
ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LA POTENCIALIDAD
DE USO DEL AGUA DE NIEBLA COMO
RECURSO HÍDRICO EN EL LITORAL
MEDITERRÁNEO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Departamento de Estadística e Investigación
Operativa Aplicadas y Calidad**

TESIS DOCTORAL

Autor: David Corell Custardoy
Directora: María José Estrela Navarro
Tutora: Amparo Montesinos Guillot

Valencia, Diciembre de 2014

La cultura no es necesaria para la supervivencia del hombre, únicamente lo es el pan y el agua. Es verdad que con el pan para comer y el agua para beber sobrevive el hombre, pero sólo con eso muere la humanidad entera. Si el hombre no se emociona con la belleza, si no cierra los ojos y pone en marcha los mecanismos de la imaginación, si no es capaz de hacerse preguntas y vislumbrar los límites de su ignorancia, es hombre o es mujer, pero no es persona; nada lo distingue de un salmón, una cebra o un buey almizclero

La bibliotecaria de Auschwitz, de Antonio G. Iturbe

*A María; a David, Jesús, Jacobo y
Mario, mi fuente de inspiración;
y al resto de la familia*

Agradecimientos

Siempre recordaré la noche en la que Michael y yo nos compenetramos para meter 70 puntos entre ambos

Stacey King, jugador de baloncesto, haciendo referencia a un partido Cleveland-Chicago en el que Jordan anotó 69 puntos

Me enfrento a esta parte de la tesis, consciente de ser la más leída de todas, con miedo a no incluir a alguna persona que se lo merezca. Si alguno leyera estas líneas y sintiese que su nombre debería de haber aparecido en ellas, le pido disculpas por mi error, ya que sé que va a ser difícil no olvidar a nadie de entre todas las personas que me han ayudado durante los más de diez años que ha durado este trabajo.

En primer lugar tengo que agradecer la confianza que depositó en mí M^a José Estrela, cuando allá por el año 2002, me contrató para trabajar con ella en el CEAM. Nadie hubiera imaginado por aquel entonces que pasados los años, ya no la vea como "mi primera jefa", sino que la considere una amiga. Cualquiera que la conozca se habrá dado cuenta de su calidad humana, así que yo he tenido la suerte de trabajar con ella muchos años y espero que el futuro nos depare muchos más. Gracias M^a José por confiar en mí, por tu apoyo y por tu carácter alegre que contagia a todos los que te rodeamos.

Ya que he empezado hablando del CEAM, quisiera extender mi agradecimiento a todas las personas que allí he conocido y que han sido mis compañeros de trabajo durante los once años que allí trabajé. Comenzaré por mi departamento, el de "Meteorología", que por mucho que le hayan querido cambiar el nombre, para mí seguirá siendo siempre eso, el de "Meteorología". Cuando llegué recién acabada la facultad tan sólo estaban por allí José Antonio Valiente y Paco Pastor, aparte de M^a José. Desde el primer momento me acogieron como uno más y me ayudaron a introducirme en un mundo nuevo para mí como era la meteorología. Con Josean he compartido muchos viajes, muchas horas de taller y muchas discusiones acerca de cómo evitar que nos volvieran a robar un pluviómetro en Barracas (¡al fin lo conseguimos!). Con Paco muchas horas de despacho, de programación en Linux y de debate sobre cuáles eran los mejores sitios para comer de todas las torres que visitaba (sin duda, el Charlot de la torre de Orihuela). Gracias por acogerme de esa manera, por vuestras correcciones y aportaciones a esta tesis, y por vuestra amistad.

Después llegaron otros cuantos compañeros al departamento y tuvimos la suerte de llevarnos todos bien y crear un excelente ambiente de trabajo. Por allí pasaron Javier Miró (que en realidad empezó a trabajar en el CEAM un día antes que yo), M^a Jesús Barberá (¡enhorabuena supermami!), Igor Gómez, Raquel Niclós y M^a José Marín. Gracias a todos por vuestra ayuda y disponibilidad, y por haber creado una pequeña familia en la segunda planta del CEAM. Y dejo a propósito en último lugar a César Azorín, que si bien tuvo una estancia breve con nosotros, le bastó para llevarse de allí a

la que a día de hoy es su mujer y a unos cuantos amigos, entre los que tengo la suerte de encontrarme. Gracias por tu ayuda en forma de viajes y tratamiento de datos durante los años que trabajamos juntos (siempre nos acordaremos de Lázaro de la Muela y del *impuesto revolucionario* que nos hacía pagarle cada vez que íbamos allí) y por tus aportaciones y correcciones a esta tesis. No sé si en el futuro seguiremos trabajando juntos, pero lo que sí que sé es que continuaremos con nuestra amistad y con nuestras charlas deportivas, que empezaron con el fútbol y ahora las hemos trasladado al *running*.

También merecen mención especial Enrique Mantilla, los "chicos del taller", José Ignacio Roselló y Begoña Correa. Con Enrique he tenido muchas charlas sobre el tratamiento de datos meteorológicos y de cómo hacer llegar al usuario final la información meteorológica. Nadie nos reconocerá jamás como los inventores de la primera *app* meteorológica (que fue DIRIME, que recitaba los valores de las torres con su inconfundible voz metálica en un antiguo Nokia), pero él y yo sabemos que así fue, ¡qué sería ahora del *iphone* sin nosotros! Los "chicos del taller", es decir, Javier Carreño, Gabriel Ferrer y Fernando García, no sólo han sido los encargados de realizar gran parte del trabajo técnico de esta tesis, sino que con ellos también he compartido viajes, almuerzos y muchas risas. Espero que esto último lo sigamos haciendo durante muchos años. Con José Ignacio coincidí en mi última etapa en el CEAM, cuando los medios escaseaban y tuvimos que unir recursos de distintos departamentos. Me ayudó mucho en la parte técnica durante el final de la tesis y fraguamos a la vez una gran amistad. A la vez que con Bego, siempre dispuesta ayudarme ante cualquier incidencia informática y no informática. A todos ellos, gracias.

Y no sería justo si no me acordara de otros tantos compañeros del CEAM, que aunque muchos de ellos no han tenido incidencia directa en las tareas de esta tesis, también han aportado su granito de arena tan sólo por "estar ahí": Millán Millán, Dora Cabrera, Emilio Valls, Cris, Pilar Zamora, Ana Villamayor, Jacqueline, Héctor Espinós, Andrés, Sera, Paco Iniesta, David Fuentes, Alejandro Valdecantos, Jaime Baeza, Jorge Boronat, Mónica Vázquez, Carmen Martín, Vicent Calatayud, Eloi Ribeiro y Monra. Y seguro que se me olvida alguien. A todos ellos, gracias.

Pero no sólo gente del CEAM ha colaborado en este trabajo, sino que también personas de otras instituciones nos han ayudado en diferentes fases de la investigación. En Cataluña, Javier Martín Vide nos asesoró en la selección de emplazamientos; Mónica Mejía Chang y Romà Ogaya, del CREAM, nos ayudaron en la toma de muestras en el Montseny y Puig Neulós; y Oliver Sánchez-Camacho, de la diputación de Barcelona, nos abrió las puertas del Parque del Montnegre y el Corredor. En Almería, José Jaime Capel Molina, además de recibirnos con una gran hospitalidad y de ser un magnífico anfitrión, nos aconsejó a la hora de seleccionar los emplazamientos en dicha provincia. Y Rosa, Xelo, David, Juanjo y Salva, los vigilantes del pico del Mondúver, se ofrecieron a recoger las muestras de niebla para los análisis químicos y nos informaron sobre cualquier incidencia del colector que instalamos enfrente de su caseta, tratándolo como a un hijo.

No quisiera olvidar a Ricardo García, de la Reserva Nacional de Caza de Muela de Cortes; Douglas T. Fischer, de la Universidad de California (USA); José Manuel Molina, de la Universidad del Estado de Colorado (USA); Roberto Román L., de la

Universidad de Chile; Percy Giménez y Luis Villegas, de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Perú); Anne Lummerich, de la organización no gubernamental *Alimon* (Alemania); Cristóbal Pinche, de Perú; Sabah Ahmed Abdul-Wahab, de la Universidad de *Sultan Qaboos* (Omán); Ellen Sträter, de la Universidad de Münster (Alemania); Juan de Dios Rivera, de la Pontificia Universidad Católica de Chile; Mussie Fessehaye Gebregiorgis, de Eritrea; Nicolás Schneider, de la Comunidad Agrícola Peña Blanca (Chile); Irene Milimouk, de la organización no gubernamental *Opur* (Francia); Pablo Osses, de la Pontificia Universidad Católica de Chile; Ricardo Domínguez, de la Fundación Bastos (Namibia); Susanne Hering, de *Aerosol Dynamics Inc.* (USA); y Alexandra Ponette-González, de la Universidad de *North Texas* (USA), por la cesión de fotos, publicaciones o información sobre diferentes proyectos de aprovechamiento de agua de niebla en otros lugares del mundo. Ni a Pilar Cereceda y Bob Schemenauer, por enviarnos la malla chilena y por sus sabios consejos. También quisiera agradecer al Laboratorio *NOAA Air Resources (ARL)* por permitirnos la utilización del modelo de transporte y dispersión atmosférica HYSPLIT (<http://www.arl.noaa.gov/ready.php>) y a la *Climate Research Unit (CRU)* por facilitarnos datos de viento y presión atmosférica para el cálculo de las condiciones sinópticas.

Me gustaría dar las gracias a dos departamentos de la Universidad Politécnica de Valencia y en particular, a dos de sus profesores. En primer lugar, a Susana Barceló, quien nos facilitó la entrada en el Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, y nos permitió seguir con la parte académica de la investigación. Con Susana, de la que fui alumno, siempre he tenido un gran apoyo en la universidad y me ha ayudado en todo lo que he necesitado. Es de esas profesoras cercanas que siempre tienen las puertas abiertas para el alumno, que tanto se agradecen en la universidad. Y a Eduardo Peris Mora y al Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil, por su colaboración y ayuda para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados, que dio origen a esta tesis.

También quisiera agradecer todo el apoyo y cariño recibido por parte de familiares y amigos, sin quienes nada de esto hubiera sido posible. En primer lugar a mis padres, por haberme dado la oportunidad de estudiar lo que quise y de apoyarme en los momentos que dudaba en abandonar el barco. Tengo la suerte de tener unos padres maravillosos y espero que su ejemplo me guíe y lleve a ser, al menos, la mitad de buen padre con mis hijos. Al igual que mis hermanos, de los que siempre he recibido cariño y momentos divertidos cuando lo he necesitado. A mis tíos y en especial a mi madrina, la tía Maricarmen, que siempre me ha querido y ayudado tanto, y a mi tío Benjamín, que me ha permitido algunos momentos de desahogo tan necesarios para despejar la mente. A mis abuelos, que ya no están aquí pero que seguro se sentirían muy orgullosos de su nieto. A Julia, que siempre ha sido y será como una segunda madre, y a mis cuñadas/os y sobrinas/os, por ser tan buena gente. Y en particular a Paula, por su apoyo en la interpretación de los análisis químicos y por sus consejos, ya que ha sido la primera doctora de la familia y nos abrió el camino al resto. Y a mi ahijado José, del que siempre nos acordamos pese a estar tan lejos. También a mis amigos de siempre, "los del cole", que por mucho que pasen los años, siempre están ahí. A mis amigos del "Café de los viernes" y los del *running* del EPRT, por los momentos divertidos que me han hecho pasar durante la última fase de redacción de la tesis. A Felipe y Merche, porque, a

Agradecimientos

pesar de la distancia, siempre han sido mi apoyo. Y a Pablo Abellán, mi amigo del *mareny blau*, por su ayuda en la interpretación de los análisis químicos y por remitirme a expertos de Aguas de Valencia para validar los resultados.

Y por último, quiero darle las gracias a María, que ha sido quien ha vivido más de cerca todos estos años de trabajo. Cuando nos conocimos, ni siquiera habíamos acabado la facultad y ahora, pasados los años, somos padres de familia numerosa. Gracias por permitirme cumplir mi sueño y apoyarme en los momentos de fatiga. Ahora te toca a ti que cumplas los tuyos y haré todo lo que esté en mi mano para que así sea. Y a David, Jesús, Jacobo y Mario, mis cuatro ángeles, nacidos sin saberlo en el transcurso de mi doctorado. Creo que ni siquiera saben que es esto de la tesis, ya que cuando salía de casa tan sólo les decía que me iba a "trabajar". Pero sí que son conscientes del tiempo que mi "trabajo" les ha robado y muchas veces he tenido que oír la frase "jopé, papá, es que siempre estás trabajando y no juegas con nosotros". Prepararos ahora para lo que os viene, porque todavía me veo con energía para hacer el castillo de arena más grande, los partidos de baloncesto más largos y los legos más complicados del mundo.

David

Tesis: Estudio estadístico de la potencialidad de uso del agua de niebla como recurso hídrico en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica

Resumen

La niebla ha sido mayoritariamente estudiada por los problemas que genera, como por ejemplo la disminución de la visibilidad, que puede provocar retrasos o accidentes en carreteras, puertos o aeropuertos. Sin embargo y aunque en menor medida, también ha sido analizada por uno de sus aspectos positivos como es su uso como recurso hídrico. En diferentes países del planeta, como por ejemplo Chile, Sudáfrica, Guatemala o Eritrea, o en lugares que nos son más familiares como las Islas Canarias, existen proyectos de aprovechamiento de agua obtenida a través de la niebla, que abastecen para consumo humano pequeñas localidades o colegios, o permiten el desarrollo de actividades en el ámbito agrícola o forestal por medio del riego. La cuenca mediterránea de la Península Ibérica es un área especialmente sensible a los problemas derivados de la escasez de agua, por lo que la búsqueda de fuentes alternativas de agua puede ayudar a reducir este problema. A su vez, esta región reúne muchas de las características geográficas y climatológicas que han llevado al resto de países y lugares mencionados a iniciar trabajos sobre la captación de agua de niebla. Por todo ello, esta tesis estudia por primera vez el potencial de aprovechamiento de agua de niebla en la Península Ibérica, y en concreto, en su vertiente mediterránea. Para ello, en primer lugar se diseña y construye un captador de niebla pasivo experimental, ya que no existen en el mercado sensores de este tipo. En segundo lugar, se pone en marcha una Red de Colectores de Agua de Niebla formada por 23 captadores, todos ellos localizados en áreas de montaña del litoral mediterráneo, en un área de 800 km de longitud que transcurre desde el pirineo oriental hasta el Cabo de Gata. La Red, en el más longevo de los emplazamientos, permaneció operativa desde el año 2003 hasta el 2012, registrando datos de recolección de agua de niebla, además del resto de variables meteorológicas básicas (lluvia, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección de viento). Esta tesis analiza, mediante el uso de técnicas estadísticas, los datos meteorológicos obtenidos por los colectores de la Red, con el objeto de conocer el potencial de recolección de agua de todos los emplazamientos estudiados, además de otras características básicas del comportamiento de la niebla, como son: los valores máximos diarios recolectados, la duración de los episodios de niebla o las direcciones de viento que optimizan la captura. Del mismo modo, se analizan los patrones de circulación atmosférica de los días con recolección de agua de niebla, así como la calidad química del agua capturada. Por último, se proponen actividades de aprovechamiento del agua recolectada adaptadas a la zona de estudio, prestando atención al tipo de tecnología utilizada, así como al contexto demográfico y social donde nos encontramos.

Thesis: Statistic study of the potential use of fog as a water resource on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula.

Abstract

Fog has been mainly studied for its problems, such as the loss of visibility, which may cause delays and accidents on roads, harbors and airports. However, and to a lesser extent, it has also been studied for one of its most positive aspects, such as its use as a water resource. In many different countries all around the planet, like, for instance, Chile, South Africa, Guatemala, and Eritrea; or places with which we are more familiar, like the Canary Islands, there are projects dedicated to the use of water generated from fog, being supplied for human consumption in small villages or schools, or allowing the development of agricultural and forestry activities by means of irrigation. The Mediterranean basin of the Iberian Peninsula is a particularly sensitive area to problems arising from water shortage, therefore the search for alternative sources of water may help to reduce this problem. At the same time, this area gathers many of the geographical and climatological characteristics which have led the rest of the countries and places mentioned to initiate works on fog collection. Consequently, this thesis studies, for the first time, the potential use of fog-generated water in the Iberian Peninsula and, more specifically, in its Mediterranean basin. To that end, an experimental passive fog collector is first designed and built, because such sensors are not currently on the market. Secondly, a Network of Fog Collectors is launched, consisting of 23 collectors, all of them located in mountain areas along the Mediterranean coast, an 800-kilometer expanse from the eastern Pyrenees to Cape Gata. The Network, in the longest-lasting of its locations, remained operative since 2003 to 2012, registering fog collection data, together with the rest of basic meteorological variables (rain, temperature, relative humidity, wind speed and wind direction). By using statistical techniques, this thesis studies the meteorological data obtained by the collectors of the Network, so as to know the potential of water collection in every location studied, along with other basic characteristics of the behavior of fog, such as: maximum values daily registered, duration of fog episodes or wind directions which optimize the capture. Likewise, atmospheric circulation patterns on fog collecting days are analyzed, as well as the chemical quality of the water captured. Finally, a number of activities adapted to the survey area are proposed in order to use the water captured, paying special attention to the type of technology used as well as the social and demographic background in which we find ourselves.

Tesi: Estudi estadístic de la potencialitat de l'ús de l'aigua de boira com a recurs hídric al litoral mediterrani de la Península Ibèrica

Resum

La boira ha sigut majoritàriament estudiada pels problemes que genera, com per exemple la disminució de la visibilitat, que pot provocar retards i accidents en carreteres, ports i aeroports. No obstant això, i encara que en menor mesura, també ha sigut analitzada per un dels seus aspectes positius, com ara el seu ús com a recurs hídric. A diferents països del planeta, com per exemple Xile, Sud-àfrica, Guatemala, o Eritrea, o en llocs que ens són més familiars com les Illes Canàries existeixen projectes d'aprofitament de l'aigua obtinguda a través de la boira, que abasteixen per al consum humà xicotetes localitats o col·legis, o permeten el desenvolupament d'activitats en l'àmbit agrícola o forestal per mitjà del regatge. La conca mediterrània de la Península Ibèrica és una regió especialment sensible als problemes derivats de la manca d'aigua, per la qual cosa la cerca de fonts alternatives d'aigua pot ajudar a reduir aquest problema. Al mateix temps, aquesta regió reuneix moltes de les característiques geogràfiques i climatològiques que han portat la resta de països i llocs esmentats a encetar treballs sobre la captació d'aigua de boira. Per tot això, aquesta tesi estudia per primera vegada el potencial d'aprofitament d'aigua de boira a la Península Ibèrica, i concretament, a la seua vessant mediterrània. Per a fer-ho, en primer lloc es dissenya i construeix un captador de boira passiu experimental, perquè no existeixen al mercat sensors d'aquest tipus. En segon lloc, es posa en funcionament una Xarxa de Col·lectors d'Aigua de Boira formada per 23 captadors, tots ells localitzats en àrees de muntanya del litoral mediterrani, a una zona de 800 kilòmetres de llargària que transcorre des del Pirineu oriental fins al Cap de Gata. La Xarxa, al més llarg dels seus emplaçaments, romangué operativa des de l'any 2003 fins al 2012, enregistrant dades de recol·lecció d'aigua de boira, juntament amb la resta de variables meteorològiques bàsiques (pluja, temperatura, humitat relativa, velocitat i direcció del vent). Aquesta tesi analitza, mitjançant l'ús de tècniques estadístiques, les dades meteorològiques obtingudes pels col·lectors de la Xarxa, amb l'objectiu de conèixer el potencial de recol·lecció d'aigua de tots els emplaçaments estudiats, a més d'altres característiques bàsiques del comportament de la boira, com ara: els valors màxims diaris recol·lectats, la durada dels episodis de boira o les direccions del vent que optimitzen la captura. De la mateixa manera, s'analitzen els patrons de circulació atmosfèrica dels dies amb recol·lecció d'aigua de boira, així com la qualitat química de l'aigua capturada. Finalment, es proposen activitats d'aprofitament de l'aigua recol·lectada adaptades a la zona d'estudi, posant especial atenció al tipus de tecnologia utilitzada, així com al context demogràfic i social on ens trobem.

Índice general

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Cronología de la investigación	3
1.2 La problemática del agua en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica	5
1.3 La niebla: descripción del fenómeno estudiado.....	10
1.3.1 Génesis de la niebla.....	11
1.3.2 Tipos de niebla	12
1.4 Objetivos y alcance de la tesis.....	18
1.5 Estructura del trabajo.....	19
Capítulo 2: Estado del conocimiento sobre la recolección de agua de niebla por métodos pasivos	21
2.1 Tecnología utilizada	23
2.1.1 Colectores planos	24
2.1.2 Colectores cilíndricos.....	27
2.1.3 Otros colectores.....	29
2.2 Proyectos relevantes sobre la captación del agua de niebla llevados a cabo en las últimas décadas	30
2.2.1 África e islas de la Macaronesia y del Índico.....	31
2.2.2 América Central y Caribe.....	36
2.2.3 América del Norte e islas del Pacífico.....	38
2.2.4 América del Sur	39
2.2.5 Asia	49
2.2.6 Europa	51
Capítulo 3: Metodología, instrumentación y área de estudio.....	53
3.1 Metodología.....	55
3.2 Instrumentación	59
3.2.1 Colectores experimentales de tipo cilíndrico	60
3.2.1.1 Comparación entre el colector cilíndrico de tipo arpa y el colector cilíndrico de tipo malla	70
3.2.2 Colector plano de tipo LFC.....	72
3.2.2.1 Comparación entre el colector industrial plano de tipo LFC y el colector experimental cilíndrico de tipo arpa	74

3.3	Área de estudio.....	76
Capítulo 4: Resultados: análisis de los datos meteorológicos obtenidos por la Red de Colectores de Agua de Niebla..... 83		
4.1	Volúmenes de niebla recolectados.....	86
4.1.1	<i>Tasa total y estacional de precipitación y de captura de niebla de todos los colectores de la Red, periodo 2003-2012.....</i>	<i>86</i>
4.1.2	<i>Serie temporal de la tasa estacional de captura de niebla de todos los colectores de la Red, periodo 2003-2012.....</i>	<i>90</i>
4.1.3	<i>Volúmenes máximos diarios de recolección de niebla en días con escasa precipitación... 91</i>	<i>91</i>
4.1.4	<i>La importancia de la altitud en la recolección de agua de niebla.....</i>	<i>93</i>
4.2	Porcentaje anual y estacional de días con recolección de agua de niebla y/o lluvia.....	96
4.3	Frecuencia horaria de la niebla.....	100
4.4	Duración de los episodios de niebla.....	103
4.4.1	<i>Episodio de recolección de agua de niebla ocurrido durante los días 22 y 25 de marzo de 2011.....</i>	<i>108</i>
4.5	Direcciones de viento óptimas para la captación de agua de niebla.....	113
Capítulo 5: Análisis de los patrones de circulación atmosférica para los días de recolección de agua de niebla en el este de la Península Ibérica..... 121		
5.1	Metodología.....	125
5.1.1	<i>Método objetivo de clasificación sinóptica de Jenkinson y Collison.....</i>	<i>125</i>
5.1.2	<i>Campo de vientos a 850 hPa.....</i>	<i>127</i>
5.1.3	<i>Índices de circulación atmosférica.....</i>	<i>128</i>
5.2	Resultados y discusión.....	130
5.2.1	<i>Recolección de agua de niebla en función del método objetivo de Jenkinson y Collison. 130</i>	<i>130</i>
5.2.2	<i>Recolección de agua de niebla en función del flujo a escala sinóptica (850 hPa).....</i>	<i>140</i>
5.2.3	<i>Recolección de agua de niebla en función de los índices de circulación atmosférica NAOi, MOi y WeMOi.....</i>	<i>149</i>
5.2.4	<i>Condiciones sinópticas y valores de los índices NAO, MO y WeMO que favorecen un mayor número de días y de volumen de recolección de agua por medio de los colectores de niebla.....</i>	<i>159</i>
Capítulo 6: Caracterización química del agua de niebla y de lluvia..... 161		
6.1	Metodología.....	164
6.1.1	<i>Muestras de agua de niebla y lluvia puras.....</i>	<i>166</i>
6.1.2	<i>Muestras de agua de niebla y lluvia con deposición atmosférica.....</i>	<i>168</i>
6.1.3	<i>Análisis químicos.....</i>	<i>169</i>
6.1.4	<i>Trayectorias.....</i>	<i>169</i>
6.1.5	<i>Métodos estadísticos.....</i>	<i>170</i>
6.2	Resultados.....	170
6.2.1	<i>Características del agua de niebla y de lluvia puras.....</i>	<i>170</i>

6.2.2	<i>Características del agua de niebla y de lluvia contaminadas por deposición atmosférica.....</i>	<i>173</i>
6.2.3	<i>Trayectorias y estacionalidad.....</i>	<i>176</i>
Capítulo 7: Aprovechamiento del agua obtenida mediante la captación de niebla en el este peninsular: propuesta de aplicaciones		181
7.1	Aplicación de riegos de apoyo en labores de reforestación.....	185
7.2	Abastecimiento de balsas destinadas a la extinción de incendios o de uso agrícola.....	189
7.3	Suministro de agua en abrevaderos para la fauna silvestre.....	191
Capítulo 8: Conclusiones		193
Bibliografía.....		201

Índice de figuras

Figura 1-1: Cronología de la investigación e hitos más importantes conseguidos en cada fase ...	6
Figura 1-2: Variación decadal de la media de precipitación total para umbrales de ≤ 30 y ≥ 125 mm/d (Millán et al., 2005)	8
Figura 1-3: Captación natural de agua de niebla a través de las acículas de un árbol.....	9
Figura 1-4: Niebla por radiación, imagen tomada en Barracas (Castellón), el 27/10/05 a las 9:05	13
Figura 1-5: Niebla de evaporación sobre un géiser. Imagen tomada en verano, en la Parque Nacional de Yellowstone (Estados Unidos) (Ahrens, 1994)	13
Figura 1-6: Esquema de la formación de niebla por contacto entre una nube y una cadena montañosa	14
Figura 1-7: Capa de estratos tocando la Sierra de Mariola a una altitud entre 900-1100 m. Imagen tomada desde el pico El Resingle, dirección NE, el 18 de octubre de 2012 a las 12:00 h	15
Figura 1-8: Capa de nubes, que en su avance por el océano Atlántico, alcanza las montañas de las Islas Canarias, el día 22 de junio de 2013 a las 12:00 h (imagen del satélite MSG3, canal 12 Norte obtenida en http://www.sat.dundee.ac.uk)	15
Figura 1-9: Esquema de la formación de una niebla orográfica, con una masa de aire ascendiendo lentamente obligada por una barrera montañosa, produciendo su enfriamiento y posterior condensación (Ahrens, 1994)	16
Figura 1-10: Niebla orográfica cubriendo el Cerro de los Frailes (Almería), el 28 de julio de 2009 a las 18:15 h	17
Figura 1-11: Nubes cubriendo la cima del monte Mondúver (Valencia), el 3 de septiembre de 2010 a las 10:00 h	17
Figura 2-1: Gotas de agua de niebla cayendo a través de hilo de nylon (izquierda, imagen cedida por Douglas T. Fischer) y adheridas a una malla plástica (derecha). En ambos casos, a medida que crecen en tamaño, caen por gravedad y son recogidas por un depósito situado en la parte inferior.....	24
Figura 2-2: Standard Fog Collector, de 1 m ² (1 x 1 m) de superficie de captación (parte superior); Large Fog Collector de 18 m ² (6 x 3 m) de superficie de captación (parte inferior); ambos instalados en Ayora (Valencia)	25
Figura 2-3: Algunos tipos de malla utilizados para recolectar niebla: malla tipo Raschel de origen chileno (izquierda), malla con refuerzo metálico utilizada en Sudáfrica (centro) y malla con diseño en 3D, de 1 cm de grosor, testada en laboratorio (derecha).....	26
Figura 2-4: Colector tipo Grunow (izquierda), el cual presenta un pluviómetro tipo Hellmann como depósito y medidor del agua capturada (Acosta-Baladón, 1996); colector tipo Juvik (derecha), con protector superior para la lluvia en su parte superior y con un pluviómetro automático situado en el suelo y unido a éste por una manguera, para cuantificar el agua recogida (Juvik et al., 2005).....	27

Figura 2-5: Colector cilíndrico tipo arpa, con hilos de teflón como material de recolección (Beiderwieden et al., 2005).....	28
Figura 2-6: Colectores de niebla NRP 3.0, modelo Garoé.....	29
Figura 2-7: Países en donde han sido llevadas a cabo investigaciones sobre el aprovechamiento del agua de niebla.....	31
Figura 2-8: Niños bebiendo agua procedente de un proyecto de aprovechamiento de agua de niebla en la escuela de Arberobue (Eritrea) (Schemenauer, 2008).....	33
Figura 2-9: Pareja de captadores instalada en Boulaalam (Marruecos), a 300 m sobre el nivel del mar, orientados a WNW (izquierda) y NNW (derecha). A los pies, la ciudad de Ifni y el océano Atlántico (Marzol and Sánchez-Megía, 2008b).....	34
Figura 2-10: Proyecto operacional en Tojqvia (Guatemala), en octubre de 2006, con dos LFC al fondo y un depósito de almacenamiento de agua de 3 000 l a la izquierda (Schemenauer, 2008).....	37
Figura 2-11: Captadores instalados en El Tofo para abastecer a la aldea de Chungungo (Chile) (Schemenauer and Cereceda, 2000).....	41
Figura 2-12: Doble pareja de SFC instalada en el valle de Roldanillo (Colombia). Cada pareja de colectores forma un ángulo de 90° entre ellos, para evaluar distintas orientaciones de recogida de niebla (imagen cedida por José Manuel Molina (Universidad del Estado de Colorado-USA)).....	42
Figura 2-13: Captador de niebla LFC instalado sobre la escuela rural de Frisoles (imagen cedida por José Manuel Molina (Universidad del Estado de Colorado-USA)).....	43
Figura 2-14: Colector LFC captando niebla en El Cráter (Ecuador) (imágenes cedidas por Roberto Román L. (Universidad de Chile)).....	44
Figura 2-15: Vista del sistema de captación de niebla instado en Lomas de Atiquipa (Perú) (imagen cedida por Percy Jiménez y Luis Villegas (Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú)).....	45
Figura 2-16: Construcción de una balsa de 1 020 m ³ en Lomas de Atiquipa (Perú) (imagen cedida por Percy Jiménez y Luis Villegas (Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú)).....	46
Figura 2-17: Detalle del sistema de captación de los árboles (Lummerich and Tiedemann, 2009) y esquema del sistema de aprovechamiento de agua de niebla instalado en el proyecto Desierto Verde en Perú (www.alimon.org).....	47
Figura 2-18: Vista del sistema de aprovechamiento de agua de niebla del proyecto Desierto Verde (Perú) (imagen cedida por Anne Lummerich (organización no gubernamental Alimon)).....	48
Figura 3-1: Estructura de la investigación.....	58
Figura 3-2: Colector de niebla cilíndrico de tipo arpa, elaborado con hilo de nylon como material de recolección.....	61
Figura 3-3: Colector de niebla cilíndrico de tipo malla, elaborado con malla tipo <i>raschel</i> como material de recolección.....	62
Figura 3-4: Malla utilizada como material de recolección, adquirida en Projar, S.A.	63
Figura 3-5: Base abatible utilizada para sujetar el mástil que da enganche a todo el sistema de prospección de agua de niebla. La base cuenta con una bisagra que permite llevar el equipo a nivel del suelo.....	64

Figura 3-6: Sistema integrado para la investigación del potencial de captura de agua de niebla, con colector de tipo arpa (izquierda) y colector de tipo malla (derecha), ambos cilíndricos	67
Figura 3-7: Caja intemperie, que contiene dos pluviómetros, uno para la medición del volumen de agua capturada por el colector de niebla (arriba) y otro para la medida de la precipitación (abajo). Una vez contabilizada, el agua es conducida hacia el exterior a través de los embudos y mangueras de desagüe	68
Figura 3-8: Caja intemperie con los siguientes elementos (de arriba a abajo): módem y antena, sistema de adquisición de datos, y batería. En este caso, el regulador de carga se encuentra integrado en el <i>datalogger</i> . Nótese el panel solar en la parte superior de la caja	69
Figura 3-9: Disposición en campo de los dos colectores cilíndricos experimentales comparados, situados en Machos (Ayora, Valencia). A la izquierda, el colector de tipo malla y a la derecha, el de tipo arpa	70
Figura 3-10: Relación entre la tasa de recolección de agua registrada por el colector de niebla de tipo malla (eje horizontal) y la monitorizada por el colector de niebla de tipo arpa (eje vertical). La línea recta representa el ajuste por regresión de los datos experimentales según la ecuación $y=1.133x$ (error=0.001; $R^2=97\%$)	71
Figura 3-11: Colector industrial plano de tipo LFC, de 18 m ² de superficie de recolección, instalado en Machos (Ayora, Valencia)	73
Figura 3-12: Detalles del colector de niebla de tipo LFC instalado en Machos (Ayora, Valencia): malla captadora, canaleta para la recogida de agua y sistema de conducción de agua hasta los depósitos situados al fondo	73
Figura 3-13: Disposición en campo del colector industrial plano de tipo LFC (izquierda) y el colector cilíndrico experimental de tipo arpa (derecha, situado detrás de los depósitos de almacenamiento), instalados en Machos (Ayora, Valencia)	74
Figura 3-14: Relación entre la tasa de recolección equivalente calculada a partir de los datos de niebla y dirección de viento registrados por el colector cilíndrico de tipo arpa calculada para una dirección de 55° con respecto al Norte (eje horizontal) y tasa de recolección de agua registrada por el colector plano de tipo LFC (eje vertical), en valores horarios. La línea recta representa el ajuste por regresión de los datos experimentales según la ecuación $y=0.97x$ (error=0.01; $R^2=95\%$)	76
Figura 3-15: Mapa de situación de la Red de Colectores de Agua de Niebla situada en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica	80
Figura 4-1: Serie temporal de la tasa estacional de captura de agua de niebla de todos los colectores de la Red, para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2012. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	92
Figura 4-2: Volúmenes de niebla diarios máximos recolectados por todos los colectores experimentales de la Red en días con apenas precipitación (<5 mm)	93
Figura 4-3: Detalle de la localización de los colectores instalados en el macizo del Montseny (Barcelona)	94
Figura 4-4: Detalle de la localización de los colectores instalados en la sierra de la Muela (Murcia)	94
Figura 4-5: Volumen acumulado de agua capturada en el macizo del Montseny (izquierda) y en la sierra de la Muela (derecha) por cada par de colectores de niebla instalado en dichos emplazamientos durante el periodo en el que estuvieron funcionando simultáneamente. En sombreado aparece la estación de verano	95

