

METEOROLOGÍA DE MONTAÑA EN EL PARQUE NATURAL DE PEÑALARA

LUIS DURÁN MONTEJANO

*Departamento de Ciencias
Escuela Superior Politécnica
Universidad Europea de Madrid
C/ Tajo s/n.
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
luis.duran@uem.es*

INTRODUCCIÓN

La Tierra presenta numerosas zonas de montaña que juegan un papel fundamental en el sistema climático, no sólo debido a su climatología tan característica, sino también a la influencia que ejercen sobre el clima planetario en su conjunto. Disponer de observaciones meteorológicas en zonas de alta montaña es crucial, no sólo para conocer las características climatológicas propias de las regiones montañosas en sí, sino también para poder evaluar su influencia sobre las regiones limítrofes, incluso para comprender el papel que éstas juegan en el sistema climático planetario. Por otro lado, el carácter remoto de estas regiones debido a su altitud y alejamiento de zonas urbanizadas, hacen que se conviertan en valiosísimos observatorios de los cambios que pueda sufrir el sistema climático.

La observación meteorológica en zonas de alta montaña no empezó a llevarse a cabo de forma intensiva hasta mediados del siglo diecinueve, y generalmente asociada a estudios de carácter astronómico, como por ejemplo los primeros estudios llevados a cabo en el Teide por Smyth en 1859. Por otro lado, la gran mayoría de los estudios meteorológicos que se han llevado a cabo en zonas de alta montaña han sido de tipo hidrológico o biológico, interesados en problemáticas muy particulares, pero sin un enfoque estrictamente meteorológico y faltos de continuidad (Band, 1991; Garen, 1994; Holko, 1997; Lindkvist, 2000; Fontaine, 2002; Friedman, 2003). Esto ha provocado que una gran parte de la información existente sobre estas zonas esté muy dispersa en la literatura científica, y que generalmente esté contemplada desde un punto de vista muy particular.

Diversas vicisitudes y casualidades han permitido que la zona actualmente denominada “Parque Natural de Peñalara, Cumbre, Circo y Lagunas”, situada en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central) mantenga su gran interés de zona de alta montaña a pesar de encontrarse a escasos kilómetros de importantes concentraciones urbanas, como por ejemplo Madrid (De Pedraza, 2000).

Desde el punto de vista científico esta región es enormemente interesante por haber conservado sus características de zona montañosa, siendo actualmente objeto de numerosos estudios científicos (Palacios 1997; Sancho, 2000; Montouto, 2000; Granados, 2000).

Por otro lado, las condiciones ambientales tan extremas que caracterizan a las zonas de montaña hacen que éstas sean ecosistemas muy frágiles, no únicamente frente a la ocurrencia de fenómenos y catástrofes de origen natural sino, especialmente, frente a cambios inducidos directa o indirectamente por el ser humano (Bosch, 2007). Conocer las condiciones ambientales a las que se encuentran las regiones montañosas no es simplemente un acto de comprensión de los fenómenos que ocurren en ellas, sino también, una forma de preservarlas.

Desde el punto de vista meteorológico, las montañas provocan tres tipos de efectos sobre el medio ambiente atendiendo a su escala:

- Modifican considerablemente los flujos sinópticos debido a efectos dinámicos y termodinámicos. Estas



perturbaciones pueden llegar a propagarse hasta niveles bastante altos de la atmósfera y extenderse geográficamente, pudiendo conformar el clima de regiones extensas.

- Generan condiciones meteorológicas recurrentes propias de lo que se podría denominar genéricamente clima alpino, con valores muy característicos de variables como el viento, la temperatura, la nubosidad y la precipitación.
- Dan lugar a una gran variedad de microclimas¹ debido al gran contraste observado de las principales variables meteorológicas como resultado de su compleja orografía que condiciona aspectos tales como la radiación incidente, exposición al viento, precipitación y otros aspectos que hacen posible que las zonas montañosas pueden llegar a presentar una gran variedad de microclimas en apenas centenas de metros.

Este último aspecto es fundamental para entender el carácter más novedoso de la red de medida meteorológica de alta resolución en el Parque Natural de Peñalara. En esta zona, situada por encima de los frondosos pinares y que se corresponde con las denominadas cumbres de Peñalara, la vida animal y vegetal, los procesos de precipitación, de acumulación de nieve e incluso de erosión que sufre el suelo y que han conformado su aspecto actual, se encuentran fuertemente controlados por el clima del suelo y de las capas de aire junto a él, es decir, su microclima. Estos microclimas, están formados a su vez por un mosaico de “topoclimas”² como resultado de los obstáculos, afloramientos rocosos y otras irregularidades del terreno, que pro-

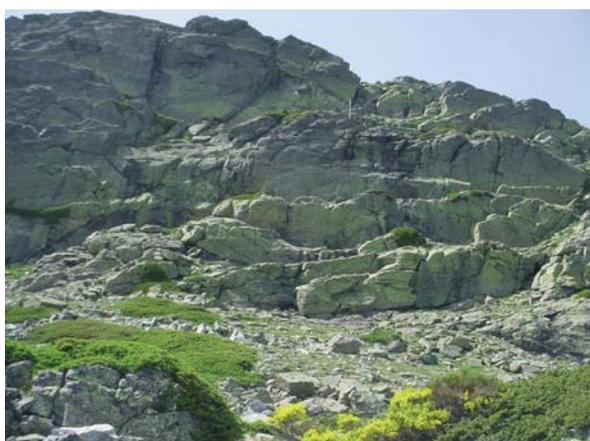


Figura 1.- Los diferentes microclimas y topoclimas existentes en el Parque son la principal causa de su gran biodiversidad.

vocan de nuevo importantes variaciones dentro de un microclima (Tappeiner, 2001; Fu, 2002; Dargie, 1987). Esta combinación de microclimas con topoclimas es la principal causa de la gran biodiversidad que caracteriza a las zonas de montaña ya que determina el tipo de cubierta vegetal que de nuevo puede influir sobre el microclima hasta que se alcanza un equilibrio más o menos estable. Es fácil comprobar cómo en cualquier rincón del Parque pequeñas irregularidades topográficas o pequeñas diferencias en el ángulo y la orientación de las pendientes pueden producir contrastes muy marcados en los tipos de líquen que colonizan cada roca o el tipo de vegetación que cubre el suelo (Sancho, 2000; Anderton, 2002) como se aprecia en la Figura 1.

Existen diferentes clasificaciones de los microclimas alpinos en función de los valores medios observados de variables meteorológicas tales como la radiación recibida por cada pendiente, el grado de exposición al viento, la profundidad de la cubierta de nieve y la densidad y profundidad de la cubierta vegetal (Turner, 1980). Otras clasificaciones son más sencillas, pero todas expresan la necesidad de disponer de información meteorológica de alta resolución espacial, es decir, capaces de discernir diferencias en apenas decenas de metros.

Finalmente, esta zona tiene un gran interés turístico y de divulgación medioambiental. Por ella transcurren al año numerosos visitantes que demandan información meteorológica, sin olvidar otros aspectos, afortunadamente poco frecuentes, como son los incendios forestales u otras situaciones de emergencia donde la información meteorológica puede ser de gran ayuda. Estas y otras razones son las que condujeron al establecimiento de una red meteorológica en el Parque Natural y su Área de Influencia Socioeconómica, cuyas observaciones permitan, paulatinamente, cumplir los siguientes objetivos:

- Realizar estudios de variabilidad climática.
- Caracterizar la climatología y la fenomenología meteorológica de alta montaña en la Sierra de Guadarrama, y más concretamente, en el Parque Natural de Peñalara y su zona de influencia.
- Estimar y caracterizar los distintos microclimas y topoclimas existentes en el Parque.

1. Microclima: es el clima existente en los dos metros cercanos a la superficie y el primer metro del suelo. La vegetación influye considerablemente en el microclima aunque también influyen la orientación y la pendiente. Los microclimas suelen tener una extensión horizontal típica de metros a centenas de metros. La consideración de los microclimas son fundamentales en los estudios de vegetación, ecología y estudio de la dinámica de poblaciones de plantas y animales (Stoutjesdijk, 1992).
2. Topoclima: variante local del clima causada por los accidentes topográficos, la vegetación o por la acción del hombre. El estudio de los topoclimas es muy importante en ecología urbana y en bioclimatología (Stoutjesdijk, Ph. y J. J. Barkman, 1992; Richards, 2002).

