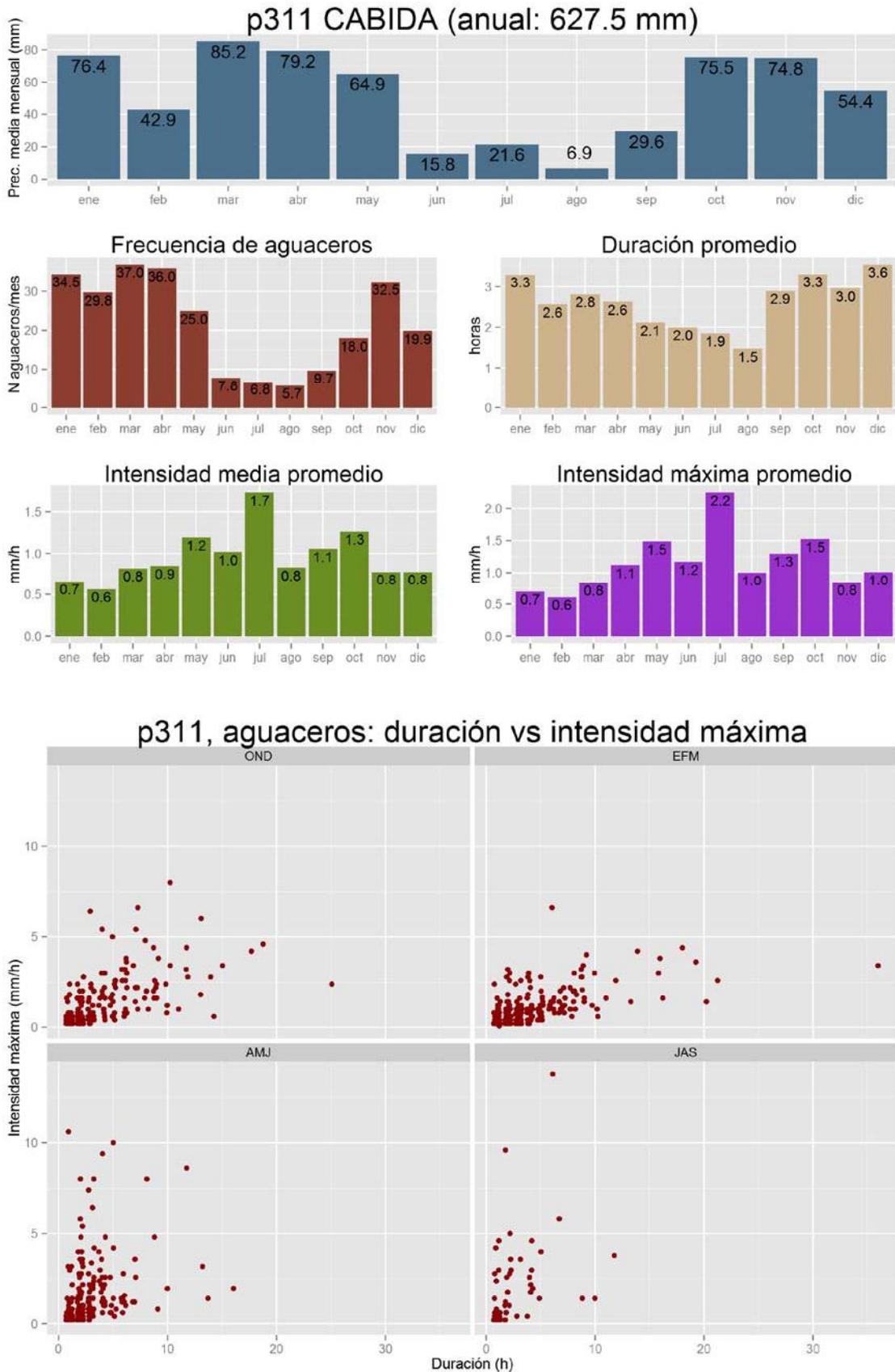


FIGURA 89. PLUVIÓMETRO ROBREGORDO, P312

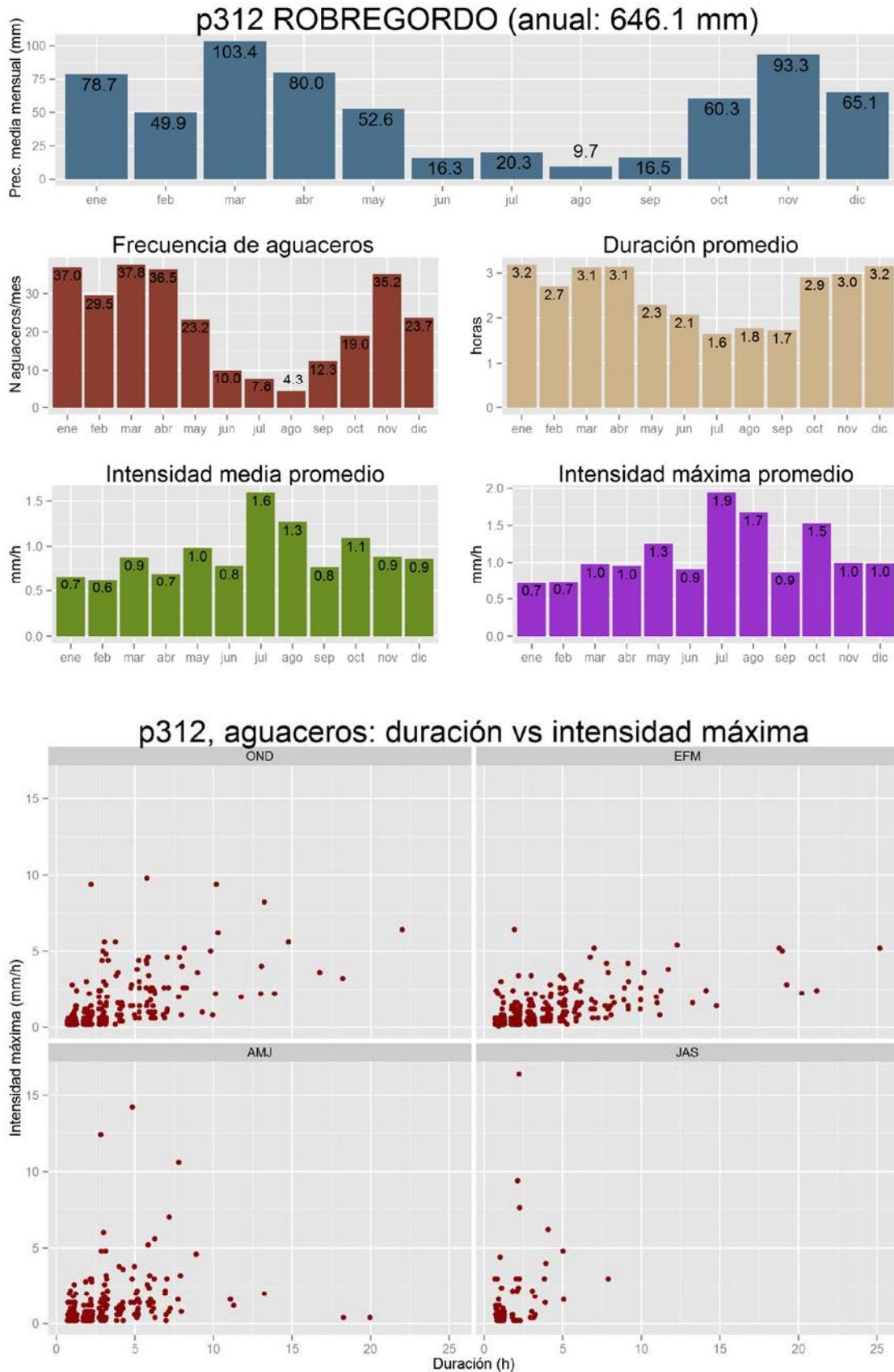


FIGURA 90. PLUVIÓMETRO DEPÓSITOS LA DEHESA, P313

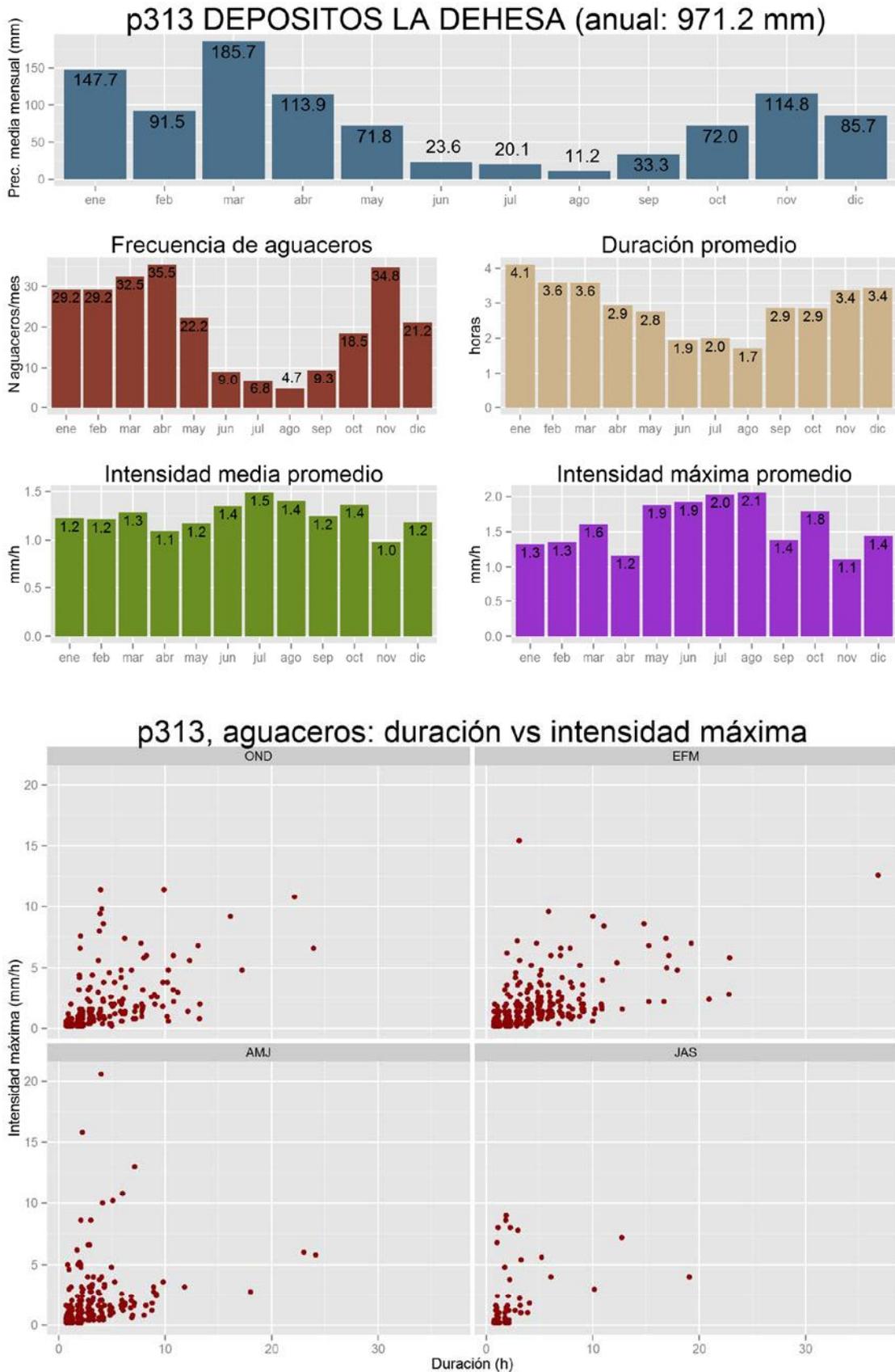