Figura 4-6: Relación entre el volumen de agua recolectado (M.Antenas/M.Canplá; Muela_A/Muela_B) en el par de colectores de niebla instalados en el macizo del Montseny y en la sierra de la Muela, en función de la estación del año	96
Figura 4-7: Porcentaje anual y estacional de días con al menos un evento de “sólo niebla”, “niebla y lluvia”, “sólo lluvia” y “sin recolección”, durante el año 2011, para los colectores Montseny Antenas y Portella (zona norte), Machos y Mondúver (zona centro), y Crevillente y Arráez (zona sur).....	99
Figura 4-8: Porcentaje de días con recolección de niebla en función de la hora del día, durante el año 2011. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	102
Figura 4-9: Porcentaje de días con recolección de niebla en función de la hora del día, durante el año 2011 (Total) y para cada estación del año, para los colectores Casillas y Colomer (zona norte), Mariola y Bernia_E (zona centro) y Alhamilla y Peñones (zona sur).....	103
Figura 4-10: Duración de los episodios de recolección de agua de niebla en función de la tasa de captura, durante el año 2011. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	106
Figura 4-11: Duración media y tasa de recolección media de los episodios de niebla, durante el año 2011. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	107
Figura 4-12: Nubosidad sobre la Península Ibérica durante el episodio de niebla ocurrido entre los días 22 y 25 de marzo de 2011 (imágenes del satélite MSG2, canales 1 (día 22) y 12 Norte (resto) obtenidas en http://www.sat.dundee.ac.uk)	109
Figura 4-13: Presión a nivel del mar y altura geopotencial de 500 hPa, para los días del 22 al 25 de marzo de 2011 a las 12 h UTC. Mapas de reanálisis GFS, obtenidos en http://www.wetterzentrale.de	110
Figura 4-14: Episodio de recolección de agua de niebla ocurrido desde las 16 h del día 22 hasta las 21 h del día 25 de marzo de 2011 en el colector Machos_Nieva (Ayora, Valencia). Niebla y lluvia acumulada (arriba); niebla, lluvia, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, valores horarios (abajo)	112
Figura 4-15: Rosas de viento del colector Bernia_E (Benissa, Alicante), elaboradas a partir de los datos del periodo comprendido entre 13/11/2008 y 31/12/2012, para cuyos cálculos se ha utilizado, izquierda: todos los datos de viento disponibles; centro: datos de viento registrados cuando se recolectó niebla; derecha: datos de viento registrados cuando se recolectó niebla, representándose el volumen capturado en cada dirección de viento	115
Figura 4-16: Orientación teórica con la que debería instalarse un captador de tipo pantalla para optimizar la recolección de agua de niebla en cada uno de los emplazamientos de la Red	117
Figura 4-17: Dirección óptima de recolección de agua de niebla total y estacional (I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño) de todos los colectores de la Red, para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2012. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	119
Figura 4-18: Rosa de viento del colector Sierra Helada (L'Alfàs del Pi, Alicante), elaborada a partir de los datos del periodo comprendido entre 04/08/2005 y 31/12/2012, para cuyo cálculo se ha utilizado los datos de viento registrados cuando se recolectó niebla, representándose el volumen capturado en cada dirección de viento.....	120
Figura 5-1: Localización de los 16 puntos de rejilla utilizados para la aplicación del método de Jenkinson y Collison	126

Figura 5-2: Rango de las direcciones de viento seleccionadas para los flujos al nivel de 850 hPa	128
Figura 5-3: Patrones de teleconexión, señalándose los puntos de grid utilizados para su cálculo a partir de datos de reanálisis, y localización de los puntos empleados para el cálculo del viento al nivel de 850 hPa (P1, P2 y P3).....	130
Figura 5-4 (a): Representación para los 26 tipos sinópticos de JC, divididos en tres zonas (izquierda: situaciones direccionales; centro: situaciones ciclónicas e híbridas; derecha: situaciones anticiclónicas e híbridas) y para los colectores situados al norte del área de estudio, calculado a partir de todos los datos disponibles de niebla acumulada diaria para el periodo 2003-2012, de: 1) Gráfica A: diagrama de caja (la media (línea roja), la mediana (línea negra), el intervalo intercuartílico (caja) y los percentiles 10 y 90 (bigotes), y 5 y 95 (puntos negros)); 2) Gráfica B: frecuencia relativa del número de días con recolección de niebla (línea continua azul) y porcentaje del volumen total de agua capturado por cada colector (línea discontinua negra).....	134
Figura 5-5: Valores máximos diarios de recolección de agua de niebla en función de la situación sinóptica de JC. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	139
Figura 5-6 (a): Representación para los 16 tipos sinópticos de flujo a 850 hPa, divididos en ocho zonas en función de la dirección de viento (de izquierda a derecha: N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) y en dos rangos de velocidad (m: moderados (0-5.14 m/s); f: fuertes (>5.14 m/s)) y para los colectores situados al norte del área de estudio, calculado a partir de todos los datos disponibles de niebla acumulada diaria para el periodo 2003-2012, de: 1) Gráfica A: diagrama de caja (la media (línea roja), la mediana (línea negra), el intervalo intercuartílico (caja) y los percentiles 10 y 90 (bigotes), y 5 y 95 (puntos negros)); 2) Gráfica B: frecuencia relativa del número de días con recolección de niebla (línea continua azul) y porcentaje del volumen total de agua capturado por cada colector (línea discontinua negra)	143
Figura 5-7: Valores máximos diarios de recolección de agua de niebla en función de los flujos sinópticos en niveles bajos (850 hPa). Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur	148
Figura 5-8: Distribución espacial anual y estacional de la señal del índice de correlación de Pearson y el nivel de significación entre la recolección de agua de niebla y los patrones de teleconexión NAOi, MOi y WeMOi, para todos los emplazamientos analizados y para los datos disponibles del periodo 2003-2012. En la parte superior izquierda, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (en negrita valores significativos, $p < 0.05$) para T (todos los colectores), N (colectores situados al N del área de estudio, de Puig Neulós a Casillas), C (colectores localizados en el centro, de Bujete a Sierra Helada) y S (colectores emplazados en el S, de Crevillente a Peñones).....	152
Figura 5-9: Distribución estadística de los valores diarios de NAOi, MOi y WeMOi (eje de abscisas superior) frente a la niebla acumulada diaria (de 0 a 24 h UTC) (eje de ordenadas derecho), así como del porcentaje del volumen total de agua capturado (eje de ordenadas izquierdo) en función del valor diario de NAOi, MOi y WeMOi distribuido en rangos de 0.5 del valor de cada índice (eje de abscisas inferior), para todos los emplazamientos analizados y para los datos disponibles del periodo 2003-2012, ordenados de Norte a Sur. En las esquinas superiores de cada gráfica se muestran el porcentaje del volumen total acumulado (V) y del número total de días con recolección de niebla (F), en función del tipo de señal de cada índice (negativa a la izquierda y positiva a la derecha)	154
Figura 6-1: Localización del lugar de muestreo situado en la cima del monte Mondúver (Xeresa, Valencia) y características orográficas del relieve cercano	165

Figura 6-2: En primer plano, colector de niebla pura, y en segundo plano, colector de niebla con deposición atmosférica. Nótese la diferencia de color entre ambos colectores debido a la contaminación sufrida por el segundo tras el paso del tiempo.....	167
Figura 6-3: A la izquierda, dispositivo utilizado para la recolección de las muestras de lluvia pura; a la derecha, detalle de la botella de polietileno localizada en el interior de la carcasa encargada del almacenamiento de la muestra	168
Figura 6-4: Representación de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011 en el espacio de los dos factores obtenidos en el análisis de componentes principales. Las muestras están identificadas con el número de cluster al que corresponden.....	177
Figura 6-5: Recorrido de las masas de aire para cada una de las muestras de niebla pura incluidas en cada cluster las 120 h previas a alcanzar el monte Mondúver (Xeresa, Valencia). Cada punto corresponde a una hora de viaje	178
Figura 6-6: Gráfico de dispersión de la conductividad (logaritmo, $\mu\text{S cm}^{-1}$) frente a la concentración de NO_3^- (logaritmo, mg l^{-1}) de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011. Cada muestra representa un análisis y está identificada por el número de cluster en el que está incluida y por la estación del año en la que ha sido recogida (I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño)	179
Figura 6-7: Concentraciones de los principales iones (mg l^{-1}) de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el monte Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011 en función de la estación del año (I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño)	180
Figura 7-1: Densidad de población municipal de España en el año 2006 (Instituto Geográfico Nacional).....	184
Figura 7-2: Consumo de agua en los hogares españoles en 2011, en función de las comunidades autónomas, en litros por habitante y día (Instituto Nacional de Estadística)	185
Figura 7-3: Sistema de aprovechamiento empleado en Ayora (Valencia), el cual se divide en una zona de captación de agua (parte superior izquierda) y en la parcela a repoblar (parte inferior derecha).....	186
Figura 7-4: Esquema del experimento llevado a cabo en Ayora (Valencia), con el sistema de captación de agua y almacenaje en la parte superior, y la parcela de repoblación y el sistema de riego en la parte inferior	188
Figura 7-5: Porcentaje de supervivencia durante el año 2007 de las plántulas de <i>Pinus pinaster</i> y <i>Quercus ilex</i> en función del tratamiento (-W: exclusión de agua; C: control; W1: un riego; W2: dos riegos) llevados a cabo en Ayora (Valencia). Fuente: Estrela et al., 2009; Valiente et al., 2011, modificada.....	189
Figura 7-6: Esquema de la instalación propuesto para el abastecimiento de balsas de extinción de incendios (Estrela et al., 2008).....	190
Figura 7-7: Balsa de uso agrícola instalada en Teno Alto (Tenerife), cuya valla protectora se cubrió con malla para la recolección de agua de niebla y que se utilizó como aporte suplementario al llenado de la balsa (Marzol, 2005)	190
Figura 7-8: Esquema de la instalación propuesto para el suministro de agua en abrevaderos para la fauna silvestre	191
Figura 7-9: Colector de niebla en forma de árbol instalado en la Reserva Valenciana de Caza de Muela de Cortes para abastecer un abrevadero para la fauna silvestre (imágenes cedidas por la Reserva Valenciana de Caza de Muela de Cortes de la Generalitat Valenciana)	192

Índice de tablas

Tabla 2-1: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en África e islas de la Macaronesia y del Índico	32
Tabla 2-2: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en América Central e islas caribeñas.....	36
Tabla 2-3: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en América del Norte e islas del Pacífico.....	38
Tabla 2-4: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en América del Sur	40
Tabla 2-5: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en Asia.....	49
Tabla 2-6: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en Europa.....	51
Tabla 3-1: Características de la Red de Colectores de Agua de Niebla	81
Tabla 4-1: Tasa total y estacional de precipitación y de captura de niebla y niebla pura de todos los emplazamientos experimentales analizados, calculadas en base a los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012 (T: Total; I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño)	87
Tabla 4-2: Fechas de inicio y fin, duración y volúmenes acumulados de niebla y precipitación, del episodio de recolección de niebla ocurrido durante los días 22 y 25 de marzo de 2011, para todos los colectores de la Red	108
Tabla 4-3: Dirección óptima y volumen de niebla equivalente a capturar en el caso de que se instalase un colector de tipo pantalla orientado en dicha dirección, calculados en base a los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012.....	118
Tabla 5-1: Frecuencia de los días de recolección de niebla, proporción del volumen de agua capturada y tasa de recolección de agua de niebla, de todos los emplazamientos experimentales analizados, en función de la situación sinóptica (ADV, situaciones advectivas (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW); ADVC, situaciones advectivas ciclónicas (CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW y CNW); ADVA, situaciones advectivas anticiclónicas (AN, ANE, AE, ASE, AS, ASW, AW y ANW); C, situaciones ciclónicas puras (C); A, situaciones anticiclónicas puras (A), calculadas en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012. En negrita, los valores más elevados de cada tipo y colector.....	137
Tabla 5-2: Volúmenes máximos diarios recolectados en función de la situación sinóptica en superficie (según la clasificación de Jenkinson y Collison) y al nivel de 850 hPa, y valor de los índices de circulación atmosférica NAO, MO y WeMO, de todos los emplazamientos experimentales analizados, calculados en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012	140

Tabla 5-3: Frecuencia de los días de recolección de niebla, proporción del volumen de agua capturada y tasa de recolección de agua de niebla, de todos los emplazamientos experimentales analizados, en función del flujo de viento a 850 hPa (M-m: Mediterráneo moderado; M-f: Mediterráneo fuerte; A-m: Atlántico moderado; A-f: Atlántico fuerte; siendo Mediterráneo: direcciones NE, E, SE y S, Atlántico: direcciones SW, W, NW y N; Moderado: velocidades entre 0 y 5.14 m/s; Fuertes: velocidades superiores a 5.14 m/s), calculadas en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012. En negrita, los valores más elevados de cada tipo y colector	146
Tabla 5-4: Número de colectores, anual y estacional, que muestran correlación (Pearson, $p < 0.05$) negativa y no significativa, negativa y significativa, positiva y no significativa, positiva y significativa, entre los datos de recolección diaria de agua de niebla y los patrones de teleconexión NAOi, MOi y WeMOi, calculado a partir de todos los datos disponibles de la Red de Colectores desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012	153
Tabla 5-5: Tipo sinóptico de Jenkinson y Collison, dirección y velocidad del viento (m: moderada (0-5.14 m/s); f: fuerte (>5.14 m/s)) al nivel de 850 hPa y valor de los índices de teleconexión NAO, MO y WeMO en intervalos de 0.5, que han producido el mayor número de días y de volumen de agua recolectado, en cada uno de los colectores de la Red, calculado en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012	160
Tabla 6-1: Composición química del agua de niebla pura y del agua de lluvia pura, muestreadas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011 y valores legales permitidos para consumo humano por la legislación española. Conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, alcalinidad en $\mu\text{eq l}^{-1}$, concentraciones de iones en mg l^{-1}	172
Tabla 6-2: Composición química del agua de niebla pura en distintos lugares del mundo. Conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, concentraciones de iones en mg l^{-1}	173
Tabla 6-3: Composición química del agua de niebla y de lluvia con deposición atmosférica, muestreadas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre abril y diciembre de 2008 y en Tshanowa y Lepelfontein (Sudáfrica) entre septiembre de 2000 y agosto de 2001. Conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, alcalinidad en $\mu\text{eq l}^{-1}$, concentraciones de iones en mg l^{-1}	175
Tabla 6-4: Componentes principales de los parámetros químicos analizados de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el monte Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011	176

Capítulo 1

Introducción

Está bien que nos llamen locos, porque lo somos en parte

Un profesor de colegio que, en el medio de carencias y marginalidades, enseña a sus alumnos a fabricar cohetes para la NASA en un concurso internacional para estudiantes

1.1 CRONOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta tesis doctoral, acerca del potencial de recolección de agua de niebla por métodos pasivos a lo largo del litoral mediterráneo de la Península Ibérica, se ha realizado en el Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo CEAM-UMH (Universidad Miguel Hernández de Elche), en adelante, CEAM, gracias fundamentalmente a la financiación de diferentes proyectos de investigación del Plan Nacional. Aunque la idea surgió antes, allá en 1998, cuando los doctores Millán Millán y María José Estrela, junto a otros investigadores del CEAM, presentaron un trabajo en la Primera Conferencia Internacional sobre Niebla y Recolección de Niebla que tuvo lugar en Vancouver (Millán et al., 1998). En dicho trabajo analizaban cuales eran los principales *inputs* al sistema hidrológico en la Comunidad Valenciana a través del análisis de datos de precipitación de más de 215 estaciones meteorológicas y para un periodo de 25 años (1970-1995) y ya intuían que el agua que aportaba al sistema los procesos de "microescala", entre los que se incluía la niebla y el rocío, suponía alrededor del 4 % del total. Este sorprendente dato abría una puerta a pensar si sería posible captar y dar uso a ese 4 % de agua que entraba al sistema de una forma poco convencional y de este modo, optimizar el aprovechamiento de este recurso cada vez más escaso.

Debido a las características orográficas y climáticas del área de estudio, con cadenas montañosas de considerable altitud cercanas a la costa y la presencia habitual de vientos de componente marítima, se pensó que la niebla debería ser el proceso de "microescala" que aportaba más agua al sistema. Por ese motivo, se decidió apostar por ese camino e iniciar una línea de investigación encaminada a recolectar y cuantificar el agua de niebla en la Comunidad Valenciana, siguiendo los pasos que ya se habían dado en otros lugares del mundo donde existían investigaciones de este tipo, como en Chile, Sudáfrica o en las Islas Canarias.

De este modo, se obtuvo la financiación necesaria para iniciar la investigación a través de un proyecto de I+D del Plan Nacional: "*El agua de niebla como input en el sistema hidrológico en la Comunidad Valenciana (REN2001-1086/HID)*", del entonces Ministerio de Ciencia y Tecnología. Este primer proyecto de investigación permitió trabajar entre 2002 y 2004. El primer paso que se dio fue el de diseñar y construir un colector de niebla pasivo adaptado a las condiciones de nuestro entorno, ya que no existían en el mercado dispositivos de ese tipo. Como se explica en capítulos posteriores, se optó por un colector de niebla de forma cilíndrica, de modo que pudiera recolectar agua con la misma eficacia para todas las direcciones de viento, lo que evitaba tener que conocer a priori el régimen de vientos del lugar donde se pretendía instalar el equipo. Y como segundo paso, se instalaron en campo diversos colectores de niebla, tratando de cubrir latitudinal y longitudinalmente la Comunidad Valenciana, con el objetivo de captar y cuantificar agua de niebla, y de comparar entre los diversos emplazamientos seleccionados. Los resultados obtenidos fueron sorprendentes, con valores de niebla que en algunas de las estaciones casi triplicaban a los de lluvia,

además de permitirnos comparar el agua de niebla capturada entre distintas áreas de la Comunidad Valenciana. Estos resultados dieron lugar a diversas publicaciones (Estrela et al., 2004; Valiente et al., 2007), así como al trabajo de investigación por el que obtuve mi Diploma de Estudios Avanzados, de título "*Estudio del agua de niebla en la Comunidad Valenciana: diseño y puesta en marcha de un colector de agua de niebla y análisis de los resultados obtenidos*", en el que analizábamos los datos de agua de niebla registrados en la cima del monte Montgó (Denia, Alicante) durante el año 2004 (Corell, 2006).

Dado los buenos resultados obtenidos con el primer proyecto de investigación y debido a la importancia de poder disponer de una nueva fuente de agua no convencional en lugares donde tradicionalmente no llega el suministro, como es el monte, se decidió dar un paso más en la investigación y realizar un experimento de aprovechamiento del agua de niebla capturada en la repoblación de una parcela forestal remota y de difícil acceso degradada por sucesivos incendios forestales. La financiación para esta etapa de la investigación se obtuvo a través del proyecto I+D del Plan Nacional de título "*Evaluación del agua de niebla en la restauración de áreas afectadas por incendios forestales (CGL2005-03386)*" del hasta entonces Ministerio de Educación y Ciencia, proporcionando soporte económico al estudio durante los años 2006 y 2008. Durante esta fase de la investigación se realizó un experimento en campo, concretamente en una parcela contigua al Peñón de los Machos de Ayora (Valencia), que consistió en realizar una repoblación forestal de 2 500 m², a la cual, para incrementar el porcentaje de supervivencia de las plántulas, se le suministró riegos de socorro controlados en verano, exclusivamente con agua capturada por un colector de niebla de 18 m² instalado al efecto. La repoblación fue un éxito, lográndose porcentajes de supervivencia superiores al 98 % en alguna de las especies analizada que había sido sometida a tratamientos de riego controlado (Estrela et al., 2009). A su vez, este proyecto dio lugar a diferentes publicaciones y ponencias en congresos internacionales (Corell et al., 2010a; Estrela et al., 2007; Estrela et al., 2008b; Estrela et al., 2008a; Estrela et al., 2009; Estrela et al., 2010; Fuentes et al., 2009).

Y finalmente, durante los años 2009 y 2011, se obtuvo financiación para continuar con la investigación a través de un tercer proyecto de I+D del Plan Nacional de título "*Evaluación del agua de niebla en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica. Potenciales usos y aplicaciones (CGL2008-04550)*" del otrora Ministerio de Educación y Ciencia. Con este proyecto se quiso, en primer lugar, mejorar el diseño del colector de niebla de modo que se abaratase su coste y se simplificara su construcción, y en segundo lugar, ampliar la red de colectores de niebla. Hasta entonces, todos los colectores de niebla habían sido instalados en el interior de la Comunidad Valenciana y con este proyecto se consiguió expandir la red de captadores a todo el litoral mediterráneo de la Península Ibérica. De este modo, se instalaron colectores de niebla desde el Pirineo Catalán hasta el Cabo de Gata, tanto en lugares de costa como de interior. El objetivo de este proyecto fue, sin duda, ampliar el conocimiento del potencial de recolección de agua de niebla a otros muchos lugares de la vertiente mediterránea española, de condiciones geográficas y climatológicas similares a los estudiados en fases anteriores del proyecto, de modo que se abriese la puerta a futuras investigaciones o aplicaciones en nuevos escenarios. Los resultados de esta fase de la investigación fueron también sorprendentes en muchos casos, con valores importantes de niebla capturada en áreas de escasa precipitación, como en el Cabo de Gata,

mostrándose con detalle los resultados en capítulos posteriores de esta tesis. Parte de los resultados de esta etapa de la investigación han sido publicados en diferentes revistas y congresos internacionales (Azorin-Molina et al., 2010; Corell et al., 2010b; Corell et al., 2011; Klemm et al., 2012; Valiente et al., 2010; Valiente et al., 2011), aunque es en este trabajo donde se presentan los resultados más importantes de esta etapa.

Esta tesis doctoral reúne todo el trabajo realizado en los tres proyectos de I+D descritos con anterioridad (figura 1-1). Al ser tanta la información generada durante los más de 10 años que ha durado la investigación, los resultados se muestran de manera sintética, divididos por capítulos, los cuales no siguen cronológicamente el orden llevado a cabo en los citados proyectos de I+D. En primer lugar se muestran los resultados obtenidos por el conjunto de colectores de niebla de una manera global, y posteriormente se va desglosando en sucesivos capítulos aspectos específicos de la temática que pretenden mejorar la comprensión del fenómeno y sus posibilidades de aprovechamiento.

1.2 LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN LA VERTIENTE MEDITERRÁNEA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

El agua es esencial para la vida humana, la naturaleza y la economía. El agua se renueva permanentemente, pero es un bien finito, que no puede obtenerse a partir de otros recursos o ser sustituido por otros recursos (Comisión Europea, 2012). Debido al incremento de la población mundial y de la actividad industrial y agrícola, la demanda del agua se ha incrementado notablemente en las últimas décadas y se espera que lo siga haciendo en los próximos años. Además, la contaminación que han recibido tanto las aguas superficiales como las subterráneas, así como su mala gestión, han hecho del agua un bien cada vez más escaso.

Las principales administraciones públicas mundiales se han hecho eco de la importancia vital del agua y de su problemática y han desarrollado políticas encaminadas a preservar su calidad y a mejorar su gestión. Así, la Comisión Europea creó en el año 2000 la Directiva Marco de Aguas (Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000, del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se establece un marco comunitario de acción en el ámbito de la política de aguas (DOCE L327/1 de 22.12.2000)) en donde se define al agua como *un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal* y que tiene como fin garantizar la protección de las aguas y promover un uso sostenible que garantice la disponibilidad del recurso natural a largo plazo. Del mismo modo, Naciones Unidas declaró en el año 2005 el *Decenio Internacional para la Acción "El agua fuente de vida" 2005-2015*, cuyo gran desafío es dirigir la atención hacia políticas y actividades proactivas que garanticen a largo plazo una gestión sostenible de los recursos hídricos, en términos tanto de calidad como de cantidad, no sólo el decenio 2005-2015, sino más allá.

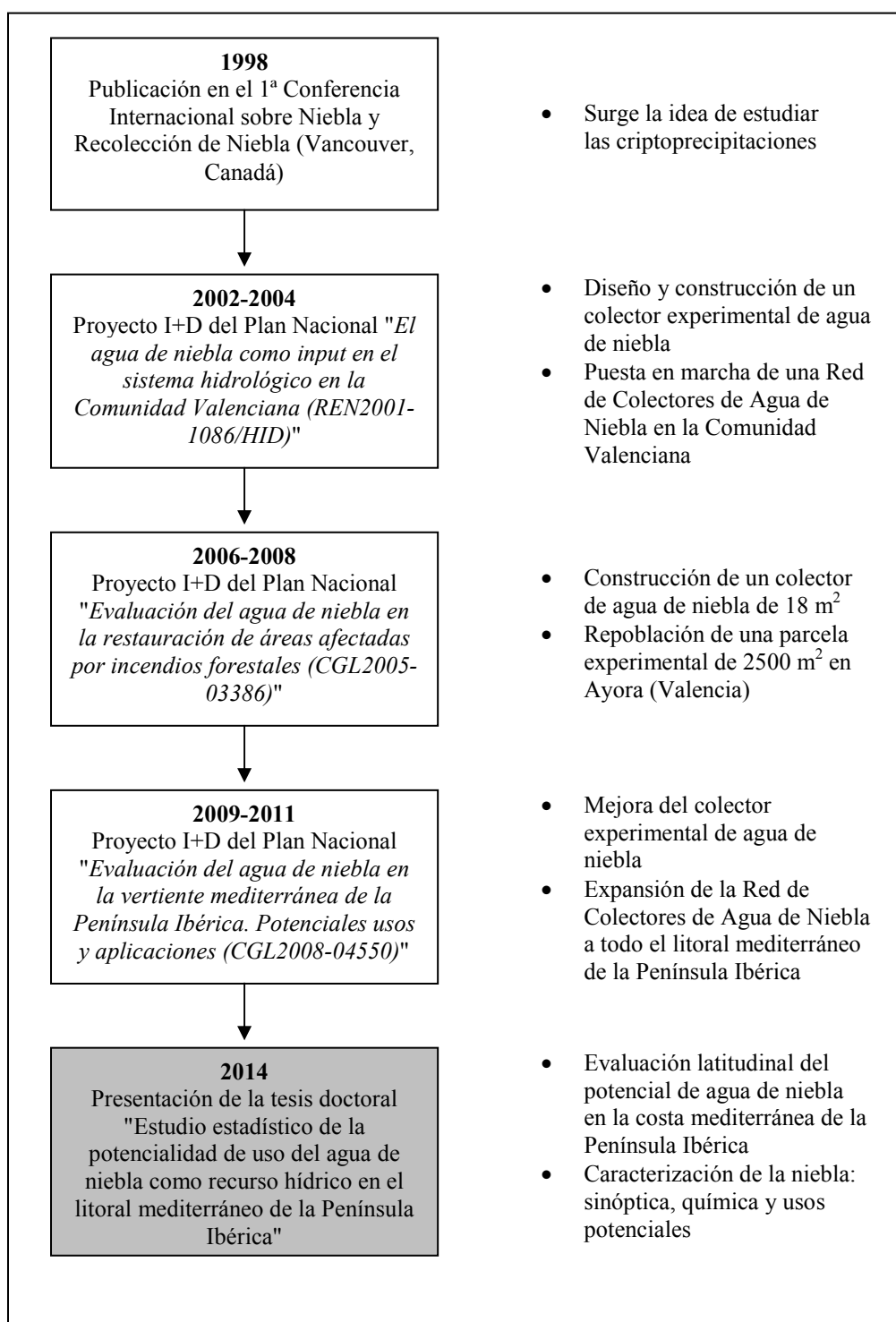


Figura 1-1: Cronología de la investigación e hitos más importantes conseguidos en cada fase

La cuenca mediterránea ha sido y es, un área con problemas importantes derivados de la escasez de agua. La masificación de las zonas costeras, el incremento del turismo y el auge de la agricultura en regadío, entre otras muchas causas, han provocado un aumento del consumo de agua en los últimos decenios¹. El litoral mediterráneo de la Península Ibérica no ha sido ajeno a estos problemas y unido a sus características climáticas de irregularidad y torrencialidad de sus precipitaciones y de sequedad estival², han derivado en problemas cada vez más graves en cuanto al abastecimiento y disponibilidad de agua. De hecho, ha habido años en los que se han tenido que adoptar restricciones legales al consumo, como sucedió en algunas zonas de las Comunidades Autónomas de Murcia y Valencia en el verano de 2003 o en el verano de 2005 en Andalucía. E incluso se ha creado el Observatorio Nacional de la Sequía como centro de conocimiento, anticipación, mitigación y seguimiento de los efectos de la sequía en el territorio nacional. Estamos por tanto ante un recurso natural estratégico y con limitaciones de uso, por lo que cualquier actividad que mejore su disponibilidad u optimice su gestión debería ser promovida.

Los estudios realizados en la Comunidad Valenciana (Millán, 1997; Millán et al., 2005) que analizan las principales entradas al sistema hidrológico, no son nada alentadores con respecto a la escasez de agua y a sus perspectivas de futuro. Según Millán et al. (2005) la tendencia general de la precipitación en la Comunidad Valenciana es negativa, matizando los siguientes aspectos:

- Ha habido una pérdida de la precipitación con volúmenes bajos (<30 mm/evento), esto es, la relacionada con frentes atlánticos y tormentas convectivo-orográficas. Este tipo de precipitación (moderada) ocurre principalmente en las zonas interiores y es muy efectiva para el sistema hidrológico (figura 1-2);
- Ha habido un aumento de la precipitación con volúmenes altos (>125 mm/evento), esto es, la relacionada con las advecciones del este. Este tipo de precipitación es menos efectiva para el sistema hidrológico porque ocurre más cerca de la costa, es torrencial y tiende a producir avenidas e inundaciones (figura 1-2).

Este estudio concluye indicando que si persisten las tendencias observadas, los impactos para la región a medio plazo serán importantes y agravarán la sequía, incluso si los totales de precipitación anual se mantienen dentro de los niveles actuales.

¹ Según datos del Instituto Nacional de Estadística, desde el año 2005, el volumen total de agua controlada y distribuida en España, está experimentando un leve descenso, con una mayor caída a partir del año 2009 y en el ámbito de Sectores Económicos, debido fundamentalmente a la crisis económica que está afectando al país y que está obligando a disminuir la actividad en muchos sectores económicos.

² Según datos de la Agencia Estatal de Meteorología, desde el año 2004 hasta el 2012, el litoral este de la Península Ibérica siempre ha presentado áreas calificadas como "secas" y todos los años, a excepción de 2010 y 2011, aparecen zonas catalogadas como "muy secas".

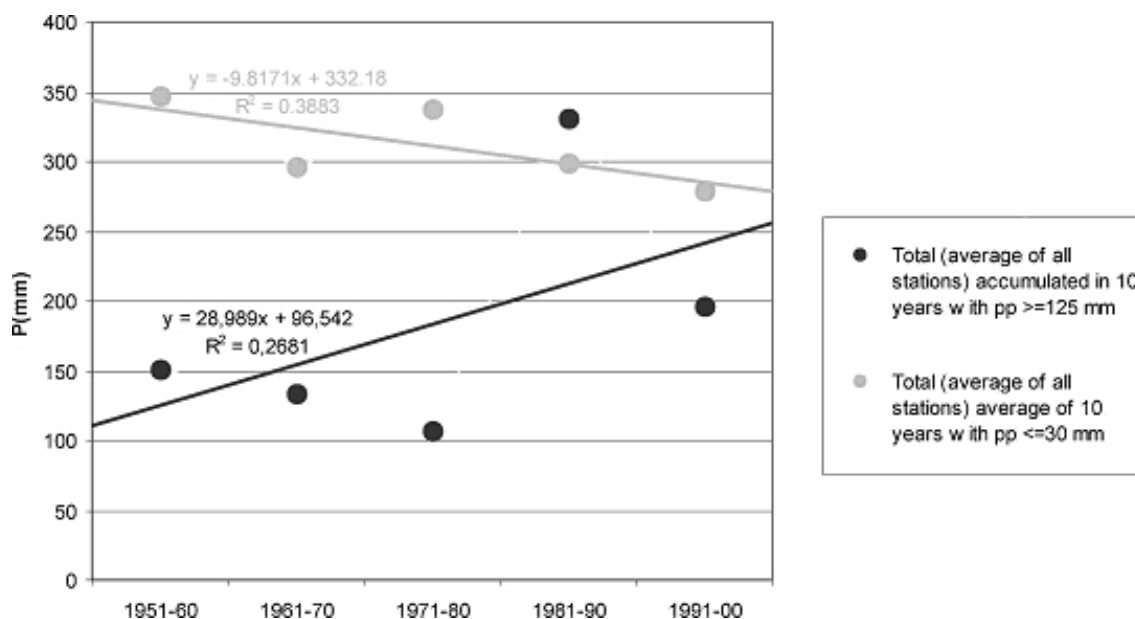


Figura 1-2: Variación decadal de la media de precipitación total para umbrales de <=30 y >=125 mm/d (Millán et al., 2005)

Ello ha provocado que las autoridades competentes hayan puesto en práctica políticas encaminadas a mitigar este problema, entre las que se encuentra la utilización de tecnologías que tratan de aumentar la disponibilidad de agua, como por ejemplo la desalación de agua del mar o el almacenamiento y/o la reutilización de agua dulce. Sin embargo, existe una tecnología mucho más simple, la cual puede servir como aporte adicional a las tradicionales formas de obtención de agua y que se basa en la imitación, por medios artificiales, de un mecanismo de la naturaleza, como es la captura de agua de niebla por medio de las hojas y las ramas de los árboles.

La naturaleza siempre ha utilizado la niebla como fuente natural de agua, la cual capta fundamentalmente a través de sus hojas (figura 1-3). De hecho, en determinados ecosistemas del planeta, se trata del principal *input* hídrico. Un ejemplo de ello es el Parque Nacional Fray Jorge, en Chile. Este bosque se encuentra en un lugar donde la precipitación no supera los 50 mm anuales y sin embargo, presenta especies arbóreas que requieren precipitaciones anuales de más de 1 000 mm y cuya existencia no se explicaría sin el aporte que la precipitación horizontal hace al sistema a través de la niebla.



Figura 1-3: Captación natural de agua de niebla a través de las acículas de un árbol

En algunos países del mundo se están desarrollando con éxito proyectos de aprovechamiento de agua procedente de la niebla. Su filosofía es recolectar agua de niebla imitando a las hojas de los árboles, pero utilizando para ello hilos o mallas plásticas. En países como Guatemala, la organización no gubernamental *FogQuest* ha desarrollado un sistema de captadores de agua de niebla para consumo humano en un pequeño pueblo de unos 300 habitantes (Schemenauer et al., 2007); en Eritrea y Sudáfrica existen escuelas de niños donde se han instalado con éxito sistemas de este tipo (Gherezghiher, 2007; Olivier and de Rautenbach, 2002); y en Chile, la instalación de 92 captadores de niebla permitió el abastecimiento de un pequeño pueblo de pescadores durante varios años (Schemenauer and Cereceda, 1992; Schemenauer and Cereceda, 1994). En otros muchos países, tales como en Croacia, Perú, Marruecos o Portugal, también se están llevando a cabo investigaciones para evaluar su potencial de recolección de agua de niebla, que a buen seguro darán lugar a proyectos de aprovechamiento en los próximos años. En España, las investigaciones más importantes se están realizando en la isla de Tenerife (Marzol, 2005), donde ya se está aprovechando el agua recolectada en el Parque Rural de Teno.

La costa mediterránea del este de la Península Ibérica presenta muchas de las características que han llevado al resto de países mencionados a iniciar trabajos de investigación sobre el uso potencial del agua de niebla. En primer lugar, se trata de una zona con importantes problemas en los recursos hídricos, por lo que la búsqueda de nuevas fuentes de agua debería ser promovida y podría ayudar a reducir este problema. Y en segundo lugar, presenta características geográficas y climatológicas adecuadas

para la formación y recolección de agua niebla, como es la existencia de cadenas montañosas cercanas a la costa, de altitudes superiores a 500 m, y la presencia habitual de vientos marítimos del este que traen nubes y aire húmedo para la formación de las nieblas costeras y de advección.

Por todo ello, por la importancia del agua en la región y su problemática actual y a medio plazo, por las exitosas experiencias llevadas a cabo en otros países y por las características climatológicas y orográficas del litoral mediterráneo peninsular, el CEAM, gracias fundamentalmente a la financiación de diferentes proyectos de investigación del Plan Nacional, comenzó una línea de investigación con el objetivo fundamental de evaluar el potencial de recolección de agua de niebla en nuestro territorio. Esta tesis recoge todo el trabajo realizado en los más de 10 años que ha durado la investigación.

1.3 LA NIEBLA: DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO ESTUDIADO

La niebla consiste en *diminutas gotas de agua suspendidas en la atmósfera, formando una nube en contacto con la superficie de la tierra* (Organización Meteorológica Mundial, 1996). Tradicionalmente la niebla ha ido asociada a un descenso de la visibilidad y muchas de las definiciones que aparecen en la literatura se basan en ese factor (Ahrens, 1994; Ahrens, 2010; Gil Olcina and Olcina Cantos, 1997; Martín-Vide, 1999). Así, la niebla se puede definir como *la suspensión en la atmósfera de gotas de agua muy pequeñas que reducen la visibilidad horizontal a menos de 1 kilómetro de distancia*. Si la visibilidad oscila entre 1 y 4 kilómetros, se considera *neblina*, y si es superior a ese umbral, se dice que es *bruma* (Marzol, 2005).