- Documentar y analizar fenómenos meteorológicos extremos, prevenir riesgos relacionados con la meteorología y apoyar ante situaciones de emergencia.
- Informar a otros organismos y al público sobre el resultado de las medidas y divulgar conceptos relacionados con la meteorología y el medio ambiente.

En las proximidades del Parque se ubica una de las estaciones meteorológicas que conforman la red del Instituto Nacional de Meteorología, la estación de Navacerrada situada a 1890 m de altitud (Latitud: 40° 46' 50" N Longitud: 4° 00' 37" W). Esta estación de alta montaña opera desde hace más de medio siglo y ha sido utilizada en numerosos estudios científicos de muy diversos ámbitos. Algunos de estos estudios tienen un carácter local (Tena, 1986; Díaz, 1997; Palacios, 1997; Sanz-Elorza, 2003; Manrique, 2004; Lana, 2005), mientras otros hacen uso de las características de estación remota de alta montaña indicadora del clima global (Agustí-Panareda, 2002; Kysely, 2004; Bosch, 2007).

El histórico de datos de esta estación permite enmarcar las condiciones atmosféricas en las que se ha encontrado la zona durante las últimas décadas, tal como se puede comprobar en la Tabla 1.

Si bien esta estación ha servido eficazmente para realizar estudios de muy diversa índole en la zona del Macizo de Peñalara, la demanda creciente por parte de los numerosos grupos de investigación que trabajan en la zona de observaciones más precisas y representativas, condujeron a la instalación por parte del propio Parque (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid) de una

estación automática en el mismo corazón del Parque en 1998, concretamente en el denominado Refugio de Zabala a 2200 metros de altitud. Este esfuerzo de monitorización continuó con la instalación de dos estaciones automáticas más, una en Cabeza Mediana (1680 m) y otra en el Puerto de los Cotos (1846 metros). Actualmente se está experimentando con un prototipo de estación meteorológica de bajo impacto, con unos requerimientos mínimos de instalación, mantenimiento y de gran robustez en siete ubicaciones del Parque y que permite la instalación de varios puntos de medida con el mismo coste que una estación automática convencional.

El carácter remoto de los emplazamientos de esta red tiene repercusiones directas sobre la calidad y la cobertura de los datos obtenidos. La instalación es complicada y las labores de mantenimiento deben concentrarse en primavera, verano y otoño, justo cuando menos se requieren. Tampoco se dispone de fuentes de energía con la que alimentar los equipos o calefactar algunos sensores especialmente diseñados para alta montaña; sin olvidar que las instalaciones quedan expuestas al vandalismo ya que, aunque con un seguimiento diario, no pueden estar vigiladas de forma continua. Finalmente, las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestas los equipos y sus estructuras son extremas, propias de un clima de alta montaña. En invierno, las temperaturas son bajas y mantenidas durante días, lo que disminuye notablemente el rendimiento de las baterías. En verano, la radiación es muy alta, lo que acelera la degradación de plásticos y pinturas. La nieve y el hielo también realizan un desgaste mecánico considerable, ya que cuando se acumula sobre las estructuras, puede llegar a fracturarlas cuando se combina con vientos, en algunos casos, huracana-

Tabla 1. Valores climatológicos de las principales variables medidas en la estación Navacerrada del Instituto Nacional de Meteorología (Fuente: INM)

Estación de Navacerra (Periodo: 1971-2000)								
MES	Temperatura media (°C)	Temperatura media de las máximas (°C)	Temperatura media de las mínimas (°C)	Precipitación media mensual (mm)	Humedad relativa media (%)	Número medio de días de nieve	Número medio de días de tormenta	Número medio de días de sol
ENE	-0.6	2.0	-3.1	141	82	13	0	108
FEB	-0.2	2.5	-2.9	116	83	12	0	107
MAR	1.5	4.7	-1.7	92	78	11	1	159
ABR	2.5	5.7	-0.8	138	81	13	1	160
MAY	6.5	10.2	2.8	142	76	5	4	209
JUN	11.9	16.3	7.5	71	66	1	5	275
JUL	16.2	21.2	11.3	33	54	0	4	339
AGO	16.3	21.2	11.3	24	54	0	3	323
SEP	12.4	16.6	8.2	63	65	1	3	212
OCT	6.7	9.8	3.6	143	81	3	1	146
NOV	2.8	5.4	0.2	186	83	8	0	108
DIC	0.7	3.2	-1.7	176	83	11	0	93
AÑO	6.4	9.9	2.9	1326	74	78	22	2238



dos. Estos factores son un breve resumen de las diversas circunstancias que afectan al rendimiento de una red de alta montaña, y que en sí mismos explican la escasez de este tipo de redes en todo el mundo.

A continuación se presenta una descripción de la red, mostrando los parámetros fundamentales de cada estación de medida y algunos resultados preliminares. También se apuntan algunas de las nuevas posibilidades, que desde el punto de vista científico, aporta esta red, y que será necesario explotar en el futuro.

DESCRIPCIÓN DE LA RED

Actualmente la red se compone de tres estaciones automáticas: Refugio de Zabala (2079 m), Puerto de los Cotos (1800 m) y Cabeza Mediana (1693 m), y siete balizas meteorológicas: Pico de Peñalara (2414 m), Dos Hermanas (2236 m), Pared Negra (2174 m), Charcas del Pico (2137 m), Chozo de Aforos (1937 m), Laguna del Operante (1935 m) y Hoyo de Pepehernando (1886 m) Figuras 2 y 3.

Los criterios de ubicación de estas estaciones han sido aquellos que mejor podían dar cumplimiento a los objetivos de la red anteriormente expuestos. Estos criterios se pueden resumir en:

- **Máxima representatividad.** La estación es representativa de las condiciones ambientales de la zona en la que se ubica, habiéndose evitado la selección de microambientes y optando por zonas bien ventiladas y expuestas. Se han seleccionado ubicaciones en cada una de las microcuencas del Parque y en todo el rango de altitudes, incluyendo la cima máxima.
- **Mínimo impacto.** Se han seleccionado zonas de bajo impacto visual, ambiental y ecológico.
- **Accesibilidad.** Relativo buen acceso a la instalación para su instalación, mantenimiento y volcado de datos.

De cada estación se muestra una ficha descriptiva en las figuras 12 a la 21.

RESULTADOS PRELIMINARES

Para poder realizar un análisis climatológico con los datos de la red sería necesario disponer de un histórico de datos mucho mayor, de al menos treinta años. Esto es así dado que el sistema climático presenta variabilidades interanuales, que hacen que cada año sea siempre, meteorológicamente hablando, diferente

del anterior. Es necesario, por tanto, incluir un gran número de años para poder caracterizar el clima de una zona y captar adecuadamente el comportamiento medio de las principales variables meteorológicas. No obstante, algunas estaciones de la red están operativas desde el año 1999, y aunque es claramente insuficiente, se puede comprobar si el comportamiento es coherente

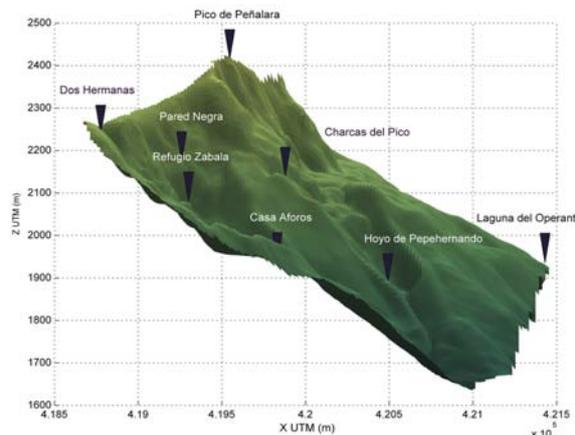


Figura 2.- Ubicación geográfica de las estaciones que se encuentran dentro del Parque Natural de Peñalara.