FIGURA 91. PLUVIÓMETRO ALBERGUE, P314

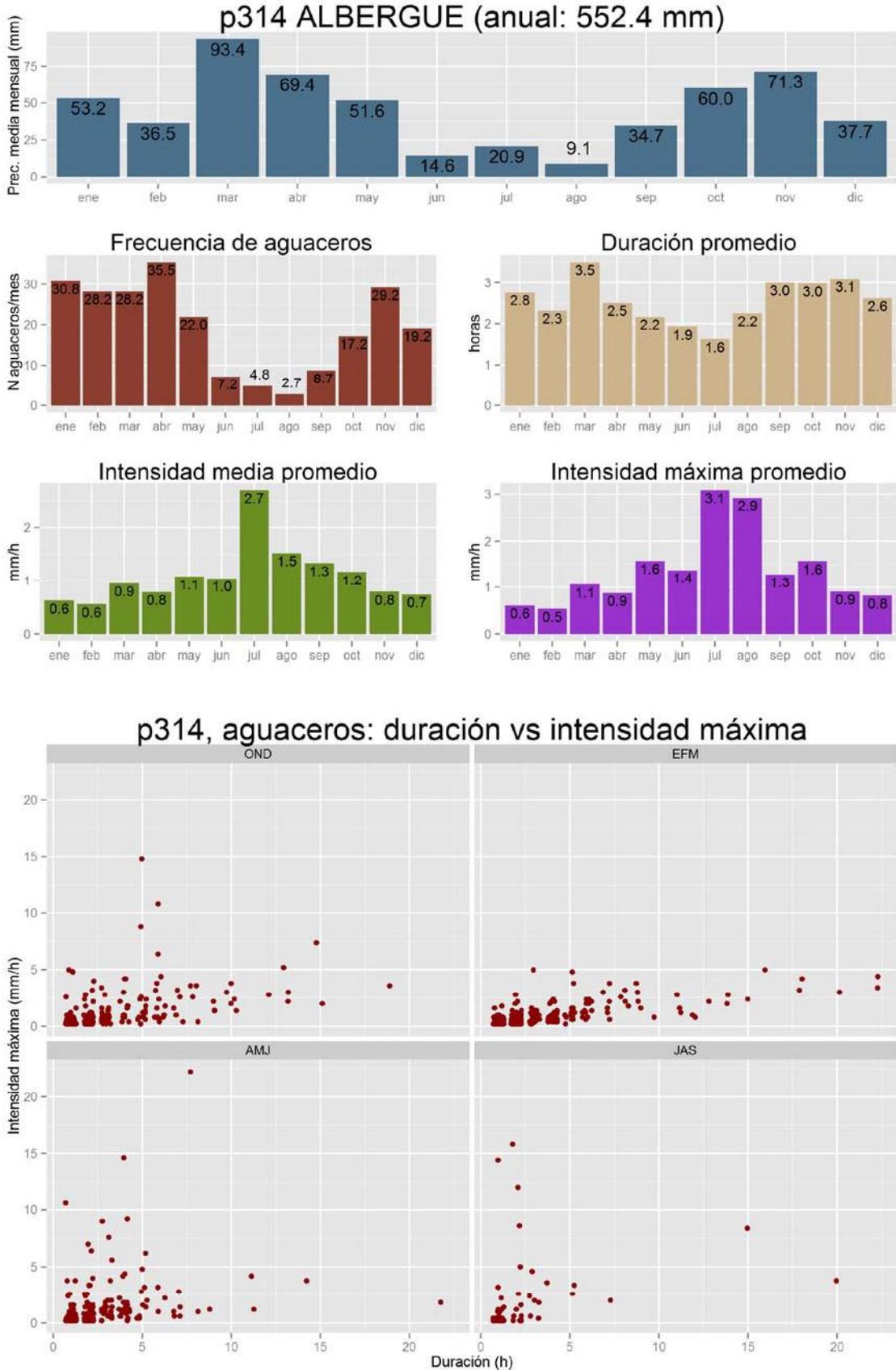


FIGURA 92. PLUVIÓMETRO LA BARRANCA, P315

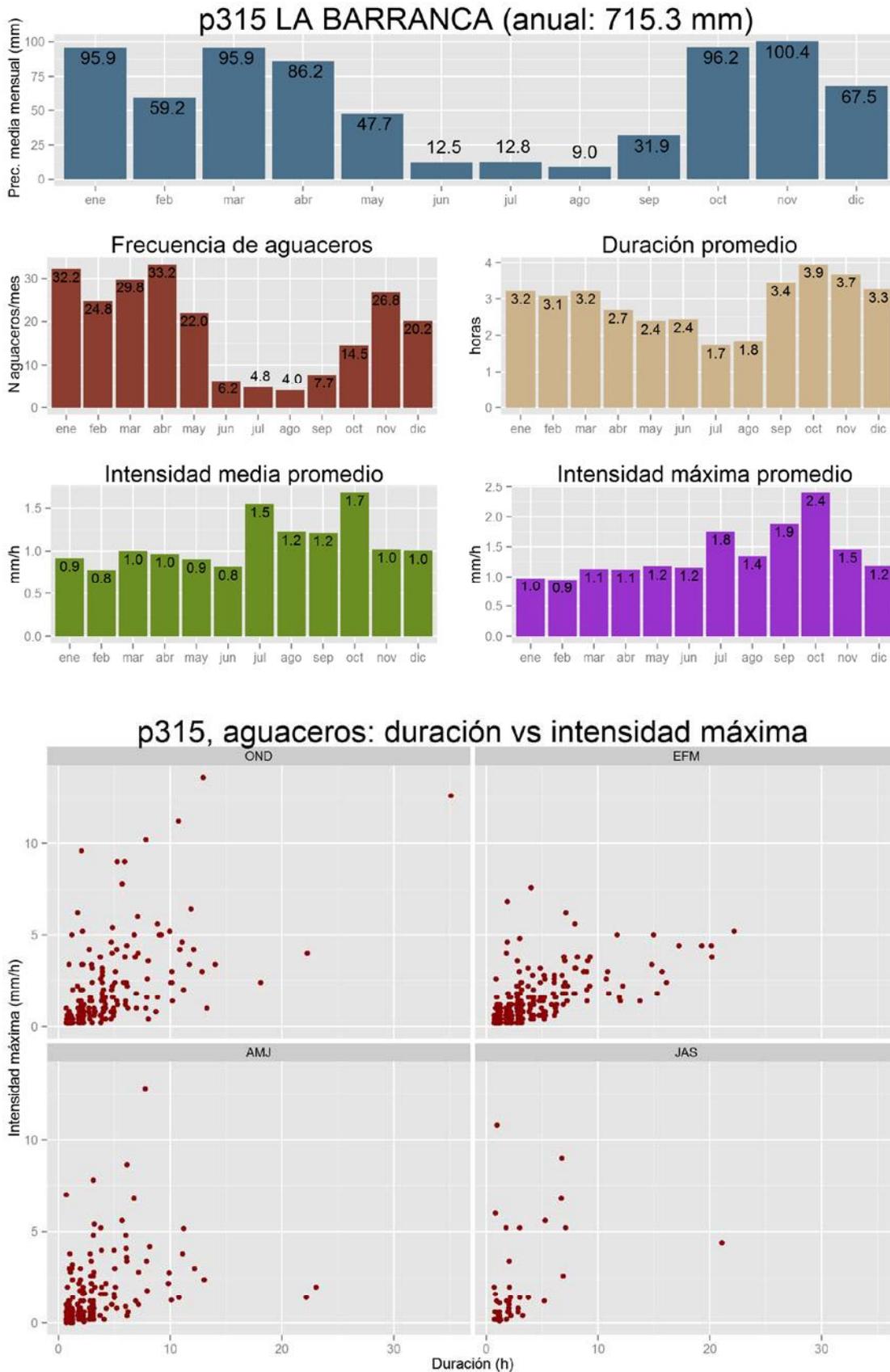