En general, los meteorólogos han estado más preocupados de la niebla como un obstáculo para la visión que como una forma de precipitación (Organización Meteorológica Mundial, 1996). Las nieblas densas pueden reducir la visibilidad hasta tal punto, que pueden provocar problemas en aeropuertos, carreteras o puertos marítimos en modo de retrasos, cancelaciones o incluso accidentes, siendo éste su principal impacto negativo sobre la sociedad. Sin embargo, la niebla tiene también un lado positivo que es su contenido de humedad el cual puede llegar a producir precipitación y que ha sido utilizado desde siempre por la naturaleza. Las gotas minúsculas suspendidas en el aire que conforman la niebla, al entrar en contacto con un árbol o planta, se acumulan en sus hojas y ramas, goteando al suelo y proveyendo de agua a sus raíces y al sistema. Es precisamente este aspecto positivo de las nieblas, la obtención de agua para su posterior uso, el que se analiza en este trabajo.

La principal diferencia entre la niebla y la nube es su localización, ya que mientras la primera se encuentra en contacto con la superficie terrestre o marina, la segunda está suspendida en el aire. En realidad, el aspecto y la estructura de las nieblas y las nubes son los mismos, de hecho, la niebla también puede ser definida como *una nube en contacto con el suelo* (Cuadrat and Pita, 1997), pudiendo identificarse, en muchos casos, como un *Stratus* en contacto con el suelo (Martín-Vide, 1999)

La cantidad de agua contenida en un metro cúbico de aire húmedo varía desde los 3 g/m³ en las nubes de tormenta, hasta los 0.05 g/m³ en nubes poco densas, mientras que en la niebla este valor varía entre 0.22 y 0.73 g/m³ (Marzol, 2005). El tamaño de las gotitas de agua que forman la niebla es menor que en la precipitación. El diámetro de las gotas de lluvia oscila entre 5 mm de las precipitaciones más intensas hasta los 0.04 mm de las lloviznas, mientras que en la niebla este valor se encuentra entre 1 y 40 µm. La velocidad de caída de las gotas de agua en la niebla varía desde valores inferiores a 1 cm/s hasta unos 5 cm/s. De hecho, su velocidad de caída es tan baja que, incluso con poco viento, las gotas se mantienen suspendidas en el aire, desplazándose casi horizontalmente (Organización Meteorológica Mundial, 1996) y cuando entran en contacto con algún material adecuado, se adhieren, condensan y con el choque de nuevas gotitas, aumentan de tamaño y caen por gravedad, provocando lo que se conoce como *precipitación horizontal*³.

1.3.1 GÉNESIS DE LA NIEBLA

Los dos factores imprescindibles para que se produzca la niebla son, en primer lugar, la saturación del vapor de agua atmosférico hasta alcanzar la condensación y, en segundo lugar, la presencia de *núcleos de condensación*⁴ en el aire que provoquen la condensación del vapor de agua sobre ellos.

La niebla, al igual que las nubes, se forma por condensación del vapor de agua atmosférico. El cambio de estado del agua de gas a líquido depende fundamentalmente de la temperatura, humedad y presión del aire. Así, la condensación del agua y, por tanto, la formación de la niebla, se puede producir cuando:

- Desciende la temperatura del aire, hasta que el vapor de agua existente alcanza la temperatura del punto de rocío y condensa.
- Aumenta el contenido de humedad en el aire, provocando la saturación del aire y, por tanto, la condensación del vapor de agua existente.
- Desciende la presión atmosférica sin suministro de calor, por ejemplo, en un ascenso adiabático del aire, lo que provoca un descenso de la temperatura del

³ La **precipitación horizontal u oculta** se puede definir como aquellos aportes de agua al suelo o plantas que no son registrados por los métodos tradicionales de medida, como son los pluviómetros, encontrándose entre sus principales formas la niebla, el rocío o la escarcha (Acosta-Baladón, 1996).

⁴ Los **núcleos de condensación** son partículas higroscópicas muy pequeñas (microscópicas), que, al absorber la humedad, inician sobre ellas el proceso de condensación, convirtiéndose en gotículas donde queda, finalmente, disuelta la propia sustancia. Los principales y más abundantes núcleos de condensación son las partículas de sal, de origen marino, generadas por la rotura de las burbujas de la espuma de mar, y las partículas procedentes de combustiones, ya sean de incendios, erupciones volcánicas, actividad industrial, etc (Martín-Vide, 1999). Su tamaño es muy variable y oscila desde los que tienen 0.01 µm de radio, cuya efectividad es escasa porque requieren altos niveles de sobresaturación, hasta los que alcanzan los 10 µm, que escasean en el aire porque se mantienen poco tiempo en él. Del conjunto los más activos son los de 0.1 a 1 µm (Cuadrat and Pita, 1997)

aire por su expansión, hasta que se produce la saturación y condensación del vapor.

El parámetro más importante que se da en la atmósfera a la hora de la formación de nieblas y nubes es el descenso en la temperatura del aire: cuando la masa de aire se enfría por debajo de su punto de rocío, se satura y el vapor que contiene se transforma en líquido (Cuadrat and Pita, 1997).

Los mecanismos más importantes de este enfriamiento en la atmósfera pueden ser varios:

- Por mezcla de dos masas de aire a distinta temperatura, lo que puede llegar a provocar la saturación de una de las masas de aire a la nueva temperatura, produciendo niebla o nubes en ella.
- Por contacto de una masa de aire húmedo sobre una superficie fría. En este caso, la pérdida de calor por radiación de la superficie fría enfría el aire inmediatamente superior y si se alcanza la saturación, el vapor de agua contenido en la masa de aire se condensa formando rocío, escarcha o niebla.
- Por la expansión adiabática de grandes masas de aire. Así, una masa de aire que es forzada a ascender, al sufrir una presión cada vez menor con la altura, aumenta su volumen y en consecuencia, disminuye su temperatura, lo que puede provocar la saturación del aire y por tanto, la formación de nieblas o nubes.

El otro mecanismo habitual que origina la condensación del vapor de agua atmosférico es el aumento de la humedad del aire. Así, cuando una masa de aire frío y relativamente seco se sitúa encima de una masa de agua más caliente, el agua tiende a evaporarse, produciéndose la saturación de la masa de aire y la formación de niebla o neblina.

1.3.2 TIPOS DE NIEBLA

Existen diferentes tipos de niebla, las cuales se suelen distinguir en función de su génesis, bien sea por enfriamiento, o bien sea por evaporación, estando todas ellas ampliamente descritas en la literatura (Acosta-Baladón, 1996; Ahrens, 1994; Ahrens, 2010; Cuadrat and Pita, 1997; Eugster, 2008; Gil Olcina and Olcina Cantos, 1997; Martín-Vide, 1999; Schemenauer et al., 1988).

Las **nieblas de radiación** se forman por descenso de la temperatura del aire en su contacto con el suelo frío por radiación. El enfriamiento del suelo por irradiación infrarroja puede provocar la saturación del aire inmediatamente superior a la superficie, hasta alcanzar el punto de rocío y, por tanto, la formación en primer lugar de rocío (o escarcha, si la temperatura es inferior a cero grados) y de niebla si el enfriamiento se trasmite a las capas superiores de la masa de aire. Se producen en invierno en situaciones anticiclónicas, en noches despejadas y presencia de viento débil. Este tipo de nieblas es muy común en nuestro territorio, principalmente en zonas de valle o en hondonadas (figura 1-4). Desde el punto de vista de su posible captación, cabe destacar que se trata de un fenómeno *estático* y apenas presenta movimiento horizontal, por lo

que su recolección por medio de sistemas *pasivos* como el que se implementa en esta tesis es muy poco efectiva, precisando para ello de sistemas *activos* que conduzcan la niebla hacia su interior.



Figura 1-4: Niebla por radiación, imagen tomada en Barracas (Castellón), el 27/10/05 a las 9:05

Las **nieblas de evaporación** se producen cuando una masa de aire fría se desplaza sobre una superficie líquida más cálida, provocando la evaporación desde el agua hacia la insaturada masa de aire. El vapor se eleva y se encuentra con aire más frío, por lo que se condensa y asciende con el aire que está siendo calentado en las capas inferiores. Es común ver este tipo de nieblas en latitudes altas en mañanas de otoño, cuando masas de aire frío se desplazan sobre las aguas de lagos o mares todavía calientes del verano. También es posible observar este fenómeno en lugares en los que emanan aguas termales, donde al agua caliente que brota de la tierra se evapora al contacto con el aire más frío, formando nieblas de vapor (figura 1-5). Por su naturaleza, este tipo de nieblas es poco frecuente en nuestro territorio, siendo además los sistemas pasivos poco efectivos en su captura.

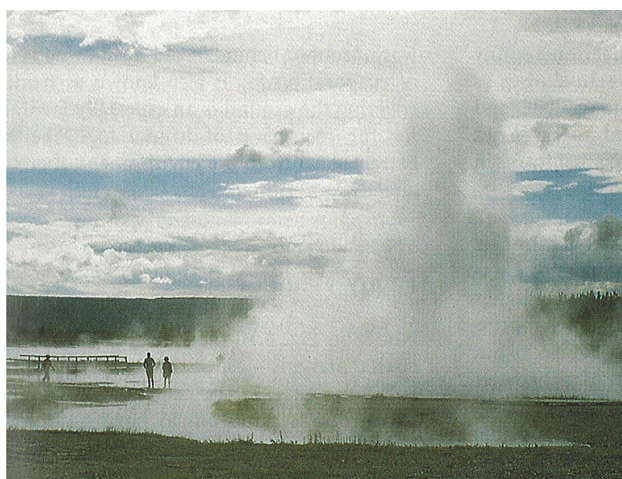


Figura 1-5: Niebla de evaporación sobre un géiser. Imagen tomada en verano, en la Parque Nacional de Yellowstone (Estados Unidos) (Ahrens, 1994)

Las **nieblas frontales** están ligadas al paso de frentes. En un frente, cuando dos masas de aire se encuentran, el aire frío forma una cuña que fuerza a ascender al aire más cálido. El aire que asciende se enfría y puede provocar la formación de nubes y la precipitación. La precipitación que cae desde una masa de aire cálido localizada en altura puede saturar el aire más frío situado debajo y provocar la formación de la niebla frontal. El resultado es una zona de gotas de agua condensada que van desde el suelo hasta las nubes.

En el caso que nos ocupa, en el que se pretende captar agua a partir de la niebla para su posterior aprovechamiento, son dos tipos los que interesan: las **nieblas de advección** y las **nieblas orográficas** (Klemm et al., 2012), las cuales se describen con más detalle a continuación.

En primer lugar, las **nieblas de advección**, que son aquellas que se forman cuando una masa de aire cálida y húmeda se desplaza horizontalmente sobre una superficie fría, ya sea tierra o agua, de modo que la masa de aire transfiere su calor a la superficie fría, enfriándose y si la temperatura supera el punto de rocío, se produce la formación de la niebla. Al contrario de lo que ocurre con las nieblas de radiación, este tipo de niebla implica el movimiento del aire, por lo que es común su existencia en zonas costeras con presencia habitual de vientos marítimos, tal y como ocurre en muchos lugares de la costa pacífica americana. Si la velocidad de viento supera los 25-35 km/h, las nubes tenderán a formarse después de que la niebla se aclare (Estrela and Millán, 1994), formándose una capa de estratos bajos o estratocúmulos (Hsu, 1988). Cuando estas nubes son empujadas por el viento e interceptan la costa, se puede llegar a producir nieblas de advección en zonas de montaña (Klemm et al., 2012). Este tipo de nieblas se forma muchas veces a cientos de kilómetros de la costa, es empujado por los vientos hacia tierra e intercepta con las cadenas montañosas de la costa, formando persistentes nieblas de advección (figura 1-6). Según estudios realizados en Chile (Cereceda et al., 2002), la capa de estratos choca sobre las cadenas montañosas a una altura que varía entre los 400 y los 1 100 m, y tiene un espesor que oscila entre los 300 y 400 m, que dependerá de la existencia en altura de una capa de inversión térmica que impida su desarrollo en altura (figura 1-7).

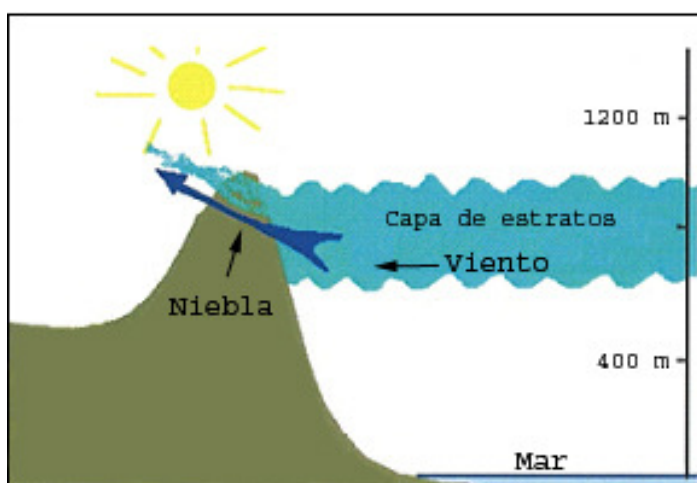
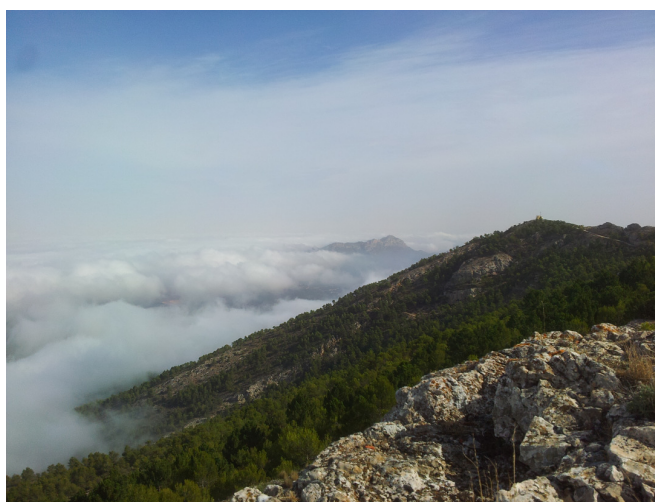


Figura 1-6: Esquema de la formación de niebla por contacto entre una nube y una cadena montañosa

Figura 1-7: Capa de estratos tocando la Sierra de Mariola a una altitud entre 900-1100 m. Imagen tomada desde el pico El Resingle, dirección NE, el 18 de octubre de 2012 a las 12:00 h



En las Islas Canarias es frecuente también que nubes bajas generadas sobre el océano Atlántico y arrastradas por los vientos alisios de componente nordeste producidos por el anticiclón de Azores, lleguen a las islas y choquen con las cumbres de las montañas de la costa (figura 1-8). Este tipo de nubes es conocido en las Islas Canarias como "mar de nubes", debido a su gran extensión horizontal y escaso desarrollo vertical, a causa de la inversión térmica a cotas que oscilan entre 800 y 1 800 m de altitud, que hace de "tapadera" para su crecimiento vertical, lo que le da una apariencia de "manta" más o menos densa que cubre el cielo canario. Investigaciones de la Universidad de La Laguna en Tenerife, encabezadas por la doctora María Victoria Marzol, han estudiado este tipo de niebla en las Islas Canarias, especialmente en la isla de Tenerife, desde 1993, habiendo constatado que estas nubes tienen la posibilidad de chocar contra las montañas de las islas a una altura que varía entre los 500 y los 1 800 m.



Figura 1-8: Capa de nubes, que en su avance por el océano Atlántico, alcanza las montañas de las Islas Canarias, el día 22 de junio de 2013 a las 12:00 h (imagen del satélite MSG3, canal 12 Norte obtenida en <http://www.sat.dundee.ac.uk>)

Por otro lado, las **nieblas orográficas** aparecen cuando una masa de aire frío y con un contenido en humedad inicial elevado, es forzada a ascender por una barrera orográfica (montaña, ladera, etc.). En el ascenso, el aire se expande y se enfría adiabáticamente. Si se alcanza el punto de rocío, el vapor de agua de la masa de aire condensa, dando lugar a la formación de la niebla (figura 1-9). Según Estrela and Millán (1994), no son necesarias grandes elevaciones para que se den este tipo de nieblas, de forma que para que se produzca el enfriamiento por expansión pueden ser suficientes áreas de pendiente suave. Como condicionantes favorables para la formación de nieblas orográficas están, por un lado, la presencia de vientos moderados, entorno a 25-35 km/h que impulsen las masas de aire hacia cotas superiores y por otro, una humedad relativa alta de la masa de aire.

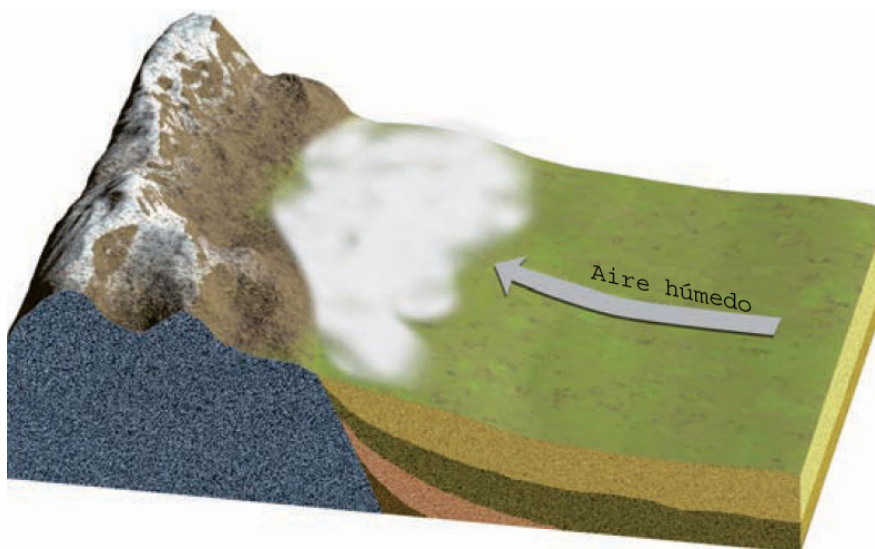


Figura 1-9: Esquema de la formación de una niebla orográfica, con una masa de aire ascendiendo lentamente obligada por una barrera montañosa, produciendo su enfriamiento y posterior condensación (Ahrens, 1994)

Según Cereceda et al. (2002), este tipo de nieblas es posible distinguirla en montañas de costa, cuando aparece la niebla en las cimas, mientras que el resto del área permanece despejado y soleado (figura 1-10). Dado que océanos y mares son fuentes importantes de humedad a la atmósfera, las regiones con cadenas montañosas cercanas a la costa son propicias para la formación de las nieblas orográficas (Klemm et al., 2012), tal y como ocurre en la litoral mediterráneo de la Península Ibérica.



Figura 1-10: Niebla orográfica cubriendo el Cerro de los Frailes (Almería), el 28 de julio de 2009 a las 18:15 h

En las áreas de montaña, el desplazamiento de una nube puede acabar en un contacto entre ambas (figura 1-11). En ese momento y lugar se dice que hay niebla (Marzol, 2005). Este tipo de niebla (nubes bajas, que empujadas por el viento, se “enganchan” en las cumbres de sierras y montañas) es bien conocida en algunos lugares del mundo, como en Chile, donde recibe el nombre de *camanchaca*, o en Cataluña, donde la nube que cubre habitualmente la cima del Puig Neulós, es conocida popularmente como la *rufa*. Es precisamente este tipo de nieblas, bien sea su origen por ascenso orográfico o por advección, la que nos interesa en este estudio, ya que en ellas, el viento juega un papel fundamental de transporte, que hace posible la captación de su contenido en agua por medio de sistemas de recolección pasivos y de bajo coste.

Figura 1-11: Nubes cubriendo la cima del monte Mondúver (Valencia), el 3 de septiembre de 2010 a las 10:00 h



1.4 OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS

El objetivo final de esta tesis es evaluar el potencial de recolección de agua de niebla en un área concreta, en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica. Para ello, dos son los objetivos principales que se persiguen:

- En primer lugar, cuantificar el agua de niebla en el este peninsular, con el interés de conocer si el comportamiento de la niebla es igual a lo largo de todo el litoral mediterráneo o si existe una marcada componente latitudinal que muestre rasgos semejantes a la precipitación, con valores más elevados al norte y menores al sur. Para lograr este objetivo, ha sido necesario, no sólo el diseño y construcción de un colector de agua de niebla experimental, sino también el planeamiento, puesta en marcha progresiva y mantenimiento desde el año 2003 hasta el 2012 de una Red de Colectores de Agua de Niebla a lo largo de todo el litoral mediterráneo peninsular.
- En segundo lugar, proponer a partir de los resultados obtenidos, los usos y aplicaciones más interesantes para nuestro territorio, teniendo presente que en nuestra sociedad avanzada, caracterizada por consumos elevados de agua, el uso ambiental puede revelarse actualmente como el más adecuado. Al tratarse de un territorio muy afectado por uno de los riesgos climáticos más importantes como son los incendios forestales, la restauración forestal se constituye como un objetivo clave.

Estos objetivos principales se concretan en una serie de objetivos específicos, los cuales son:

- Estudio de las investigaciones más relevantes que se hayan llevado a cabo en otros lugares del mundo sobre la captación pasiva del agua de niebla y su posterior aprovechamiento, que sienta las bases para la realización del trabajo. En base a ello, diseñar y construir un colector de agua de niebla adecuado a las características de la zona y los objetivos que se persiguen en esta investigación, y puesta en marcha de una Red de Colectores de Agua de Niebla en el litoral mediterráneo peninsular, en un área que abarque desde el Pirineo oriental hasta el Cabo de Gata, cubriendo tanto zonas de costa como de interior.
- Análisis de las principales pautas de conducta de la niebla, como son la estacionalidad, la influencia de la altitud, su comportamiento a lo largo de un día, la duración de los episodios de niebla y las direcciones óptimas de captura en cada emplazamiento analizado.
- Determinar las situaciones sinópticas más favorables para la recolección de agua de niebla, tanto a nivel de superficie como en capas bajas de la troposfera, así como determinar la influencia en la captura de los principales patrones de teleconexión.

- Análisis de las principales características químicas del agua de niebla recolectada, de modo que permita determinar si existen limitaciones en cuanto a su utilización.

1.5 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

En el primer capítulo de este trabajo se explica cuáles han sido las motivaciones para realizar un estudio sobre la recolección de agua de niebla en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica, realizando una justificación del mismo, describiendo su alcance y objetivos, y detallando las diferentes fases en las que se ha ido realizando la investigación.

El segundo capítulo contiene un estudio bibliográfico de los principales proyectos de aprovechamiento de agua de niebla, tanto en fase de investigación como operativos, que se han llevado a cabo en cualquier lugar del mundo, el cual sirve como reflejo del estado de arte de la temática abordada en este estudio y es utilizado como base para establecer la metodología de trabajo de la investigación.

Tras analizar investigaciones similares a la realizada en esta tesis, en el Capítulo 3 se presenta la metodología de trabajo utilizada. Posteriormente, se describe con detalle la instrumentación, haciendo una descripción de los colectores de niebla diseñados y construidos para la investigación. Y por último, se define el área de trabajo seleccionada, presentando los lugares donde se han instalado los equipos que conforman la Red de Colectores de Agua de Niebla.

En el Capítulo 4 se lleva a cabo un análisis estadístico de la base de datos generada por la Red. Se presentan los volúmenes de recolección de agua de niebla registrados, así como los valores de precipitación, para cada uno de los observatorios de la Red. A su vez, se analizan las principales pautas de comportamiento de la niebla en los diferentes emplazamientos analizados y se detalla sus direcciones óptimas de recolección.

En el Capítulo 5 figura un estudio detallado de las condiciones sinópticas propicias para la recolección del agua de niebla. Como parte de este estudio, se analizan los patrones de circulación atmosférica que favorecen la captura de agua, así como los flujos de viento dominantes. Del mismo modo, se estudia la relación entre la captación de agua de niebla y los principales índices de teleconexión.

Las principales características químicas del agua de niebla recolectada, así como su comparación con la lluvia, se presentan en el Capítulo 6. Por otro lado, también se analiza la estacionalidad en la calidad del agua de niebla, así como la influencia en la misma del recorrido previo seguido por las masas de aire que la portan.

En el Capítulo 7 se proponen diferentes formas de aprovechamiento del agua recolectada a través de sistemas pasivos de captura de niebla, adecuadas para nuestra

área de estudio. Para ello se valora, en primer lugar, el tipo de tecnología utilizada y, en segundo lugar, el contexto demográfico y social donde nos encontramos.

El Capítulo 8 recoge las conclusiones del trabajo y sirve de síntesis de las aportaciones más importantes obtenidas durante la investigación.

Capítulo 2

Estado del Conocimiento sobre la Recolección de Agua de Niebla por Métodos Pasivos

The weather is an ever-playing drama before which we are a captive audience. With the lower atmosphere as the stage, air and water as the principal characters, and clouds for costumes, the weather's acts are presented continuously some-where about the globe. The script is written by the sun; the production is directed by the earth's rotation; and, just as no theatre scene is staged exactly the same way twice, each weather episode is played a little differently, each is marked with a bit of individuality

Between Earth and Space, de Clyde Jr. Orr

El tema de la obtención de agua a partir de la niebla en cantidades suficientes para algunas aplicaciones ha despertado un gran interés desde hace algunas décadas, especialmente en climas y ámbitos en los que éste constituye un recurso escaso. Sus aplicaciones más importantes son el abastecimiento para la población, especialmente en regiones desfavorecidas, el riego en actividades forestales o agrícolas y la investigación científica. Una conferencia internacional reúne, desde 1998 y cada tres años, a científicos, estudiantes y usuarios de esta tecnología para la obtención de agua a partir de la niebla y recopila cada vez en sus actas los trabajos presentados (www.fogquest.org/conferences.html).

Es muy difícil fijar el momento en que comenzaron las investigaciones sobre la captación pasiva de agua de niebla y su posterior aprovechamiento. Algunos estudios afirman que desde finales del siglo XIX en Crimea y desde principios del siglo XX en Sudáfrica, existen trabajos que han tratado de aprovechar este nuevo recurso (Marzol, 2005). En la literatura podemos encontrar diversos estudios que describen con detalle algunas de estas investigaciones pasadas y ofrecen una amplia referencia a los trabajos de captación realizados en el mundo en tiempos pasados (Abdul-Wahab and Lea, 2008; Klemm et al., 2012; Marzol, 2005; Schemenauer and Cereceda, 1991; Schemenauer and Cereceda, 1994b).

Pero sin duda, desde que en 1987 se iniciara con éxito el proyecto de aprovechamiento de agua de niebla en la antigua explotación minera de El Tofó en Chile para abastecer al poblado de pescadores Chungungo, las investigaciones de este tipo han tomado un nuevo rumbo. En aquel entonces, se crearon una metodología y una tecnología nuevas que han servido como modelo para las investigaciones realizadas posteriormente en otros lugares del mundo. Dada la importancia de ese proyecto, en este trabajo de investigación se revisan los experimentos más relevantes realizados en el mundo con posterioridad a 1987.

2.1 TECNOLOGÍA UTILIZADA

La recolección de agua de niebla utiliza una tecnología muy sencilla, que se basa en imitar la captación de agua que hacen las hojas y ramas de los árboles y plantas tras el paso de la niebla a través de ellas. La técnica artificial se fundamenta en exponer al aire, en lugares adecuados al paso de la niebla, materiales que favorezcan la adhesión de las gotas de agua presentes en ella. Por lo general se utilizan mallas o hilos plásticos o metálicos. Cuando la niebla, empujada por el viento, entra en contacto con la malla (o hilo), parte de las gotículas de agua quedan adheridas a la misma por impacto. A medida que nuevas gotas vuelven a impactar, éstas se hacen cada vez más grandes, cayendo finalmente por gravedad a una canaleta situada en la parte inferior del material colector y conducidas a un depósito para su almacenamiento y/o cuantificación (figura 2-1).

A pesar de que la tecnología para la captación es simple, no existe una instrumentación estándar para recolectar y cuantificar el agua de niebla, ni en cuanto a la forma del

colector ni respecto al material de captación utilizado. En muchas de las investigaciones descritas en la literatura, se utilizan colectores fabricados con materiales autóctonos que facilitan su reparación en caso de rotura y reducen costes económicos, ya que teóricamente son más fáciles de encontrar.

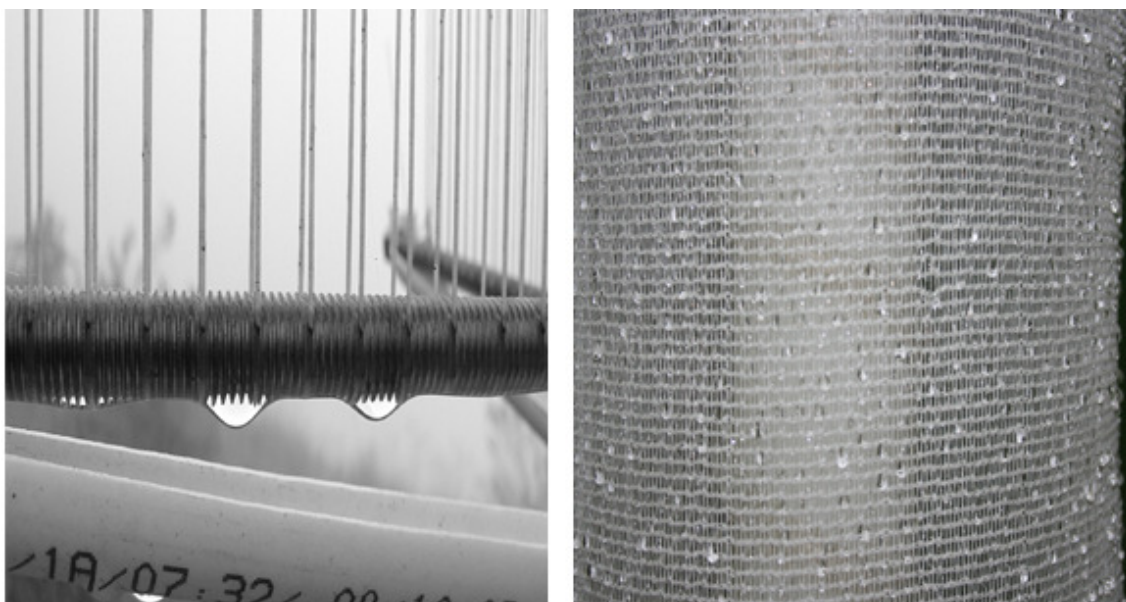


Figura 2-1: Gotas de agua de niebla cayendo a través de hilo de nylon (izquierda, imagen cedida por Douglas T. Fischer) y adheridas a una malla plástica (derecha). En ambos casos, a medida que crecen en tamaño, caen por gravedad y son recogidas por un depósito situado en la parte inferior

En función de su forma, los colectores de niebla se podrían clasificar de la siguiente manera:

2.1.1 COLECTORES PLANOS

El colector de niebla más ampliamente utilizado es el **Standard Fog Collector** (en adelante, **SFC**), el cual se utiliza con fines de investigación (Organización Meteorológica Mundial, 1996; Schemenauer and Cereceda, 1994a). Se trata de un captador plano y por tanto, bidireccional (presenta la máxima eficacia de captación en dos direcciones de viento), formado por una superficie de recolección de 1 m^2 ($1 \times 1 \text{ m}$), instalada a 2 m sobre el nivel del suelo. Se debe instalar perpendicularmente a la dirección de viento que porte con más frecuencia la niebla al lugar. Como material de recolección se suele utilizar una malla de polietileno de alta densidad denominada *Raschel* y originaria de Chile, instalada en doble capa y con un porcentaje de cobertura del 35 % (www.marienberg.cl) (figura 2-2).

Existe una versión más pequeña del SFC utilizada principalmente en Canarias, de 0.25 m^2 de superficie recolectora ($0.5 \times 0.5 \text{ m}$), denominada **Quarter-size Fog Collector**

(QFC), que reduce costes y facilita su construcción con respecto a su predecesor (Marzol, 2002; Marzol, 2005).

Cuando lo que se persigue es recolectar agua en grandes cantidades para su aprovechamiento, se utiliza una versión del SFC de mayor tamaño, denominada **Large Fog Collector (LFC)**, cuya instalación y material de recolección son idénticos a los de su predecesor (Schemenauer and Cereceda, 1994b). La principal diferencia entre ellos es el tamaño, siendo el más habitual de 12 m de ancho y 4 m de alto, lo que supone 48 m² de superficie de captación (figura 2-2). Existen versiones de este colector con mallas dispuestas en tres dimensiones instaladas en Perú, como el denominado colector *Eiffel*, que están dando tasas de captura superiores al LFC (Lummerich and Tiedemann, 2009; Tiedemann and Lummerich, 2010).



Figura 2-2: Standard Fog Collector, de 1 m² (1 x 1 m) de superficie de captación (parte superior); Large Fog Collector de 18 m² (6 x 3 m) de superficie de captación (parte inferior); ambos instalados en Ayora (Valencia)

A pesar de que la malla *Raschel* de origen chileno es la más utilizada en este tipo de colector de niebla, no en todos los trabajos llevados a cabo siempre ha sido así, debido fundamentalmente a la dificultad que existe para adquirirla. Es por ello que en muchos países se utilizan mallas de origen local, similares a la chilena, pero de más fácil acceso, lo que facilita su reposición en el caso de que sea necesario. En países como Sudáfrica, donde el viento es un factor limitante, se suele utilizar mallas realizadas con materiales metálicos (Shanyengana et al., 2003). En los últimos años se está prestando una mayor atención a materiales con estructuras tridimensionales que se supone incrementan la eficacia de captación (Sarsour et al., 2010) (figura 2-3).

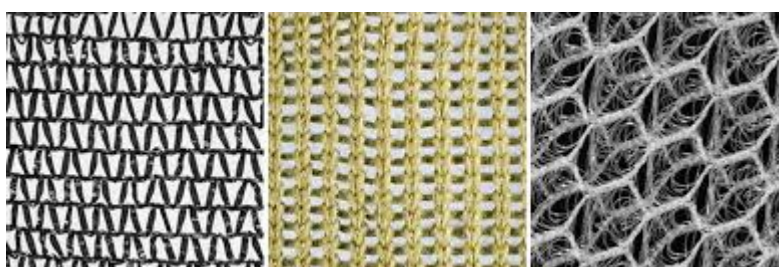


Figura 2-3: Algunos tipos de malla utilizados para recolectar niebla: malla tipo Raschel de origen chileno (izquierda), malla con refuerzo metálico utilizada en Sudáfrica (centro) y malla con diseño en 3D, de 1 cm de grosor, testada en laboratorio (derecha)

Dentro de los colectores planos, existe un tipo de captador que utiliza como material de recolección hilo, principalmente de nylon o de teflón, aunque también de alambre. Este colector es conocido como de tipo **arpa**, debido a la colocación de los hilos de manera vertical y con cierta tensión, permitiendo el deslizamiento de las gotas de agua condensadas en ellos. Uno de los primeros en utilizarlo fue Goodman (1985), el cual diseñó un colector plano de idénticas medidas que el SFC, pero que utiliza hilo de nylon como material de captación, conocido como **Wire Harp**. Este colector está construido a base de dos capas cuadradas de 500 hilos de nylon cada una, los cuales están dispuestos verticalmente a modo de arpa a intervalos de 1.2 mm. El hilo de nylon tiene un diámetro de 0.8 mm. En Irán (Mousavi-baygi, 2008) y en Perú (Lummerich and Tiedemann, 2009) también utilizan colectores de este tipo. Los colectores de niebla que utilizan hilos dispuestos verticalmente como material de recolección tienen como principal ventaja frente a los que utilizan malla, la velocidad de caída de las gotas de agua, que es más rápida ya que carecen de hilos en posición horizontal que ralentizan su deslizamiento. Por contra, los colectores hechos de hilos de nylon (u otro material) suelen tener mayor dificultad de construcción, lo que encarece los costes de producción.