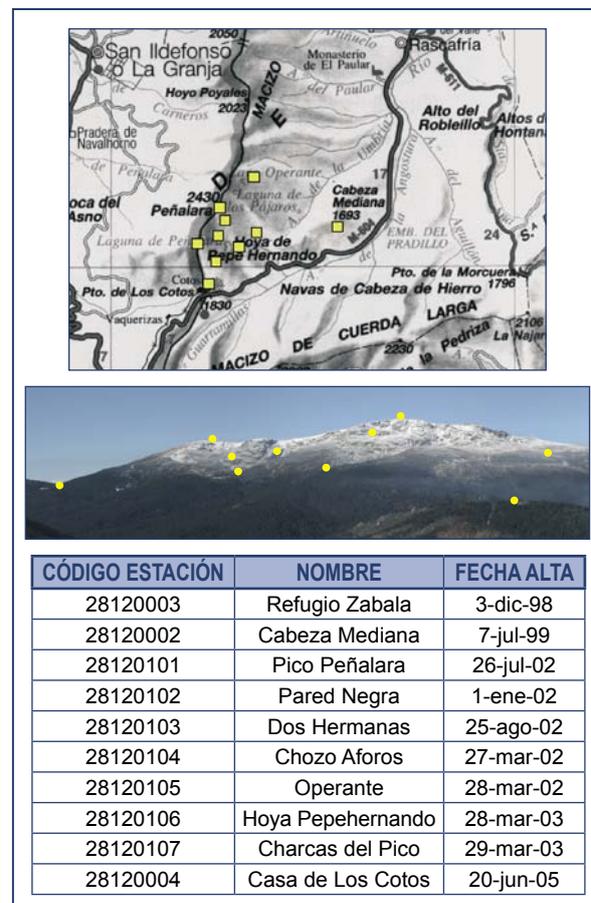


Figura 3.- Código, nombre y fecha de instalación de las estaciones que conforman la Red Meteorológica del Parque Natural de Peñalara.



con la climatología de la zona, suministrada por la estación INM de Navacerrada. En la figura 4 se muestran los valores medios mensuales registrados hasta la fecha en tres estaciones de la red a altitudes muy distintas y la estación de Navacerrada del INM. Es importante llamar la atención sobre el hecho de que los periodos de cálculo son muy distintos entre las distintas estaciones, siendo el gráfico correspondiente a la estación de Navacerrada el único realmente válido, desde el punto de vista climatológico.

Estos gráficos sirven para comprobar como la estación 002 (Cabeza Mediana) con el histórico de datos mayor y más completo, es aquel que muestra un comportamiento más cercano a la climatología observada en Navacerrada. Sin embargo se notan diferencias importantes durante los meses de invierno. Esta circunstancia, aún más acusada en las otras dos

estaciones de la red, puede deberse al hecho de que con la tecnología disponible hasta 2005, únicamente se están contabilizando precipitaciones líquidas. En los meses de invierno, gran parte de la precipitación es sólida, nieve y granizo, que únicamente se podría contabilizar en una estación automática si se dispone de instrumental adecuado. Este hecho ya se observó durante los primeros años de operación de la red y se corrigió con la instalación de un pluviómetro calefactado en la estación 003 (Refugio Zabala). La puesta en marcha de estos sensores, conllevó la instalación de fuentes adicionales de energía eléctrica. En lo que respecta a las estaciones 101 y 003, aún es pronto para concluir variaciones espaciales de la precipitación. Por otro lado, las denominadas “balizas meteorológicas” aún están en fase de validación y perfeccionamiento. El emplazamiento en el Pico de Peñalara, a parte de probablemente sufrir el mismo fenómeno, presenta unas particularidades asociadas a la dureza de las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesta, que han provocado importantes lagunas de datos. Será necesario esperar aún más tiempo para poder concluir particularidades climatológicas.

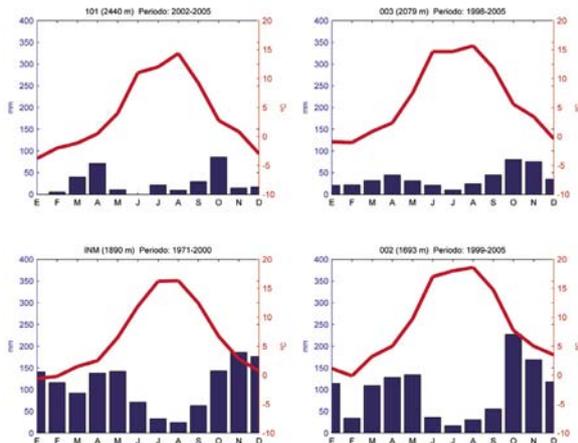


Figura 4.- Valores medios medidos para diferentes periodos y climograma de la estación INM Navacerrada. Las barras son la precipitación media mensual y la línea representa la temperatura media mensual.

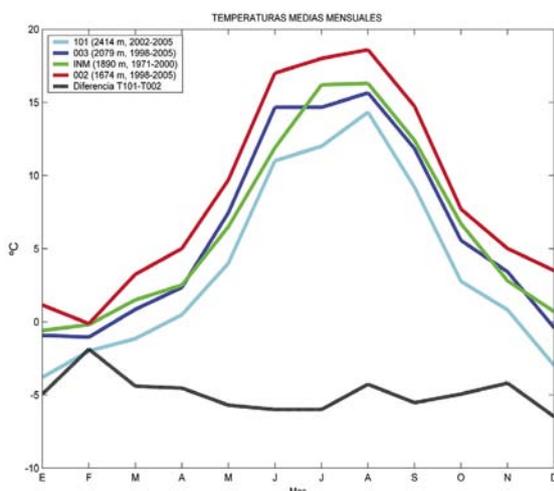


Figura 5.- Valores la temperatura media mensual y gradiente térmico medio

La Figura 5 muestra los valores medios mensuales de temperatura en cuatro estaciones. Como se puede comprobar, la diferencia altitudinal se refleja en los valores medios de la temperatura. Tal y como era de esperar, se ha encontrado un gradiente térmico vertical con las menores temperaturas para las estaciones situadas a mayor altitud, siendo esta diferencia de temperatura prácticamente constante a lo largo de todo el año. Este hecho es fácil de comprobar al haberse representado también la diferencia de temperatura entre la estación a mayor altitud (101) con la de menor altitud (003). Esta diferencia tiene una media anual de $-6.6\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$, siendo ligeramente mayor durante los meses de invierno, y menor durante los meses de verano. Este valor del gradiente térmico vertical se encuentra entre el correspondiente al de una atmósfera seca (el gradiente adiabático seco es de $-9.78\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$) y el de una atmósfera húmeda ($-4.9\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$) (Barry, 1992). No es casualidad que el valor mínimo de este gradiente se corresponda con los meses con mayor índice de tormentas en la zona, mayo y junio, es decir, donde ocurren la mayoría de los procesos de convección y donde la atmósfera tendrá una composición más parecida a la atmósfera saturada.

El comportamiento del gradiente térmico vertical es aún más interesante cuando se analizan los valores horarios de las temperaturas registrados por las estaciones ubicadas a diferentes altitudes. La Figura 6 muestra la evolución del gradiente vertical de temperatura calculado a partir de las observaciones así como los valores del gradiente adiabático seco y saturado.