FIGURA 93. PLUVIÓMETRO MIEDES DE ATIENZA, P316

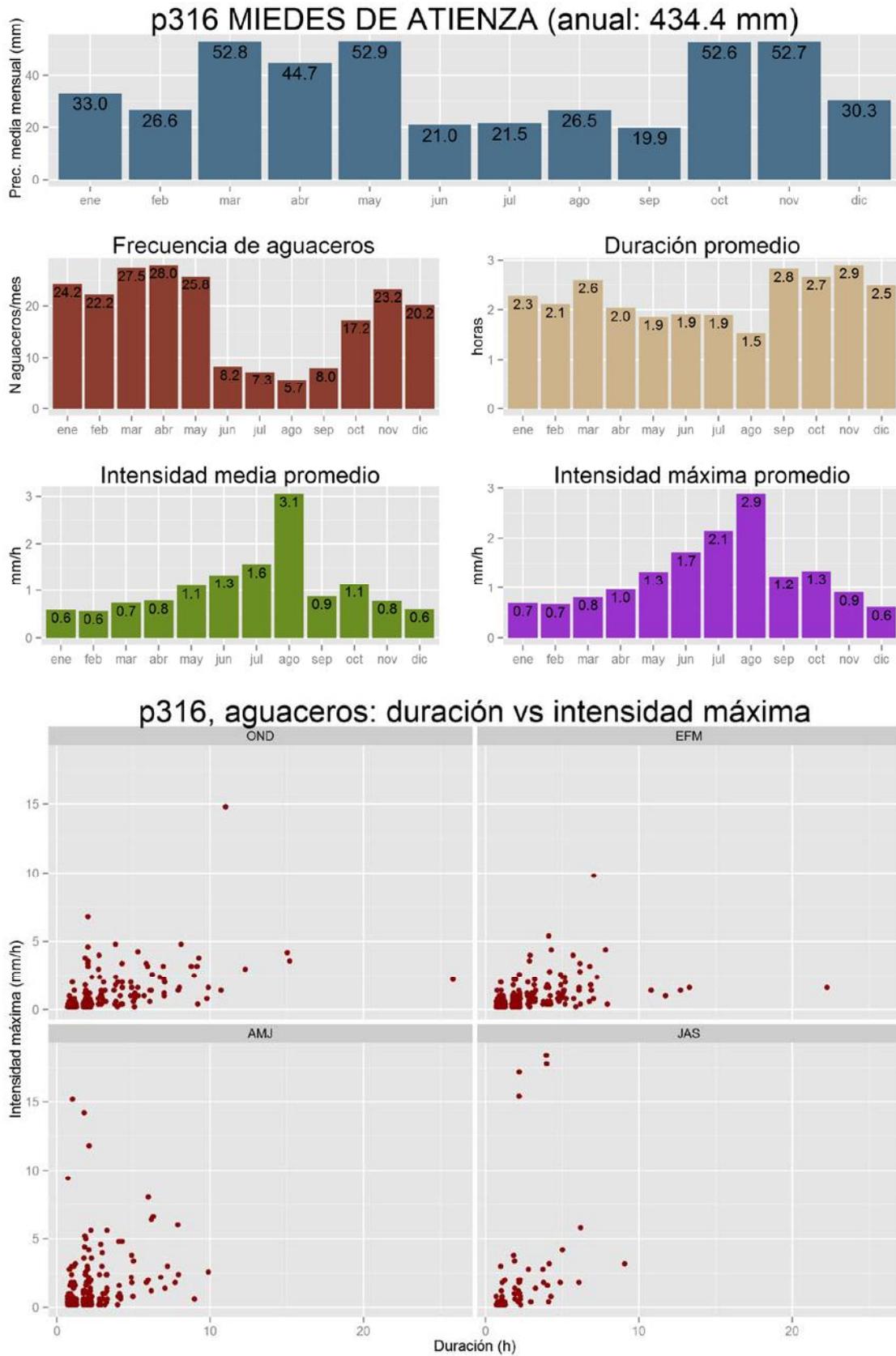


FIGURA 94. PLUVIÓMETRO GASCUEÑA DE BORNOVA, P317

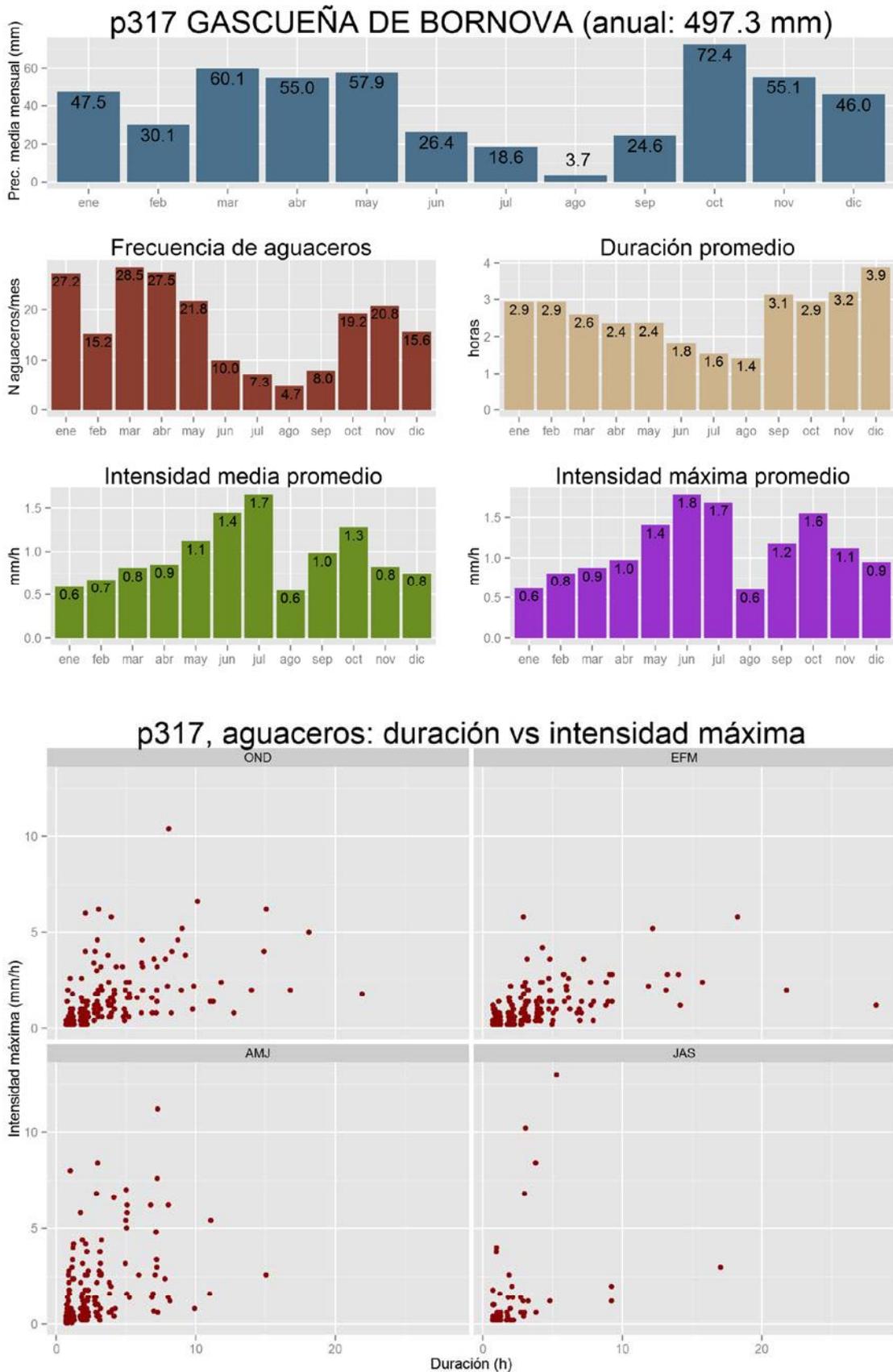
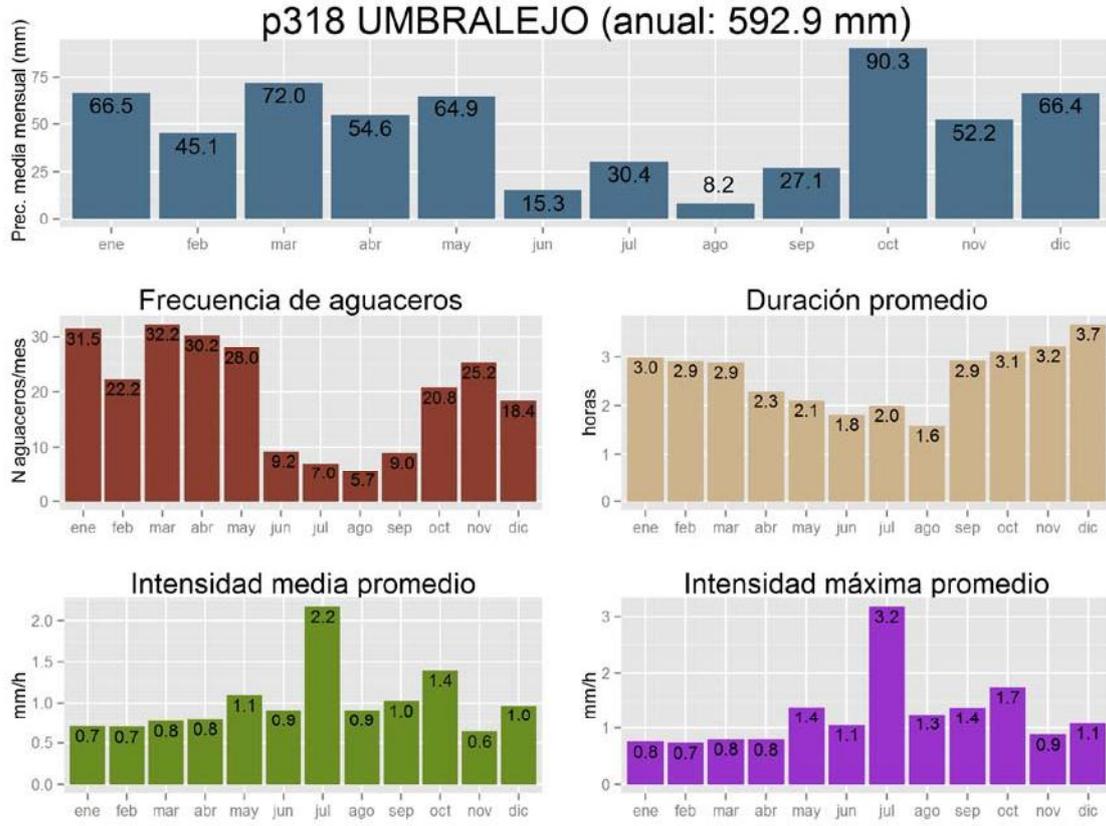