2.1.2 COLECTORES CILÍNDRICOS

También son habituales los colectores con forma cilíndrica, que tienen como principal ventaja frente a los planos, su capacidad para capturar agua con la misma eficacia en todas las direcciones de las que proceda la niebla. Son, por tanto, adecuados en lugares donde no se conoce a priori la dirección de viento portadora con mayor frecuencia de la niebla y son usados mayoritariamente con fines de investigación. El más simple de ellos es el conocido como colector **Grunow** (Grunow, 1952; Grunow, 1960; Organización Meteorológica Mundial, 1996), el cual consiste en una malla metálica de forma cilíndrica situada de forma vertical en la parte superior de un pluviómetro, quedando expuesta totalmente a la circulación del aire. El cilindro tiene 10 cm de diámetro y 22 cm de altura, lo que supone 0.022 m² de superficie efectiva de captación (10 x 22 cm) (figura 2-4). Una versión del colector Grunow de mayor tamaño es la conocida como colector tipo **Juvik** (Juvik et al., 1993). Este colector presenta como novedad, aparte de sus dimensiones, un protector de forma cónica o tipo plancha (metálica o plástica), que colocado en la parte superior del cilindro, previene al colector de recoger parte de la lluvia (figura 2-4). Una versión de este colector, junto a varios colectores planos, fue utilizada en los años 80 en la isla de Tenerife por el Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), para el análisis de niebla en la isla (Santana-Pérez, 1987).



Figura 2-4: Colector tipo Grunow (izquierda), el cual presenta un pluviómetro tipo Hellmann como depósito y medidor del agua capturada (Acosta-Baladón, 1996); colector tipo Juvik (derecha), con protector superior para la lluvia en su parte superior y con un pluviómetro automático situado en el suelo y unido a éste por una manguera, para cuantificar el agua recogida (Juvik et al., 2005)

Dentro de los colectores cilíndricos, también existen los de tipo arpa, es decir, aquellos que utilizan hilo dispuesto de manera vertical como material de recolección (figura 2-5). El más utilizado de ellos es el conocido como colector **ASRC** (Atmospheric Science Research Center, State University of New York) (Falconer and Falconer, 1980). Se trata de un cilindro fabricado con dos discos de polipropileno de 25 cm de diámetro, separados 1 m, y que utiliza hilo de teflón de 0.4 mm de diámetro como material de recolección. Este hilo es cosido de manera continua, uniendo los dos discos a lo largo de su periferia externa, con una separación de 3 mm entre hilos. El agua es recogida por un embudo colocado en el disco inferior. Existen versiones de este colector con diferentes dimensiones, como aquella utilizada por el Dr. Schemenauer, quien diseñó un colector cilíndrico con 370 hilos de teflón, de 45 cm de longitud, 0.53 mm de diámetro y con una separación de 3 mm, distribuidas en dos círculos concéntricos, estando el resto de su estructura fabricada en polietileno (Schemenauer et al., 1995). También existen distintas versiones en cuanto al material de recolección, algunas de las cuales utilizan teflón (Beiderwieden et al., 2005; Dawson, 1998; Marzol, 2005; Schemenauer et al., 1995), mientras que otras usan nylon debido a su menor coste y mayor facilidad para trabajarlo (Fischer and Still, 2007; GOODMAN, 1985).



Figura 2-5: Colector cilíndrico tipo arpa, con hilos de teflón como material de recolección (Beiderwieden et al., 2005)

2.1.3 OTROS COLECTORES

Dentro del ámbito comercial, existe una empresa privada en Tenerife, Agua de Niebla de Canarias, S.L., que ha desarrollado un colector de niebla con forma de prisma rectangular y que utiliza malla como material de captura (Hernando-Olmo and Gil-Casanova, 2012). El colector de niebla se denomina **NRP 3.0**, del cual existen varios modelos (www.aguadeniebla.com) (figura 2-6). Una de las particularidades de esta empresa es que, además de comercializar colectores de niebla, envasa y distribuye agua de niebla obtenida a partir de un huerto hídrico de captadores NRP 3.0. El nombre comercial del agua de niebla embotellada es "Alisios".



Figura 2-6: Colectores de niebla NRP 3.0, modelo Garoé (www.innovaspain.com/detalle_noticia.php?noticia=1899)

2.2 PROYECTOS RELEVANTES SOBRE LA CAPTACIÓN DEL AGUA DE NIEBLA LLEVADOS A CABO EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS

La mayoría de estudios o proyectos de aprovechamiento de agua de niebla por métodos pasivos se ha desarrollado en emplazamientos cercanos al mar, donde es habitual la presencia de nieblas de advección. Así, a lo largo de la costa americana del Pacífico se han multiplicado este tipo de estudios, muchos de los cuales han dado lugar a la implementación de proyectos operacionales de abastecimiento, fundamentalmente en su parte sur, donde los recursos económicos son menores y donde existen zonas con graves problemas de acceso a agua potable. Por idénticos problemas, muchos estudios se han desarrollado en el continente africano, principalmente en áreas bañadas por el océano Atlántico. Sudáfrica es uno de los países más activos en la utilización de esta tecnología, contando con varios proyectos de aprovechamiento en funcionamiento. La Península Arábiga, debido a su clima árido, también ha sido lugar de numerosos estudios que han tratado de utilizar esta técnica, habiéndose llegado a poner en funcionamiento un proyecto operacional en Yemen, el cual finalmente fracasó por problemas derivados de su gestión. Del mismo modo, Asia ha albergado estudios de prospección de este recurso, existiendo varios sistemas de aprovechamiento operativos en Nepal dando buenos resultados. En Europa los estudios han ido encaminados a la investigación y se han localizado en su parte sur, donde los recursos hídricos son más escasos.

En los siguientes apartados se describen brevemente los principales proyectos de investigación o aprovechamiento sobre el agua de niebla habidos en el mundo en las últimas décadas, los cuales aparecen localizados geográficamente sobre un mapamundi en la figura 2-7. Los estudios se han clasificado según el continente donde han tenido lugar, mostrándose una tabla resumen al comienzo de cada apartado que recoge todos los estudios descritos, así como el tipo de trabajo realizado. No es objeto de este apartado comparar tasas de recolección entre diferentes lugares, ya que la heterogeneidad entre los instrumentos de captación lo imposibilita. De todas maneras, se ha tratado de incluir en todos los estudios descritos datos de tasas de captura de agua de niebla para poder comprender la magnitud del recurso.



Figura 2-7: Países en donde han sido llevadas a cabo investigaciones sobre el aprovechamiento del agua de niebla

2.2.1 ÁFRICA E ISLAS DE LA MACARONESIA Y DEL ÍNDICO

África, debido a sus escasos recursos económicos y al clima desértico de muchas de sus áreas, ha albergado numerosas investigaciones sobre la captación de niebla, algunas de las cuales han dado lugar a proyectos operacionales que han beneficiado a gente pobre. Sudáfrica ha sido uno de los países más activos en esta área de conocimiento, habiendo puesto en marcha hasta 10 proyectos semi-operativos de recolección de agua de niebla, describiéndose los más importantes a continuación. Otros países bañados por el Atlántico, como Namibia y Marruecos, también han desarrollado estudios sobre la niebla, así como muchas de las islas de la Macaronesia, donde los vientos alisios generados por el anticiclón de Azores transportan por el océano *Stratocumulus* que chocan contra sus cadenas montañosas. En lugares bañados por el océano Índico y por el mar Rojo también se han publicado trabajos de este tipo.

Tabla 2-1: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en África e islas de la Macaronesia y del Índico

País	Región o nombre del proyecto	Tipo de estudio
Eritrea	Nefasit	Aprovechamiento
Eritrea	Arberobue	Aprovechamiento
Marruecos	Boutmezguida	Aprovechamiento
Namibia	Desierto Central	Cuantificación
Sudáfrica	Lepelfontein	Aprovechamiento
Sudáfrica	Tshanowa Junior Primary School	Aprovechamiento
Sudáfrica	Kleinzee	Cuantificación
Cabo Verde	Monte Verde	Cuantificación
Cabo Verde	Sierra Malagueta	Aprovechamiento
España	Tenerife	Aprovechamiento
Portugal	Isla de Madeira	Cuantificación
Francia	Isla de la Reunión	Cuantificación

En **Eritrea**, tres organizaciones no gubernamentales, la canadiense *FogQuest*, la alemana *WaterFoundation* y la local *Vision Eritrea*, trabajan desde el año 2005 en el estudio del agua de niebla en el país. Este país bañado por el mar Rojo, posee cadenas montañosas paralelas a la costa, con alturas comprendidas entre los 2 000 m y lo 2 500 m, que hacían suponer que podía ser un buen lugar para la puesta en práctica de un sistema de recolección de agua de niebla por métodos pasivos. Tras una fase preliminar en la que se utilizaron colectores de tipo SFC y se obtuvieron tasas de captación de 12 l/m²/d en los meses húmedos, se pusieron en práctica dos proyectos de aprovechamiento de agua de niebla. El primero de ellos se sitúa en la localidad de **Nefasit** y tiene como objetivo suministrar agua a 1 500 alumnos de una escuela sin acceso a agua potable a través de 10 colectores de tipo LFC (FogQuest News, 2007; Gherezghiher, 2007; Gherezghiher, 2010). El segundo se localiza en el municipio de **Arberobue**, consta también de 10 colectores de tipo LFC y suministra agua a una escuela y a las 120 familias que viven en el pueblo (FogQuest News, 2007; Gherezghiher, 2007; Gherezghiher, 2010; Schemenauer, 2008) (figura 2-8).



Figura 2-8: Niños bebiendo agua procedente de un proyecto de aprovechamiento de agua de niebla en la escuela de Arberobue (Eritrea) (Schemenauer, 2008)

En el año 2006, la Universidad de La Laguna (Tenerife) y la Fundación *Si Hmad Derhem* (Casablanca, Marruecos), decidieron poner en marcha un proyecto de manera conjunta, en el cual se analizase el potencial de recolección de agua de niebla (*tagut* en dialecto berebere) en **Marruecos**. Para ello, se seleccionaron dos emplazamientos a diferente altitud, donde se evaluó el potencial de recolección de agua de niebla utilizando colectores de tipo SFC y QFC (Marzol et al., 2007; Marzol et al., 2010; Marzol et al., 2011; Marzol and Sánchez-Megía, 2008a; Marzol and Sánchez-Megía, 2008b; Marzol and Sánchez-Megía, 2008c) (figura 2-9). Los buenos resultados obtenidos, con valores promedio superiores a $10 \text{ l/m}^2/\text{d}$, hicieron que en 2011 se pusiera en marcha un proyecto operacional de recolección de agua de niebla en **Boutmezguida** formado por 14 colectores de tipo LFC, el cual sirve para suministrar agua a la población de la zona, la cual vive principalmente de la ganadería (Klemm et al., 2012). La organización no gubernamental *Opur* (International Organization for Dew Utilization, www.opur.fr) ha trabajado también varios años en Marruecos, centrando sus estudios principalmente en la obtención de agua a partir del rocío.



Figura 2-9: Pareja de captadores instalada en Boulaalam (Marruecos), a 300 m sobre el nivel del mar, orientados a WNW (izquierda) y NNW (derecha). A los pies, la ciudad de Ifni y el océano Atlántico (Marzol and Sánchez-Megía, 2008b)

Namibia es otro país africano bañado por el océano Atlántico que ha realizado y hecho público estudios encaminados al aprovechamiento del agua de niebla. Las primeras investigaciones se realizaron entre los años 1962 y 1996, utilizándose captadores de agua de niebla cilíndricos de malla de alambre, cuyos resultados hicieron constatar una mayor y más regular presencia de niebla que de lluvia. Desde 1996 investigadores de la Fundación para la Investigación del Desierto de Namibia y de la UNESCO trabajan para poner en práctica un sistema de abastecimiento de agua procedente de la niebla que palie las enormes necesidades de agua que existen en el país, donde el 97 % de la superficie se considera de ambiente hiperárido a árido. Los resultados del experimento realizado con 14 colectores de tipo SFC en tres emplazamientos del **Desierto Central** mostraron una considerable variación estacional, con seis meses al año (desde agosto hasta enero) con valores promedio de recolección de agua superiores a 2 l/m²/d, con presencia de niebla el 45 % de los días y otros seis meses (de febrero a julio) con valores inferiores a 0.5 l/m²/d y presencia de niebla el 15 % de los días (Mtuleni et al., 1998; Shanyengana et al., 2002). También se han realizado experimentos testando diferentes tipos de malla y reduciendo el tamaño de los colectores LFC para minimizar las roturas durante las típicas tormentas de arena del desierto (Makuti et al., 2004; Shanyengana et al., 2003). De los últimos estudios que se tiene constancia son los encaminados a instalar un sistema de abastecimiento de agua a través de colectores de

tipo LFC en la tribu *Topnaar*, el cual ha sido desarrollado por la Fundación Bastos (Dominguez Llosa et al., 2007).

Otro de los países que ha podido poner en práctica con éxito varios proyectos encaminados a recoger agua de niebla para suministro de la población ha sido **Sudáfrica**. La fase experimental de estos proyectos se inició en 1994 y fue llevada a cabo por investigadores de la Universidad del Norte y la Universidad de Pretoria (Louw et al., 1998; Olivier, 1998). Tras los buenos resultados obtenidos y debido a los grandes problemas de agua que padece gran parte de Sudáfrica, fundamentalmente por problemas de contaminación de las aguas tanto superficiales como subterráneas, hasta la fecha, 10 proyectos semi-operativos de recolección de agua de niebla se han puesto en marcha en el país (van Heerden et al., 2010). De entre todos ellos, destacan los llevados a cabo en **Lepelfontein** (provincia Cabo Oeste), donde se instalaron colectores de tipo LFC por un total de 72 m² de superficie de captación para suministrar agua a una población de 200 habitantes (de Rautenbach and Olivier, 2001; Olivier, 2002; Olivier, 2004; Olivier and de Rautenbach, 2002) y el que se desarrolló en el colegio **Tshanowa Junior Primary School** (provincia Norte), donde se implantó un sistema de 72 m² de superficie de captación a base de colectores de tipo LFC para abastecer a los más de 100 niños que tenía la escuela (Dyson, 2007; Olivier, 2001; Olivier and de Rautenbach, 2002). También se han publicado estudios realizados con colectores de tipo SFC en **Kleinzee**, aunque con pobres resultados (Olivier and Rautenbach, 2007).

Desde 1962 se llevan a cabo estudios sobre el aprovechamiento del agua de niebla en las **Islas de Cabo Verde** (Sabino, 1998). Dos han sido las zonas más estudiadas: por un lado, el **Monte Verde** en la isla de San Vincent, a 4 km de la costa y a unos 600 m de altitud, en donde se utilizaron colectores tipo Juvik (Sabino and Moreno, 2001), y por otro lado, el Parque Natural de la **Serra Malagueta** en la isla Santiago, a 8 km de la costa y a unos 1 000 m de altitud (Sabino, 2004). A pesar de que ambos emplazamientos han mostrado tener buenas condiciones para acoger un sistema de captación de agua de niebla, tan sólo en Serra Malagueta se ha podido poner en marcha con éxito un sistema de captación de agua de niebla, gracias fundamentalmente a la voluntad de los vecinos. Este sistema permite suministrar agua a 250 personas que viven en el Parque Natural, además de servir como apoyo para la agricultura. La recogida de agua se realiza a través de 10 colectores de tipo LFC, de 25 m² de superficie de captación cada uno, formando un total de 250 m² (Fog Newsletter, 2000; FogQuest News, 2003; Sabino, 2004; Sabino, 2007).

Las **Islas Canarias**, debido a su característico régimen climático, de muy escasas precipitaciones y larga sequía estival, ha tenido a lo largo de la historia una gran necesidad y preocupación de encontrar fuentes alternativas de agua, por lo que ha sido pionera en España en el estudio del aprovechamiento del agua de niebla. De entre las investigaciones llevadas a cabo en las islas, que datan desde 1948, todas ellas bien descritas en Marzol (2005), destacan las llevadas a cabo en la isla de **Tenerife** por la Dra. María Victoria Marzol Jaén, de la Universidad de La Laguna. Desde 1993, las investigaciones de la Dra. Marzol se han dividido en tres etapas y han sido analizadas seis áreas de la isla de Tenerife, con altitudes comprendidas entre 664 y 1 742 metros sobre el nivel del mar (Marzol, 2001; Marzol, 2002; Marzol, 2005; Marzol et al., 2010; Marzol et al., 2011; Marzol and García-Santos, 2004; Marzol and Sánchez-Megía,

2008a; Marzol and Valladares, 1998). En las primeras fases de la investigación se utilizaron distintos tipos de colectores, todos ellos cilíndricos, forrados con diferentes tipos de malla e hilos, siendo el de hilos de teflón el más eficaz (Marzol, 2005). En fases posteriores se diseñó y utilizó el colector tipo QFC, así como el SFC, probándose diferentes mallas. Los buenos resultados de la fase experimental, con valores promedio de recolección superiores a 10 l/m²/d, hicieron que se pusiera en práctica un proyecto operacional de aprovechamiento en el Parque Rural de Teno, el cual consta de ocho colectores de tipo LFC y que tiene como fin suministrar riego en tareas de reforestación y el abastecimiento de balsas para prevenir incendios forestales (Klemm et al., 2012).

En las **Islas de Madeira** entre 1995 y 2006 se puso en marcha un proyecto de investigación del agua de niebla utilizando colectores de tipo SFC y pluviómetros situados bajo las copas de los árboles en diferentes tipos de bosque, con valores promedio de recolección superiores a 16 l/m²/d en el mejor de los emplazamientos analizados (Prada et al., 2007; Prada et al., 2009).

Durante el año 2001 se llevó a cabo un experimento en la **Isla de la Reunión**, el cual tenía como objetivo evaluar la capacidad del árbol endémico *Sophora denudata* de añadir agua al sistema hídrico de la isla a través de la niebla (Gabriel and Jauze, 2008). Para ello se utilizaron colectores cilíndricos de tipo Juvik. El estudio evidenció la capacidad del árbol para actuar de colector de agua de niebla.

2.2.2 AMÉRICA CENTRAL Y CARIBE

En esta región americana se está llevando a cabo el proyecto de aprovechamiento de agua de niebla más grande del mundo. En la localidad de Tojquia se han instalado 35 colectores de tipo LFC, cuya producción de agua abastece a sus ciudadanos, que hasta entonces debían desplazarse varios kilómetros a pie para encontrar agua. También en Haití y en República Dominicana se ha analizado el potencial de recolección de agua de niebla con buenos resultados.

Tabla 2-2: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en América Central e islas caribeñas

País	Región o nombre del proyecto	Tipo de estudio
Guatemala	Lago Atitlán	Aprovechamiento
Guatemala	Tojquia	Aprovechamiento
Guatemala	La Ventosa	Aprovechamiento
Haití	Salagnac	Cuantificación
República Dominicana	San José de Ocoa y Azua	Cuantificación

En **Guatemala**, la organización no gubernamental *FogQuest* ha puesto en marcha diversos proyectos operacionales con diferente suerte. Entre los años 2003 y 2005 se trabajó en las inmediaciones del **lago Atitlán**, poniéndose en funcionamiento dos colectores de tipo LFC (García et al., 2004). A pesar de las buenas tasas de captura, este

proyecto fracasó por los problemas derivados de su gestión entre los miembros de las comunidades afectadas. Desde el año 2006, *FogQuest* lleva trabajando en un proyecto de captación de agua de niebla en **Tojquia**, un pequeño asentamiento de 300 habitantes, situado a 15 km de La Ventosa, al oeste del país y a una altitud de unos 3 300 m (Rosato et al., 2010; Rosato et al., 2013; Schemenauer et al., 2007). El sistema está operativo en la actualidad y consta de 35 colectores de tipo LFC (figura 2-10). Durante la estación seca, el sistema llega a producir un promedio de 6 300 l/d, sirviendo de apoyo para el suministro de agua a la comunidad (Klemm et al., 2012). También se han publicado investigaciones en **La Ventosa**, donde se instalaron otros cuatro colectores de tipo LFC (Schemenauer et al., 2007).



Figura 2-10: Proyecto operacional en Tojquia (Guatemala), en octubre de 2006, con dos LFC al fondo y un depósito de almacenamiento de agua de 3 000 l a la izquierda (Schemenauer, 2008)

Haití y República Dominicana son dos países caribeños donde se han llevado a cabo investigaciones sobre el aprovechamiento de agua de niebla. En ambos casos se utilizaron colectores de tipo SFC para realizar la investigación, obteniéndose en Haití tasas de captura de 5.5 l/m²/d (www.fogquest.org), mientras que en República Dominicana se registraron 2.5 l/m²/d (Schemenauer et al., 2001).

2.2.3 AMÉRICA DEL NORTE E ISLAS DEL PACÍFICO

La costa oeste de los Estados Unidos ha sido la zona donde se han centrado los estudios sobre la captación del agua de niebla en aquel país, debido a las características de su clima mediterráneo, con veranos secos y cálidos. Algunos de los estudios realizados han tenido como fin analizar la importancia de la niebla como recurso hídrico en los bosques *Redwood*, hábitat de una de las especies de árboles más alta del planeta (*Sequoia sempervirens*). En México y en Hawái también se han realizado estudios de investigación, pero al igual que ha ocurrido en Estados Unidos, todavía no se ha puesto en marcha ningún sistema de aprovechamiento, siendo la cuantificación el principal objetivo de los estudios llevados a cabo en dichos países.

Tabla 2-3: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en América del Norte e islas del Pacífico

País	Región o nombre del proyecto	Tipo de estudio
Estados Unidos	San Francisco, California central	Cuantificación
Estados Unidos	Monterrey, California central	Cuantificación
Estados Unidos	Islas del Canal, California	Cuantificación
Estados Unidos	California Norte	Cuantificación
Estados Unidos	Volcán Mauna Kea, Hawái	Cuantificación
México	Chiapas	Cuantificación
México	Veracruz	Cuantificación

Los primeros estudios que se conocen son los llevados a cabo en el monte Ox, en la Península de **San Francisco** (GOODMAN, 1998), durante los veranos de 1991 y 1992. En dichos estudios se utilizaron colectores tipo arpa, tanto planos como cilíndricos, basados en Goodman (1985), con tasas promedio de captura entre 1.5 y 4 l/m²/d. También en California Central, pero esta vez en las proximidades de **Monterrey**, durante el verano de 2005, se llevaron a cabo estudios sobre el potencial de captura de agua de niebla utilizando tres colectores de tipo SFC (Fernández and Ruiz, 2007). No se describen los valores promedio de agua capturada, pero sí el valor máximo diario en el mejor de los emplazamientos, el cual alcanzó los 7.12 l/m². Del mismo modo, en 2005 se llevó a cabo un proyecto de investigación sobre la recolección de niebla en la Isla de Santa Cruz, la de mayor superficie de las **Islas del Canal** en California. Para el estudio se instalaron en 12 emplazamientos del área analizada, 21 captadores de niebla, a diferentes altitudes y orientaciones. El mayor interés de este estudio fue la utilización de un nuevo captador de niebla pasivo, de tipo arpa, formado por dos paneles de hilos de nylon dispuestos en cruz (Fischer et al., 2009; Fischer and Still, 2007).

Durante tres años se llevó a cabo un estudio en una zona situada en el **norte de California**, el cual trataba de analizar la importancia del agua de niebla como *input* hídrico en los bosques *Redwood*. Para ello se realizó un experimento en 10 emplazamientos situados en una zona a unos 750 m de la costa y a unas altitudes comprendidas entre 47 y 191 m sobre el nivel del mar, utilizándose colectores

omnidireccionales basados en el ASRC (Dawson, 1998; Dawson and Vidiella, 1998). Los resultados del estudio revelaron que, de media, el 34 % del agua que entraba al sistema era debida a la niebla interceptada por los árboles. En las zonas en las que no había presencia de árboles, la niebla representaba el 17 %, demostrando la importancia de los árboles como captadores pasivos del agua que entra al sistema hídrico. Una continuación de este estudio relata que la frecuencia de días con niebla se ha reducido significativamente en el último siglo en la costa de California (Johnstone and Dawson, 2010). De continuar esta tendencia, relacionada con el descenso del gradiente de temperatura costa-interior, se pone en peligro el bosque *Redwood*, lo que afectaría al sistema hidrológico del área, pudiendo tener importantes consecuencias ecológicas.

Entre noviembre de 2001 y octubre de 2002 se llevó a cabo un estudio en la **isla Hawái**, la isla más grande del archipiélago al que da nombre, el cual pretendía analizar el hábitat de una especie endémica amenazada, el pájaro palila (*Loxioides bailleui*). El hábitat de esta especie es el bosque del árbol endémico mamane (*Sophora chrysophylla*), situado en las laderas del volcán Mauna Kea. Para el estudio se instaló durante 12 meses y a una altitud de 2 600 m, una estación meteorológica dotada con una pareja de captadores de agua de niebla. El principal interés de este estudio fue el diseño y utilización del captador de niebla pasivo tipo Juvik, ya que los promedios de agua capturada fueron muy bajos (0.33 l/m²/d) (Juvik et al., 1993; Juvik and Nullet, 1995).

En México se han realizado estudios de cuantificación en dos estados: **Chiapas**, donde se utilizó un colector de tipo SFC (Mundo-Molina et al., 1998); y **Veracruz**, donde se trabajó con un colector basado en el ASRC (Ponette-González et al., 2009). En ambos estudios, los promedios de captura fueron bastante bajos, con valores que no alcanzaban los 0.5 l/m²/d.

2.2.4 AMÉRICA DEL SUR

América del Sur ha sido pionera en la investigación de la niebla como recurso hídrico. Allí se ha desarrollado una metodología para cuantificar y recolectar el agua de niebla que ha sido exportada al resto de países del mundo. En la mayoría de países de la costa del Pacífico se han desarrollado investigaciones de este tipo, muchas de las cuales han derivado en proyectos de aprovechamiento. En muchos lugares de la costa es habitual la presencia de una densa capa de *Stratocumulus* proveniente del océano Pacífico, que es retenida por las cadenas montañosas litorales sin dar apenas precipitación, formando niebla en los lugares donde toma contacto. Este tipo de niebla es conocida en muchos países como *camanchaca*. La presencia constante de la *camanchaca*, unido a la carestía de agua y a la escasez de recursos económicos y técnicos en muchas áreas del continente, ha favorecido el uso de esta técnica sencilla y económica, que trata de extraer agua de la niebla anclada en sus montañas litorales.

Chile fue el primer país en desarrollar la técnica, además de albergar el proyecto de aprovechamiento más grande y ambicioso llevado a cabo hasta la fecha, el desarrollado para abastecer al municipio de Chungungo. A partir de entonces, la técnica se extendió por el resto de países vecinos y por otros continentes.

Tabla 2-4: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en América del Sur

País	Región o nombre del proyecto	Tipo de estudio
Chile	El Tofo	Aprovechamiento
Chile	Parque Nacional Fray Jorge	Aprovechamiento
Chile	Proyecto Falda Verde	Aprovechamiento
Chile	Proyecto Peñablanca	Aprovechamiento
Chile	Proyecto Santuario Padre Hurtado	Aprovechamiento
Chile	Alto Patache	Cuantificación
Chile	Cerro Guatalaya	Cuantificación
Chile	Cerro Moreno	Cuantificación
Chile	Paposo	Cuantificación
Colombia	Desierto de Guajira	Cuantificación
Colombia	Valle del Roldanillo	Cuantificación
Colombia	Proyecto Frisoles	Aprovechamiento
Ecuador	Nudo de Loja, Andes	Cuantificación
Ecuador	El Cráter	Aprovechamiento
Ecuador	Pachamama Grande	Aprovechamiento
Perú	Cerro Orara	Aprovechamiento
Perú	Lomas de Atiquipa	Aprovechamiento
Perú	Lomas de Mejía	Aprovechamiento
Perú	Lomas de Lachay	Aprovechamiento
Perú	Proyecto Collanac	Aprovechamiento
Perú	Proyecto Desierto Verde	Aprovechamiento
Venezuela	El Cañadón	Cuantificación
Venezuela	Isla Margarita	Cuantificación

Por la novedad que supuso y por el éxito tanto de la investigación como de la fase de aplicación, de todas las experiencias llevadas a cabo en **Chile**, destaca la de **El Tofo**, desarrollada en la costa norte de Chile, en una antigua explotación minera (Cereceda et al., 1992; Cereceda et al., 1997; Cereceda and Schemenauer, 1998; Schemenauer et al., 1988; Schemenauer and Cereceda, 1991; Schemenauer and Cereceda, 1994b). En 1987, investigadores del Departamento de Medio Ambiente de Canadá y de la Pontificia Universidad Católica de Chile, iniciaron un proyecto en El Tofo, a 780 m de altitud, con el objetivo de evaluar las posibilidades de abastecer de agua de niebla a una pequeña población de pescadores denominada Chungungo, situada a los pies de la colina donde se desarrolló la investigación. El número de colectores instalados, del tipo LFC, fue de 92 (figura 2-11). El agua recolectada en lo alto de la colina era conducida a través de una tubería de 6.2 km hasta el pueblo de Chungungo y una red de distribución lo llevaba a 106 casas (Schemenauer and Cereceda, 1994b). La calidad del agua recogida por los primeros 48 captadores instalados fue analizada en los primeros pasos de la investigación, considerándose aceptable para consumo humano (Schemenauer and Cereceda, 1992). El promedio de recolección de agua de niebla fue superior a 3 l/m²/d, lo que supuso una producción media de 15 000 l/d (Schemenauer and Cereceda, 2000). Sin embargo, tras 15 años de buenos resultados, la rotura progresiva de las mallas de los colectores debido al viento y la ausencia de mantenimiento de los equipos derivado de

los problemas en la gestión del proyecto entre los usuarios, provocó que en 2002 el sistema se estropease, requiriendo una reparación, volviendo desde entonces el pueblo de Chungungo a ser abastecido de agua a través de camiones cisterna (Gallicchio, 2003).



Figura 2-11: Captadores instalados en El Tofo para abastecer a la aldea de Chungungo (Chile) (Schemenauer and Cereceda, 2000)

El proyecto de El Tofo sirvió de base para la creación de una técnica para analizar y aprovechar el agua de niebla como recurso hídrico y rápidamente se extendió por diferentes zonas del país. De este modo, en 1998 se llevó a cabo un proyecto en el **Parque Nacional del Bosque de Fray Jorge**, donde el agua recolectada por 10 colectores LFC sirvió para realizar una reforestación, con promedios de captura de $3 \text{ l/m}^2/\text{d}$ (Canto and Cruzat, 2001; Cruzat, 2004); en **Falda Verde** el agua obtenida por 10 colectores LFC fue utilizada durante 2001-2010 por la asociación de pescadores para el cultivo bajo invernadero de aloe vera y tomates (Carter et al., 2007; Larrain et al., 2002) y ahora se utiliza con fines educativos (Klemm et al., 2012); en **Peñablanca**, donde el agua capturada se utiliza con fines educativos y para realizar una reforestación (Klemm et al., 2012); 10 captadores de niebla LFC instalados en Cerro Talinay sirvieron para suministrar agua al **Santuario de Padre Hurtado** y a varias escuelas de localidades cercanas entre 1999 y 2004 (Fog Newsletter, 1999; Klemm et al., 2012; Osses et al., 2000); en lugares como **Alto Patache**, **Cerro Guatalaya**, **Cerro Moreno** y **Paposo**, se

han realizado estudios de cuantificación utilizando colectores de tipo SFC (Cereceda et al., 2002; Larrain et al., 2002), teniendo el primero de ellos un registro de captación de niebla de 14 años, con una tasa promedio de captura de unos $6 \text{ l/m}^2/\text{d}$ (Klemm et al., 2012).

En **Colombia** se han realizado varios proyectos de investigación sobre el aprovechamiento del agua de niebla en los últimos años. Entre los años 2003 y 2004 se instalaron en el **Desierto de Guajira** dos colectores de tipo SFC, utilizando mallas de origen local y alcanzándose un promedio de captación de $1.4 \text{ l/m}^2/\text{d}$ (García and Arango, 2004). Posteriormente se llevaron a cabo trabajos de campo en varios emplazamientos del Valle del Cauca: en las proximidades del municipio de **Roldanillo** se instalaron en 2003 12 colectores SFC, en cuatro emplazamientos diferentes y dispuestos por parejas (figura 2-12). Se testaron diferentes tipos de malla, con valores de recolección medios entre 4.15 y $0.19 \text{ l/m}^2/\text{d}$ (Molina, 2007; Molina and Escobar, 2005; Molina and Escobar, 2008); en el municipio de **Frisoles** se ha implantado el primer sistema de aprovechamiento de agua de niebla, formado por un colector tipo LFC de 25 m^2 de superficie de captación, el cual es utilizado para abastecer a una escuela rural (Escobar et al., 2008; Escobar et al., 2010) (figura 2-13).



Figura 2-12: Doble pareja de SFC instalada en el valle de Roldanillo (Colombia). Cada pareja de colectores forma un ángulo de 90° entre ellos, para evaluar distintas orientaciones de recogida de niebla (imagen cedida por José Manuel Molina (Universidad del Estado de Colorado-USA))



Figura 2-13: Captador de niebla LFC instalado sobre la escuela rural de Frisoles (imagen cedida por José Manuel Molina (Universidad del Estado de Colorado-USA))

Ecuador es otro país bañado por el océano Pacífico que ha desarrollado estudios sobre la niebla e incluso puso en marcha un proyecto de aprovechamiento de grandes dimensiones. En el año 2002, se llevó a cabo un estudio sobre los *inputs* al sistema hidrológico en la Reserva Biológica San Francisco, localizada en la parte sur de los Andes ecuatorianos (**Nudo de Loja**), entre 1 800 y 3 200 m de altitud. El experimento constaba de seis estaciones meteorológicas, cada una de las cuales dotada con un captador de niebla de tipo SFC. Los resultados fueron muy sorprendentes y mostraron que el aporte de niebla puede llegar a suponer para la zona un 40 % adicional al total de precipitación (Rollenbech et al., 2007). Del mismo modo, en un lugar denominado “**El Cráter**”, a 15 km al norte de Quito y a unos 3 000 m de altitud, se lleva a cabo un proyecto de aprovechamiento de agua de niebla, la cual es utilizada para el abastecimiento de un restaurante. Dicho sistema está formado por un colector LFC de 48 m² de superficie de captación (Román, 1999) (figura 2-14). Pero sin duda, el proyecto de mayor envergadura se llevó a cabo en **Pachamama Grande**, una aldea indígena de 200 habitantes situada en una planicie a 3 700 m de altitud. En dicho lugar, entre 1995 y 1997, se instalaron 40 captadores de niebla de de tipo LFC de 50 m² de superficie plana y un depósito de almacenamiento de 80 000 de capacidad, que sirvió como suministro de agua para la población. Los valores de recolección medios alcanzados durante la primera fase de investigación fueron de 4 l/m²/d. Debido a los fuertes vientos de la zona que derribaron algunos de los captadores y a la poca implicación de la población en su reparación, el sistema ha sido abandonado (Henderson and Falk, 2001).