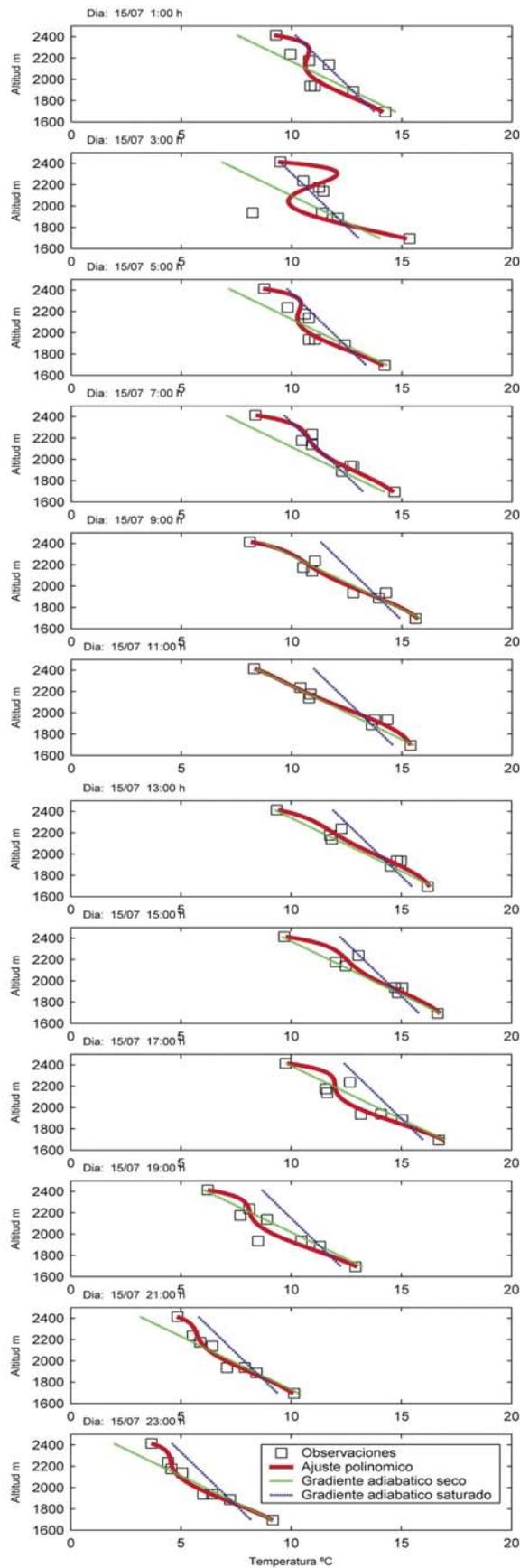


Figura 6.- Evolución diaria de las temperaturas medias horarias observadas y gradientes térmicos estimados el día 15/7/2002

Como se puede observar en estas gráficas se muestra la utilidad de una red de alta resolución. Por lo general, en las redes de alta montaña se dispone de menos estaciones por cada nivel de altitud, y el gradiente vertical calculado omite estas inversiones. En este día concreto, reflejado en la Figura 6, la omisión no sería importante durante algunas horas del día (horas centrales del día), sin embargo, a partir de las 17:00 horas el gradiente térmico vertical comienza a quebrarse, formando una inversión máxima durante las primeras horas de la madrugada (ver pendiente positiva). Este fenómeno de inversión no es esporádico en el Parque y además muestra una dinámica repetitiva noche-día que se repite hasta que las condiciones atmosféricas dejan de ser favorables. Es obvio que desde el punto de vista ambiental el fenómeno de inversión térmica puesto de manifiesto por la red descubre zonas del Parque sujetas a unas condiciones ambientales diferentes a las esperadas, o al menos, más complejas y que será necesario estudiar con más detalle.

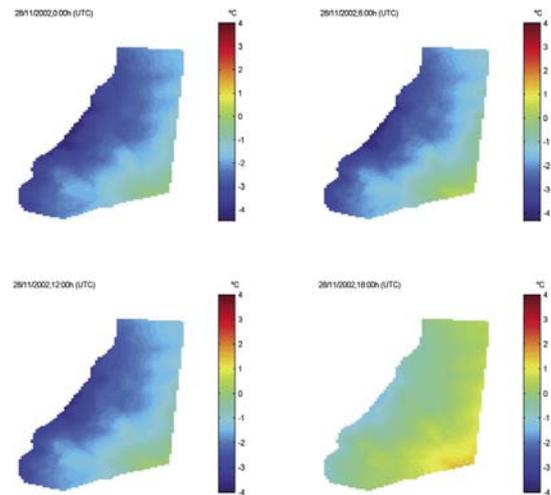


Figura 7.- Campos de temperatura de alta resolución (20 m) para el Parque Natural de Peñalara correspondientes a las 0, 6 12 y 18 horas del día 22 de Agosto de 2002.



Figura 8.- Estudio de intercomparación de pluviómetros utilizados en la red. Ubicación de Cabeza Mediana.

Una de las aplicaciones del cálculo de perfiles verticales de temperatura que proporciona esta red es la estimación de campos de temperatura de muy alta resolución y el cálculo de series de temperatura en ubicaciones donde no existen estaciones de medida (Durán, 2004) Figura 7.

Otro aspecto de interés que pone de manifiesto esta red es la variación espacial de la precipitación líquida (Figura 9). El Parque está constituido por varias cuencas, y la precipitación recogida por cada una de ellas dependerá, entre otros factores, de su área y de la distribución espacial de la precipitación. Un método aceptado es la generalización de la precipitación recogida por un pluviómetro a un área de varias decenas de kilómetros cuadrados y aplicar esos valores a toda la cuenca. Sin embargo, en zonas de alta montaña, los procesos que conducen a la precipitación son complejos, haciendo que varíe considerablemente en pocos centenas de metros. Si bien es cierto que cuando el periodo de integración es muy largo (climatología) la precipitación total entre puntos próximos tiende a ser igual, no lo es evento a evento y, probablemente, tampoco lo sea desde el punto de vista del balance hídrico. Existe numerosa documentación sobre la variación de la precipitación con la altitud (Daly, 1994; Konrad 1995; Frei, 1998) y la relación existente entre las montañas y los procesos de precipitación

(Lin, 2001). Estos autores, entre otras cosas, ponen de manifiesto la alta correlación existente entre altura y la precipitación total, generalmente calculada a partir de valores promediados mensual o incluso anualmente, por otro lado, las estaciones utilizadas en este tipo de estudios distan en altitud y también en distancia horizontal varias decenas de kilómetros. Este no es el caso que nos ocupa, ya que esta red dispone de estaciones con apenas una diferencia de decenas de metros en vertical y pocos centenas de metros en horizontal. Por otro lado, un aspecto que hay que tener en cuenta en el estudio de la precipitación es la utilización de diferentes tipos de sensores, cuya intercomparabilidad está siendo estudiada (Sevruk, 1994) como se aprecia en la Figura 8.

Esta red permitirá en el futuro el estudio de la fenomenología de los procesos meteorológicos que actúan en el Parque, y sus conclusiones podrán extrapolarse a otras zonas del Sistema Central e incluso a otras zonas de montaña. La Figura 10 muestra la evolución de algunas de las variables medidas por la red, incluyendo alguna variable calculada como es la temperatura del punto de rocío (Teten, 1930; Bolton 1980), en un episodio de precipitación de verano debido a la formación de una tormenta el día 10 de agosto de 2002. Nótese como a diferencia de lo que ocurrió el 10 de agosto, el aire encontró condiciones de casi saturación

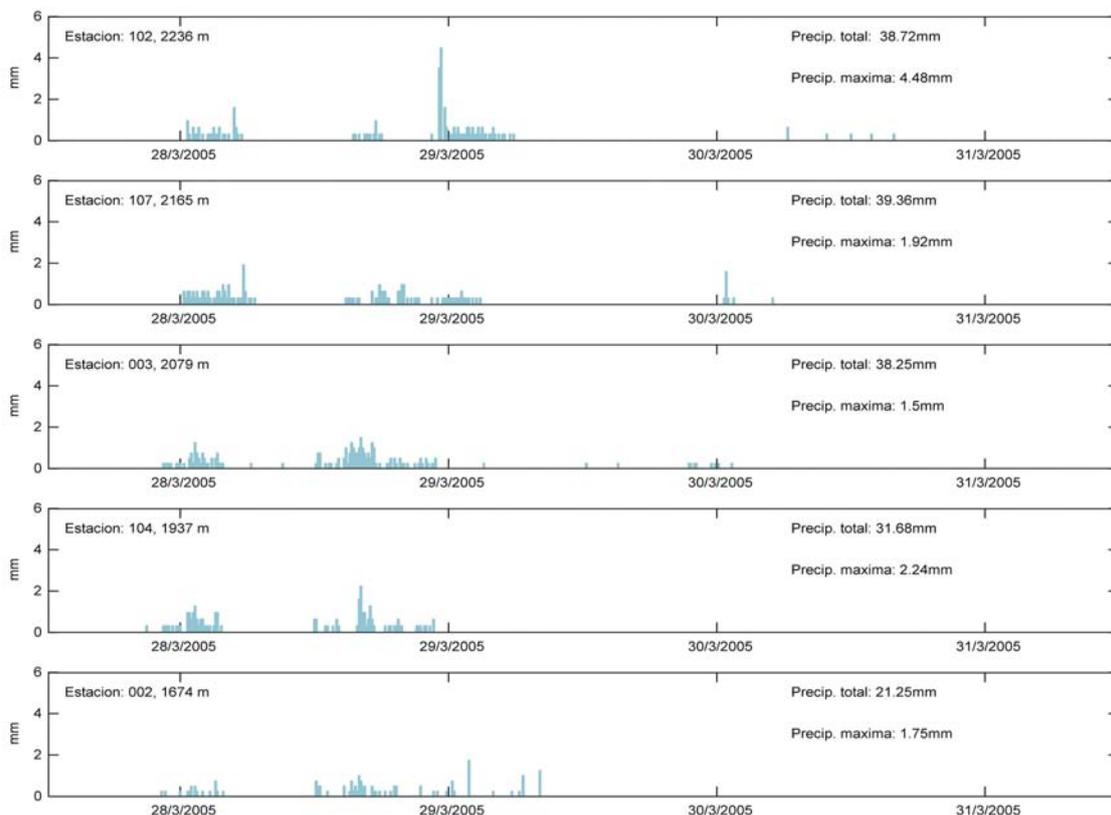


Figura 9.- Precipitación observada en cinco estaciones de la red.