FIGURA 95. PLUVIÓMETRO UMBRALEJO, P318



p318, aguaceros: duración vs intensidad máxima

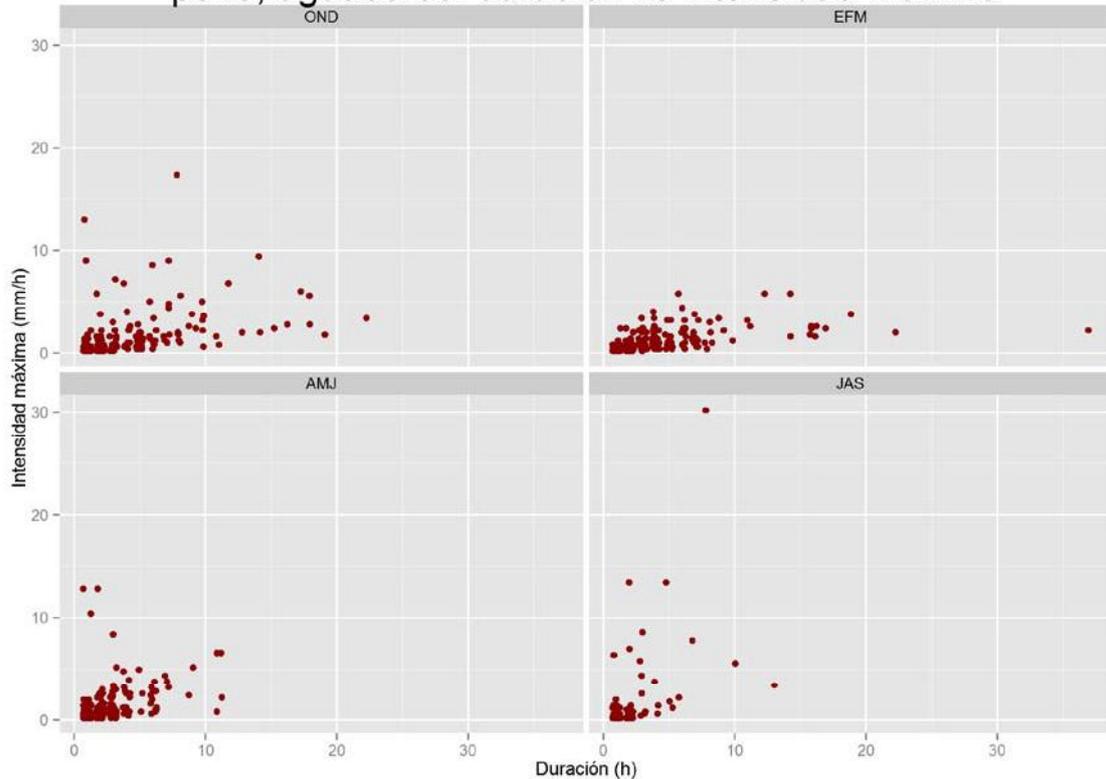


FIGURA 96. PLUVIÓMETRO MAJAELRAYO, P319

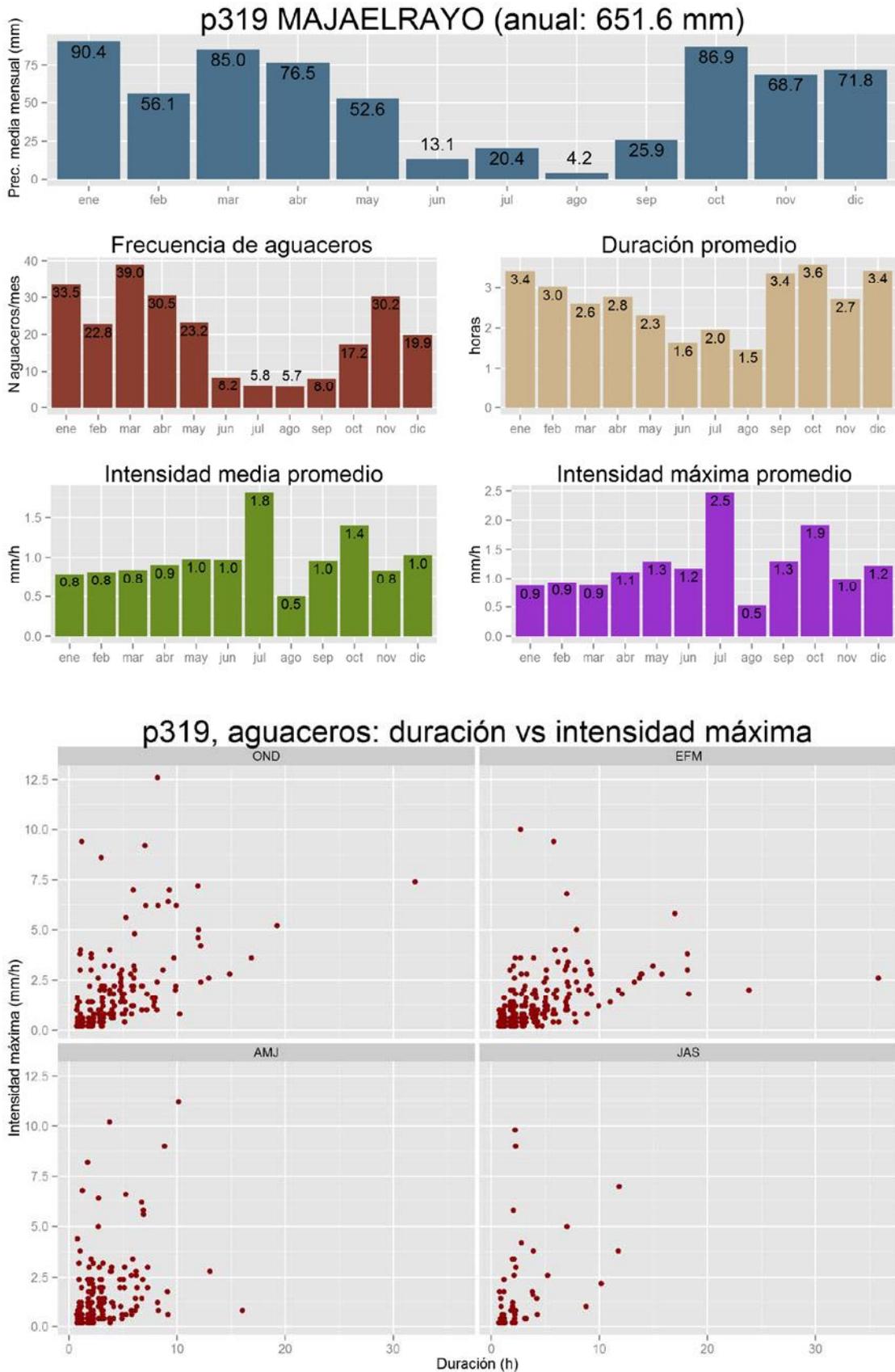


FIGURA 97. PLUVIÓMETRO PUEBLA DE LA SIERRA, P320

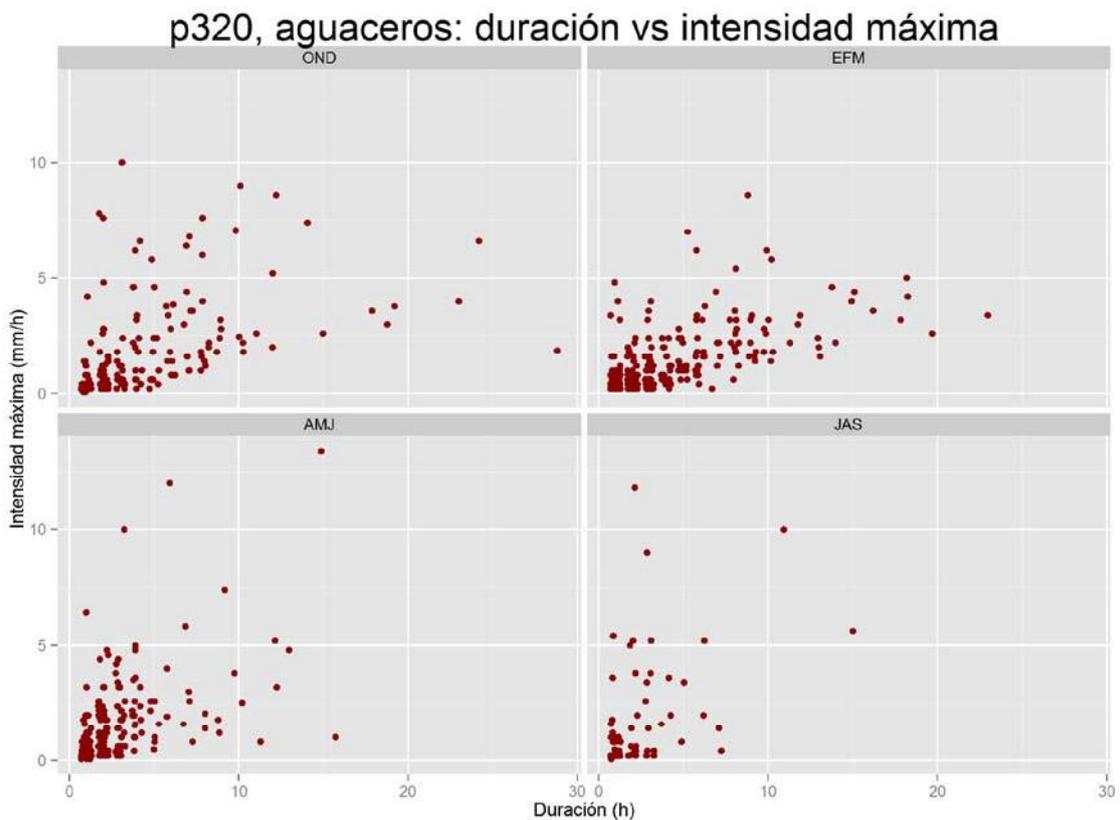
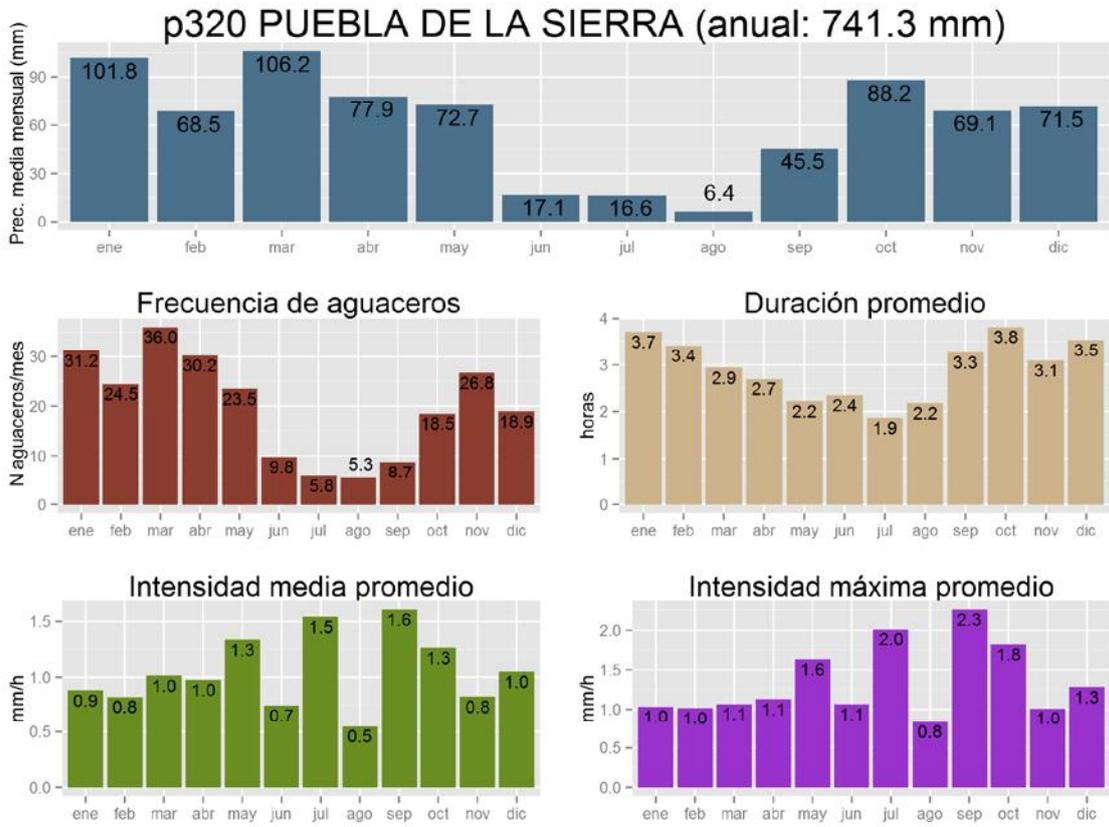