Figura 2-14: Colector LFC captando niebla en El Cráter (Ecuador) (imágenes cedidas por Roberto Román L. (Universidad de Chile))

Perú fue el primer país sudamericano que comenzó a seguir los pasos iniciados por Chile, cuando en 1990, la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional, subvencionó los fondos necesarios para realizar un estudio sobre el potencial de agua de niebla en **Cerro Orara**, a 35 km al norte de la capital peruana Lima, en un lugar a 3.5 km de la costa y a 430 metros de altitud. Los buenos resultados experimentales llevaron a dos compañías privadas a la construcción de dos sistemas de abastecimiento de agua a partir de la recolección de agua de niebla, utilizando colectores de tipo LFC, uno de ellos, en un colegio cercano a Lima, con un sistema de 1 200 m² de malla de recolección, y otro, en un parque al norte de Lima, con 500 m² de malla, utilizado con fines forestales. Los resultados experimentales mostraron un promedio de recolección de agua de niebla de 8.5 l/m²/d (Cereceda and Schemenauer, 1993; Cereceda and Schemenauer, 1998; Schemenauer and Cereceda, 1993; Schemenauer and Cereceda, 1994b; Schemenauer and Cereceda, 2000). Desde el año 2001 se lleva a cabo un proyecto de aprovechamiento de agua de niebla con fines forestales en las **Lomas de Atiquita**, en el desierto costero chileno-peruano situado en Arequipa, al sur de Perú. El proyecto tiene como principal objetivo el restaurar el entorno y preservar su biodiversidad, además de ofrecer a los habitantes de la Comunidad de Campesinos de Atiquita una nueva forma de generar ingresos respetuosa con el medio ambiente. El

sistema está formado por 28 captadores de niebla de tipo LFC, de 48 m² de superficie (12 x 4 m) cada uno, formando un total de 1 344 m² de superficie captadora (figura 2-15), almacenándose el agua recolectada en balsas de gran capacidad (figura 2-16). El promedio de captura de agua de niebla durante el periodo de evaluación fue extraordinariamente elevado, alcanzando un valor de 21.9 l/m²/d, con un máximo mensual en septiembre de 2005 de 66.5 l/m²/d. Durante la fase operacional, el promedio anual de agua captada ha sido de 8 500 m³, lo que supone un promedio de captación de 17.5 l/m²/d (Ortega et al., 2007; Villegas et al., 2007). También en **Lomas de Mejía**, entre 1993 y 1995, se llevó a cabo un proyecto operacional con 20 colectores de tipo LFC, de 48 m² de superficie (12 x 4 m) cada uno, formando un total de 960 m² de malla recolectora. La fase operacional supuso una producción anual en torno a 2 000 m³, lo que supone un promedio de captación aproximado de 5.7 l/m²/d. El agua recolectada fue utilizada en el riego por goteo de seis parcelas experimentales en donde se cultivan diferentes especies vegetales adaptadas al ambiente árido (*Acacia macracantha*, *Caesalpinia spinosa*, *Casuarina equisetifolia*, *Prosopis pallida*, *Heliotropum* spp, etc.). Una vez finalizado el proyecto, los captadores fueron desinstalados y las plantaciones siguen vivas y desarrollándose con el agua de niebla que ellas mismas captan (Cereceda et al., 1998; Cereceda and Schemenauer, 1998; Falciai and Giacomini, 2000; Jiménez et al., 2000; Semenzato et al., 1998). También en Lomas de **Lachay** (Marzol, 2005) y en **Collanac** (www.fogquest.org, (Cereceda, 2008)) se han puesto en marcha proyectos operacionales de menor escala utilizando colectores de tipo LFC con fines agrícolas.



Figura 2-15: Vista del sistema de captación de niebla instalado en Lomas de Atiquipa (Perú) (imagen cedida por Percy Jiménez y Luis Villegas (Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú))



Figura 2-16: Construcción de una balsa de 1 020 m³ en Lomas de Atiquipa (Perú) (imagen cedida por Percy Jiménez y Luis Villegas (Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú))

Un proyecto muy interesante que se está llevando a cabo en Perú es el denominado **Proyecto Desierto Verde**, el cual merece una mención aparte. En el año 2006, el Fondo de Exploración Mundial (*Global Exploration Fund*) perteneciente a las empresas *Bayern* y *National Geographic*, financió la puesta en marcha de un proyecto de aprovechamiento de agua de niebla a 16 km al sur de Lima. El proyecto tenía como objetivo captar agua de niebla en una zona extremadamente árida (la precipitación media es de 10 mm/año), pero con constante presencia de niebla durante seis meses al año (de junio a noviembre). El proyecto se llevó a cabo en el distrito de Villa María del Triunfo de Lima e implicó a tres aldeas (Bellavista, Los Ángeles y Quebrada Alta). La instalación estaba formada por cuatro captadores de tipo LFC de 32 m² de superficie de recolección (8 x 4 m), formando un total de 128 m² de superficie captora. A su vez, una superficie impermeable construida bajo los 800 árboles plantados, hacía que éstos funcionasen como captadores naturales de niebla, incrementando de este modo la superficie de recolección (figura 2-17). El sistema permitía obtener un volumen de agua de niebla de unos 600 l/d, lo que supone unos 4.6 l/m²/d (Lummerich and Tiedemann, 2009; Tiedemann and Lummerich, 2007; Tiedemann and Lummerich, 2010; Vince, 2013). Durante el primer año de trabajo, la niebla capturada por los colectores se utilizó para irrigar 800 árboles plantados junto a ellos. A partir del segundo año, los árboles hicieron de captadores naturales de la niebla y junto a los colectores artificiales, el agua capturada se utilizó para regar pequeñas parcelas agrícolas construidas al efecto (figura

2-18). A finales de 2007, una vez transcurridos los dos años de duración de la financiación del proyecto, el sistema se dejó en manos de los habitantes del distrito. Uno de los hitos del proyecto fue el diseño y construcción de un captador tipo LFC denominado *Eiffel*, cuyas tasas de captación son muy elevadas en comparación con el LFC tradicional (Lummerich and Tiedemann, 2009).

También se han publicado estudios sobre el aprovechamiento del agua de niebla en **Venezuela**. El primero que se dio a conocer se llevó a cabo entre los años 2005 y 2006 en la cordillera de los Andes, concretamente en un emplazamiento conocido como **El Cañadón**, a 2 200 m de altitud. Además de la evaluación del potencial de captura de niebla de la zona, otro aspecto interesante del experimento fue la comparación de distintos tipos de colectores, ya que en el estudio se utilizaron tanto colectores de tipo SFC como Juvik (Ataroff and Naranjo, 2007). Del mismo modo, durante el año 2005 la organización no gubernamental canadiense *FogQuest* trabajó en dos emplazamientos distintos de la **Isla Margarita**, utilizando para ello ocho colectores de tipo SFC, aunque no se describen los resultados obtenidos (www.fogquest.org).

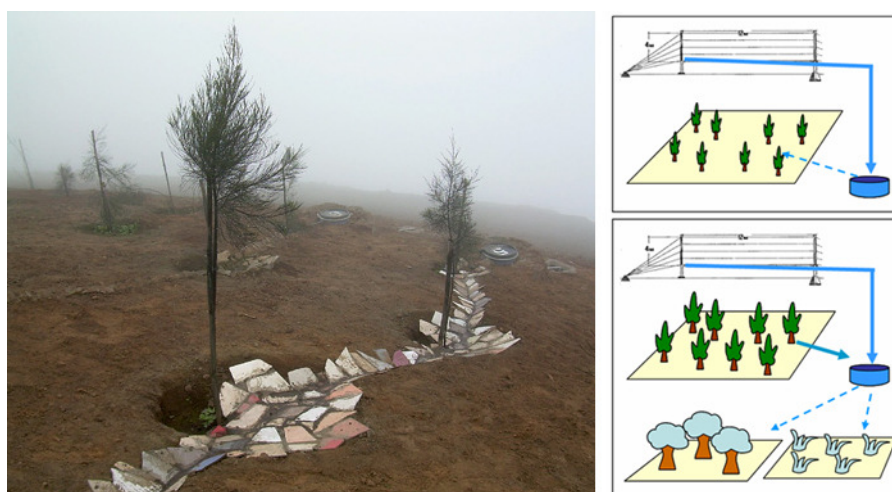


Figura 2-17: Detalle del sistema de captación de los árboles (Lummerich and Tiedemann, 2009) y esquema del sistema de aprovechamiento de agua de niebla instalado en el proyecto Desierto Verde en Perú (www.alimon.org)



Figura 2-18: Vista del sistema de aprovechamiento de agua de niebla del proyecto Desierto Verde (Perú) (imagen cedida por Anne Lummerich (organización no gubernamental Alimon))

2.2.5 ASIA

Varios países de la Península Arábiga, donde predomina el clima desértico, han realizado trabajos de investigación sobre la recolección de agua de niebla en los últimos años. En la República de Yemen se llegó incluso a poner en marcha un sistema de aprovechamiento, pero terminó fracasando por problemas en su gestión. En Nepal, a pesar de ser un país con elevados recursos de agua, el acceso a los mismos es complicado en determinados emplazamientos de montaña. Por ello, se han desarrollado y puesto en práctica con éxito diversos proyectos de aprovechamiento de agua de niebla en el país.

Tabla 2-5: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en Asia

País	Región o nombre del proyecto	Tipo de estudio
Arabia Saudí	Asir	Cuantificación
Irán	Khorassan	Cuantificación
Jordania	Mazar-Karak	Cuantificación
Nepal	Kalpokhari (Mabu VDC, Ilam)	Aprovechamiento
Nepal	Dhoje Danda (Danda Bazaar, Dhankuta)	Aprovechamiento
Nepal	Megma (Jogmai VDC, Ilam)	Aprovechamiento
Nepal	Templo de Pathivara (Taplejung)	Aprovechamiento
Omán	Dhofar	Cuantificación
Yemen	Hajja	Aprovechamiento
Yemen	Sadaa	Cuantificación

Arabia Saudí es uno de los países más secos del mundo, con una promedio de lluvia menor de 120 mm/año. La región carece de ríos permanentes y sus únicas fuentes de agua son la subterránea y la proveniente de sus más de 30 plantas desalinizadoras. Por ello, desde abril del año 2006, investigadores de la Universidad Rey Fahd de Petróleo y Minerales, estudian el potencial de recolección de agua de niebla en la región de **Asir**, al suroeste del país (Gandhidasan and Abualhamayel, 2007). El experimento se realizó comparando el agua capturada en tres emplazamientos diferentes, dos de ellos localizados en Al-Sooda (Rayda y el parque Al-Sahab) y otro en la ciudad de Abha, mediante la utilización de colectores de tipo SFC. Las altitudes de los tres emplazamientos estaban comprendidas entre 2 400 y 3 177 m (Al-hassan, 2009). En el año 2009 se diseñaron y construyeron dos colectores de tipo LFC, de 20 x 2 m de superficie de recolección en la región de Al-Sooda, para completar el experimento (Abualhamayel and Gandhidasan, 2010; Gandhidasan and Abualhamayel, 2012). Los resultados obtenidos fueron muy positivos, con tasas promedio de recolección superiores a 2 l/m²/d en el mejor de los emplazamientos. A su vez, la calidad del agua capturada también fue analizada durante el experimento, demostrándose como apta para el consumo humano según los estándares de la Organización Mundial de la Salud. Por

ello, se considera la niebla una fuente viable de agua tanto por magnitud como por calidad que complementa las ya existentes.

En **Irán**, entre los años 2004 y 2005 se llevó a cabo un estudio en la región de **Khorassan**, situada a 55 km al norte de Mashhad, en el que se trató de cuantificar el agua de niebla recolectada a través de diferentes tipos de captadores, todos ellos de tipo arpa, tanto planos como cilíndricos (Mousavi-baygi, 2008). Las cantidades de agua de niebla recolectadas fueron bastante bajas, con promedios anuales de $0.53 \text{ l/m}^2/\text{d}$. El colector que tuvo un mejor promedio de captación fue el de tipo cilíndrico doble. También en **Jordania** se realizaron estudios de captación de niebla durante los años 1992 y 1994, utilizando colectores SFC con malla de origen local, con tasas de recolección máximas mensuales de $8.5 \text{ l/m}^2/\text{d}$ y con una marcada estacionalidad (Al-Jayyousi and Mohsen, 1999; Tarawneh, 2004).

A pesar de ser un país con abundantes recursos de agua, en **Nepal** el acceso a la misma es en muchos casos complicado, especialmente en algunas regiones montañosas donde no llega el suministro o no hay fuentes naturales cercanas. Es por ello, que desde 1997 instituciones canadienses y nepalíes como *NEWAH* (Nepal Water for Health, www.newah.org.np), trabajan en el estudio de la recolección de agua de niebla en aquel país, para mejorar el acceso a este recurso a comunidades con dificultades (Bajracharya and Pokhrel, 2001; Mac Quarrie et al., 2001; Pokhrel and Mac Quarrie, 2001). En la actualidad existen en funcionamiento seis proyectos de aprovechamiento de agua de niebla (Klemm et al., 2012). El primer proyecto operacional se llevó a cabo en **Kalpokhari (Mabu VDC, Ilam)**, donde se instalaron unos 50 m^2 de superficie de recolección a base de colectores de tipo LFC. El proyecto fracasó por disputas por los terrenos donde se asentaba (Bajracharya and Pokhrel, 2001). Posteriormente se instalaron seis colectores LFC, sumando un total de 252 m^2 de superficie de captación, para suministrar agua al municipio de **Dhoje Danda (Danda Bazaar, Dhankuta)** (Bajracharya and Pokhrel, 2001), siendo éste el proyecto operacional más antiguo del país. También existe un proyecto de aprovechamiento funcionando en una escuela infantil (*Saraswati Primary School*) de 50 estudiantes en la comunidad de **Megma**, situada a 2 900 de altitud, donde existen dos colectores de tipo LFC formando un total de 67.2 m^2 de malla captadora (Apigian, 2005). Otro proyecto de idénticas características técnicas al anterior se está llevando a cabo en el **templo de Pathivara (Taplejung)**, a 3 800 m de altitud, donde el sistema permite obtener, en los meses de verano, un volumen de agua de niebla de unos 1 000 l/d, con un promedio anual del sistema de unos $3.6 \text{ l/m}^2/\text{d}$. El agua abastece una fuente que es utilizada por los peregrinos (Apigian, 2005).

En otro país asiático en donde se ha evaluado la posibilidad de implantar un sistema de abastecimiento de agua de niebla ha sido en el **Sultanato de Omán**, cuyos estudios realizados entre 1989 y 1990 destacan por sus elevados promedios de captación, en torno a $30 \text{ l/m}^2/\text{d}$ durante los tres meses que duró el monzón (Alesh, 1998; Cereceda and Schemenauer, 1998). En el año 2005 se llevó a cabo un nuevo estudio en la zona, el cual puso en práctica tres colectores de tipo LFC con diferente malla, con el fin de poder comparar distintos materiales (Abdul-Wahab et al., 2007a; Abdul-Wahab and Lea, 2008) y conocer la calidad química del agua recolectada (Abdul-Wahab et al., 2007b), la cual resultó adecuada para consumo humano. A su vez, en el año 2006, durante la época del monzón, se puso en marcha un nuevo estudio sobre captación de niebla

utilizando como colectores tres tipos de árboles: una higuera, un limonero y un tamarindo, bajo los cuales se instalaron depósitos que recogían el agua capturada por los árboles (Abdul-Wahab et al., 2009; Abdul-Wahab and Lea, 2008). Trabajos más recientes confirman la productividad de la niebla en el país (Abdul-Wahab et al., 2010).

En la **República de Yemen**, país asiático bañado por el mar Rojo, la organización no gubernamental canadiense *FogQuest* lleva trabajando desde 2002 en dos emplazamientos en diferentes zonas del país, habiendo logrado poner en práctica uno de ellos en el noroeste del país, concretamente en la gobernación de **Hajja**, en un área conocida como Mabijan (Abdul-Wahab and Al-Hinai, 2007; FogQuest News, 2003; Nomanan, 2007; Schemenauer et al., 2004). En este proyecto se construyeron 25 colectores de niebla de tipo LFC de 40 m² de superficie, lo que supuso un total de 1 000 m² de superficie de exposición. Tras unos meses de funcionamiento, finalmente el proyecto fracasó por falta de mantenimiento (www.fogquest.org). También se evaluó la potencialidad de captación de niebla en la gobernación de **Sadaa**, al norte del país, utilizando para ello 10 colectores tipo SFC con malla de origen local y obteniéndose unos valores promedio cercanos a 9.5 l/m²/d en los mejores emplazamientos estudiados (Osses et al., 2004).

2.2.6 EUROPA

En los países del sur de Europa, la combinación del clima mediterráneo de veranos largos y secos, junto al elevado consumo de agua provocado por la alta densidad de población y por la intensa actividad agrícola e industrial, hacen del agua un recurso escaso. Sin embargo, hasta la fecha no se ha puesto en marcha ningún proyecto de aprovechamiento de agua de niebla en la región. Tan sólo en España y Croacia se han desarrollado trabajos sobre la captación de agua de niebla, pero sólo con fines de investigación.

Tabla 2-6: Proyectos de aprovechamiento o investigación sobre el agua de niebla llevados a cabo en Europa

País	Región o nombre del proyecto	Tipo de estudio
Croacia	Monte Velebit	Cuantificación
España	Barcelona (Montseny)	Cuantificación

Desde el año 1954, el Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional de **Croacia**, ha incorporado en la estación meteorológica instalada a mayor altitud del país, el **Monte Velebit**, a 1 594 m de altitud, un sistema de recolección de agua de niebla, con el objetivo de cuantificar su aporte. El primer captador utilizado fue uno cilíndrico de tipo Grunow, instalado en 1954. Desde el verano del año 2000 se utiliza un colector de niebla de tipo SFC (Mileta, 1998; Mileta, 2001; Mileta, 2004; Mileta, 2007). En verano, la tasa de captura alcanza un promedio de 4 l/m²/d (Klemm et al., 2012), mientras que el

máximo volumen de agua capturada en un día sin lluvia fue de 19 l/m² (Mileta and Likso, 2010).

En la **Península Ibérica**, sin mencionar las experiencias llevadas a cabo en la vertiente mediterránea y que son el objeto de esta tesis, los únicos experimentos conocidos que han tratado de cuantificar el agua de niebla fueron realizados en Cataluña, concretamente en el **Montserrat**, a 1 712 m de altitud, durante dos meses en la primavera de 1996. En el experimento se utilizó un captador de tipo SFC, de 0.5 x 0.5 m de superficie captadora, forrado con malla de 35 % de cobertura, llegando a recoger 4 litros en un día (Rey, 1996).

Capítulo 3

Metodología, Instrumentación y Área de Estudio

El modo de dar una vez en el clavo es dar cien veces en la herradura

Miguel de Unamuno, escritor

3.1 METODOLOGÍA

Como ya se ha visto en el Capítulo 2, en la actualidad no se conocen estudios cuantitativos sobre el agua de niebla en la Península Ibérica, tan sólo un pequeño experimento de dos meses de duración realizado en el Turó de l'Home, la cima del macizo del Montseny, en Barcelona (Rey, 1996). Por ello, en este trabajo, para elaborar la metodología y los instrumentos de medida, ha sido fundamental la revisión bibliográfica de las experiencias vividas en otras partes del mundo, que han servido como base para la toma de muchas decisiones, a la vez que ha habido que aventurarse en muchas otras, como parte de un trabajo de investigación poco estudiado y que pretende ser un primer paso para futuras investigaciones. También ha sido importante la toma de contacto con personas que trabajan día a día en el monte, como los guardas forestales, los responsables de Parques Naturales y los vigilantes forestales de todas las comunidades autónomas visitadas, así como la experiencia del personal del CEAM en trabajos de campo, que junto al estudio climático-geográfico del territorio, ha permitido localizar los emplazamientos más idóneos, así como otros enclaves potenciales que a buen seguro resultarían óptimos para realizar experiencias similares a la descrita en esta tesis.

Para alcanzar los objetivos propuestos al inicio de la investigación, el trabajo se dividió en cuatro fases: de estudio bibliográfico, de diseño, de ejecución y de explotación de resultados (figura 3-1). A continuación se explica las labores realizadas en cada una de ellas:

1. **Fase de estudio bibliográfico:** con el objetivo de adquirir un mayor conocimiento de la niebla que sirviera de base para las siguientes etapas, la primera fase de la investigación se centró en el estudio de la niebla, de trabajos previos sobre su recolección por métodos pasivos y de las características geográficas y climatológicas del litoral este de la Península Ibérica, de la siguiente manera:

- 1.1. La primera etapa de la investigación sirvió para profundizar en el **conocimiento teórico de la niebla**, haciendo una revisión de la bibliografía básica existente sobre la génesis y tipos de niebla, que permitiera determinar qué clase de niebla se puede dar con más frecuencia en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica. Las características climatológicas de la costa mediterránea peninsular, con vientos frecuentes de componente marítima cargados de humedad, la presencia de cadenas montañosas cercanas a la costa que favorecen el ascenso de los vientos y a su vez interceptan las nubes bajas que se dirigen hacia la costa y también, la experiencia de campo de los guardas y vigilantes forestales públicos y del personal del CEAM, sirvió para encaminar el estudio hacia las nieblas de advección y las nieblas orográficas.

- 1.2. La segunda parte de la investigación se basó en la **revisión bibliográfica** de los trabajos realizados en otros lugares del mundo, en donde se ha pretendido

cuantificar y/o utilizar el agua de niebla. Esta revisión de la literatura científica se ha centrado en aquellos estudios encaminados a la recolección y cuantificación del agua de niebla por métodos pasivos y a su posterior aprovechamiento como fuente alternativa de agua. La revisión bibliográfica de las experiencias desarrolladas en otros lugares del mundo ha servido como base para la planificación de esta investigación.

1.3. La tercera parte de la investigación consistió en el **estudio climático-geográfico del territorio**, a fin de determinar sectores potenciales para la captación de niebla en la región que discurre entre el Pirineo Oriental y el Cabo de Gata. El trabajo realizado en las etapas anteriores, permitió acotar las áreas a estudiar, analizando las zonas descritas por el personal experto consultado y las que cumplieran la mayor parte de las recomendaciones relatadas por Schemenauer y Cereceda (1994b) como adecuadas para la captación pasiva de nieblas de advección.

2. **Fase de diseño:** la segunda fase del trabajo consistió en el diseño del experimento. Por un lado, se diseñaron y construyeron los colectores de agua de niebla; por otro, se seleccionaron los emplazamientos donde instalar los colectores; y por último, se establecieron los protocolos de medida de las variables meteorológicas, de la siguiente manera:

2.1. La primera parte de esta fase consistió en el **diseño de un captador de niebla** experimental que permitiera alcanzar los objetivos principales propuestos. Posteriormente se construyeron los captadores de niebla diseñados. A su vez, se determinaron los sensores meteorológicos necesarios para completar el experimento, así como el material necesario para su colocación óptima en el campo. En total, se han utilizado tres tipos de colectores diferentes de agua de niebla, dos de ellos cilíndricos y experimentales, y otro plano de tipo industrial.

2.2. A partir del estudio climático-geográfico del territorio, se realizó una campaña de campo para valorar *in situ* los emplazamientos seleccionados previamente. Esta fase sirvió para acotar aun más los emplazamientos potenciales y realizar la **selección definitiva de los emplazamientos** donde ubicar los colectores. Finalmente, se iniciaron las gestiones para averiguar los propietarios de las parcelas elegidas y solicitar las pertinentes autorizaciones de instalación. Una vez conseguidos los permisos por parte de los propietarios de las parcelas, se tramitaron con las respectivas administraciones públicas locales y autonómicas las autorizaciones para la instalación de los colectores. Esta etapa fue una de las más arduas del trabajo, ya que en algunos casos, la obtención de los permisos por parte de las administraciones públicas se dilató más de un año.

2.3. Una vez diseñados y contruidos los captadores de agua de niebla, y seleccionados los emplazamientos donde se pretendían ubicar, se fijaron la **rutina y protocolos de medición del agua captada** y del resto de variables climáticas empleadas en la investigación.

3. **Fase de ejecución:** tras la fase de diseño del experimento, se pasó a poner en marcha la Red de Colectores, así como los protocolos para el control de calidad de los datos meteorológicos. Durante esta fase se generaron dos bases de datos que incluían la información básica de la investigación. La metodología empleada fue la siguiente:

3.1. A medida que se fueron obteniendo los permisos administrativos, se instalaron progresivamente en campo todos los colectores de agua de niebla en los emplazamientos seleccionados, creando de este modo una **Red de Colectores de Agua de Niebla en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica**.

3.2. A su vez, se fijaron **revisiones periódicas** para la limpieza de los conductos de agua y chequeos rutinarios de cada captador de niebla de la Red de Colectores. Del mismo modo, se realizaron **visitas eventuales** a los colectores en los casos en que se detectaba una avería o error en la medición de algún sensor.

3.3. Toda la información generada durante las visitas realizadas y cualquier detalle relevante que pudiera influir en la calidad de la información meteorológica generada, se incluyó en una base de datos. Esta **base de datos recogía la información histórica** o “metadatos” en términos estadísticos de cada uno de los colectores de la Red. Como ejemplo, esta base de datos contenía información como las visitas realizadas, tareas efectuadas, incidencias observadas, cambio de sensores, etc. Esta información ha sido muy valiosa a la hora de analizar los datos meteorológicos obtenidos.

3.4. Con la información generada, se diseñó un **protocolo de control de calidad de los datos meteorológicos** obtenidos. Para ello, fue necesaria la creación de un *software* específico. Dicha herramienta informática permitió, entre otras cosas, la graficación de las variables climáticas y la comparación de los valores obtenidos por cada colector con estaciones meteorológicas cercanas, todo ello de manera diaria, permitiendo un control exhaustivo de todos los equipos disponibles en campo y mejorando de este modo la calidad de los datos meteorológicos registrados por los colectores de la Red.

3.5. Los datos obtenidos, tras pasar un filtro de depuración que evita determinados errores en las medidas, se incorporaron a una **base de datos de registros meteorológicos**, que era uno de los objetivos básicos de la investigación dado que el interés inicial era cuantificar el agua de niebla en este sector de la cuenca mediterránea.

4. **Fase de explotación de resultados:** con la información generada en la fase anterior, recogida en las dos bases de datos creadas al efecto, la última fase de la investigación consistió en la publicación de los resultados obtenidos en los foros científicos y la realización de esta tesis doctoral, la cual recoge con detalle todo el trabajo realizado.

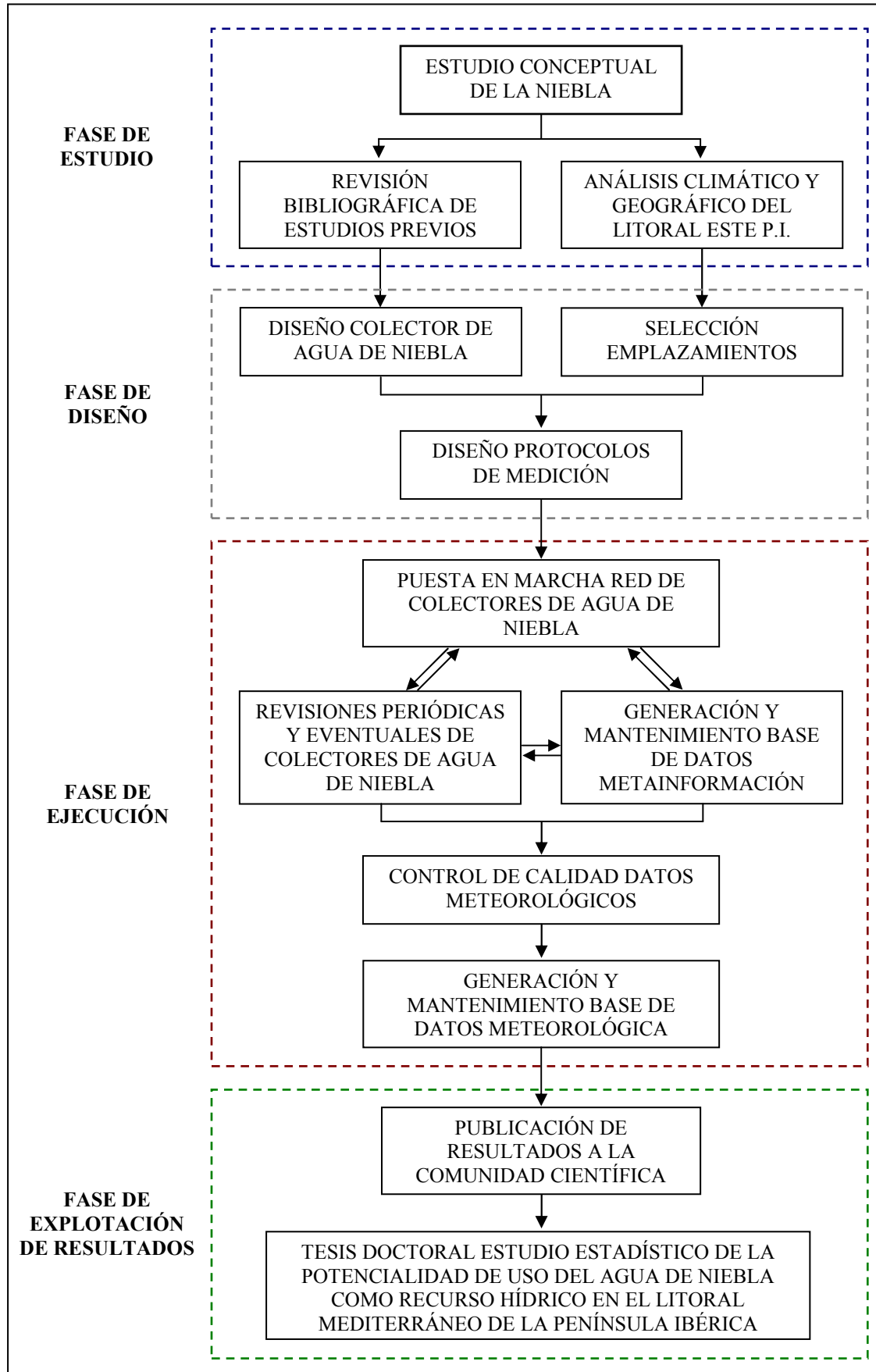


Figura 3-1: Estructura de la investigación

3.2 INSTRUMENTACIÓN

El análisis de los diferentes tipos de colectores de niebla realizado en el Capítulo 2 permitió conocer el abanico de modelos utilizados en estudios previos, así como sus principales características.

En función de su forma, los colectores de niebla se pueden clasificar en planos o cilíndricos. Se optó por elegir un modelo de **colector de niebla de tipo cilíndrico** en lugar de uno de tipo plano, debido a que el primer tipo de sensor es omnidireccional y presenta una exposición uniforme a los vientos de todas las direcciones, independientemente de la orientación en que se instale. Por el contrario, los colectores de niebla de tipo plano o pantalla, para que su eficacia de captación sea máxima, se deben instalar perpendicularmente a la dirección que porta los mayores volúmenes de niebla, siendo más adecuada su colocación en los emplazamientos en donde está bien documentada dicha dirección o donde, por las características geográficas del terreno, se pueda suponer con seguridad cuál va a ser la misma. En nuestro caso, al no conocerse con seguridad las direcciones de viento óptimas para la recolección de niebla en todos los emplazamientos de la Red, se decidió utilizar colectores omnidireccionales en la fase experimental. Este tipo de sensor, utilizado conjuntamente con sensores que registraban la dirección y velocidad del viento, permitió cuantificar la tasa de recolección de agua de niebla, así como las direcciones óptimas de captura en todos los emplazamientos analizados.

En cuanto al material de recolección, los captadores de niebla pueden dividirse entre los que utilizan malla y los de tipo arpa, es decir, aquellos que usan hilos dispuestos verticalmente, pudiéndose en ambos casos utilizar indistintamente materiales plásticos o metálicos. En la primera fase de nuestra investigación se diseñó y construyó un colector de niebla cilíndrico de tipo arpa, basado en el modelo ASRC (Falconer and Falconer, 1980), pero utilizando hilo de nylon como material de recolección. Se seleccionó este material en lugar de teflón o de algún metal, debido a su bajo coste y a la facilidad para poder trabajarlo (Fischer and Still, 2007). En una segunda fase de la investigación, se diseñó y construyó un colector de niebla cilíndrico de tipo malla, el cual consiguió reducir los costes de construcción, además de utilizar para la captación el mismo tipo de material que el SFC (Standard Fog Collector). La malla utilizada fue de tipo *raschel* y de bajo coste, adquirida en un proveedor local, de modo que se asegurase su disponibilidad en caso de ampliación de la Red de Colectores y permitiese su reposición con facilidad en caso de rotura de algún equipo.

El **proceso de recolección** de agua de niebla es simple. Las gotas de agua suspendidas en el aire y arrastradas por el viento, chocan contra la superficie captadora (hilos de nylon o malla) y a medida que crecen por el impacto de nuevas gotas, caen por gravedad deslizándose hasta un disco inferior donde se acumula. El agua condensada acumulada en este disco, es conducida por medio de una superficie inclinada hacia los agujeros de desagüe, los cuales están conectados a unos tubos de silicona. Estos tubos

de silicona unen los agujeros de drenaje del colector con un pluviómetro de balancín que mide el agua recolectada, la cual, tras pasar por el pluviómetro, es canalizada y expulsada al exterior. El volumen de agua de niebla recolectado por unidad de área (l/m^2) se obtiene dividiendo el volumen de agua recogido por la superficie efectiva de recolección del colector.

Para realizar la investigación se diseñaron y construyeron tres tipos diferentes de captadores de agua de niebla, ya que no existen en el mercado sensores de este tipo. En un primer paso, se construyó un colector de niebla experimental de tipo cilíndrico, del cual se realizaron dos versiones, una que utiliza como material de recolección hilo de nylon y otra que utiliza malla plástica. Este colector, de pequeñas dimensiones, se utilizó en modo experimental, para realizar la prospección del potencial de agua de niebla en todos los emplazamientos de la Red de Colectores. En un segundo paso, se confeccionó un colector plano de tipo LFC de grandes dimensiones, con el objetivo de recolectar agua de manera industrial para utilizarla en una aplicación experimental. En los siguientes apartados se describen con detalle los colectores utilizados en esta tesis.

3.2.1 COLECTORES EXPERIMENTALES DE TIPO CILÍNDRICO

Con el principal objetivo de cuantificar el agua de niebla, se diseñó un colector de tipo cilíndrico de pequeñas dimensiones, el cual se instaló en todos los puntos que conforman la Red de Colectores. Se realizaron dos versiones de este sensor, siendo el material de recolección la principal diferencia entre ambos. En un primer lugar, se diseñó un colector de niebla que utilizaba hilo de nylon como material de captura. Este tipo de colector fue instalado en los primeros años de la experiencia (2003-2008) y forma parte de los equipos utilizados en los emplazamientos más longevos de la Red. En una segunda fase del experimento y con el objetivo de disminuir los costes de fabricación, se diseñó un nuevo colector experimental, de similares dimensiones al anterior, pero que empleaba malla plástica como material de captación. Este nuevo sensor se comenzó a utilizar en campo a partir del año 2009 a medida que se iba ampliando los emplazamientos estudiados. A su vez, también se utilizó para sustituir algunos equipos averiados.

Ambos dispositivos, al carecer de partes móviles y no requerir suministro energético para su funcionamiento, actúan como colectores pasivos de agua de niebla, requiriendo la presencia de viento para su óptimo funcionamiento. Las características principales de ambos colectores se describen a continuación:

1. **Colector de niebla cilíndrico de tipo arpa:** se trata de un modelo diseñado y construido artesanalmente, basado en el modelo de Falconer y Falconer (1980), conocido como colector ASRC (Atmospheric Science Research Center, State University of New York). Consiste en un cilindro, de 26 cm de diámetro y 46 cm de altura, formado por cinco filas concéntricas de 200 hilos de nylon de 0.8 mm de diámetro cada uno y con una separación entre ellos de 1.8° . En total, 1 000 hilos de nylon dispuestos verticalmente y unidos por dos discos de poliamida, formando una superficie efectiva de recolección de 0.12 m^2 ($0.46 \times 0.26 \text{ m}$). El coste de los materiales del sensor es de unos 112 € y su construcción

requiere una dedicación aproximada de unas 60 horas de una persona (figura 3-2).



Figura 3-2: Colector de niebla cilíndrico de tipo arpa, elaborado con hilo de nylon como material de recolección

2. **Colector cilíndrico de tipo malla:** el modelo, también construido manualmente por personal del CEAM, es una mezcla de los modelos ASRC de Falconer y Falconer (1980) y el SFC (Standard Fog Collector) (Schemenauer and Cereceda, 1994a). Se trata de un colector con forma cilíndrica, formado por dos discos de PVC como bases y una malla que actúa como superficie colectora uniendo ambos discos por su parte más externa. Este sensor mantiene las medidas del colector de tipo arpa, pero varía ligeramente su forma, adquiriendo un diseño hiperbólico debido a la tensión de la malla sobre los discos de PVC que lo limitan en sus extremos. Esta forma hiperbólica es tenida en cuenta a la hora del cálculo de la sección eficaz del colector (figura 3-3). Como material de captura se emplea malla tipo *raschel*, instalada en capa simple, fabricada con

monofilamento de polietileno de alta densidad y resistente a la radiación UV, de bajo coste y adquirida en una tienda local de material agrícola (referencia: Ostende 1050, adquirida en Projar S.A. (www.projar.es)). La malla tiene un porcentaje de cobertura del 55 %, está tejida con la técnica *raschel*, emplea fibra con forma cilíndrica y está cosida en modo rectangular (figura 3-4). El coste de los materiales del sensor es de unos 90 € y su construcción requiere una dedicación aproximada de unas 32 horas de una persona.