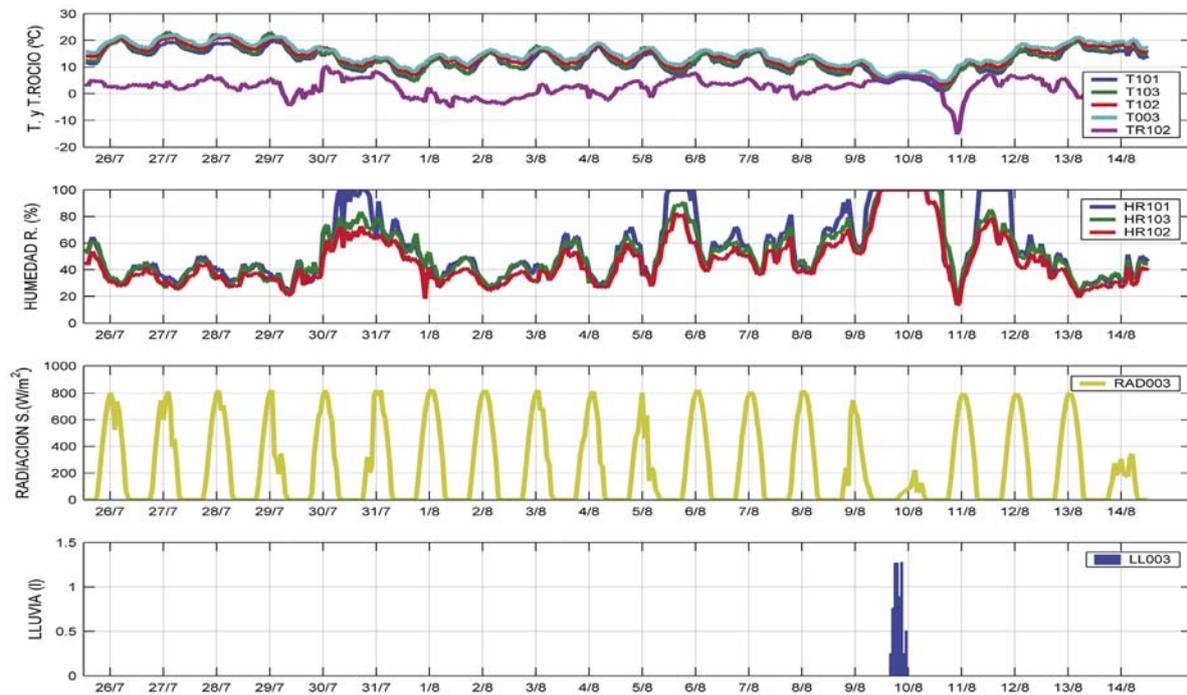


Figura 10.- Observaciones: T101: Temperatura media horaria en 101; T103: Temperatura media horaria en 103; T102: Temperatura media horaria en 102; T003: Temperatura media horaria en 003; TR102: Temperatura del punto de rocío calculada en 102; HR101: Humedad relativa media horaria en 101; HR103: Humedad relativa media horaria en 103; HR102: Humedad relativa media horaria en 102; RAD003: Radiación solar global media horaria en 003; LL003: Precipitación acumulada horaria en 003.

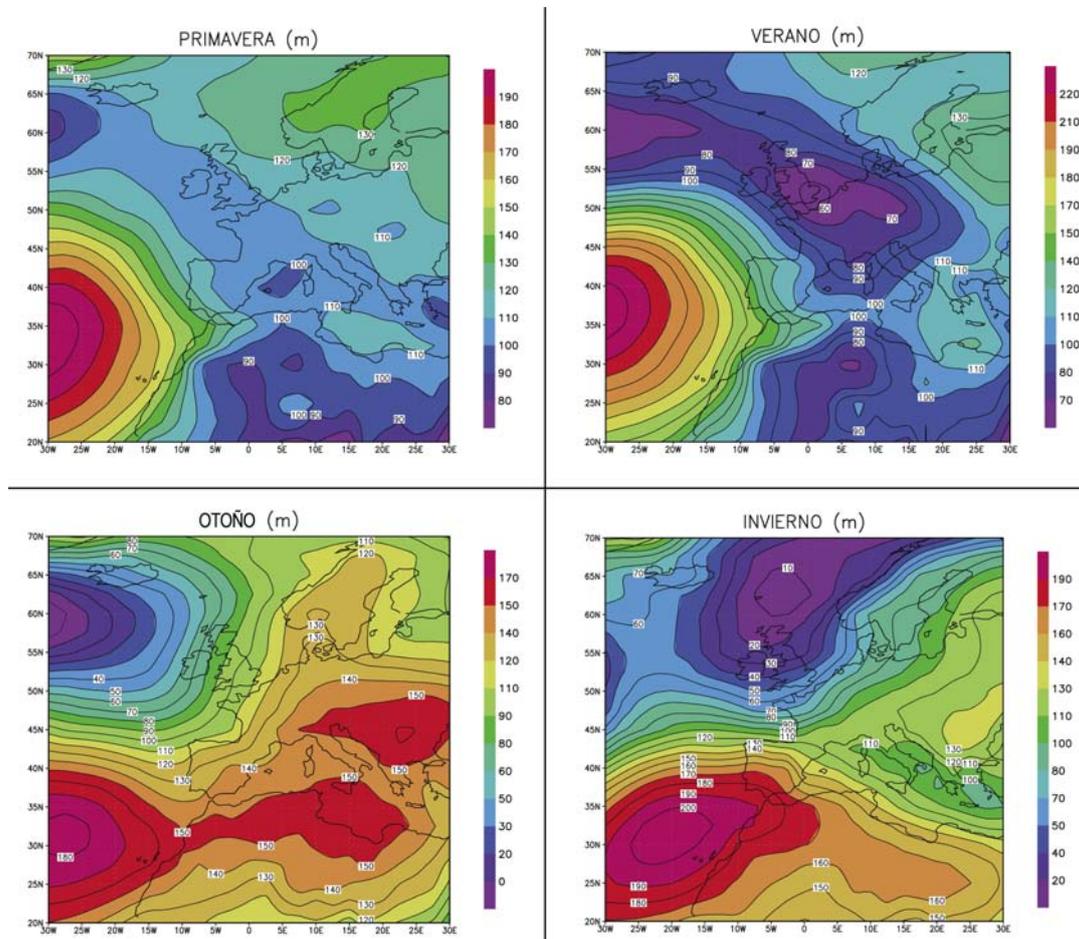


Figura 11.- Mapas compuestos de geopotencial para eventos de precipitación y para cada estación del año.



(temperatura del aire es igual a temperatura del punto de rocío) lo que produjo un aumento de la nubosidad (reflejado en el valor de la radiación), pero sin llegar a precipitar. Se puede suponer además, que este aumento de la nubosidad se produjo a una cota de mayor altura, tal como muestra el gradiente de humedad relativa (valores mucho más altos de la humedad relativa en la estación del Pico de Peñalara).