FIGURA 98. PLUVIÓMETRO NAVAMOJADA, P321

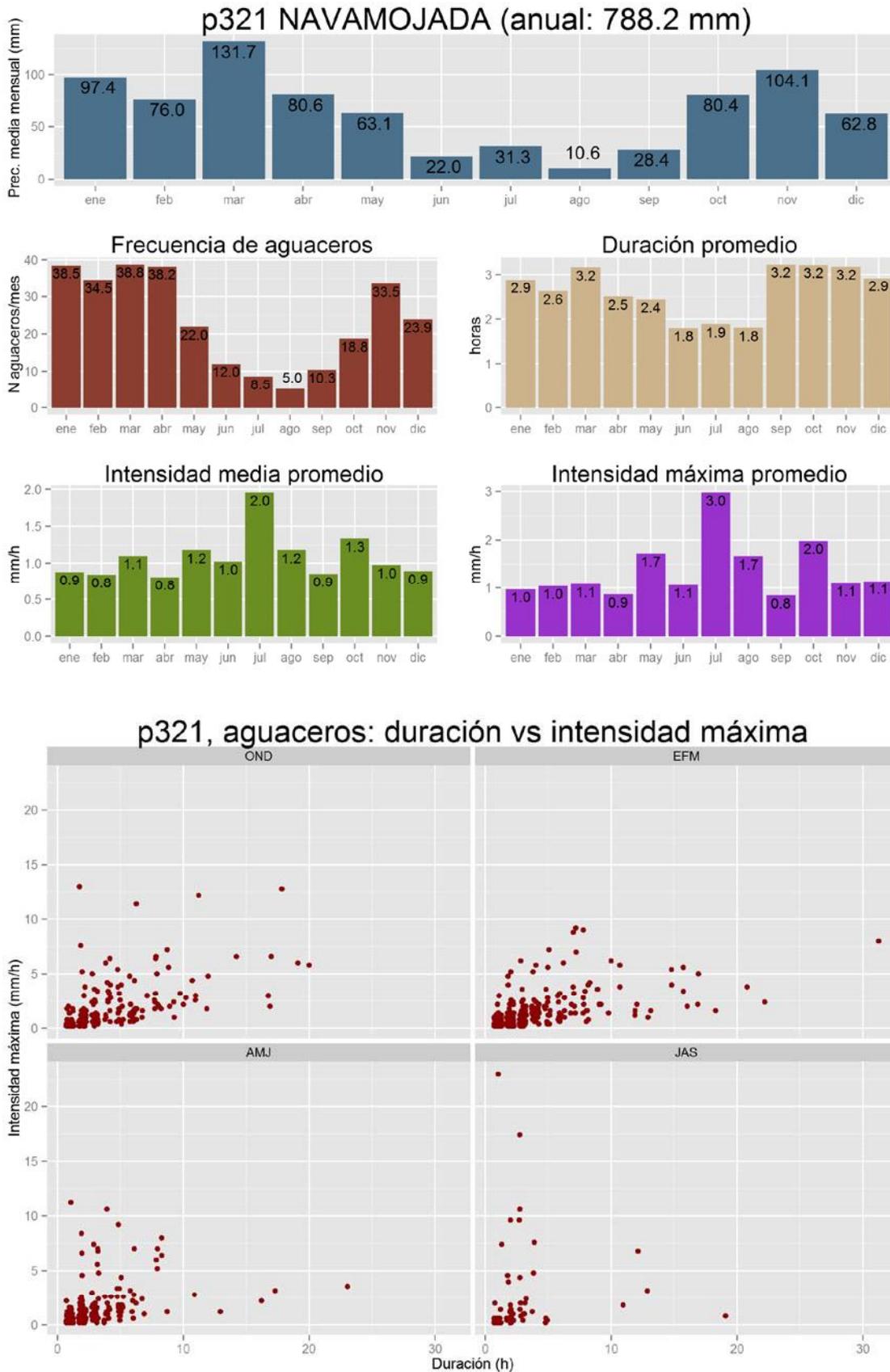


FIGURA 99. PLUVIÓMETRO OLLA DEL QUIÑÓN, P322

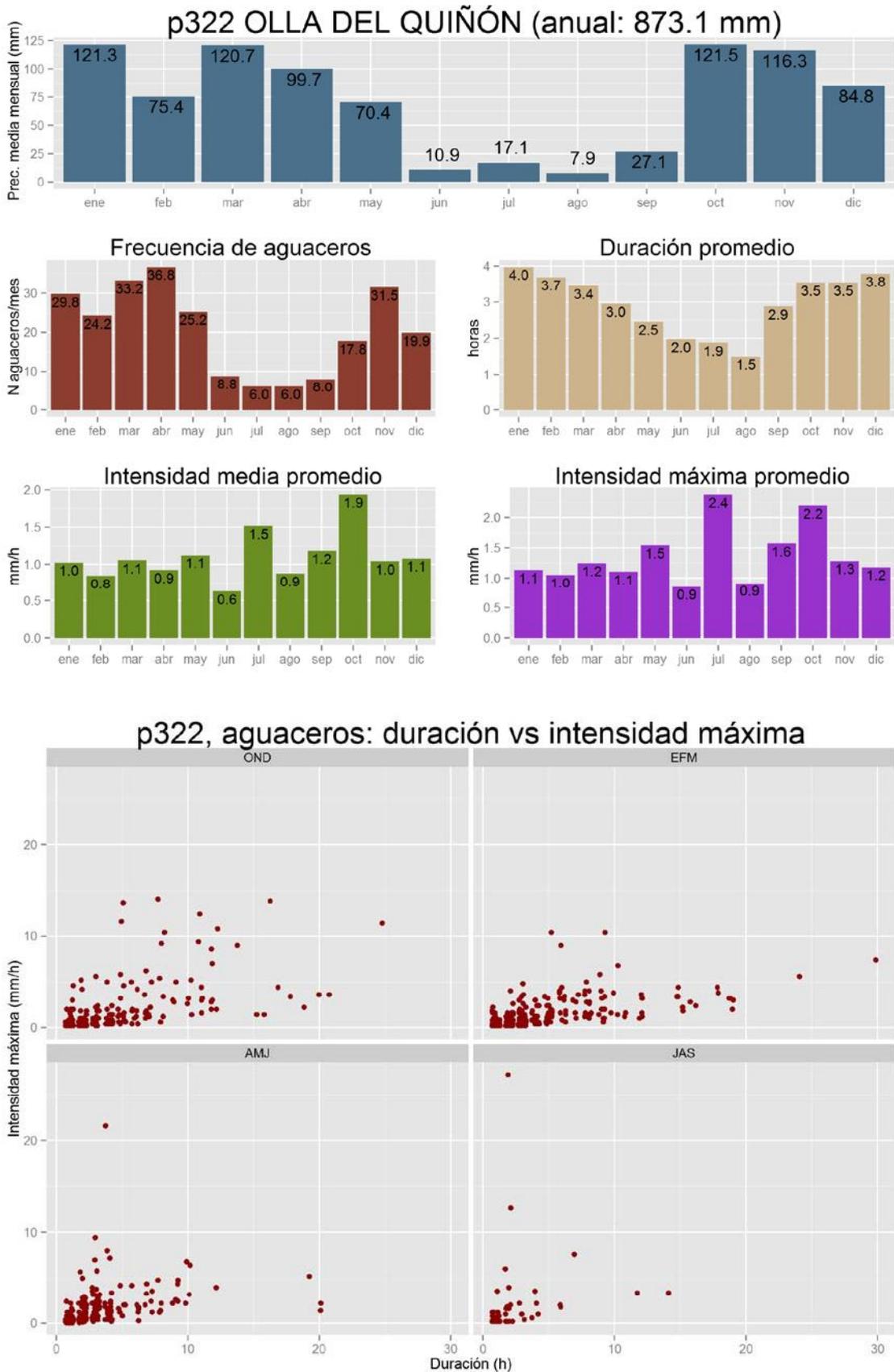