Figura 3-3: Colector de niebla cilíndrico de tipo malla, elaborado con malla tipo *raschel* como material de recolección

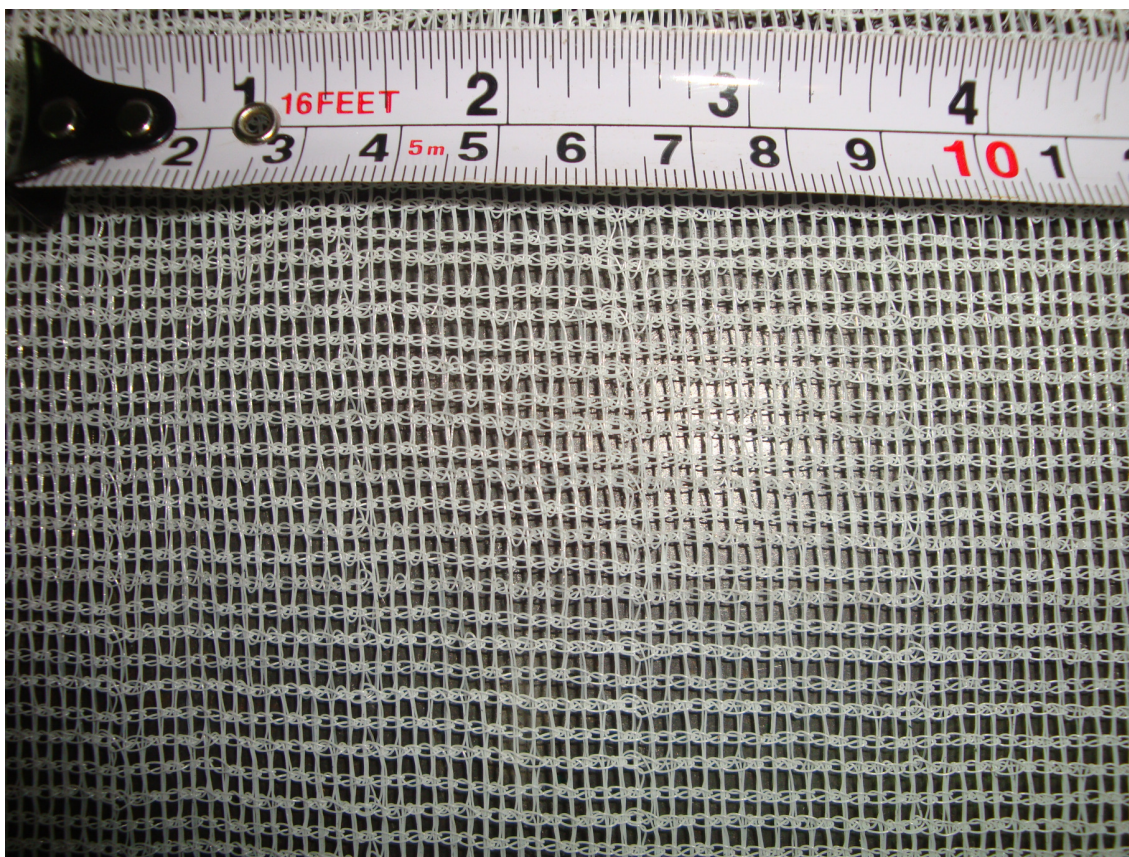


Figura 3-4: Malla utilizada como material de recolección, adquirida en Projar, S.A.

La disposición del colector en el conjunto del sistema de captación de agua de niebla es la misma, independientemente del tipo que sea (arpa o malla). El colector es montado en la parte superior de un mástil de acero galvanizado de 3 metros de longitud, el cual se fija sobre el terreno mediante una base abatible (figura 3-5). En la parte superior del colector, se coloca un protector circular de polipropileno, de 60 cm de diámetro, que tiene por objeto evitar que el agua de lluvia entre en el colector. Este protector hace a su vez las funciones de pluviómetro en el sistema que contiene el colector de niebla de tipo malla. Para darle mayor solidez al colector y evitar balanceos producidos por el viento, el mástil de acero se refuerza con tres cables del mismo material sujetos por uno de sus extremos en su parte superior, adecuadamente tensados y anclados al suelo.



Figura 3-5: Base abatible utilizada para sujetar el mástil que da enganche a todo el sistema de prospección de agua de niebla. La base cuenta con una bisagra que permite llevar el equipo a nivel del suelo

Para completar la experiencia, se añaden diversos sensores meteorológicos al mástil de acero a diferentes alturas. Los sensores meteorológicos que completan el sistema, junto a las alturas a la que están instalados (a la izquierda, valores del colector de tipo arpa; a la derecha, del de tipo malla) son, de arriba abajo (figura 3-6):

- Sensores de viento: un anemómetro y una veleta, a 4/4 m de altura (modelo 7914, marca Davis Instruments)
- Un pluviómetro que registra el agua de lluvia, a 4/3.5 m de altura (modelo 7856M, marca Davis Instruments)
- Cuatro/dos rejillas de humectación, que dan una respuesta eléctrica ante la deposición de las gotas de agua suspendidas en el aire, a 3/3.5 m de altura (modelo 237F, marca Campbell Scientific LTD)
- Un sensor de temperatura del aire, a 1.6/1.6 m de altura (modelo HMD50Y, marca Vaisala)
- Un sensor de humedad relativa del aire, a 1.6/1.6 m de altura (modelo HMD50Y, marca Vaisala)

El agua capturada por el colector de niebla y por el pluviómetro, es conducida a través de unos tubos de silicona al interior de una caja intemperie, la cual contiene dos pluviómetros independientes para la medida del volumen recolectado de agua de niebla y de la lluvia respectivamente (figura 3-7). Todos los pluviómetros utilizados en la experiencia fueron calibrados previamente por personal especializado en CEAM.

La adquisición automática de los datos generados por los sensores meteorológicos se realiza a través un sistema de adquisición de datos o *datalogger*, el cual se encuentra situado en el interior de una caja intemperie, junto al sistema de comunicación y al de alimentación (figura 3-8). Los modelos de *datalogger* utilizados han sido CR510, CR200 y CR10X (algún caso), todos ellos de la marca Campbell Scientific LTD.

El sistema de comunicación está formado por un módem y su correspondiente antena, pudiendo funcionar a través de una tarjeta SIM por medio de la red GSM o GPRS, dependiendo de la cobertura de cada emplazamiento. Los modelos de módem utilizados han sido TC65 de la marca Siemens y WMOD2 de Wavecomm.

El sistema de alimentación se compone de una batería de 12 V y 16 Ah (marca Sonnenschein, modelo A512/16G5) junto con un regulador de carga (marca Helios, modelo HT8), el cual en algunos casos forma parte del *datalogger*, y un panel solar de 10 W (marca BP Solar, modelo BP1210). Los sensores y demás equipos son alimentados a partir de este sistema de alimentación.

Las variables meteorológicas registradas en cada punto de la Red, así como el periodo de muestreo de cada una de ellas, han sido las siguientes:

- Dirección del viento: promedio vectorial diezminutal de la resultante de la dirección del viento, con un muestreo cada 6 segundos, en grados.
- Desviación estándar de la dirección del viento: desviación estándar del promedio vectorial diezminutal de la dirección del viento, con muestreo cada 6 segundos, utilizando el algoritmo de Yamartino, en grados.
- Velocidad del viento: promedio escalar diezminutal de la velocidad del viento, con un muestreo cada 6 segundos, en m/s.
- Desviación estándar de la velocidad del viento: desviación estándar del promedio escalar diezminutal de la velocidad del viento, con muestreo cada 6 segundos, en m/s.
- Velocidad máxima del viento: racha máxima de la velocidad escalar del viento, calculado a partir de la media móvil cada 12 segundos, en m/s.
- Temperatura del aire: promedio escalar diezminutal de la temperatura del aire, con un muestreo cada 60 segundos, en grados centígrados.
- Humedad relativa del aire: promedio escalar diezminutal de la humedad relativa del aire, con un muestreo cada 60 segundos, en tanto por ciento.

- Batería: promedio escalar diezminutal del nivel de batería, con un muestreo cada 600 segundos, en voltios.
- Precipitación: precipitación acumulada en 10 minutos, con un muestreo cada 600 segundos, en mm.
- Niebla: niebla acumulada en 10 minutos, con un muestreo cada 600 segundos, en l/m^2 .
- Índice de humectación: promedio escalar diezminutal del nivel de humectación, con un muestreo cada 60 segundos, adimensional (0-1).

Por tanto, los datos registrados por cada *datalogger* de la Red de Colectores han sido diezminutales, lo que ha supuesto un total de 144 datos al día por cada variable y por cada colector de la Red. En total, 11 variables han sido monitorizadas por cada colector que conforma la Red, lo que supone 1 584 datos/día-colector (11 x 144) y 578 160 datos/año-colector (1 584 x 365).

Los datos registrados por cada *datalogger* de la Red eran enviados vía telefónica a un servidor situado en las oficinas del CEAM. Posteriormente, personal experto, utilizando *software* específico programado a tal efecto, procedía al control de calidad de los datos meteorológicos. Básicamente este control de calidad estaba compuesto por una etapa de filtrado automático de datos anómalos a través del uso de valores límite, una segunda fase de graficación de las variables meteorológicas y un último paso de comparación con estaciones meteorológicas cercanas. Tras pasar por este control de calidad, los datos generados por todos los colectores de la Red fueron incorporados a una base de datos de registros meteorológicos.

El coste de los equipos, sin contar el colector de niebla en si, fue de unos 2 000 €, mientras que para el ensamblado se requiere la dedicación de una persona durante 35 horas. Para su instalación en campo se requiere el trabajo de tres personas durante ocho horas cada una.

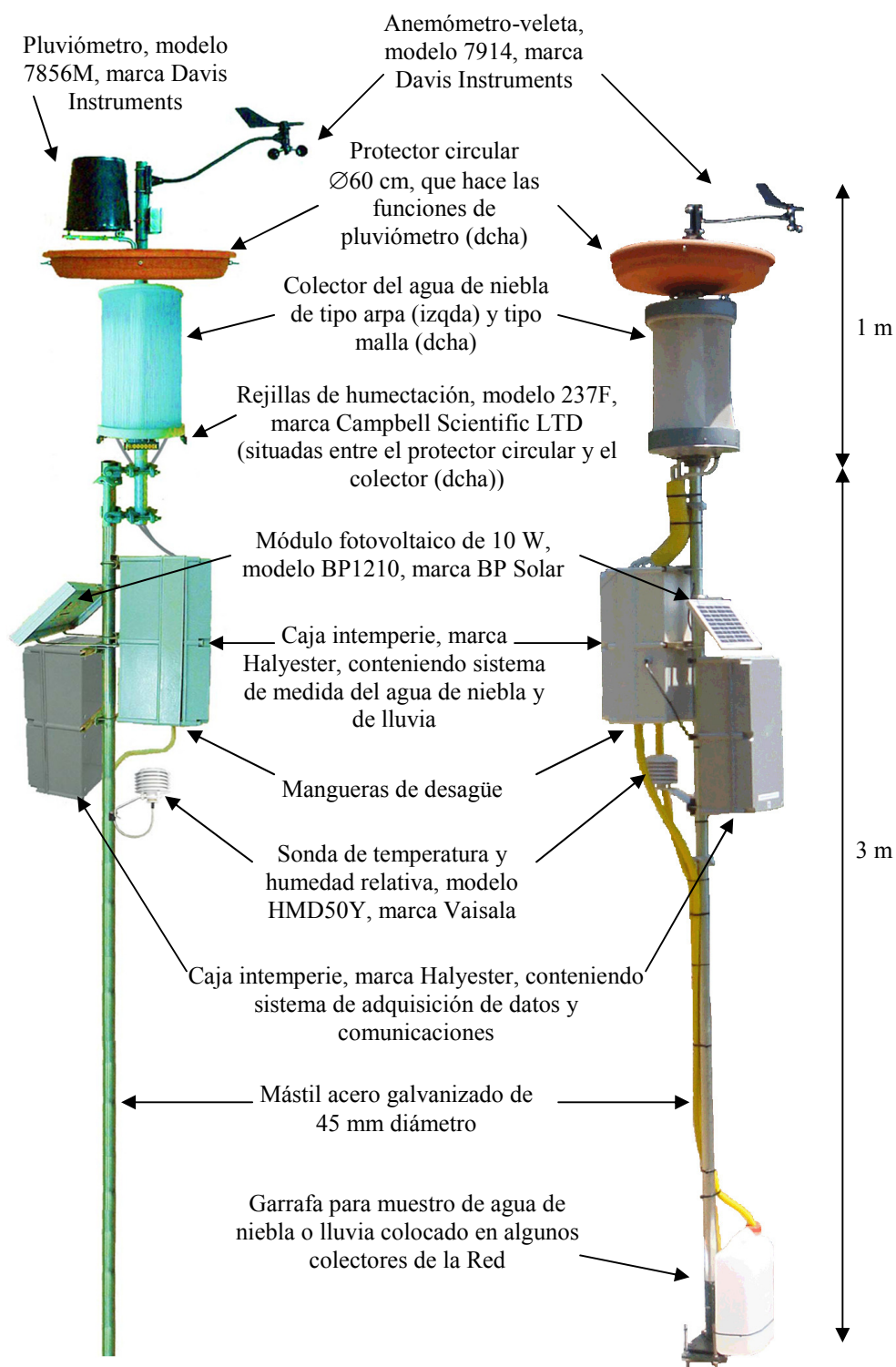


Figura 3-6: Sistema integrado para la investigación del potencial de captura de agua de niebla, con colector de tipo arpa (izquierda) y colector de tipo malla (derecha), ambos cilíndricos



Figura 3-7: Caja intemperie, que contiene dos pluviómetros, uno para la medición del volumen de agua capturada por el colector de niebla (arriba) y otro para la medida de la precipitación (abajo). Una vez contabilizada, el agua es conducida hacia el exterior a través de los embudos y mangueras de desagüe

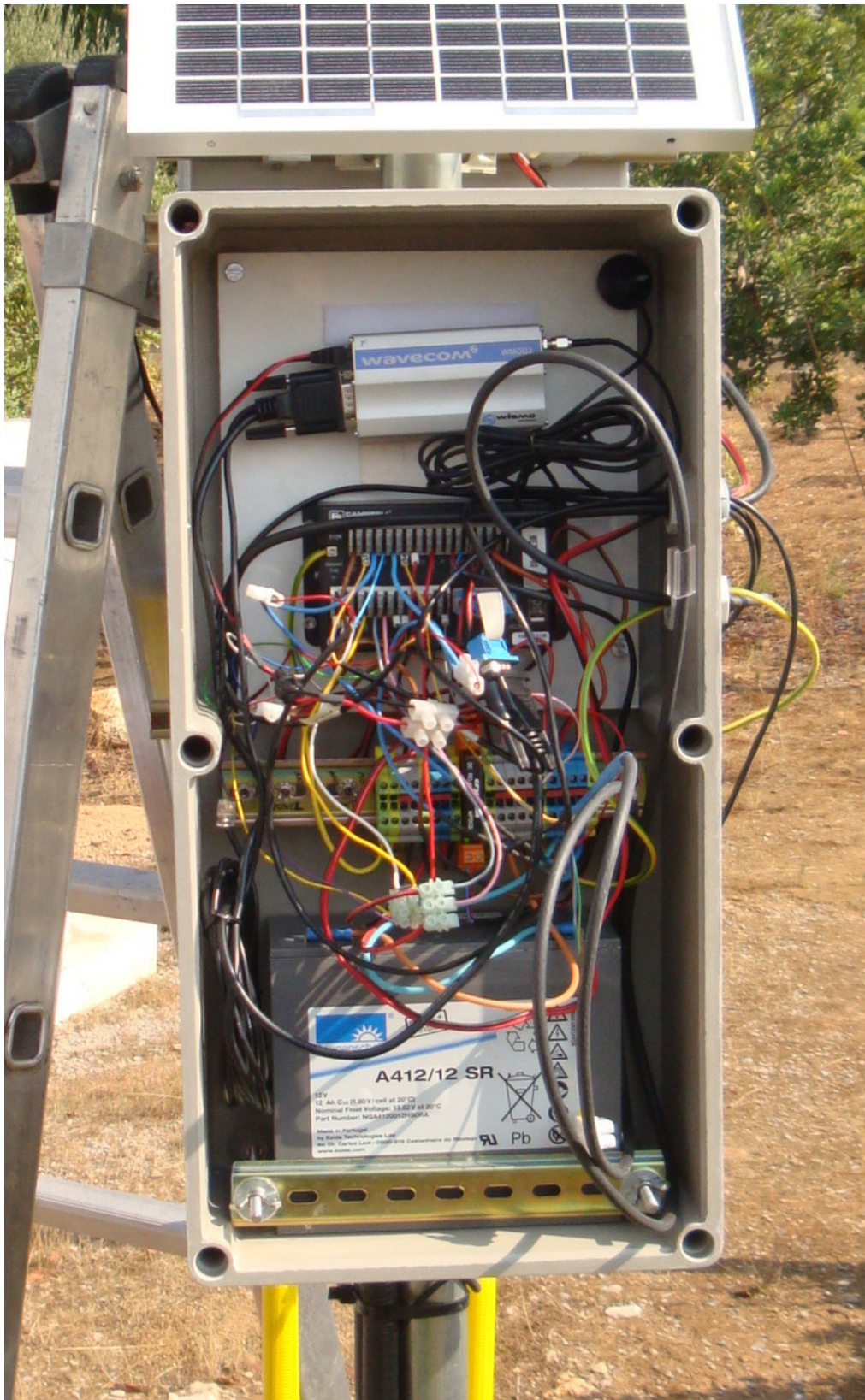


Figura 3-8: Caja intemperie con los siguientes elementos (de arriba a abajo): módem y antena, sistema de adquisición de datos, y batería. En este caso, el regulador de carga se encuentra integrado en el datalogger. Nótese el panel solar en la parte superior de la caja

3.2.1.1 COMPARACIÓN ENTRE EL COLECTOR CILÍNDRICO DE TIPO ARPA Y EL COLECTOR CILÍNDRICO DE TIPO MALLA

Con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos en los distintos emplazamientos de la Red, se llevó a cabo una campaña de comparación entre los dos colectores cilíndricos experimentales utilizados en este trabajo. Para ello, se instalaron en el emplazamiento Machos (Ayora, Valencia) (apartado 3.3), un colector de niebla de cada tipo, alejados menos de 10 m, manteniéndose funcionando en paralelo entre junio de 2010 y junio de 2011 (figura 3-9).



Figura 3-9: Disposición en campo de los dos colectores cilíndricos experimentales comparados, situados en Machos (Ayora, Valencia). A la izquierda, el colector de tipo malla y a la derecha, el de tipo arpa

La figura 3-10 compara los volúmenes de niebla capturados por el colector cilíndrico de tipo malla y el cilíndrico de tipo arpa durante el periodo comprendido entre junio de 2010 y junio de 2011. En el eje Y se muestra los datos de agua capturada por el colector de niebla de tipo arpa, mientras que en el eje X se muestra el volumen registrado por el colector de tipo malla, ambos expresados en litros por metro cuadrado de superficie de recolección acumulados en 10 minutos. El gráfico de dispersión muestra una mayor concentración de puntos cercanos al origen de los ejes, propagándose con menor intensidad hacia valores mayores. Obviamente, el número de eventos con volúmenes de captura pequeños es superior al de eventos con volúmenes grandes. De cualquier modo, se observa una fuerte relación lineal positiva entre las variables comparadas, tal y como muestra la línea recta de la figura. Dicha recta representa los valores obtenidos por la ecuación (1) del modelo de regresión lineal (R-cuadrado = 97 %):

$$y = 1.133 \cdot x \quad (1)$$

donde x representa volumen de agua por metro cuadrado registrado por el colector de niebla cilíndrico de tipo malla en un periodo de 10 minutos;
 y representa volumen de agua por metro cuadrado registrado por el colector de niebla cilíndrico de tipo arpa en un periodo de 10 minutos

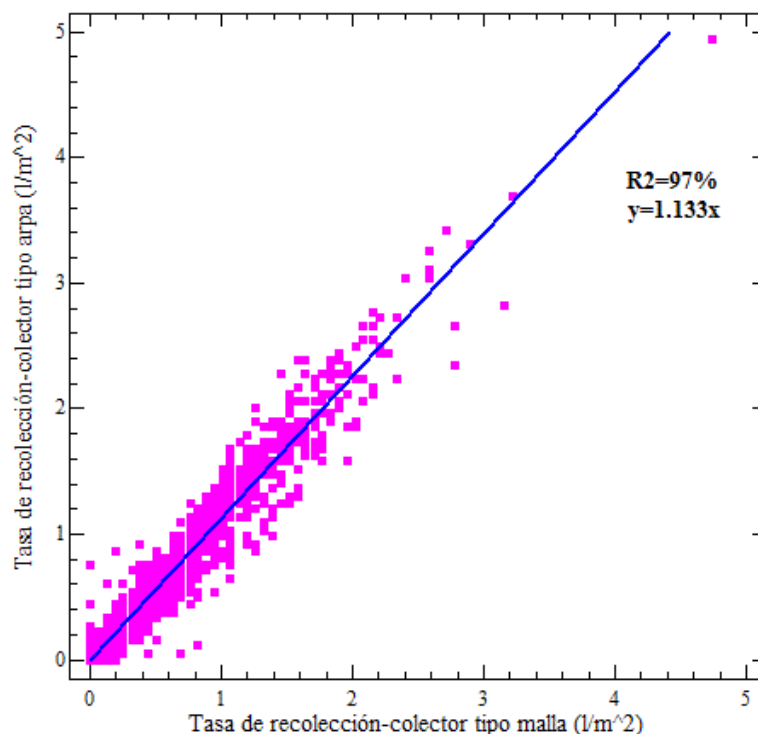


Figura 3-10: Relación entre la tasa de recolección de agua registrada por el colector de niebla de tipo malla (eje horizontal) y la monitorizada por el colector de niebla de tipo arpa (eje vertical). La línea recta representa el ajuste por regresión de los datos experimentales según la ecuación $y=1.133x$ (error=0.001; $R^2=97\%$)

Debido a que se han utilizado dos tipos de colectores experimentales diferentes en este trabajo, para poder realizar una correcta comparación de los resultados obtenidos, los volúmenes de agua recogidos por los colectores cilíndricos de tipo malla, de aquí en adelante serán transformados a volúmenes equivalentes de colector cilíndrico de tipo arpa según la expresión (1).

3.2.2 COLECTOR PLANO DE TIPO LFC

Con el objetivo de recolectar agua para regar una parcela experimental situada en el emplazamiento Machos (Ayora, Valencia) (apartado 3.3), de 2 500 m² de superficie y que se pretendía repoblar con 620 plántulas, se construyó un colector de niebla plano de grandes dimensiones, basado en el captador Large Fog Collector o LFC (Capítulo 2, apartado 2.1.1). Como material de recolección se utilizó la misma malla empleada en el colector experimental cilíndrico de tipo malla, pero esta vez, instalada en doble capa. La malla tenía unas dimensiones de 6.4 m de ancho por 2.8 m de alto, resultando una superficie de captación de 18 m². La base de la malla se encontraba a una altura aproximada de 1.8 m sobre el suelo. Como soporte de la malla se utilizaron dos mástiles de hierro de sección cuadrada (10 x 10 cm), de 5 m de longitud, instalados a ambos lados de la misma sobre sendas bases plegables. Cada uno de los mástiles se fijó al suelo a través de seis cables de acero colocados a dos alturas diferentes. La sujeción de la malla a los mástiles se realizó mediante el uso de hilo de acero plastificado, el cual transcurría a través de mangueras y de poleas para evitar el deterioro de la malla. El tensado de la malla se realizó utilizando dos cabrestantes, instalados cada uno de ellos en los mástiles laterales, a 1 m de altura (figura 3-11). En la parte inferior de la malla, una canaleta plástica recogía el agua capturada y la dirigía a través de una manguera hacia los depósitos de almacenamiento (tres depósitos interconectados de 1 000 l cada uno). En uno de ellos se instaló un sensor (modelo PDCR 1 830, marca GE Druck Limited) para la medición del nivel y el flujo del agua en el interior de los depósitos (figura 3-12). Estos datos fueron registrados por medio de un *datalogger* (modelo CR10X, marca Campbell Scientific Ltd).

El colector LFC fue instalado a escasos metros del colector experimental cilíndrico de tipo arpa, el cual se puso en funcionamiento con anterioridad (figura 3-13). Los datos registrados previamente por el colector experimental, permitieron determinar la dirección más favorable para la recolección de agua de niebla en dicho emplazamiento. En base a dichos datos, el captador LFC se instaló con una orientación de 55° con respecto al Norte.

El sistema estuvo instalado en campo desde marzo de 2007 hasta noviembre de 2009. En todo ese periodo, hasta seis episodios de fuertes vientos lograron derribarlo y/o dejarlo inoperativo, por lo que el tiempo que estuvo en funcionamiento fue menor.

El coste de los materiales necesarios para la construcción del captador de niebla plano LFC fue de 977 €, pudiéndose obtener todo el material a través de comercios locales. Para la construcción del panel se necesitaron 90 horas de trabajo repartidas entre dos personas, mientras que para su instalación en campo se requiso el trabajo de tres personas durante ocho horas cada una.

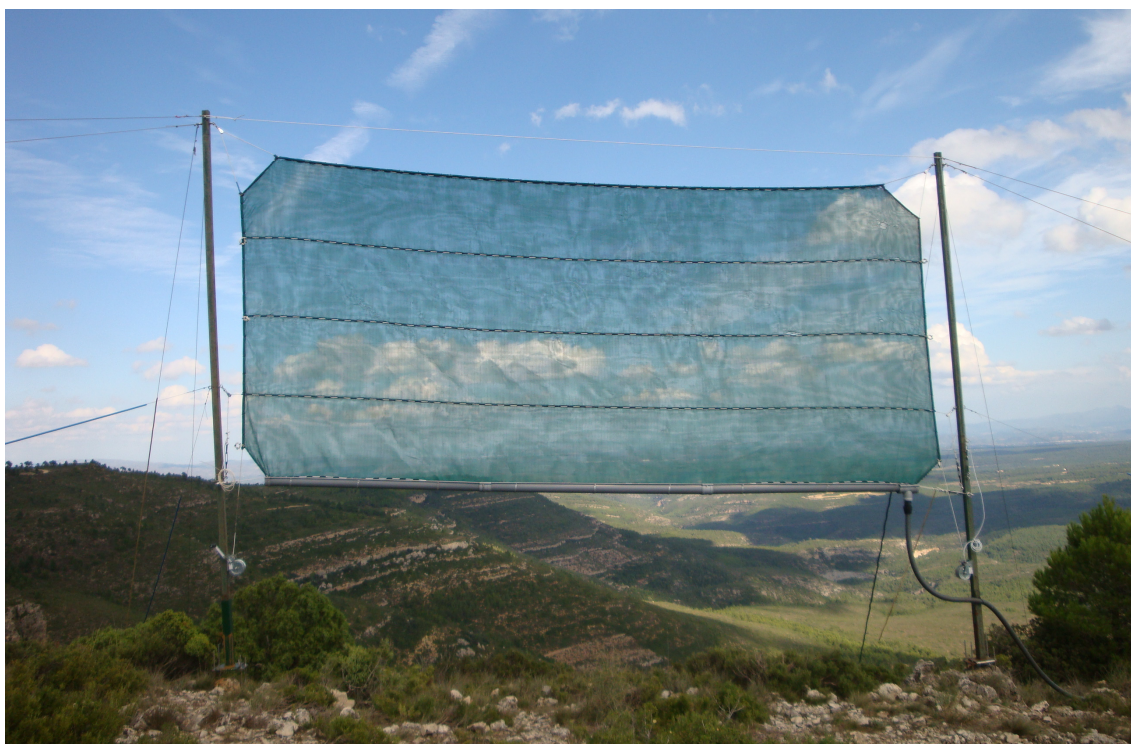


Figura 3-11: Colector industrial plano de tipo LFC, de 18 m² de superficie de recolección, instalado en Machos (Ayora, Valencia)



Figura 3-12: Detalles del colector de niebla de tipo LFC instalado en Machos (Ayora, Valencia): malla captadora, canaleta para la recogida de agua y sistema de conducción de agua hasta los depósitos situados al fondo

3.2.2.1 COMPARACIÓN ENTRE EL COLECTOR INDUSTRIAL PLANO DE TIPO LFC Y EL COLECTOR EXPERIMENTAL CILÍNDRICO DE TIPO ARPA

La relación entre el colector industrial plano de tipo LFC y el colector experimental cilíndrico de tipo arpa se analizó en el emplazamiento Machos (Ayora, Valencia) (apartado 3.3), tras instalar un equipo de cada tipo en paralelo, a menos de 10 m de distancia, entre marzo de 2007 y noviembre de 2009 (figura 3-13).



Figura 3-13: Disposición en campo del colector industrial plano de tipo LFC (izquierda) y el colector cilíndrico experimental de tipo arpa (derecha, situado detrás de los depósitos de almacenamiento), instalados en Machos (Ayora, Valencia)

El nivel de agua de los depósitos de almacenamiento se midió utilizando un sensor de nivel de presión. A partir de este nivel de agua, se pudo calcular el volumen de niebla por metro cuadrado capturado por el colector plano de tipo LFC y compararlo con el del colector experimental cilíndrico de tipo arpa. Utilizando los datos de viento y de niebla capturada por el colector cilíndrico, se calculó el volumen por metro cuadrado de niebla equivalente para el ángulo al cual estaba orientado el colector plano (55° con respecto al Norte). Para dicho cálculo se utilizó la proyección de la dirección de viento en un eje fijo de 55° , es decir, el coseno de la diferencia de ángulo entre la dirección del viento

registrada cada 10 minutos por el colector experimental cilíndrico y la orientación del colector plano, a través de la siguiente expresión:

$$\phi_h = \sum_{1h} f_i |\cos(55^\circ - \theta_i)| \quad (2)$$

donde θ_i es la dirección de viento diezminutal registrada por el colector experimental cilíndrico expresada en grados con respecto al Norte,

f_i es el volumen de niebla por metro cuadrado registrado por el colector experimental cilíndrico en un periodo de 10 minutos, y

ϕ_h es el volumen equivalente de niebla por metro cuadrado para una dirección de 55° en un periodo de una hora (desde las :10 hasta las :00 horas, 6 sumandos).

El objetivo principal de esta expresión es calcular a partir de los datos obtenidos por un colector experimental omnidireccional, el volumen equivalente por metro cuadrado que se obtendría para una dirección determinada a la cual se oriente un colector de niebla industrial plano de tipo LFC.

La figura 3-14 compara los volúmenes de niebla capturados por el colector industrial plano de tipo LFC y el experimental cilíndrico de tipo arpa, durante el tiempo en que el primero estuvo operativo, entre marzo de 2007 y noviembre de 2009. En el eje Y se muestra los datos de niebla del colector plano medidos directamente por el sensor de nivel, mientras que en el eje X se muestra el volumen equivalente de niebla por metro cuadrado calculado con la expresión (2) a partir de los datos de niebla y viento registrados por el colector experimental cilíndrico, en valores horarios. Se observa una mayor concentración de puntos en valores próximos al origen y una fuerte correlación lineal positiva, tal y como muestra la alineación de los puntos alrededor de la línea recta de la figura. Dicha recta representa los valores obtenidos por la ecuación (3) del modelo de regresión lineal (R-cuadrado = 95 %):

$$y = 0.97 \cdot x \quad (3)$$

donde x representa tasa de recolección equivalente calculada a partir de los datos de niebla y dirección de viento registrados por el colector cilíndrico de tipo arpa calculada para una dirección de 55° con respecto al Norte, según la expresión (2);

y representa volumen de agua por metro cuadrado registrado por el colector de niebla plano de tipo LFC en un periodo de 60 minutos

Por tanto, si se dispone de datos de niebla y dirección de viento diezminutales obtenidos a partir de un colector omnidireccional, es posible predecir las tasas de captura que se obtendrían con un colector plano a través de la expresión (2), mostrando una relación cercana a 1:1. Durante el periodo en el que el colector plano estuvo operativo, su captación de niebla fue de 154 l/m^2 . Si se utiliza los datos obtenidos por el colector cilíndrico en la ecuación (2), la captación de niebla equivalente para el mismo periodo sería de 153 l/m^2 . Por tanto, esta metodología se considera perfectamente válida para el

cálculo del potencial de recolección de niebla de colectores industriales planos a partir de datos obtenidos por un colector experimental omnidireccional.

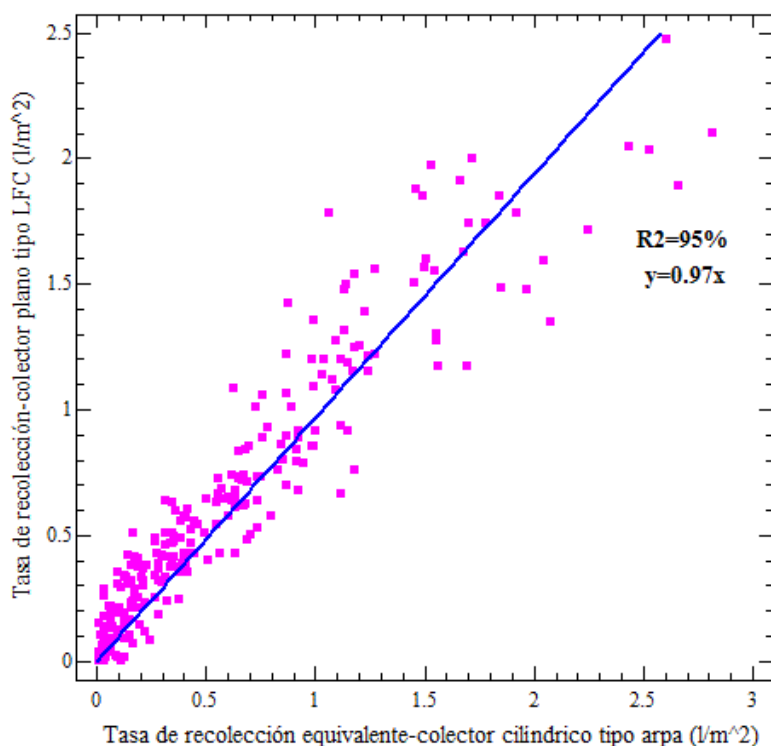


Figura 3-14: Relación entre la tasa de recolección equivalente calculada a partir de los datos de niebla y dirección de viento registrados por el colector cilíndrico de tipo arpa calculada para una dirección de 55° con respecto al Norte (eje horizontal) y tasa de recolección de agua registrada por el colector plano de tipo LFC (eje vertical), en valores horarios. La línea recta representa el ajuste por regresión de los datos experimentales según la ecuación $y=0.97x$ (error=0.01; $R^2=95\%$)

3.3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada para este trabajo ha sido la vertiente mediterránea de la Península Ibérica, desde la provincia de Gerona hasta la de Almería. La zona de estudio se encuentra limitada en su parte oriental por el mar Mediterráneo y se extiende una distancia aproximada de 60 km hacia el interior peninsular. Se trata de un área con una orografía compleja, con una línea de costa que presenta una longitud de más de 1 700 km y con una orientación sudoeste-nordeste. Es una región que presenta aspectos geográficos con fuertes contrastes: llanuras litorales amplias en su zona central, fundamentalmente en las provincias de Valencia y Castellón, junto a otras más estrechas en su parte norte y sur, alternadas por deltas, en general de escasa importancia, excepto

el del río Ebro, situado en el tercio norte del territorio, y por relieves rocosos y acantilados, que en muchos casos superan los 500 m de altitud a escasos metros de la costa. Se trata de un área que en su parte occidental está limitada por sistemas montañosos importantes, como son la cordillera Bética en la parte sur, el Sistema Ibérico en la zona centro y las Cordilleras Costero Catalanas y los Pirineos por el norte. Estos sistemas, que en algunas áreas se extienden desde el interior peninsular hasta alcanzar la línea de costa, presentan elevaciones que superan con facilidad los 1 000 m, destacando los picos de Calar alto (2 168 m) en la parte sur, Aitana (1 558 m) y Peñagolosa (1 813 m) en el centro, y el Turó de l'Home (1 712 m) en la zona norte.