Otra aplicación inmediata de los resultados de esta red sería el estudio de la relación entre la situación sinóptica, es decir, la configuración de los campos de presiones a nivel continental, y los valores detectados a nivel local. La Figura 11 muestra un ejemplo de mapa compuesto de altura de geopotencial para las distintas estaciones del año ante eventos de precipitación que permitiría avanzar en el conocimiento de los procesos de precipitación en alta montaña, y poder, entre otras aplicaciones, ayudar considerablemente en la predicción meteorológica.

Un análisis somero de la Figura 11 muestra como la precipitación en el Parque Natural de Peñalara ocurre en otoño e invierno ante situaciones de altas presiones en Azores y bajas presiones en Gran Bretaña, tal como era de esperar, con viento considerable del Oeste, siendo más acusado en invierno. Este dipolo de presiones, conocida como Oscilación del Atlántico Norte, da lugar a precipitaciones en nuestras latitudes cuando se encuentra más bajo de lo normal, tal como se puede apreciar en la figura. Por otro lado, la precipitación en primavera y verano, con un sistema de altas presiones en Azores, gran separación entre las isobaras, y por tanto apenas viento de origen sinóptico, se debe a fenómenos de convección, es decir, tormentas, probablemente inducidas orográficamente.

CONCLUSIONES

Se ha descrito la Red Meteorológica del Parque Natural de Peñalara con diversas innovaciones desde el punto de vista conceptual e instrumental. También se han apuntado diversas líneas de investigación que serán necesarias explotar en el futuro y aunque su instalación es reciente, se pueden extraer algunas conclusiones:

El Parque Natural de Peñalara presenta unas condiciones ambientales muy adversas para la medida meteorológica tal como se ha puesto de manifiesto desde el año 1998, fecha desde la que se vienen llevando a cabo observaciones meteorológicas mediante estaciones automáticas e instrumentación específicamente diseñada para entornos de montaña. Se ha probado diferente instrumentación y se han adoptado medidas para minimizar las pérdidas de datos, pero aún sigue siendo necesario avanzar en la robustez del sistema y la comparabilidad de las medidas.

Con objeto de caracterizar la gran diversidad de los microclimas presentes en esta zona ha sido necesario disponer de una alta densidad de estaciones. Los criterios de ubicación de los puntos de medida se han mostrado determinantes para poder cumplir los objetivos de la red.

Los valores de las principales variables meteorológicas obtenidos hasta la fecha se están mostrando coherentes con los datos obtenidos por estudios de características similares realizados en otras regiones montañosas. Por otro lado, se apuntan procesos locales muy interesantes, no solo desde el punto de vista meteorológico. Entre estos aspectos se incluyen la frecuente aparición de inversiones térmicas, procesos de precipitación con alta variabilidad espacial y otros fenómenos propios de la orografía compleja.

Entre otros valores añadidos de la red, se han ensayado métodos simples de obtención de campos meteorológicos de alta resolución y cálculo de series meteorológicas en zonas donde no hay estaciones. La explotación de estas posibilidades son las principales líneas en las que proseguir la investigación a corto plazo. Otro aspecto a investigar será la determinación de los procesos meteorológicos a nivel sinóptico que influyen en los procesos de precipitación y los valores extremos de temperatura así como otros fenómenos locales.



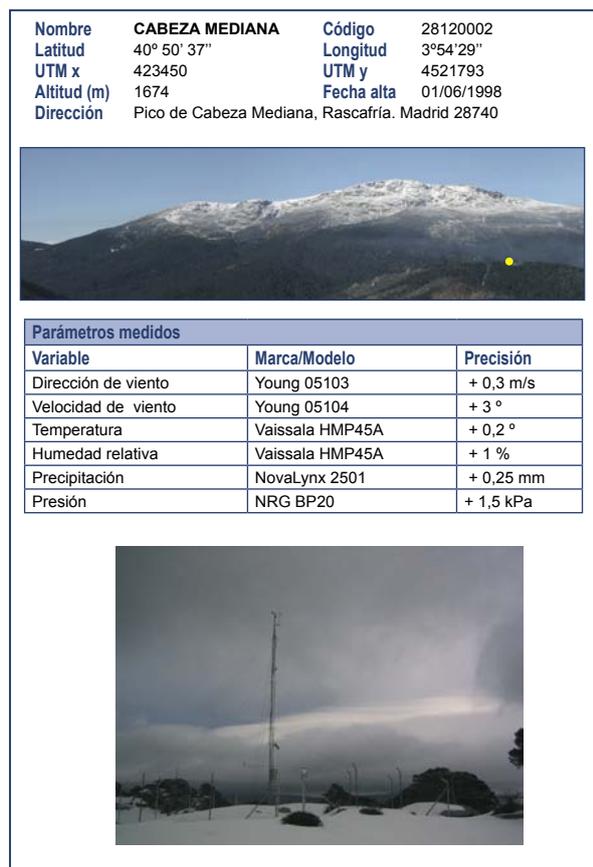


Figura 12.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en Cabeza Mediana

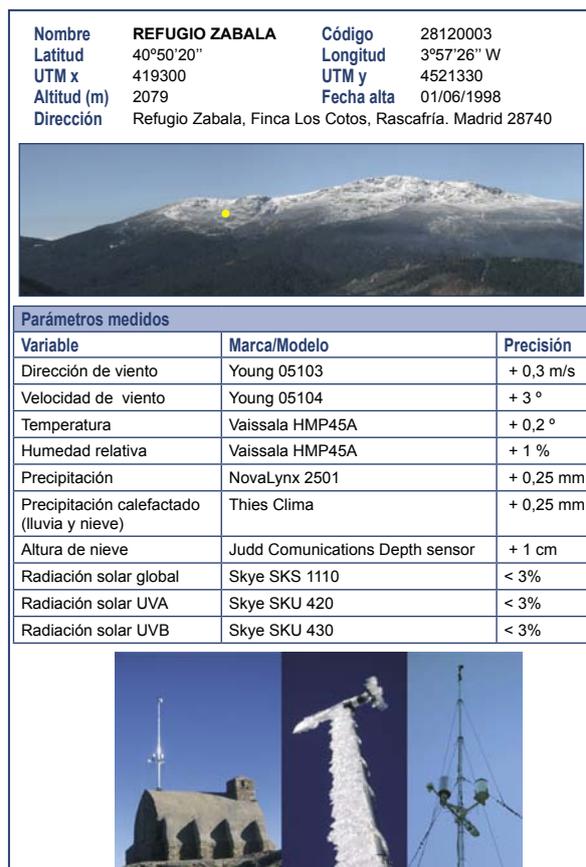


Figura 13.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en el Refugio Zabala