FIGURA 100. PLUVIÓMETRO CRUZ ROJA, P323

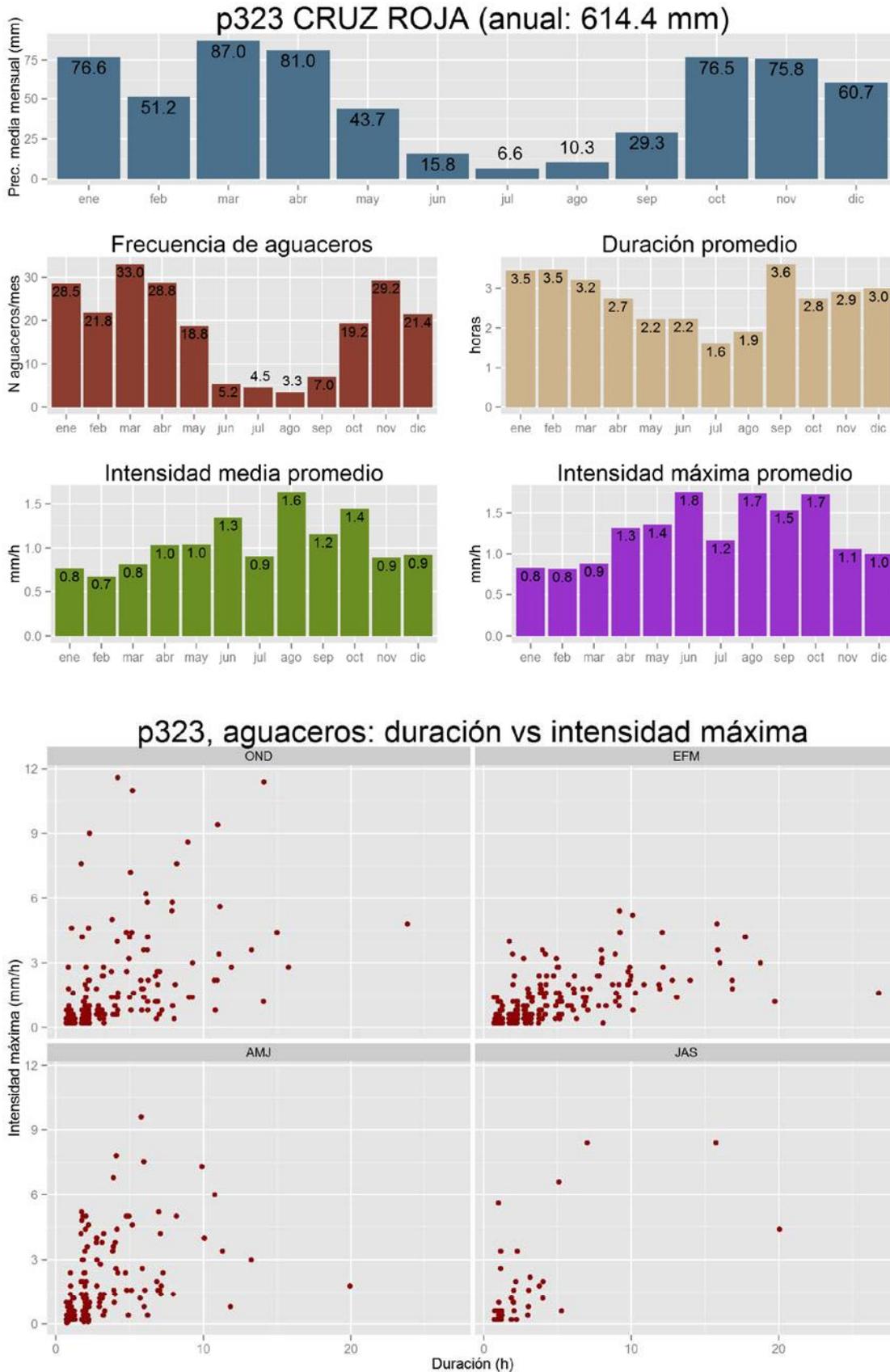


FIGURA 101. PLUVIÓMETRO CERCEDILLA, P324

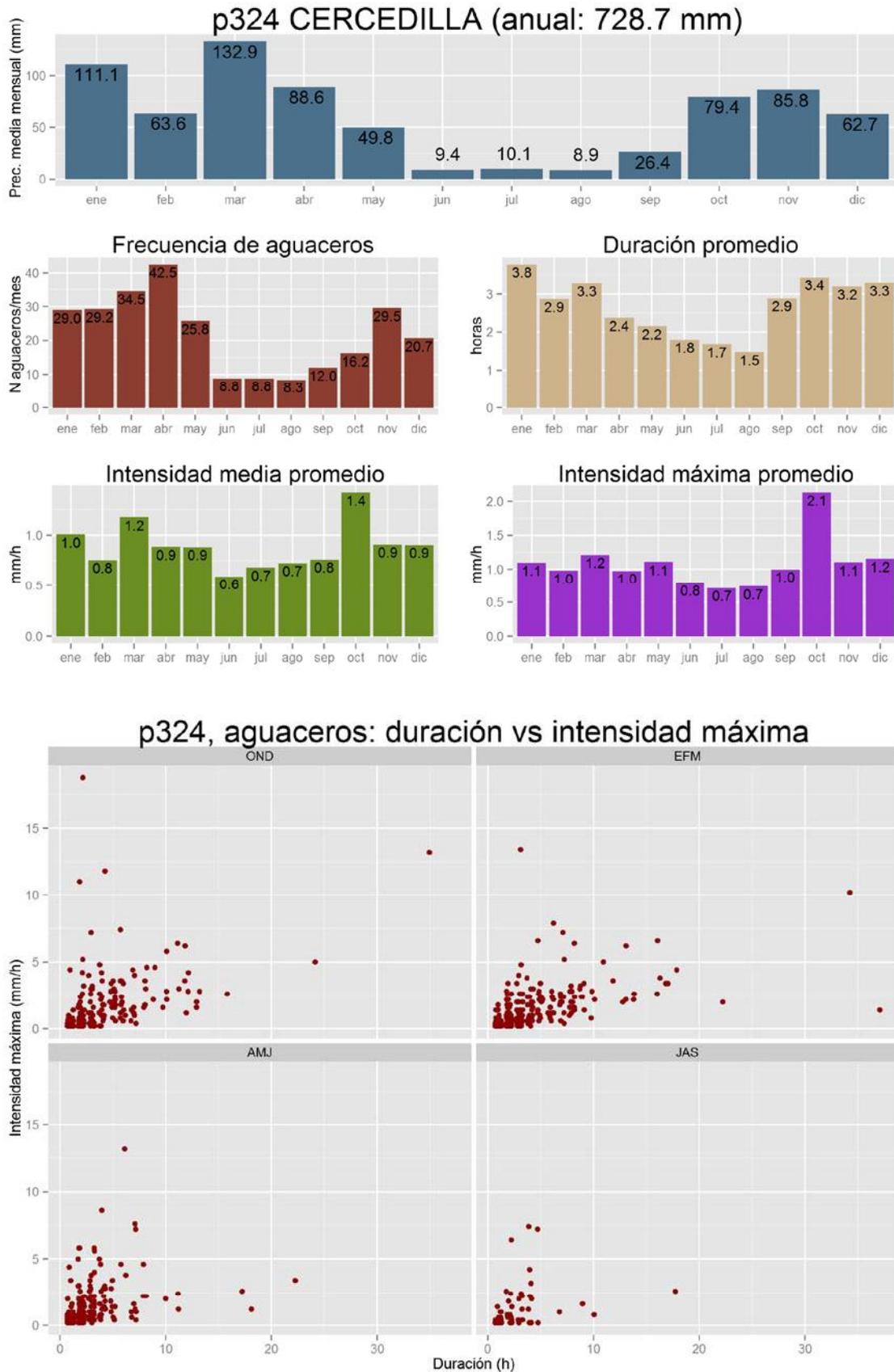
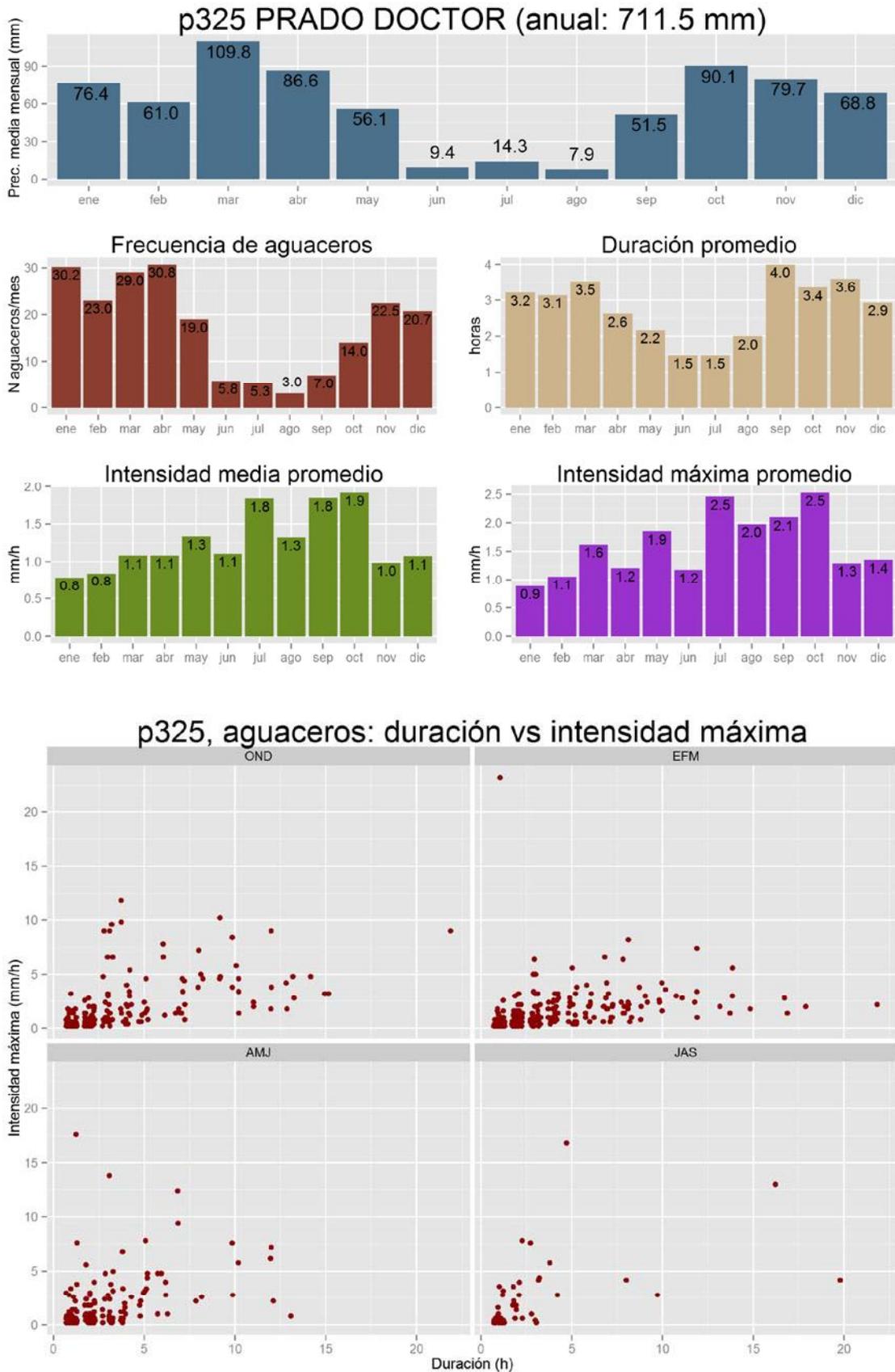