En cuanto a la climatología, se trata de un área con un clima típico mediterráneo. Las temperaturas son, por lo general, suaves, con valores medios anuales que varían entre 15°C en algunos sectores de la costa catalana a 18°C en la almeriense (Martín-Vide and Olcina Cantos, 2001), con un gradiente positivo de norte a sur y de interior a costa. La precipitación media anual oscila entre valores superiores a 800 mm en el área pirenaica y en la zona montañosa que discurre entre las provincias de Alicante y Valencia, e inferiores a 300 mm en el sudeste (Capel-Molina, 1981), sobresaliendo por su extrema aridez la región que rodea el Cabo de Gata, con valores entre 125 y 150 mm, siendo, muy probablemente, el lugar más seco de la Europa continental (Martín-Vide and Olcina Cantos, 2001). Entre las características de la precipitación en esta área cabe destacar su torrencialidad, la cual es más acusada en lugares próximos a la costa, su irregularidad y la presencia de largos periodos secos, especialmente en verano y en la parte sur. Estudios recientes estiman una tendencia general negativa de la precipitación en parte del área seleccionada, fundamentalmente en los eventos de precipitación moderada, que son el principal mecanismo de recarga del sistema hídrico (Millán et al., 2005). El carácter irregular de la precipitación y la presencia de periodos prolongados de sequía hacen que esta área sea especialmente frágil a los incendios forestales, que aprovechan la sequedad de la vegetación para actuar con mayor virulencia.

Por otra parte, la elevada densidad de población, a excepción de algunas zonas de la parte sur; la presión turística, ya que se trata de uno de los principales destinos de ocio para el turismo nacional e internacional en la Península; y la intensa actividad industrial y agrícola, entre otras causas, han provocado un elevado consumo hídrico en la región estudiada.

Se trata por tanto de un área con problemas importantes derivados de la escasez de agua y de su elevado consumo. De hecho, en los últimos años han existido restricciones en el consumo humano y agrícola en algunas zonas del sur. Es por ello que la búsqueda de nuevas fuentes de agua en la región pueda ayudar a paliar este problema en el futuro. Por todo ello, se escogió esta zona para realizar la investigación, con el objetivo de analizar la importancia de una de las entradas menos conocidas al sistema hidrológico, como son las nieblas.

De este modo, en el año 2003 se inició la creación de una **Red de Colectores de Agua de Niebla** en la región descrita, comenzando con la instalación en campo de tres colectores en sendos emplazamientos litorales de la Comunidad Valenciana. En los primeros años de la investigación, la Red fue aumentando su número de colectores operativos en las tres provincias de dicha comunidad, tanto en puntos costeros como en

lugares alejados del mar. En la provincia de Alicante fue donde mayor número de colectores se instalaron, hasta cinco con anterioridad a 2009. A partir de dicho año, se decidió ampliar el estudio a todo el litoral este de la Península Ibérica, por lo que la Red se expandió al exterior de la Comunidad Valenciana, instalándose colectores en todas las provincias costeras desde los Pirineos al Cabo de Gata. De este modo, se dispusieron colectores de niebla en Gerona, Barcelona, Tarragona, Murcia y Almería, a la vez que se amplió su número en Valencia y Alicante. El emplazamiento Machos (Ayora, Valencia), además de ser un punto más de la Red, fue utilizado como parcela experimental para la comparación de equipos, instalándose allí hasta tres sistemas de captación diferentes (un colector cilíndrico de tipo arpa, otro de tipo malla y un colector plano de tipo LFC) y estableciéndose un plan de visitas mensual para supervisar su correcto funcionamiento. Tanto en el emplazamiento de Montseny (Barcelona), como en el de Muela (Murcia), se instalaron dos colectores a diferente altitud para evaluar las diferencias existentes en función de la cota y cuyos resultados se analizan en el Capítulo 4, apartado 4.1.4. En total, 24 colectores de niebla fueron instalados, formando una Red que cubre un área de 800 km de longitud, extendiéndose desde los 42°N hasta los 36°N en latitud, mientras que en longitud abarca desde los 2°E hasta los 2°W (figura 3-15).

En total, la Red presenta colectores de niebla en cuatro comunidades autónomas y en ocho provincias distintas, según la siguiente distribución (número de colectores, en paréntesis): Cataluña: Gerona (1), Barcelona (3), Tarragona (1); Comunidad Valenciana: Castellón (2), Valencia (6), Alicante (6); Región de Murcia: Murcia (2); y Andalucía: Almería (3). El primero de los colectores se instaló en julio de 2003, mientras que el último se hizo en abril de 2011. Todos los colectores instalados se pretendieron mantener operativos desde el día de su puesta en funcionamiento hasta el final del año 2012. Sin embargo, por cuestiones técnicas o administrativas, algunos de ellos tuvieron que ser desmantelados con anterioridad a dicha fecha, mientras que algunos otros tuvieron que ser reubicados en nuevos emplazamientos. A su vez, la rotura de algunos equipos hizo que se tuviera que cambiar el tipo de colector en alguno de los lugares. Todos estos cambios han sido registrados en la base de datos que contiene la información histórica de los colectores y han sido tenidos en cuenta a la hora de realizar cálculos en capítulos posteriores de esta tesis. Los colectores están ubicados a unas altitudes que varían entre los 428 y los 1 319 m, y a una distancia al mar máxima de 60 km. En la tabla 3-1 se ofrece información detallada de todos los colectores que conforman la Red y que han sido utilizados en este trabajo.

Teniendo en cuenta que en todas la comunidades autónomas estudiadas, se pretendía instalar colectores tanto en zonas de montaña litorales como interiores a modo de poder realizar transectos, no sólo latitudinales, sino también longitudinales en la interpretación de resultados, las consideraciones tenidas en cuenta a la hora de ubicar los colectores que conforman la Red fueron las siguientes:

- Análisis de los procesos meteorológicos específicos de la cuenca occidental del Mediterráneo. En esta fase se ha valorado, a la hora de definir el emplazamiento final de cada colector, la experiencia de campo del personal del CEAM, así como de los guardas y vigilantes forestales de las distintas comunidades autónomas visitadas. En los colectores ubicados en el interior de Parques Naturales o en los que disponían de alguna figura de protección con un organismo público encargado de su gestión, fue fundamental la comunicación

con los responsables de los mismos para determinar el emplazamiento final seleccionado.

- Las recomendaciones geográficas realizadas por Schemenauer (Schemenauer and Cereceda, 1994b) a la hora de seleccionar un emplazamiento para implantar un sistema pasivo de captación de agua de niebla, que son las siguientes:
 - La presencia de vientos persistentes de una misma dirección y la existencia de cadenas montañosas cercanas a la costa capaces de interceptar las nubes bajas impulsadas por esos vientos y orientadas perpendicularmente a la dirección de los vientos dominantes.
 - Altitudes entre 400 y 1 000 metros sobre el nivel del mar.
 - La distancia hasta la costa debe ser la menor posible, siendo los emplazamientos ideales los que se encuentran a menos de 5 km del mar, aunque también se consideran con posibilidades las áreas separadas 25 km de la costa. En este caso, nosotros hemos querido evaluar el peso que tiene esta recomendación y hemos instalado colectores en puntos distantes de la costa de hasta 60 km.
 - Espacio suficiente para poder instalar el colector de niebla.
 - La ausencia de obstáculos en el relieve próximo (montañas, picos, etc.) que desvíen la trayectoria de los vientos e impidan que la niebla intercepte con el emplazamiento seleccionado.
 - Las crestas de cadenas montañosas suelen ser óptimas para la captación de la niebla, aunque se deben evitar los lugares con presencia de pendientes muy pronunciadas que favorecen la componente vertical del viento, dificultando la recolección de la niebla.
- El estudio climático-geográfico y el trabajo de campo realizado para reconocer los emplazamientos seleccionados, descartando aquellos en los que la microtopografía indicaba dificultad de accesibilidad, presencia de obstáculos, ocupaciones, propiedades privadas, etc.
- Las posibilidades de poder establecer en un futuro un sistema de captación de niebla, cuya agua pudiera ser utilizada principalmente con fines medioambientales, tales como la reforestación de zonas degradadas, el abastecimiento de abrevaderos para la fauna o de depósitos para la lucha contra incendios, etc.

Todos los emplazamientos seleccionados cumplen la mayoría de directrices descritas anteriormente, tratándose todos ellos de lugares de montaña, bien expuestos a los vientos de procedencia marítima y sin obstáculos que impidan la entrada de los mismos.

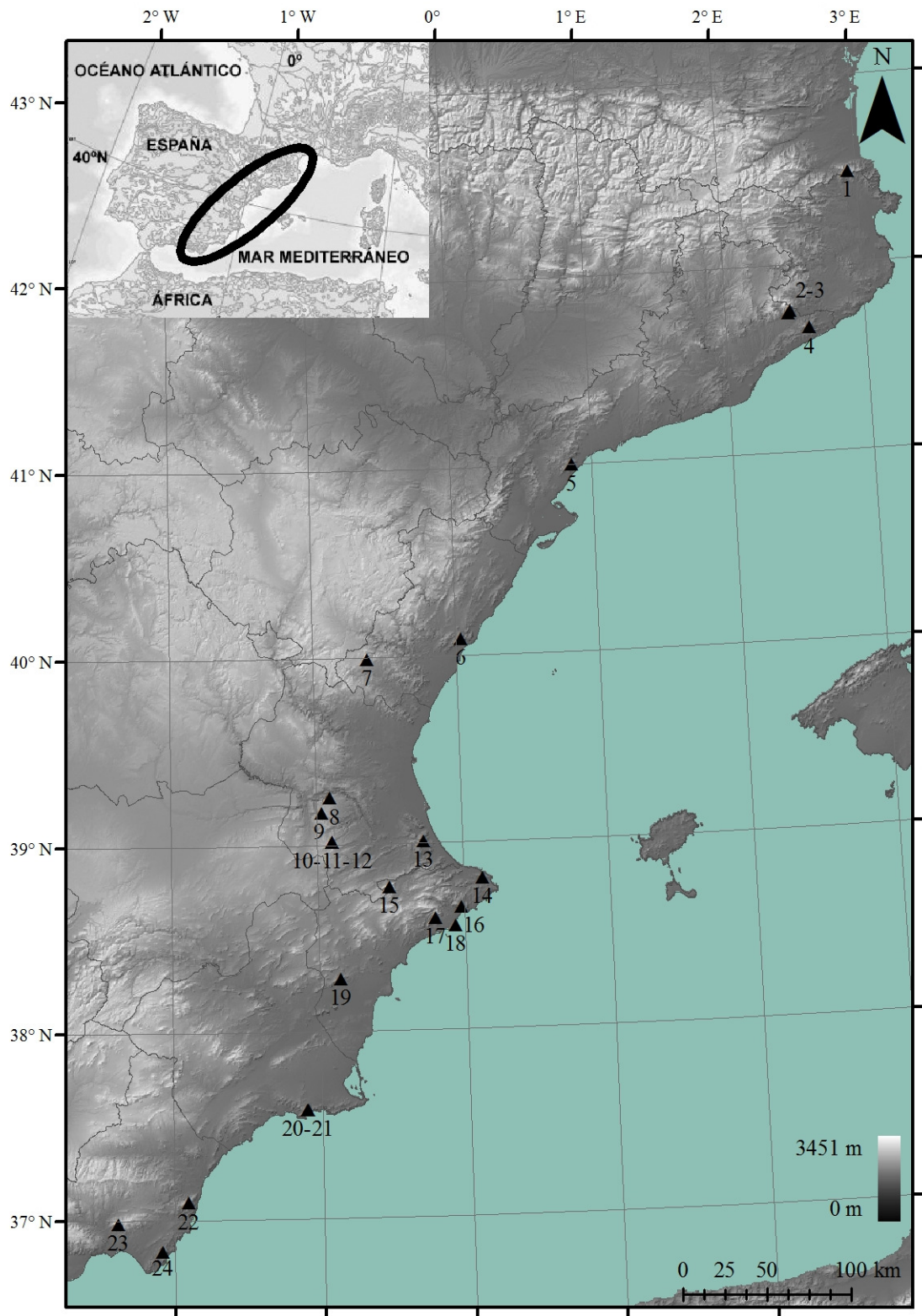


Figura 3-15: Mapa de situación de la Red de Colectores de Agua de Niebla situada en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica

Tabla 3-1: Características de la Red de Colectores de Agua de Niebla

Nº	Colector	Municipio	Provincia	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Dist. al mar (km)	Fecha inicio	Fecha fin	Tipo de colector
1	Puig Neulós	La Jonquera	Gerona	42°28'51"N	02°56'47"E	1232	11	27/10/09		2
2	Montseny Antenas	Fogars de Montclús	Barcelona	41°45'22"N	02°28'04"E	1230	21	17/06/10	07/02/12	2
3	Montseny Canplá	Fogars de Montclús	Barcelona	41°44'39"N	02°27'23"E	832	21	17/06/10	07/02/12	2
4	Montnegre	Sant Cebrià de Vallalta	Barcelona	41°39'36"N	02°35'47"E	648	7	18/06/10		2
5	Portella	Vandellòs i L'Hospitalet	Tarragona	40°59'46"N	00°51'42"E	707	4	03/11/10		2
6	Colomer	Cabanes	Castellón	40°05'16"N	00°02'16"E	708	5	13/06/08		1
7	Casillas	Pina de Montalgrao	Castellón	39°59'28"N	00°37'13"W	1150	46	23/03/04		2
8	Bujete	Cortes de Pallás	Valencia	39°15'10"N	00°53'57"W	780	52	07/04/11		2
9	Cinto Cabra	Cortes de Pallás	Valencia	39°10'26"N	00°57'27"W	997	59	20/07/10		2
10	Machos Nieva	Ayora	Valencia	39°00'53"N	00°53'40"W	1025	60	07/06/10		2
11	Machos	Ayora	Valencia	39°00'52"N	00°53'39"W	1025	60	16/11/06		1
12	Machos LFC	Ayora	Valencia	39°00'53"N	00°53'40"W	1025	60	15/03/07	11/11/09	3
13	Mondúver	Xeresa	Valencia	39°00'37"N	00°15'55"W	843	8	16/07/03		1
14	Montgó	Denia	Alicante	38°48'25"N	00°07'48"E	670	3	23/07/03		1
15	Mariola	Agres	Alicante	38°46'09"N	00°30'22"W	1193	39	24/06/04		1
16	Bernia_E	Benissa	Alicante	38°39'22"N	00°01'13"W	851	3	13/11/08		1
17	Puig Campana	Finestrat	Alicante	38°35'50"N	00°11'48"W	1319	8	30/06/05	09/02/07	1
18	Sierra Helada	L'Alfàs del Pi	Alicante	38°33'27"N	00°03'37"W	428	1	04/08/05		1
19	Crevillente	Crevillente	Alicante	38°16'56"N	00°51'09"W	822	24	01/02/10		2
20	Muela_A	Cartagena	Murcia	37°35'09"N	01°05'44"W	556	1	23/03/10	16/05/12	2
21	Muela_B	Cartagena	Murcia	37°35'03"N	01°05'20"W	464	1	23/03/10	16/05/12	2
22	Arráez	Turre	Almería	37°05'43"N	01°54'23"W	841	5	14/10/10		2
23	Alhamilla	Pechina	Almería	36°59'03"N	02°22'27"W	1254	16	02/02/10		2
24	Peñones	Níjar	Almería	36°50'01"N	02°04'52"W	487	3	08/07/10		2

(1) Colector experimental cilíndrico de tipo arpa; (2) Colector experimental cilíndrico de tipo malla; (3) Colector industrial plano de tipo LFC

Capítulo 4

Resultados: Análisis de los Datos Meteorológicos Obtenidos por la Red de Colectores de Agua de Niebla

*El atleta más fuerte no es el que llega antes a la meta. Ese es el más rápido.
El más fuerte es el que cada vez que se cae se levanta. El que cuando siente el dolor en el costado no para. El que cuando ve la meta muy lejos no abandona. Cuando ese corredor llega a la meta, aunque llegue último, es un ganador. A veces, aunque quieras, no está en tu mano ser el más rápido, porque tus piernas no son tan largas o tus pulmones son más estrechos.
Pero siempre puedes elegir ser el más fuerte. Sólo depende de ti, de tu voluntad y de tu esfuerzo*

La bibliotecaria de Auschwitz, de Antonio G. Iturbe

El principal objetivo de este capítulo es analizar los datos meteorológicos registrados por la Red de Colectores, con fin de obtener los volúmenes de agua que se han recolectado, en promedio, durante todo el periodo de estudio (2003-2012).

En el apartado 4.1 se describen los volúmenes de agua de niebla recolectados, así como los de lluvia. Con ello pretendemos poner de manifiesto el orden de magnitud del recurso niebla, aun sabiendo que ambas variables no deberían ser comparadas, ya que la lluvia no necesita ser recolectada para ser aprovechada por el sistema, mientras que la niebla debe ser capturada si se quiere utilizar.

En los apartados siguientes se analizan otros aspectos importantes sobre el comportamiento de la niebla, que nos ayudarán a conocer mejor este recurso poco estudiado. De este modo, en el apartado 4.2 se describe la época del año en que es posible recolectar niebla, para conocer cuándo podemos contar con este recurso hídrico y de este modo poder planificar las actividades a realizar que requieran su aprovechamiento. En muchos lugares del este y sur peninsular, el agua es un factor limitante para llevar a cabo actividades forestales en los meses de verano, por lo que conocer si es posible contar con agua extraída con esta tecnología, puede ayudar a que se realicen con éxito actividades en este ámbito. A su vez, en el apartado 4.3 se analiza el comportamiento de la niebla a lo largo del día, para conocer en qué horas su presencia es más habitual a lo largo del año y para cada estación climatológica. Otro aspecto importante y que se estudia en el apartado 4.4 es la duración de los episodios de recolección de niebla, describiéndose con detalle las condiciones sinópticas del episodio de recolección de agua de niebla de mayor duración ocurrido durante marzo de 2011 y que hizo que en gran parte de los colectores de la Red se recolectaran importantes cantidades de agua. Y por último, en el apartado 4.5 se determina la dirección óptima de recolección de agua de niebla de todos los emplazamientos de la Red y se estima el volumen que se podría recolectar instalando en cada punto un colector de tipo pantalla orientado según la dirección propuesta.

Como ya se ha descrito en el Capítulo 3, aunque el periodo de estudio abarca los años comprendidos entre 2003 y 2012, no todos los colectores de la Red estuvieron operativos durante el periodo de estudio completo. El montaje de los colectores fue progresivo, iniciándose en 2003 con la puesta en funcionamiento de los colectores Mondúver y Montgó, y terminando en 2011 con la instalación de Bujete. Además, la finalización del último proyecto de I+D que financiaba la investigación, hizo que algunos colectores tuvieran que ser desinstalados antes del final del año 2012, como fueron los colectores Montseny Antenas, Montseny Canplá, Muela_A y Muela_B. Por todo ello, el único año del periodo de estudio en el que todos los colectores de niebla han estado operativos (salvo el Puig Campana que, por problemas de mantenimiento, sólo estuvo operativo durante un breve espacio de tiempo durante los años 2005 y 2007) ha sido el 2011. Es por ello que en los apartados de este capítulo donde se han realizado análisis comparando los distintos colectores, sólo se han utilizado datos de ese año. En cambio, cuando el objetivo ha sido describir características de los colectores que no requieran la comparación entre los mismos, se han empleado todos los datos disponibles para cada colector, como por ejemplo cuando se detalla el potencial de recolección de cada emplazamiento o las direcciones óptimas de captura.

Por último y con la idea de contextualizar a una mayor escala los registros de niebla del área de estudio, se han comparado algunas de las tasas de captura obtenidas con las registradas en otros lugares del planeta, teniendo presente que, dado que los diseños de los distintos colectores no son coincidentes, los resultados deben ser tomados como orientativos.

4.1 VOLÚMENES DE NIEBLA RECOLECTADOS

Para el análisis de la tasa de captura de los colectores de la Red hemos utilizado todos los datos disponibles desde su instalación hasta su desmantelamiento, o en su defecto, hasta el 31/12/2012.

Consideraciones generales de los cálculos realizados:

- La variable **Niebla** representa toda el agua capturada por el colector de niebla, que bien podría ser niebla, precipitación o ambos meteoros a la vez, por metro cuadrado de superficie captadora y día. Para el cálculo de la variable **Niebla pura** se ha utilizado un filtro que elimina la contaminación por lluvia, el cual es función, además de la niebla, de la velocidad de viento y de la lluvia (Estrela et al., 2008). Los valores de **precipitación** se muestran en milímetros por día y recogen la lluvia registrada por los pluviómetros instalados en cada emplazamiento.
- Las estaciones del año se han calculado siguiendo el método meteorológico (invierno: diciembre, enero y febrero; primavera: marzo, abril y mayo; verano: junio, julio y agosto; otoño: septiembre, octubre y noviembre).
- Debido a que se han utilizado dos tipos de colectores de niebla experimentales diferentes durante la investigación, todos los datos de niebla obtenidos por los colectores de tipo malla se han transformado siguiendo la expresión (1) del Capítulo 3, mostrándose como volumen de agua recogida por un colector de niebla de tipo arpa, permitiendo de este modo su comparación.

4.1.1 TASA TOTAL Y ESTACIONAL DE PRECIPITACIÓN Y DE CAPTURA DE NIEBLA DE TODOS LOS COLECTORES DE LA RED, PERIODO 2003-2012

La tabla 4-1 presenta las tasas de precipitación y de captura de niebla y de niebla pura del total del periodo registradas por cada colector de la Red, así como las tasas estacionales. Para el cálculo de la **tasa total** de cada una de las tres variables, se han utilizado todos los datos registrados por cada colector, mientras que para las **tasas estacionales** se han utilizado los datos de cada estación climatológica de todos los años.

Dichas tasas han sido calculadas como la relación entre el volumen capturado de niebla y/o de lluvia, y el número de días en que ha estado operativo el sistema, para todo el periodo de estudio y para cada estación del año. Para cada colector se han utilizado todos los datos disponibles desde su puesta en funcionamiento hasta su desmantelamiento, o en su defecto, hasta el 31 de diciembre de 2012. La tabla 3-1 del Capítulo 3 recoge, para cada colector, las fechas de inicio y fin de su funcionamiento. En la figura 3-15 del Capítulo 3 se puede ver la posición geográfica de cada colector de niebla que aparece en la tabla 4-1.

Tabla 4-1: Tasa total y estacional de precipitación y de captura de niebla y niebla pura de todos los emplazamientos experimentales analizados, calculadas en base a los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012 (T: Total; I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño)

Cód.	Colector	Periodo datos		Variable meteorológica	T	I	P	V	O
		Inicio	Fin						
		(mm/aa)							
1	Puig Neulós	10/09		Precipitación (mm/d)	3.3	1.4	3.3	1.9	6.2
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	22.3	22.8	27.2	16.8	22.3
				Niebla pura (l/m ² /d)	18.8	-	19.3	15.8	18.8
2	Montseny Antenas	06/10		Precipitación (mm/d)	2.3	0.7	4.0	1.9	3.4
		02/12		Niebla (l/m ² /d)	6.6	3.3	6.9	4.4	11.6
				Niebla pura (l/m ² /d)	6.2	3.3	6.7	4.1	10.5
3	Montseny Canplá	06/10		Precipitación (mm/d)	3.3	1.2	4.8	2.2	5.5
		02/12		Niebla (l/m ² /d)	1.2	0.6	2.4	0.6	1.5
				Niebla pura (l/m ² /d)	0.8	0.5	1.6	0.3	0.9
4	Montnegre	06/10		Precipitación (mm/d)	2.8	1.0	3.4	1.4	5.0
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	0.5	0.3	1.0	0.1	0.8
				Niebla pura (l/m ² /d)	0.5	0.3	0.9	0.1	0.7
5	Portella	11/10		Precipitación (mm/d)	1.6	0.4	3.1	0.4	2.5
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	4.2	1.4	6.8	3.2	5.6
				Niebla pura (l/m ² /d)	3.9	1.4	5.9	3.1	4.7
6	Colomer	06/08		Precipitación (mm/d)	1.3	0.9	1.5	0.5	2.2
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	3.3	3.0	4.5	1.3	4.7
				Niebla pura (l/m ² /d)	2.5	2.4	3.5	1.1	3.1
7	Casillas	03/04		Precipitación (mm/d)	1.4	0.7	2.0	0.8	2.1
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	2.1	1.8	2.7	1.0	3.1
				Niebla pura (l/m ² /d)	1.6	1.5	1.9	0.7	2.4
8	Bujete	04/11		Precipitación (mm/d)	1.4	0.6	1.8	0.4	2.6
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	1.4	0.6	1.9	0.3	2.7
				Niebla pura (l/m ² /d)	1.0	0.4	1.2	0.2	2.0
9	Cinto Cabra	07/10		Precipitación (mm/d)	1.3	0.4	2.0	0.3	2.0
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	2.6	1.3	5.7	0.7	3.2
				Niebla pura (l/m ² /d)	2.2	1.3	4.8	0.6	2.2
10	Machos Nieva	06/10		Precipitación (mm/d)	1.4	0.6	1.9	0.7	2.4
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	4.4	1.8	9.1	2.1	5.6
				Niebla pura (l/m ² /d)	4.0	-	8.6	1.9	4.7
11	Machos	11/06		Precipitación (mm/d)	-	-	-	-	-
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	3.4	2.0	4.3	2.2	5.2
				Niebla pura (l/m ² /d)	3.0	1.8	3.8	2.0	4.3
13	Mondúver	07/03		Precipitación (mm/d)	2.1	2.1	2.1	0.7	3.7
		12/12		Niebla (l/m ² /d)	4.5	5.0	5.9	1.7	5.5
				Niebla pura (l/m ² /d)	3.8	4.2	5.0	1.6	4.5

14	Montgó	07/03 12/12	Precipitación (mm/d)	2.7	3.3	2.8	0.9	3.8
			Niebla (l/m ² /d)	5.8	6.0	7.5	3.5	6.6
			Niebla pura (l/m ² /d)	4.5	4.6	5.6	3.4	4.7
15	Mariola	06/04 12/12	Precipitación (mm/d)	1.5	1.4	1.5	0.4	2.6
			Niebla (l/m ² /d)	5.7	7.5	6.2	2.0	7.3
			Niebla pura (l/m ² /d)	5.0	6.9	5.4	1.8	6.2
16	Bernia_E	11/08 12/12	Precipitación (mm/d)	1.6	1.5	1.5	0.7	2.7
			Niebla (l/m ² /d)	6.0	6.0	8.0	2.3	7.7
			Niebla pura (l/m ² /d)	4.9	4.7	6.9	2.0	6.0
17	Puig Campana	06/05 02/07	Precipitación (mm/d)	1.2	1.9	1.3	0.2	1.5
			Niebla (l/m ² /d)	3.6	5.9	3.9	0.9	3.8
			Niebla pura (l/m ² /d)	2.6	-	3.3	0.9	3.1
18	Sierra Helada	08/05 12/12	Precipitación (mm/d)	0.8	0.7	0.6	0.3	1.6
			Niebla (l/m ² /d)	1.0	1.0	0.8	0.2	1.7
			Niebla pura (l/m ² /d)	0.6	0.6	0.6	0.2	1.1
19	Crevillente	02/10 12/12	Precipitación (mm/d)	0.7	0.4	1.0	0.4	1.2
			Niebla (l/m ² /d)	1.7	1.4	2.2	0.8	2.3
			Niebla pura (l/m ² /d)	1.5	1.4	2.0	0.7	2.1
20	Muela_A	03/10 05/12	Precipitación (mm/d)	0.8	0.7	0.9	0.4	1.2
			Niebla (l/m ² /d)	2.0	1.4	3.1	1.2	1.8
			Niebla pura (l/m ² /d)	1.7	1.1	2.9	1.0	1.6
21	Muela_B	03/10 05/12	Precipitación (mm/d)	0.7	0.7	0.8	0.4	1.0
			Niebla (l/m ² /d)	1.1	0.8	1.8	0.5	1.1
			Niebla pura (l/m ² /d)	0.9	0.5	1.5	0.4	0.8
22	Arráez	10/10 12/12	Precipitación (mm/d)	1.4	0.9	1.5	0.3	2.7
			Niebla (l/m ² /d)	3.3	2.4	4.4	0.6	5.4
			Niebla pura (l/m ² /d)	2.5	2.0	2.2	0.6	4.7
23	Alhamilla	02/10 12/12	Precipitación (mm/d)	0.9	1.2	1.2	0.2	1.1
			Niebla (l/m ² /d)	1.9	2.2	3.5	0.1	2.0
			Niebla pura (l/m ² /d)	1.7	1.9	3.3	0.1	1.7
24	Peñones	07/10 12/12	Precipitación (mm/d)	0.7	0.8	0.7	0.1	1.2
			Niebla (l/m ² /d)	1.6	1.9	1.5	0.4	2.3
			Niebla pura (l/m ² /d)	1.3	1.5	1.2	0.4	1.9

Debido a que los periodos de muestreo no son iguales para todos los colectores que aparecen en la tabla 4-1, nuestro objetivo no es la comparación de las tasas de captura entre los diferentes emplazamientos en este apartado del capítulo. El principal interés de esta tabla es analizar el comportamiento de la niebla en los diferentes puntos y su comparación con la precipitación, teniendo en cuenta las consideraciones descritas en la introducción del capítulo.

La **tasa de captura media de niebla** de todos los colectores de la Red ha sido de 3.9 l/m²/d, mientras que de precipitación ha sido 1.6 mm. Entre todos los colectores de la Red, destaca por su extraordinaria tasa de captación de niebla el colector Puig Neulós, instalado en el pico más alto de la Sierra de la Albera, en el Pirineo oriental. Los 22.3 l/m²/d de tasa de captura de agua de niebla, o bien los 18.8 l/m²/d excluyendo la contaminación por lluvia, son una de las mayores tasas de captura que se describen en la literatura, comparable a la obtenida en Lomas de Atiquita en Perú (Ortega et al., 2007; Villegas et al., 2007) o la registrada en el Sultanato de Omán en los meses de monzón (Alesh, 1998; Cereceda and Schemenauer, 1998). Este mismo colector registró como tasa máxima mensual de captación de niebla 55.6 l/m²/d durante marzo de 2011 y como tasa máxima anual 24.2 l/m²/d durante el año 2010. Destaca a su vez por su elevada tasa

de captación de niebla el colector Montseny Antenas, con una tasa de recolección de niebla que alcanza $6.6 \text{ l/m}^2/\text{d}$ ($6.2 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura). Este colector se encuentra a 90 km de distancia del colector Puig Neulós y a su misma altitud. Sin embargo, en el colector Montseny Canplá, que se encuentra tan sólo a unos 900 m de distancia del colector Montseny Antenas, pero que presenta una altitud 400 m menor y los cuales han estado operativos durante el mismo periodo de tiempo, la tasa de captura de niebla tan sólo ha alcanzado $1.2 \text{ l/m}^2/\text{d}$ ($0.8 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura), un valor cinco veces inferior al de su colector vecino, lo que pone de manifiesto la importancia de la altitud en la captación de niebla. Este aspecto se analiza con detalle en el apartado 4.1.4 de este capítulo.

Cabe destacar del mismo modo las elevadas tasas de captación de niebla registradas por varios de los colectores de niebla situados al sur de la provincia de Valencia y Norte de la provincia de Alicante, como los colectores Montgó, Mariola y Bernia_E, con valores próximos a $6 \text{ l/m}^2/\text{d}$, o los colectores Portella y Mondúver, ambos situados por encima de los 700 m de altitud y a escasos kilómetros de la costa, con tasas de captura de niebla superiores a $4 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Son notables también las tasas de captura obtenidas por varias de los colectores situados al sur del área de estudio, como por ejemplo Arráez, con una tasa superior a $3.3 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Por el lado contrario, sobresale por su baja tasa de captura, el colector Montnegre, con una tasa de recolección de niebla igual a $0.5 \text{ l/m}^2/\text{d}$ ($0.5 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura). Este colector se encuentra a unos 15 km de distancia de los situados en el macizo del Montseny, pero a una altitud de 648 m y más próximo al mar. Por idéntico motivo se distinguen los colectores Sierra Helada y Muela_B. Ambos colectores son los que se encuentran a menor distancia al mar de toda la Red, a menos de un kilómetro, y son los que están instalados a menor altitud (428 y 464 m respectivamente). En todo el periodo que han estado operativos presentan tasas de captación de niebla iguales a 1 y $1.1 \text{ l/m}^2/\text{d}$ respectivamente (0.6 y $0.9 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura).

En cuanto al régimen estacional de la captación de niebla, se observa, al igual que en la precipitación, un marcado ciclo anual, con dos periodos de mayor recolección, que son fundamentalmente primavera y otoño, y dos periodos menos productivos, invierno y verano, la cual se presenta como la estación más seca. Destacan por su elevada tasa de captura el colector Puig Neulós, que presenta en primavera una tasa de $27.2 \text{ l/m}^2/\text{d}$ ($19.3 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura), así como Montseny Antenas, con una tasa igual a $11.6 \text{ l/m}^2/\text{d}$ ($10.5 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura) durante el otoño. Mientras que los captadores Alhamilla y Montnegre sobresalen por su escasa tasa de captura durante el verano, con un valor igual a $0.1 \text{ l/m}^2/\text{d}$ ($0.1 \text{ l/m}^2/\text{d}$ de niebla pura) en ambos casos.

En referencia a los valores de **precipitación** registrados, se observa un claro gradiente latitudinal negativo, con máximos en los colectores situados al norte del área de estudio y mínimos en los del sur, a excepción de los situados en la zona sur de Valencia y norte de Alicante, que es un área bien conocida por su elevada pluviometría. Es destacable a su vez como los valores registrados de precipitación son, en la mayoría de los casos, inferiores a los de niebla. En tan sólo dos de los colectores analizados la tasa de precipitación supera a la de niebla recolectada (Montnegre y Montseny Canplá). En el resto de colectores, la tasa de captación de niebla es mayor. Además, en la mayoría de los casos, la niebla capturada representa más del doble que la precipitación, siendo en varios emplazamientos esta relación superior a 3:1. Esta proporción entre las tasas de

captura de agua de niebla y de lluvia se incrementa notablemente en la estación de verano, donde en lugares como Puig Neulós y Portella la relación pasa a ser de 8:1 o en algunos emplazamientos del sur del área de estudio, como en Puig Campana o Peñones, con una relación de 4:1, o en Muela_A, con una proporción de 3:1 a favor de la niebla. En lugares especialmente secos en la estación de verano, como son los tres señalados en último lugar, el aprovechamiento de la niebla puede ayudar a incrementar actividades en donde el agua es un factor limitante en esa época del año, como son las repoblaciones forestales o el suministro hídrico a la fauna silvestre.

4.1.2 SERIE TEMPORAL DE LA TASA ESTACIONAL DE CAPTURA DE NIEBLA DE TODOS LOS COLECTORES DE LA RED, PERIODO 2003-2012

La figura 4-1 representa, para cada colector de la Red, la tasa estacional de captura de agua de niebla, para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2012, calculada en base a los datos disponibles para cada uno de ellos.