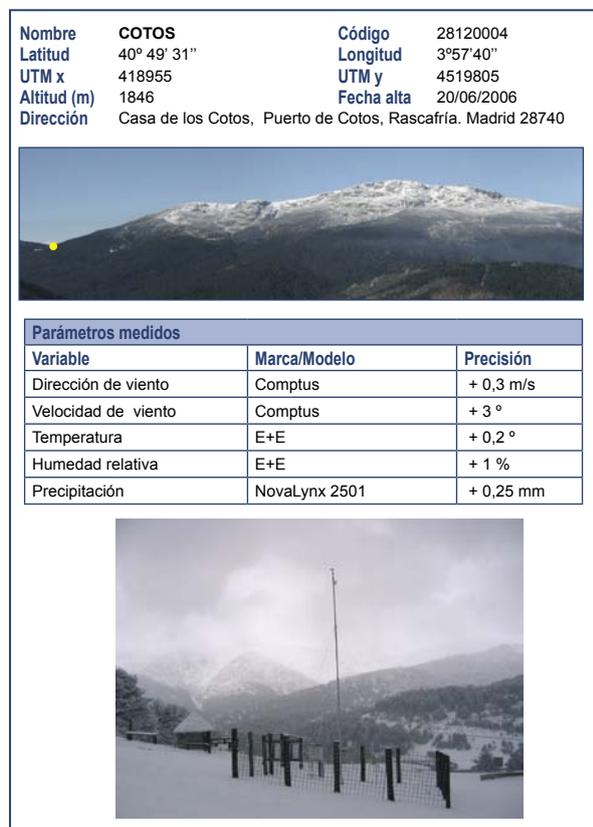


Figura 14.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en Cotos

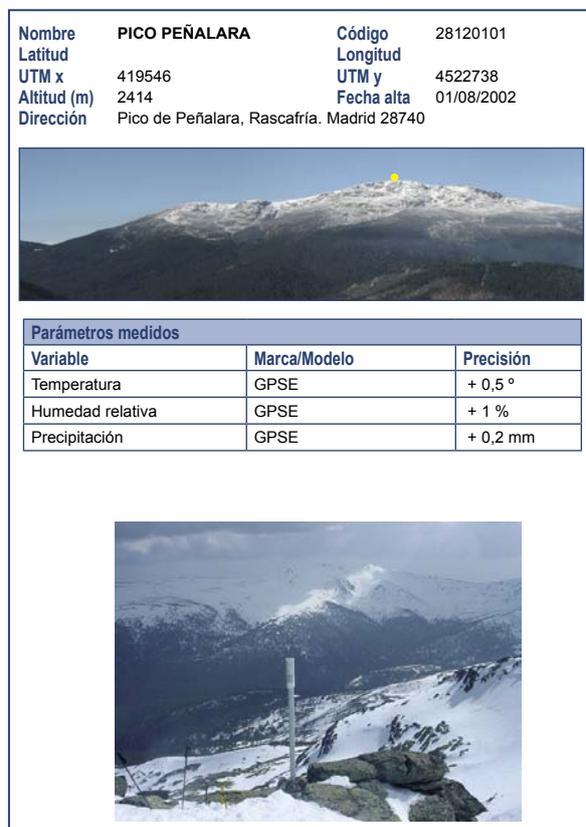


Figura 15.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en el Pico de Peñalara



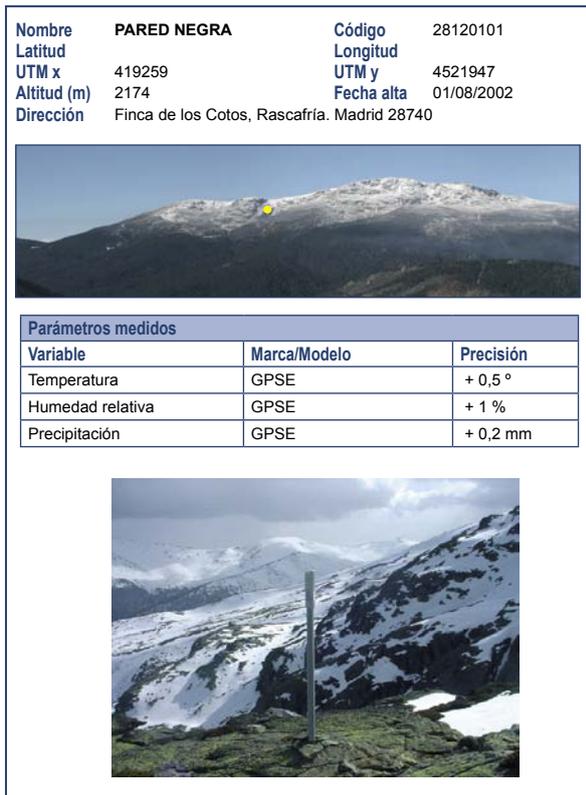


Figura 16.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en la Pared Negra

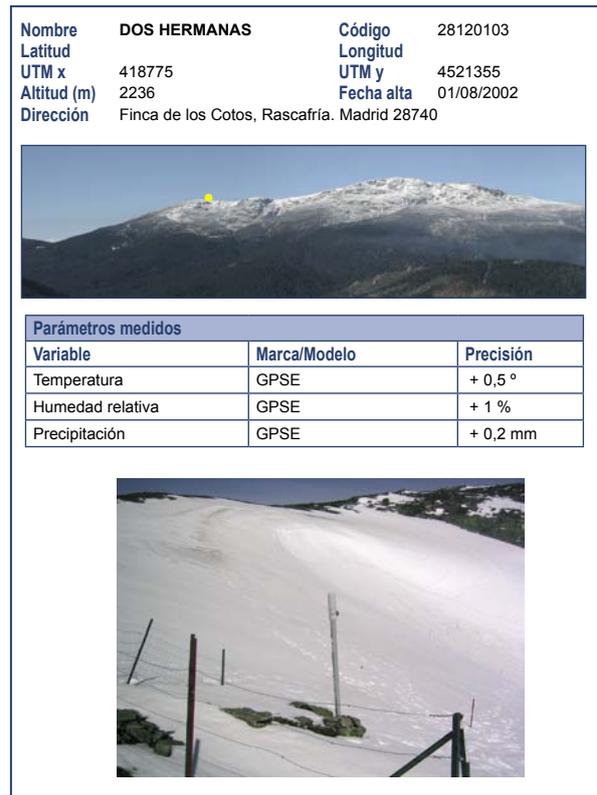


Figura 17.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en Dos Hermanas

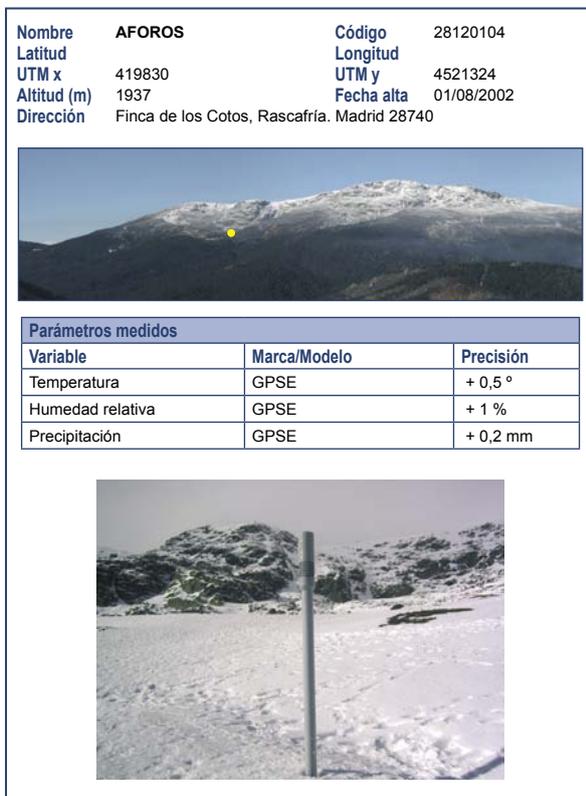


Figura 18.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en Aforos



Figura 19.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en El Operante



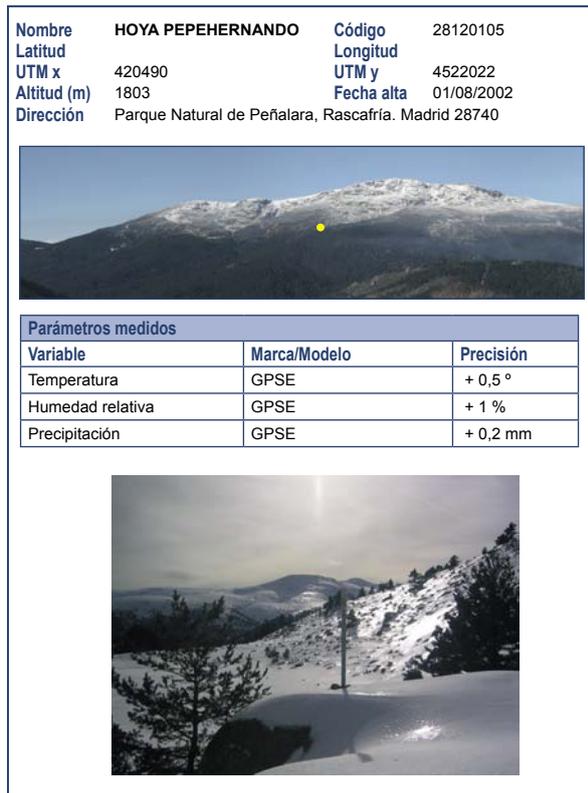


Figura 20.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en la Hoya de Pepehernando