FIGURA 102. PLUVIÓMETRO PRADO DOCTOR, P325



**ANEXO 7.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ACA y CRAHI-UPC** (2010), Establiment, contrast i validació d'una metodologia de càlcul de camps combinats de precipitació radar-pluviòmetres mitjançant l'eina de previsió hidrometeorològica integrada (EHIMI). No publicado.

**Benzi, R., R. Deidda and M. Marrocu** (1997), Characterization of Temperature and Precipitation Fields over Sardinia with Principal Component Analysis and Singular Spectrum Analysis. *International Journal of Climatology* Vol. 17, 1231-1262.

**Esteban, P., P.D. Jones, J. Martín-Vide, M. Mases** (2005), Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25, 319-329.

**Heppner, P.O.** (1992), Snow versus Rain: Looking beyond the "Magic" Numbers. *Weather Forecast*, 74(4), 683-691.

**Hyndman, R.J. and G.K. Grundwald** (2000), Generalized additive modelling of mixed distribution Markov models with application to Melbourne's rainfall. *Australian and New Zealand Journal of Statistics* 42(2), 145-158.

**Raziei, T., A. Mofidi, J.A. Santos and I. Bordi** (2012), Spatial patterns and regimes of daily precipitation in Iran in relation to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology* Vol. 32, 1226-1237.

**Romero, R., C. Ramis, J.A. Guijarro, G. Summer** (1999), Daily Rainfall Areas in Mediterranean Spain. *International Journal of Climatology* Vol. 19, 557-578.

**Svoma, B.M.** (2011), El Niño-Southern Oscillation and snow level in the western United States. *Journal of Geophysical Research*, 116, D24117.

**Ward, J.H., Jr.** (1963), Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 236-244.

**Ware, R., R. Carpenter, J. Güldner, J. Liljegren, T. Nehrkorn, F. Solheim, F. Vandenberghe** (2003), A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid. *Radio Science*, 38 (4), 8079-8032.

**Wilks, D.S.** (2011), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* Third Edition. Academic Press. Capítulos 12 y 13.

**Windmann, M. and C. Schär** (1997), A principal component and long-term trend analysis of daily precipitation in Switzerland, *International Journal of Climatology*, Vol. 17, 1333-1356.

**Yeo, I-K. and R.A. Johnson** (2000), A new family of power transformations to improve normality or symmetry. *Biometrika*, 87, 954-959.

## ANEXO 7.3. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

### AEMET

Agencia Estatal de Meteorología.

### CA

Análisis de conglomerados o análisis de “*Cluster*”, por sus siglas en inglés (*Cluster Analysis*). En este estudio se refiere concretamente a la metodología de CA jerárquico por el criterio de mínima varianza de Ward.

### CCA

Análisis de correlaciones canónicas, según sus siglas en inglés (*Canonical Correlation Analysis*).

### ECMWF

European Center for Medium-Range Weather Forecasts, centro intergubernamental de investigación y de servicio operativo, promovido por 34 países europeos, dedicado a la predicción numérica del tiempo. Opera y mantiene modelos de predicción numérica globales que están considerados entre los mejores a nivel mundial.

### GDAL

Geospatial Data Abstraction Library, es una librería de traducción de formatos de datos geoespaciales en rejilla o vectoriales, publicada bajo licencia de código abierto por la Open Source Geospatial Foundation.

### GeoTIFF

Extensión del formato de imagen TIFF (Tagged Image File Format, un formato estándar de archivo para imágenes) que permite encajar información georreferenciada en archivos de imagen. Se utiliza frecuentemente para manejar ortofotos o datos en rejilla en sistemas de información geográfica.

### GRIB

Acrónimo de GRIdded Binary o General Regularly-distributed Information in Binary form. Es el formato binario de datos en rejilla más ampliamente utilizado para la salida de datos de los modelos de predicción numérica del tiempo. Forma parte del estándar de la Organización Meteorológica Mundial.

### Hirlam

Acrónimo del modelo de predicción numérica de mesoescala High Resolution Limited Area Model promovido por un consorcio de agencias meteorológicas europeas en el que participa AEMET. En este estudio se refiere por lo general a una de las tres implementaciones que opera AEMET, concretamente la que cubre la Península Ibérica con resolución de 0,05°.

### HRES

Modelo global de predicción numérica del tiempo operado por el ECMWF. El nombre hace referencia a su alta resolución espacial (High RESolution) en relación con otros modelos globales. Su resolución espacial es 0,125°, la resolución temporal de salida es de 3h, la frecuencia de refresco es 6-horaria y el alcance de predicción es 240 horas.

### MDT

Modelo digital del terreno.

### **PCA**

Análisis de componentes principales, por sus siglas en inglés (Principal Components Analysis).

### **PNG**

Portable Network Graphics, un formato de imágenes basado en un algoritmo de compresión sin pérdida.

### **R**

Lenguaje de programación y entorno de software para cálculo estadístico y gráficos. Está disponible como software libre (<http://www.r-project.org/>).

### **SAIH**

Sistema Automático de Información Hidrológica.

### **VARIMAX**

Rotación ortogonal de ejes en un subespacio vectorial que intenta concentrar en el mínimo número de factores (nuevos ejes) la correlación con cada variable original.

**ANEXO 7.4. ÍNDICE DE FIGURAS**

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PLUVIÓMETROS SELECCIONADOS	14
2	EJEMPLO DE CAMPO DE PRECIPITACIÓN HIRLAM EN LA VENTANA SELECCIONADA ESTUDIO	15
3	FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS DE NIEVE POTENCIAL	17
4	ESTADÍSTICA ELEMENTAL DE AGUACEROS, POR MESES, EN EL PLUVIÓMETRO DE PINILLA	18
5	RELACIÓN ENTRE DURACIÓN E INTENSIDAD MÁXIMA, POR TRIMESTRES, PARA LOS AGUACEROS REGISTRADOS EN EL PLUVIÓMETRO DE PINILLA	18
6	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CUATRO GRUPOS DE PLUVIÓMETROS RESULTANTES DEL ANÁLISIS CLUSTER, PARA LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DEL INVIERNO EXTENDIDO	19
7	MAPAS DE REPRESENTACIÓN DE LOS PESOS DE CADA PLUVIÓMETRO, EN CADA UNA DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES, PRECIPITACIONES HORARIAS DE NOVIEMBRE A ABRIL	20
8	CORRELACIONES HOMOGÉNEAS DE LOS PRIMEROS CUATRO PARES DE VARIABLES CANÓNICAS (INVIERNO EXTENDIDO, CASOS DE NIEVE POTENCIAL)	22
9	TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 18 (05-02-2012)	23
10	DISTANCIAS EN EL ESPACIO DE RESIDUOS, HORA A HORA, PARA LAS VENTANAS DE OPORTUNIDAD	24
11	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SENSIBILIDAD A LA ALTERACIÓN DEL CAMPO DE PRECIPITACIONES DURANTE LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 14	25
12	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS TRES REDES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS	31
13	AGUACERO ANÓMALO EN PINILLA (CANAL GESTIÓN)	33
14	MODIFICACIÓN EFECTUADA EN LOS DATOS DEL AGUACERO ANÓMALO EN PINILLA	33
15	RELACIÓN ENTRE DATOS HORARIOS DE CANAL GESTIÓN, EL VADO (P106) Y SAIH E_13 (P307)	35
16	COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MENSUALES EN LOS PLUVIÓMETROS DE CANAL GESTIÓN, EL VADO (P106) Y SAIH E_13 (P307)	36
17	DISPONIBILIDAD DE DATOS EN LOS PLUVIÓMETROS AEMET 2135A (P201), 2150H (P202), 2462 (P203) Y 2465 (P204)	38
18	SERIE PARCIAL DE PRECIPITACIONES HORARIAS DE SAIH-PN23 Y PRÓXIMOS	39
19	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PLUVIÓMETROS DE LA SELECCIÓN DEFINITIVA	41
20	EJEMPLO DE CAMPO DE PRECIPITACIÓN HORARIA HIRLAM 0,05 PENÍNSULA IBÉRICA	43
21	MAPA DE PREDICCIÓN DE COTA DE NIEVE	45
22	MAPA DE PREDICCIÓN DE NIEVE HIRLAM	45
23	PANTALLA DE LA APLICACIÓN DE VISUALIZACIÓN DE CAMPOS DE PRECIPITACIÓN	51
24	TRANSFORMACIÓN LOG(1+X)	53
25	EJEMPLO DE COMPROBACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN LOG(1+X)	54
26	DENDROGRAMA DE UN ANÁLISIS CLUSTER	56
27	EJEMPLO DE REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE COMPONENTES PRINCIPALES PCA	57

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
28	FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS QUE CUMPLEN EL CRITERIO DE COTA DE NIEVE	63
29	FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS DE NIEVE POTENCIAL RELATIVA A HORAS CON PRECIPITACIÓN	64
30	FRECUENCIA MENSUAL DE HORAS DE NIEVE POTENCIAL	65
31	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL POR PLUVIÓMETROS EN EL PERIODO DE ANÁLISIS	66
32	RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y ALTITUD	66
33	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PLUVIÓMETROS CON INDICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (2010-11 A 2013-14)	67
34	FRACCIÓN DE PRECIPITACIÓN EN SITUACIONES DE NIEVE POTENCIAL	68
35	DENDROGRAMA DEL ANÁLISIS CLUSTER (CA) PARA EL CONJUNTO DE PLUVIÓMETROS	70
36	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS CUATRO GRUPOS DE PLUVIÓMETROS SEÑALADOS EN EL DENDROGRAMA DE LA FIGURA 35	70
37	DENDROGRAMA DEL CA PARA EL CONJUNTO DE PLUVIÓMETROS RESTRINGIDO AL INVIERNO EXTENDIDO	71
38	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS CUATRO GRUPOS DE PLUVIÓMETROS SEÑALADOS EN EL DENDROGRAMA DE LA FIGURA 4.10	72
39	VARIANZA EXPLICADA (VE) EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPALES (N)	73
40	MATRIZ DE CORRELACIONES DE LAS SERIES CORRESPONDIENTES A LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES	73
41	SERIES TEMPORALES DE PRECIPITACIONES HORARIAS OBSERVADA Y RECONSTRUIDA, MEDIANTE SEIS COMPONENTES PRINCIPALES, PARA EL MES DE ENERO DE 2014 EN P101 (PINILLA)	74
42	SERIES TEMPORALES DE PRECIPITACIONES HORARIAS OBSERVADA Y RECONSTRUIDA, MEDIANTE SEIS COMPONENTES PRINCIPALES, PARA EL MES DE NOVIEMBRE DE 2011 EN P103 (PUENTES VIEJAS)	74
43	REPRESENTACIÓN EN MAPAS DE LOS PESOS DE CADA PLUVIÓMETRO EN CADA UNA DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES	76
44	REPRESENTACIÓN EN MAPAS DE LOS PESOS DE CADA PLUVIÓMETRO EN CADA UNA DE LAS SEIS COMPONENTES QUE RESULTAN DE LA ROTACIÓN VARIMAX	77
45	REPRESENTACIÓN DE LOS AGUACEROS ACAECIDOS ENTRE EL 11 Y EL 15 DE FEBRERO DE 2014, AMBOS INCLUSIVE, A TRAVÉS DE LAS SERIES TEMPORALES DE LAS 6 PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES	78
46	REPRESENTACIÓN DE LOS AGUACEROS ACAECIDOS ENTRE EL 11 Y EL 15 DE FEBRERO DE 2014, AMBOS INCLUSIVE, A TRAVÉS DE LAS SERIES TEMPORALES DE LAS 6 PRIMERAS COMPONENTES ROTADAS	79
47	VARIANZA EXPLICADA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPALES CALCULADAS SOBRE LA SERIE DE CAMPOS DE PRECIPITACIÓN HIRLAM	80
48	DETALLE DEL GRÁFICO DE LA FIGURA 47	80
49	CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LAS SEIS PRIMERAS COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS PARA CAMPOS DE PRECIPITACIÓN HORARIA HIRLAM DE NOVIEMBRE-ABRIL	82
50	COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS 37 PARES DE VARIABLES CANÓNICAS	83
51	DISPERSIÓN ENTRE VARIABLES DE LOS CUATRO PRIMEROS PARES DE VARIABLES CANÓNICAS	84
52	CORRELACIONES HOMOGÉNEAS DE LOS PRIMEROS CUATRO PARES DE VARIABLES CANÓNICAS	85

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
53	COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LOS 37 PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL CCA RESTRINGIDO A CASOS DE NIEVE POTENCIAL	86
54	DISPERSIÓN ENTRE VARIABLES DE LOS CUATRO PRIMEROS PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL ANÁLISIS CCA, RESTRINGIDO A LOS CASOS DE NIEVE POTENCIAL	87
55	CORRELACIONES HOMOGÉNEAS DE LOS PRIMEROS CUATRO PARES DE VARIABLES CANÓNICAS DEL CCA RESTRINGIDO A LOS CASOS DE NIEVE POTENCIAL	88
56	GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE RESIDUOS $V^* - V$ EN LAS DOS PRIMERAS CORRELACIONES CANÓNICAS	90
57	HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE LAS DISTANCIAS EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE LAS CUATRO PRIMERAS CORRELACIONES CANÓNICAS	91
58	TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 1	92
59	TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 5	93
60	TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 13	94
61	TRAYECTORIA EN EL ESPACIO DE RESIDUOS DE CC1 A CC4 PARA LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 18	95
62	DISTANCIAS EN EL ESPACIO DE RESIDUOS HORA A HORA PARA LAS VENTANAS DE OPORTUNIDAD	96
63	CAMPOS DE PRECIPITACIÓN OBSERVADA Y HIRLAM DE LAS 6 HORAS DE LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 14	97
64	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE SENSIBILIDAD A LA ALTERACIÓN DEL CAMPO DE PRECIPITACIONES EN LA VENTANA DE OPORTUNIDAD 14	98
65	PLUVIÓMETRO PINILLA, P101	105
66	PLUVIÓMETRO RIOSEQUILLO, P102	106
67	PLUVIÓMETRO PUENTES VIEJAS, P103	107
68	PLUVIÓMETRO VILLAR, P104	108
69	PLUVIÓMETRO EL ATAZAR, P105	109
70	PLUVIÓMETRO EL VADO, P106	110
71	PLUVIÓMETRO PEDREZUELA, P107	111
72	PLUVIÓMETRO NAVACERRADA, P108	112
73	PLUVIÓMETRO SANTILLANA, P109	113
74	PLUVIÓMETRO NAVALMEDIO, P110	114
75	PLUVIÓMETRO LA JAROSA, P111	115
76	PLUVIÓMETRO VALMAYOR, P112	116
77	PLUVIÓMETRO LA ACEÑA, P113	117
78	PLUVIÓMETRO MORALES, P114	118
79	PLUVIÓMETRO FRESNO CANTIESPINO, P201	119
80	PLUVIÓMETRO LA PINILLA ESTACIÓN DE ESQUÍ, P202	120
81	PLUVIÓMETRO SEGOVIA, P204	121

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
82	PLUVIÓMETRO RIEGOS BORNOVA, P302	122
83	PLUVIÓMETRO JARAMA EN VALDEPEÑAS, P304	123
84	PLUVIÓMETRO POZO DE LOS RAMOS, P306	124
85	PLUVIÓMETRO CONDEMIOS DE ARRIBA, P308	125
86	PLUVIÓMETRO CAMPISABALOS, P309	126
87	PLUVIÓMETRO CANTALOJAS, P310	127
88	PLUVIÓMETRO CABIDA, P311	128
89	PLUVIÓMETRO ROBREGORDO, P312	129
90	PLUVIÓMETRO DEPÓSITOS DE LA DEHESA, P313	130
91	PLUVIÓMETRO ALBERGUE, P314	131
92	PLUVIÓMETRO LA BARRANCA, P315	132
93	PLUVIÓMETRO MIEDES DE ATIENZA, P316	133
94	PLUVIÓMETRO GASCUEÑA DE BORNOVA, P317	134
95	PLUVIÓMETRO UMBRALEJO, P318	135
96	PLUVIÓMETRO MAJAELRAYO, P319	136
97	PLUVIÓMETRO PUEBLA DE LA SIERRA, P320	137
98	PLUVIÓMETRO NAVAMOJADA, P321	138
99	PLUVIÓMETRO OLLA DEL QUIÑON, P322	139
100	PLUVIÓMETRO CRUZ ROJA, P323	140
101	PLUVIÓMETRO CERCEDILLA, P324	141
102	PLUVIÓMETRO PRADO DOCTOR, P325	142

**ANEXO 7.5. ÍNDICE DE TABLAS**

<i>Tabla</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	ACCIONES DE SUSTITUCIÓN POR ESTIMAS EN SECUENCIAS ANÓMALAS DETECTADAS EN LAS SERIES DE DATOS	34
2	PORCENTAJE DE DATOS COMPLETOS EN LOS PLUVIÓMETROS DE AEMET	37
3	RELACIÓN DE PLUVIÓMETROS DE LA SELECCIÓN DEFINITIVA	40
4	VENTANAS DE OPORTUNIDAD DE LAS CAMPAÑAS 2010-11 y 2011-2012	47

Santa Engracia, 125. 28003 Madrid

[www.canalgestion.es](http://www.canalgestion.es)