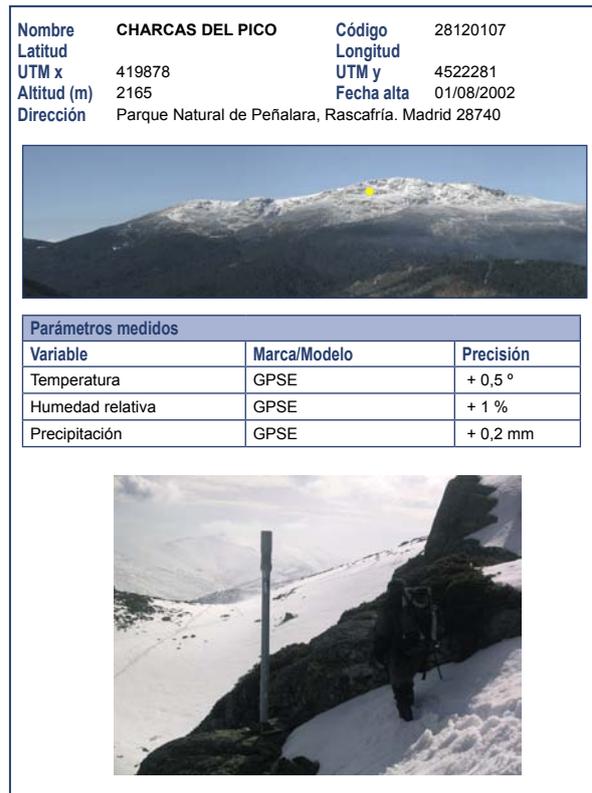


Figura 21.- Resumen de parámetros de la estación ubicada en las Charcas del Pico

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUSTÍ-PANAREDA A, THOMPSON R., 2002. Reconstructing air temperature at eleven remote alpine and arctic lakes in Europe from 1781 to 1997 AD. *Journal of Paleolimnology*, Volume 28, Number 1.
- ANDERTON S.P., WHITE S.M., ALVERA B., 2002. Micro-scale spatial variability and the timing of snow melt runoff in a high mountain catchment. *Journal of Hydrology*, 268, 158–176.
- BAND, L., PETERSON, D., RUNNING, S., COUGHLAN, J., LAMMERS, R., DUNGAN, J., NEMANI, R. 1991. Forest ecosystem processes at the watershed scale: basis for distributed simulation. *Ecological Modelling*, 56, 171-196.
- BARRY R.G., 1992. *Mountain Weather and Climate*. 2nd ed., Routledge, London/New York, 402 pp.
- Bolton, D., 1980. The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053.
- BOSCH J, CARRASCALI L.M., DURÁN L, WALKERS S. AND FISHER M.C., 2006. Climate change and outbreaks of amphibian chytridiomycosis in a montane area of Central Spain; is there a link? *Proc. R. Soc. B* (2007), 274, 253-260.
- DALY C., NEILSON R. P. R. , PHILLIPS D. L., 1994. A Statistical-Topographic Model for Mapping Climatological Precipitation over Mountainous Terrain. *Journal of Applied Meteorology*. Article: pp. 140–158
- Dargie C.D., 1987. An Ordination Analysis of Vegetation Patterns on Topoclimate Gradients in South-East Spain. *Journal of Biogeography*, Vol. 14, No. 3, pp. 197-211
- DE PEDRAZA-GILSANZ J., 2000. Peñalara: ¿Un paradigma para la conservación de las montañas?. En: *Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y Valle de El Paular*. Comunidad de Madrid. Consejería de Medio Ambiente. 9-18.
- DIAZ H.F., BRADLEY R.S., 1997. Temperature Variations During the Last Century at High Elevation Sites. *Climatic Change*, 36: 253–279, 1997.
- DURÁN - MONTEJANO L. y RODRÍGUEZ-FONSECA R. B., 2003. Description and Preliminary Results of a Meteorological Network for High Altitudes in the Peñalara, Cumbre, Circo y Lagunas Natural Park. *3ª Conferencia Internacional sobre Experiencias con Estaciones Meteorológicas Automáticas*.
- DURÁN L., 2003. Description and Preliminary Results of a Meteorological Network for High Altitudes. *European Geophysical Assembly-American Geophysical Union*.
- DURÁN L., 2004. System for High Resolution Temperature Fields Estimation in Mountain environments. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 05418, 2004
- FONTAINE T.A., CRUICKSHANK T.S., ARNOLD J.G. Y HOTCHKISS R.H., 2002. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 262, 209-223.
- FREI C. and SCHÄR C., 1998. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18, 873-900.
- FRIEDLAND A.J., BOYCE R.L., VOSTRAL C.B., HERRICK G.T., 2003. Winter and early spring microclimate within a mid-elevation conifer forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115, 195-200.
- FU P. y RICH P.M., 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 25-35.
- GAREN D. C., GREGORY L. J. y CLAYTON L. HANSON. 1994. Mean Areal Precipitation for Daily Hydrologic Modeling in Mountainous Regions. *Water Resources Bulletin*, 30, 481-491.
- GRANADOS I., TORO M., 2000. Limnología en el Parque Natural de Peñalara: nuevas aportaciones y perspectivas de futuro. En: *Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y Valle de El Paular*. Comunidad de Madrid. Consejería de Medio Ambiente. 55-72.
- HARTMANN, D.L., 1994: *Global Physical Climatology*. Academic Press, 411 pp.



- HOLKO L. y LEPISTO A., 1997. Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL. *International Journal of Hydrology*, 196, 361-377.
- KONRAD II C.E, 1995. Maximum precipitation rates in the southern Blue Ridge Mountains of the southeastern United States. *Clim Res.*, Vol. 5: 159-166.
- KYSELY J, DUBROVSKY M., 2004. Simulation of extreme temperature events by a Stochastic Weather Generator: Effects of Interdiurnal and Inerannual Variability Reproduction. *Int. J. Climatol.*, 25: 251-269 (2005).
- LANA X. *et al.* 2005. *Distributions of long dry spells in the Iberian Peninsula, years 1951-1990.*
- LIN, Y. L., WANG, T. A., KAPLAN, M. L., WEGLARZ, R. P., 2001. Some Common Ingredients for Heavy Orographic Rainfall. *Wea. Forecasting*, 16, 633-660.
- LEGATES, D.R. y WILLMOTT C.J., 1990: Mean Seasonal and Spatial Variability in Global Surface Air Temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 41, 11-21.
- LINDKVIST L., GUSTAVSSON T. y BOGREN J., 2000. A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 51-67.
- MANRIQUE E, FERNANDEZ-CANCIO A., 2004. Extreme Climatic Events in Dendroclimatic Reconstructions from Spain. *Climatic Change*, Volume 44, Numbers 1-2 / January, 2000.
- MONTOUTO-GONZÁLEZ O., 2000: La flora vascular rara, endémica y amenazada del Parque Natural de Peñalara y su entorno. Amenazas y necesidades de conservación en la Finca de los Cotos. En: *Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y Valle de El Paular*. Comunidad de Madrid. Consejería de Medio Ambiente.
- PALACIOS D., GARCÍA SANCHEZ-COLOMERM, 1997. The Influence of Geomorphologic Heritage on Present Nival Erosion: Penalara, Spain. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Vol. 79, No. 1/2, pp. 25-40
- PEIXOTO, J.P y A.H. OORT, 1992: Physics of Climate. *American Institute of Physics*, 520 pp.
- SANZ-ELORZA M *et al.* 2003. Changes in the High-mountain Vegetation of the Central Iberian Peninsula as a Probable Sign of Global Warming. *Annals of Botany*. 92(2): 273-280.
- SANCHO L.G., 2000. Vegetación Liguénica y Procesos Naturales de Colonización en el Macizo de Peñalara. En: *Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y Valle de El Paular*. Comunidad de Madrid. Consejería de Medio Ambiente.
- SEVRUK, B., y L. ZAHLAVOVA, 1994. Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application. *Internat. J. Climatol.*, 14, 681-689.
- STOUTJESDIJK, Ph. y BARKMAN J. J., 1992. *Microclimate, Vegetation and Fauna*. Opulus Press AB, Knivsta, Sweden, 238pp.
- TAPPEINER U., TAPPEINER G., ASCHENWALD J., TASSER E. y OSTENDORF B., 2001. GIS-based modelling of spatial pattern of snow cover duration in an alpine area. *Ecological Modelling.*, 138, 265-275.
- TENA F., TINAUT D., 1986. Solar Radiation in Spain. *Journal of Climatology* 6 (1): 53-68.
- TURNER, H., 1980. Types of microclimate at high elevations. *Mountain Environments and Subalpine Tree Growth*, 21-6.