Como podemos observar, existe en general una buena correlación entre los valores de los distintos colectores, fundamentalmente entre los que se encuentran más próximos y están ubicados en emplazamientos con condiciones geográficas similares (altitud, distancia al mar, etc.), aunque con algunos matices como se verá más adelante. La forma de dientes de sierra de las series indica la existencia de variación estacional, además de observarse variación interanual entre las tasas de captura. Las tasas de captura más elevadas, representadas por los picos de las sierras, han ocurrido fundamentalmente en las estaciones de primavera y otoño. Destacan por sus elevadas tasas de captura la primavera de 2004, tanto en el centro como la zona norte, así como la de 2011 en las tres zonas. En las series más largas, como las de Montgó, Mondúver, Mariola o Casillas, se observan otros periodos de capturas elevadas, como el invierno y la primavera de 2007 o el otoño de 2008. Por el contrario, el invierno y el verano se presentan como las estaciones de menor captura, apareciendo en los gráficos con forma de fondo de valle. El invierno de 2012 aparece como un periodo de escasa o nula captura en las tres grandes zonas, así como los veranos de 2010 y 2012, fundamentalmente en los colectores del sur, donde todo el 2012, a excepción del otoño, se mostró poco productivo.

A pesar de que existe una buena correlación en el comportamiento de las distintas series, existen casos concretos en donde diferencias en la altitud u orientación pueden provocar diferencias importantes entre colectores vecinos. Así por ejemplo, Montseny Canplá, Muela_B y Bujete, presentan tasas estacionales de captura menores que sus colectores más próximos (Montseny Antenas, Muela_A y Cinto Cabra), a pesar de estar separados por pocos kilómetros, incluso metros. Esto pone de relieve la importancia de una adecuada selección de cada emplazamiento para optimizar la recolección de agua, prestando especial atención a la altitud, a la pendiente de las laderas cercanas y a la orientación. En el apartado 4.1.4 se analiza con detalle lo ocurrido en los colectores situados en el macizo del Montseny y en la sierra de la Muela, donde la altitud ha sido clave para explicar estas diferencias.

En la zona norte, se distinguen por sus elevadas tasas de captura los colectores Puig Neulós, con valores superiores a 30 l/m²/d en el invierno de 2010 y la primavera de 2011; Montseny Antenas y Colomer, con tasas que han superado los 10 l/m²/d en alguna estación; y Portella, que alcanzó un registro de 8.5 l/m²/d en la primavera de 2011. Por el contrario, los colectores Montnegre y Montseny Canplá se han mostrado como los menos productivos.

En la zona centro, las tasas de captura más elevadas las han presentado colectores situados próximos al mar, como Montgó, Bernia_E o Mondúver, así como Mariola, el cual se encuentra en una montaña alejada casi 40 km de la línea de costa. Todos ellos presentan valores superiores a 10 l/m²/d en algunas estaciones, alcanzando los 15 l/m²/d Montgó y Mondúver en la primavera de 2004 y Mariola en la primavera de 2011. Por otro lado, los colectores situados en zonas de interior han mostrado las tasas más bajas de recolección de agua. Sobresalen por encima del resto Bujete y Sierra Helada, el cual, a pesar de encontrarse a muy poca distancia del mar, debido a su escasa altitud (428 m), presenta una baja tasa de captura de agua de niebla.

En la zona sur, los colectores Arráez, Muela_A y Alhamilla han registrado las mayores tasas de captación, mientras que Muela_B la más baja, encontrándose Crevillente y Peñones en una situación intermedia. Cabe destacar las diferencias encontradas entre los colectores Muela_A y Muela_B, los cuales se encuentran situados en la misma montaña, con la misma orientación, pero a diferente altitud. Los 92 m de diferencia que existen entre ellos parece ser el factor clave que explica estas diferencias.

4.1.3 VOLÚMENES MÁXIMOS DIARIOS DE RECOLECCIÓN DE NIEBLA EN DÍAS CON ESCASA PRECIPITACIÓN

En la figura 4-2 se muestran los **volúmenes máximos diarios**¹ de recolección de agua de niebla en días con escasa precipitación (<5 mm), para todos los colectores experimentales de la Red. Se considera de interés este dato para ilustrar el potencial de recolección de niebla en días sin precipitación o cuando ésta es relativamente escasa.

Como se puede observar en la figura, en todos los emplazamientos estudiados, excepto en Montseny Canplá (3), Montnegre (4) y Bujete (8), ha habido días iguales o superiores a 30 l/m² de recolección de niebla, habiéndose registrado en 8 de los 23 colectores días con volúmenes capturados superiores a 90 l/m². Destaca por encima del resto el día 4 de febrero de 2010, cuando en el Puig Neulós (1) se contabilizó un volumen de captura de niebla de 272 l/m². Son reseñables también los 160.3 l/m² registrados en Bernia_E (16) el 24 de marzo de 2011, los 119.3 l/m² de Arráez (22) el 8 de noviembre de 2012 o los 106.5 l/m² de Machos Nieva (10) el 8 de marzo de 2011. La mayoría de estos días de capturas tan elevadas han ocurrido en primavera.

¹ En el Capítulo 5, apartado 5.2.1, se muestra el volumen máximo diario alcanzado en cada colector de niebla, detallándose la situación sinóptica que lo ha generado. A su vez, se muestra, para cada colector de niebla, el volumen máximo alcanzado en las 26 situaciones sinópticas definidas por la clasificación de Jenkinson y Collison.

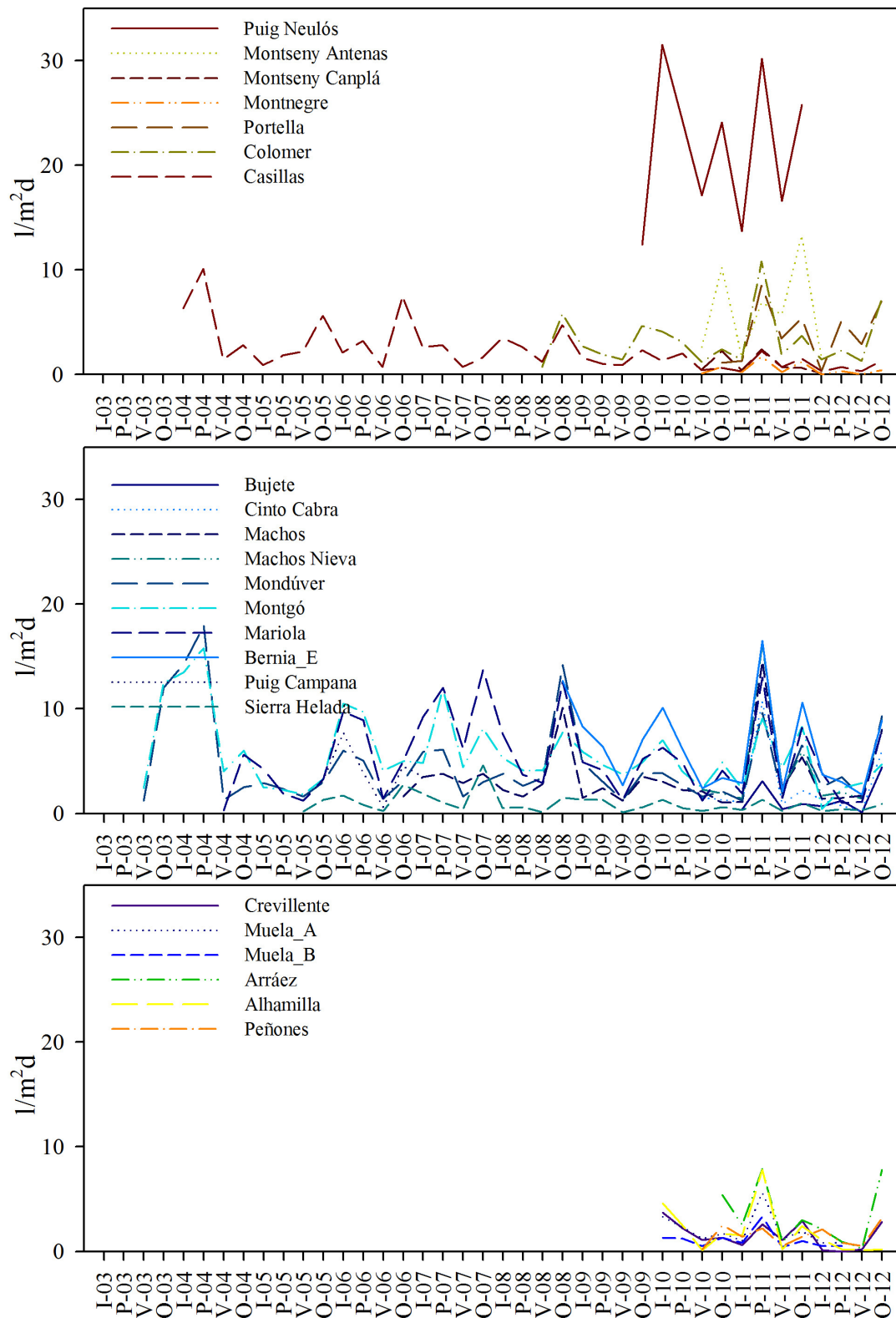


Figura 4-1: Serie temporal de la tasa estacional de captura de agua de niebla de todos los colectores de la Red, para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2012. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

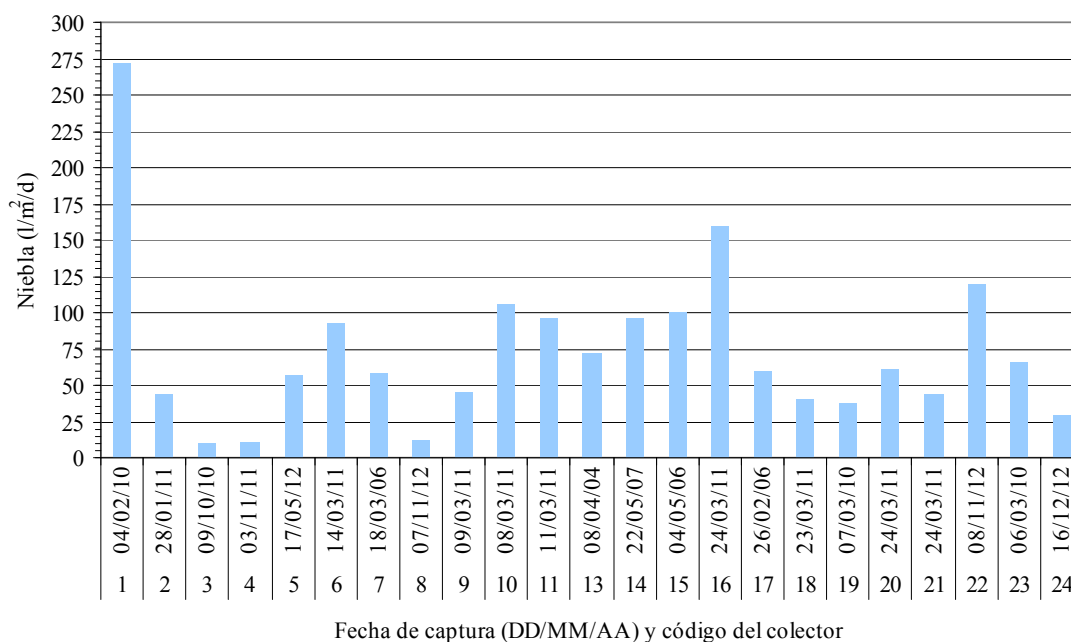


Figura 4-2: Volúmenes de niebla diarios máximos recolectados por todos los colectores experimentales de la Red en días con apenas precipitación (<5 mm)

4.1.4 LA IMPORTANCIA DE LA ALTITUD EN LA RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA

Para conocer **cómo influye la altitud en la recolección de agua de niebla**, se realizó el mismo experimento en dos emplazamientos diferentes. En cada uno de ellos se instaló un par de colectores de niebla con la misma orientación y a menos de un kilómetro de distancia, pero a distinta altitud, de modo que éste fuera el único factor diferenciador para la captura de agua de niebla. Los lugares seleccionados fueron, por un lado, el macizo del Montseny, al norte del área de estudio, y por otro, la sierra de la Muela, en el sur. En el primero de ellos se instalaron los colectores Montseny Antenas (1 230 m) y Montseny Canplá (832 m), con una diferencia de 398 m de altitud (figura 4-3), mientras que en el segundo fueron Muela_A (556 m) y Muela_B (464 m), con 92 m de desigualdad (figura 4-4).

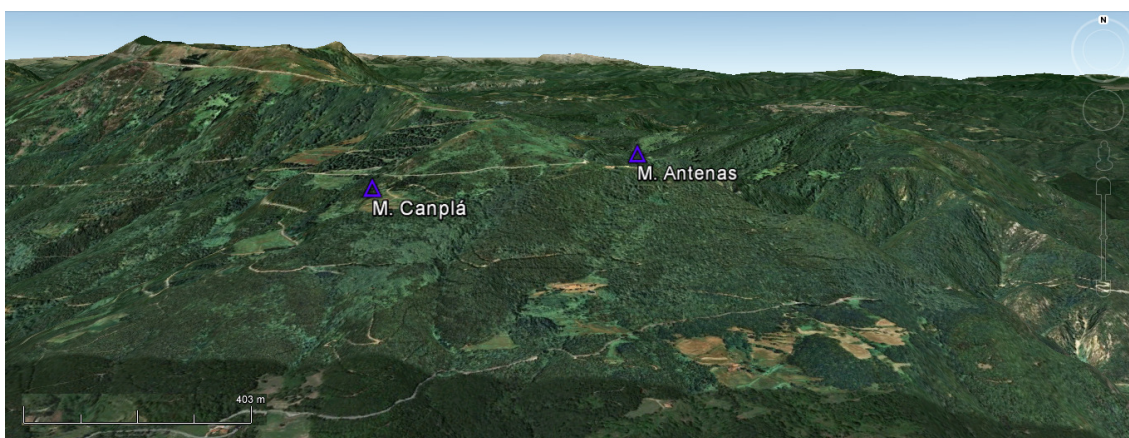


Figura 4-3: Detalle de la localización de los colectores instalados en el macizo del Montseny (Barcelona)

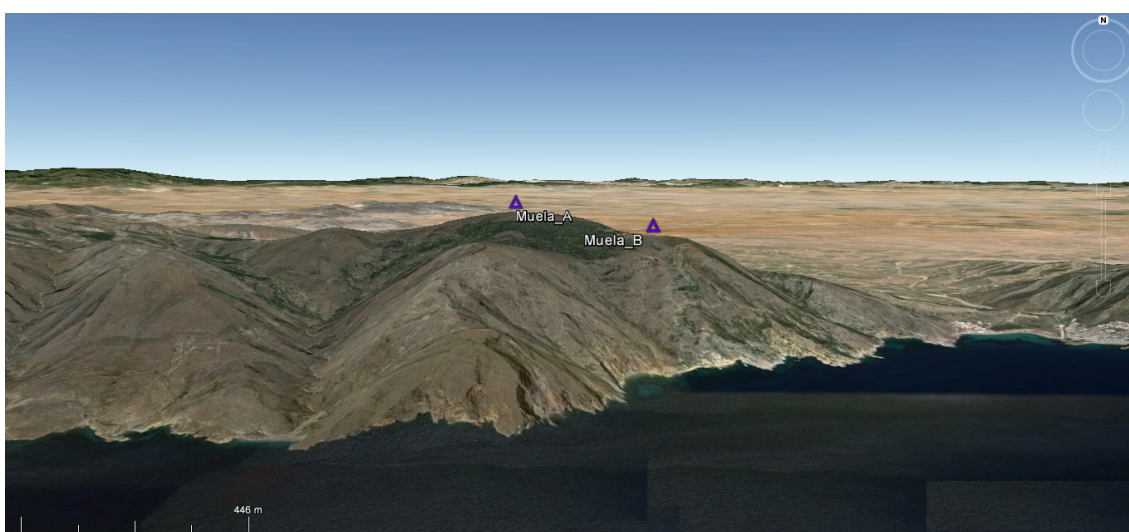


Figura 4-4: Detalle de la localización de los colectores instalados en la sierra de la Muela (Murcia)

La figura 4-5 muestra el volumen acumulado de agua capturada por cada colector de niebla en los dos emplazamientos analizados. Dicho volumen representa toda el agua capturada por cada colector de niebla durante el periodo de tiempo en que el par de captadores estuvo funcionando simultáneamente, excluyéndose del cálculo aquellos días en los que alguno de los dos no se encontraba operativo. Su cálculo se ha realizado en base a los datos de niebla acumulada diaria. Y como se puede observar, existen diferencias muy importantes en ambos emplazamientos. En el macizo del Montseny, el colector situado a mayor altitud recolectó casi cinco veces más agua que su par ($3\,035\text{ l/m}^2$ frente a 619 l/m^2), mientras que en la sierra de la Muela, el que se encontraba a mayor cota capturó casi el doble ($1\,492\text{ l/m}^2$ frente a 836 l/m^2). Hay que destacar que, mientras en el primero de los casos la diferencia de altitud es sustancial (casi 400 m), en el segundo no alcanza los 100 m.

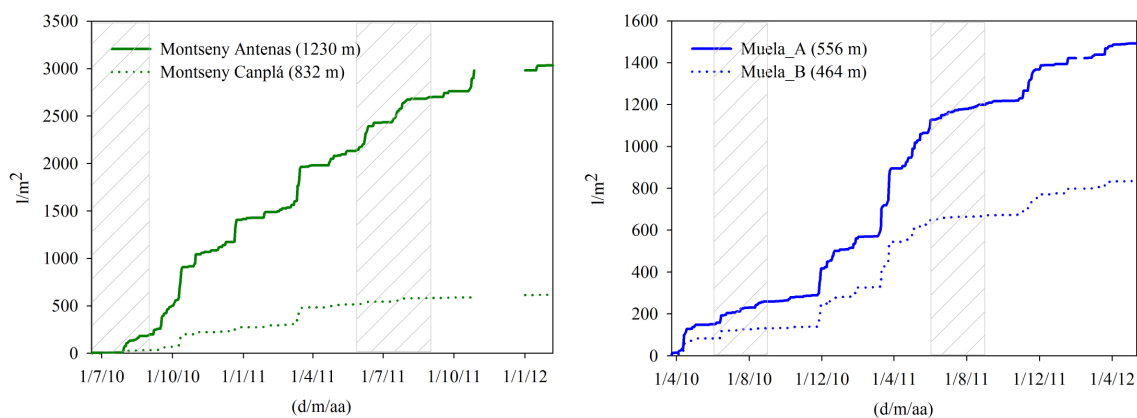


Figura 4-5: Volumen acumulado de agua capturada en el macizo del Montseny (izquierda) y en la sierra de la Muela (derecha) por cada par de colectores de niebla instalado en dichos emplazamientos durante el periodo en el que estuvieron funcionando simultáneamente. En sombreado aparece la estación de verano

Del mismo modo, se ha analizado, para cada estación del año, la relación entre el volumen recolectado para cada uno de los miembros, tanto en el Montseny como en la Muela, calculado de la siguiente manera: Volumen (M.Antenas)/Volumen (M. Canplá) y Volumen (Muela_A)/Volumen (Muela_B) y los resultados se muestran en la figura 4-6. Y se observa como las diferencias entre los volúmenes capturados varían notablemente en función de la estación del año. En el caso del macizo del Montseny, la diferencia entre los volúmenes recolectados alcanza el máximo valor en verano, con una relación de 7:1 a favor de Montseny Antenas, mientras que desciende a 3:1 en primavera y se mantiene alrededor de 6:1 en invierno y otoño. En la sierra de la Muela también se ha registrado un incremento en verano en la relación entre Muela_A y Muela_B, alcanzando el valor de 2.7:1, mientras que en el resto de estaciones se mantiene alrededor de 1.7:1. En la figura 4-5 se puede observar, en sombreado, el volumen acumulado por cada colector durante los periodos estivales, que es donde se han observado las mayores diferencias. En los dos emplazamientos se observa una línea casi plana en los colectores situados a menor cota, siendo especialmente llamativa en Muela_B, lo que indica que apenas han sido capaces de capturar agua en esta época del año.

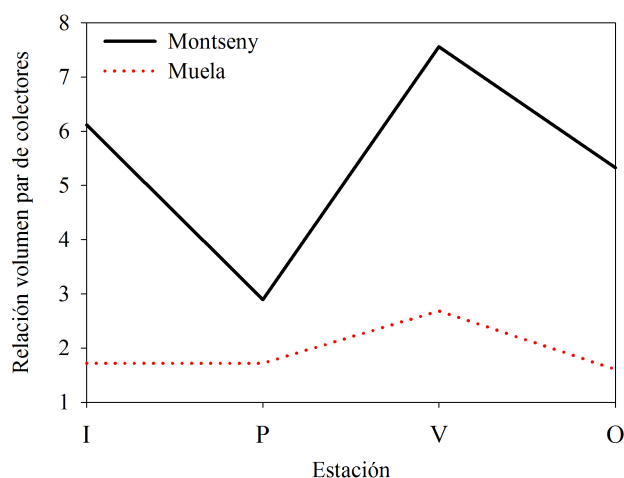


Figura 4-6: Relación entre el volumen de agua recolectado (M.Antenas/M.Canplá; Muela_A/Muela_B) en el par de colectores de niebla instalados en el macizo del Montseny y en la sierra de la Muela, en función de la estación del año

Se observa por tanto, que una correcta selección de la altitud es fundamental para optimizar la recolección de agua de niebla. Se necesita un mínimo de altitud para poder capturar agua con esta técnica. En la zona centro y sur, se ha observado como con altitudes menores de 500 m las tasas de captura son escasas, especialmente en verano, donde el nivel de condensación aumenta debido al incremento de la temperatura. Sin embargo, en la zona norte, el valor de la cota mínima que optimiza la captura es mayor. A su vez, se ha visto que las mayores altitudes no garantizan mayores volúmenes de agua. Es fundamental por tanto determinar para cada emplazamiento la altitud adecuada donde instalar los equipos de captación, así como la mejor orientación.

4.2 PORCENTAJE ANUAL Y ESTACIONAL DE DÍAS CON RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA Y/O LLUVIA

Con el objetivo de analizar en qué época del año es posible extraer agua por medio de los colectores de niebla, mostramos **el porcentaje de días en que se ha recolectado agua** en función de las cuatro estaciones del año, distinguiendo si esa agua procede sólo de la niebla, de la lluvia o de ambas. Su cálculo se ha realizado a partir de los datos de niebla y precipitación acumulada diaria, como la suma del número de días en que la niebla y/o la lluvia es mayor que cero, dividido por el número total de días del periodo de estudio, para todo el año 2011 y para las cuatro estaciones, expresado en tanto por ciento.

La figura 4-7 muestra la **frecuencia anual y estacional** de días con captura de agua de niebla y/o lluvia, para el año 2011. Las categorías de los gráficos representan el

porcentaje anual y estacional de días con, al menos, un evento de “sólo niebla”, “niebla y lluvia”, “sólo lluvia” o “sin recolección”. Se ha escogido para este análisis un par de colectores de cada zona, uno costero (Portella, Mondúver y Arráez) y otro de interior (Machos) o prelitoral (Montseny Antenas y Crevillente). A modo de ejemplo, durante el año 2011, en el colector Mondúver en invierno, se recolectó agua el 27 % de los días (9 % de días con agua procedente exclusivamente de la niebla, más 15 % de niebla y lluvia, más 3 % de agua de sólo lluvia), mientras que durante el 73 % de los días no hubo captación agua.

Podemos observar como el porcentaje anual de días con recolección de agua por medio de los colectores, representado por las áreas rayadas horizontalmente y a cuadros de cada columna, varía entre las diferentes zonas y a su vez, entre los distintos emplazamientos. La zona norte, en su emplazamiento costero (Portella), aparece como la de mayor porcentaje de días con recolección de agua de niebla, bien sea sola o acompañada de lluvia. Allí, durante el 58 % de los días ha habido captación de agua por medio del colector de niebla, descendiendo este porcentaje en el interior. En la zona centro, el porcentaje de días con recolección ha estado en torno al 45 % tanto en el litoral como en el interior, mientras que la zona sur, este valor desciende al 35 % en los dos emplazamientos analizados.

Si observamos lo que ocurre en las cuatro estaciones del año, se distinguen comportamientos diferentes en función de la época analizada. El verano se ha mostrado como la época con mayor porcentaje de días con recolección de niebla en los colectores del norte y del centro (esto ha ocurrido en la mayoría de colectores de la Red de estas dos áreas). En estas áreas, se ha recogido agua en más del 50 % de los días en los cuatro colectores analizados, llegándose a recoger en más del 75 % de los días en Portella. Es sorprendente observar como el verano, a pesar de presentar bajas tasas de recolección en comparación con el resto de estaciones, presenta un elevado número de días con niebla. Ello indica que, aunque es frecuente la presencia de niebla en esta época, su recolección es relativamente escasa, debido, en parte, al poco tiempo que permanece en el lugar, ya que las altas temperaturas propias de la época del año hacen que se disipe con facilidad, aunque es posible que también influyan otros factores (menor densidad de la niebla o velocidad de viento más baja, por ejemplo). Por otro lado, el invierno presenta el menor número de días con recolección de agua en todo el territorio, con captura de niebla en menos del 30 % de los días (este dato se repite en la mayoría de colectores de la Red).

Cabe destacar de igual modo el porcentaje de días en los que se ha recolectado agua procedente exclusivamente de la niebla, con el fin de separar este fenómeno meteorológico de la lluvia, a la cual se encuentra asociado en muchos casos. El porcentaje de días con captura exclusiva de agua de niebla se representa por el área rayada horizontalmente y aparece en la parte inferior de cada columna. Y se observa como, durante el año 2011, el verano se ha mostrado como la época con mayor número de días de este tipo de recolección, en la mayoría de los emplazamientos analizados. Sin embargo, la primavera, época con las mayores tasas de captura, presenta, en general, las menores frecuencias de días con sólo niebla, lo que indica que en esos días su presencia suele ir asociada a episodios de lluvia y nubosidad. Por el contrario, la presencia en verano de un porcentaje elevado de días de sólo niebla indica que, a pesar de ser una época climatológicamente seca en cuanto a la precipitación, es habitual la presencia de

episodios de nieblas, bien sean de advección u orográficas, de las cuales es posible extraer agua. Este mayor porcentaje de situaciones de recolección de agua procedente exclusivamente de la niebla responde a la influencia de las circulaciones locales de viento en el Mediterráneo. Azorin-Molina et al. (2010) comprobaron que gran parte del volumen de agua de niebla recolectado en primavera-verano (Mayo-Septiembre) se debe a la ocurrencia de episodios de nieblas orográficas formadas a favor del avance de la brisa marina hacia el interior. Con las situaciones sinópticas favorables (altas presiones subtropicales sobre Azores, baja térmica en el interior de la Península Ibérica y en el norte de África, y pantano barométrico sobre la cuenca Mediterránea (Azorin-Molina et al., 2011), dominan las circulaciones mesoescalares de vientos del E y SE sobre la fachada oriental de la Península Ibérica, que refuerzan el sistema local de brisas en zonas costeras, y desarrollan nubosidad de tipo orográfico, nubes que quedan ancladas a los puntos culminantes de los accidentes montañosos mediterráneos (Azorin-Molina et al., 2009). Esta nubosidad se desarrolla preferentemente al final de la tarde, alcanzando hasta la mañana siguiente, para disiparse durante las horas centrales de mayor radiación.

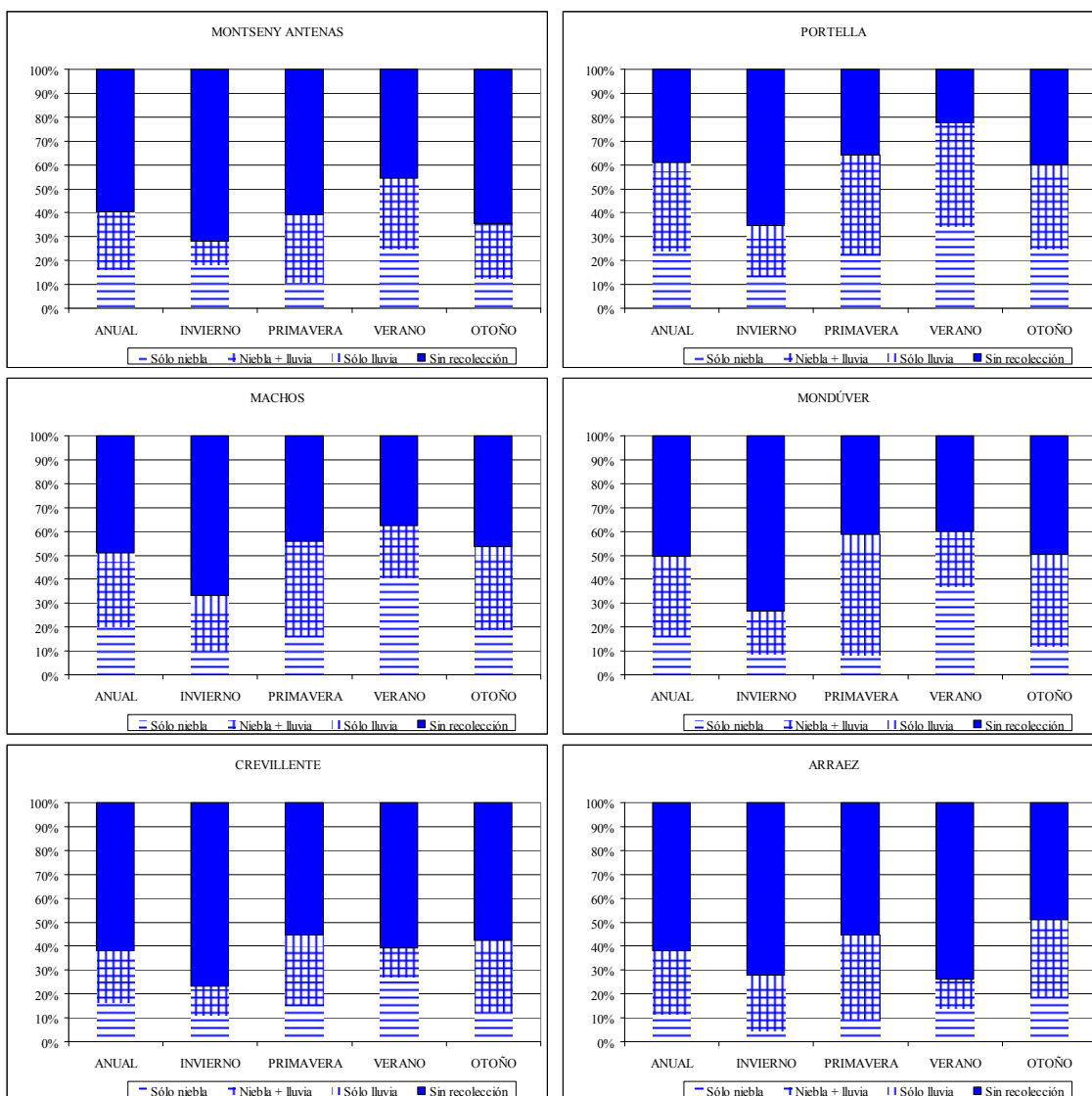


Figura 4-7: Porcentaje anual y estacional de días con al menos un evento de “sólo niebla”, “niebla y lluvia”, “sólo lluvia” y “sin recolección”, durante el año 2011, para los colectores Montseny Antenas y Portella (zona norte), Machos y Mondúver (zona centro), y Crevillente y Arráez (zona sur)

4.3 FRECUENCIA HORARIA DE LA NIEBLA

Con el fin de evaluar cómo se comporta la niebla a lo largo del día, se ha analizado el porcentaje de días en los que se ha recolectado agua en las 24 horas del día durante el año 2011. Para ello hemos calculado la **frecuencia horaria de la niebla**, la cual representa el porcentaje de días del periodo de estudio en los que se ha recolectado niebla en cada una de las 24 horas del día. Su cálculo se ha realizado, a partir de los datos de niebla acumulada en una hora, como la suma del número de días en los que se ha recolectado niebla, dividido por el número total de días del periodo de estudio, para cada una de las 24 horas del día, en tanto por ciento. A modo de ejemplo, el colector Montgó, durante el año 2011, a las 6 horas ha tenido presencia (y captura) de niebla el 25 % de los días.

La figura 4-8 muestra la frecuencia horaria de recolección de niebla para todos los colectores de la Red, agrupados en función de su posición geográfica, obtenida con los datos correspondientes al año 2011. Se observan un marcado ciclo diario para la mayoría de emplazamientos, con mayores frecuencias durante las primeras y últimas horas del día (horas nocturnas), y con menores porcentajes en las horas centrales del día (horas diurnas). Estas fluctuaciones diarias en la frecuencia horaria de recolección de niebla pueden deberse al desarrollo y disipación de nieblas orográficas, ya que éstas están asociadas a las fluctuaciones diarias de la temperatura del aire. Cuando la temperatura desciende, el vapor de agua presente en la masa de aire ascendente puede condensar y producir niebla. Por el contrario, cuando la temperatura del aire aumenta en las horas diurnas del día, puede no haber suficiente enfriamiento en la masa de aire ascendente para producir la condensación del vapor de agua, por lo que se inhibe la formación de niebla.

Las mayores frecuencias, superiores al 30 %, las encontramos a primeras horas de la mañana en el colector Puig Neulós. A su vez, Portella, también situado en la zona norte, alcanza porcentajes similares a los de Puig Neulós durante la noche, aunque la presencia de niebla disminuye notablemente durante las horas diurnas del día. Por otro lado, las menores frecuencias aparecen en los colectores Montseny Canplá, Montnegre y Sierra Helada, los cuales muestran una curva prácticamente plana próxima al 5 % durante todas las horas del día, con un ligero incremento durante la tarde-noche.

Si comparamos las tres grandes zonas, se observa como las mayores frecuencias aparecen en determinados colectores de la zona norte. Sin embargo, esta zona también presenta emplazamientos con escasa presencia de niebla, como Montseny Canplá y Montnegre. También podemos ver en varios colectores, como Montseny Antenas y Casillas, que el pico de máxima frecuencia aparece a las 18 h en el primero y algo más tarde, a las 21 h en el segundo, y no a primeras horas del día como en la mayoría de colectores. Estos captadores se encuentran instalados a una altitud superior a 1 100 m y alejados del mar 21 y 46 km respectivamente. En la zona centro se puede ver como en una gran parte de los emplazamientos, tanto los de interior como los de costa, existen

franjas horarias con porcentajes superiores al 15 %, a excepción de Bujete y, fundamentalmente, Sierra Helada, donde la frecuencia horaria no alcanza el 5 % en ninguno de los tramos horarios, mostrándose como el colector con menor presencia de niebla de todos los analizados. Los colectores más meridionales muestran un comportamiento más homogéneo, con un marcado ciclo diario en todos ellos, con un máximo a primeras horas y un mínimo a mediodía. Muela_A y Arráz son los colectores con mayor presencia de niebla, superior al 15 % de los días durante gran parte de las noches, mientras que Alhamilla alcanza las menores frecuencias.

Sin embargo, si analizamos la evolución horaria de la niebla en las distintas épocas del año, observamos como su comportamiento cambia en función de la estación en la que nos encontremos. En la figura 4-9 se muestra el porcentaje de días con presencia (y recolección) de niebla en función de la hora del día, para el total del año 2011 y para cada una de las cuatro estaciones del año. Se ha escogido a modo de ejemplo, un par de colectores de cada zona, uno costero (Colomer, Bernia_E y Peñones) y otro de interior (Casillas y Mariola) o prelitoral (Alhamilla). Lo primero que podemos observar es que, en los seis colectores analizados, la forma de la curva es muy similar entre las distintas estaciones del año, salvo en las que presentan menor frecuencia, en las que se vuelve casi plana. Ello indica que la niebla suele aparecer en cada emplazamiento a unos intervalos horarios determinados, aunque con distinta frecuencia en función de la estación. La primavera se muestra como la época con mayor porcentaje de días con niebla en todas las áreas, tanto en el interior como en la costa. Del mismo modo, en el otoño los porcentajes son elevados y similares a los de la primavera en la zona centro, mientras que en las otras su importancia es menor. Sin embargo, las mayores diferencias entre áreas las encontramos en las estaciones con menor presencia de niebla. Así, en el norte, el invierno es la época con menor porcentaje de días con niebla, mientras que en el sur es el verano, con un porcentaje muy bajo en el colector situado más alejado de la costa (Alhamilla) y con presencia casi nula durante las horas centrales del día en la costa (Peñones) debido al calor y a la alta radiación solar. En la zona centro, no existen diferencias tan claras entre el invierno y el verano, mostrándose ambas como las de menor número de días con captura de niebla.

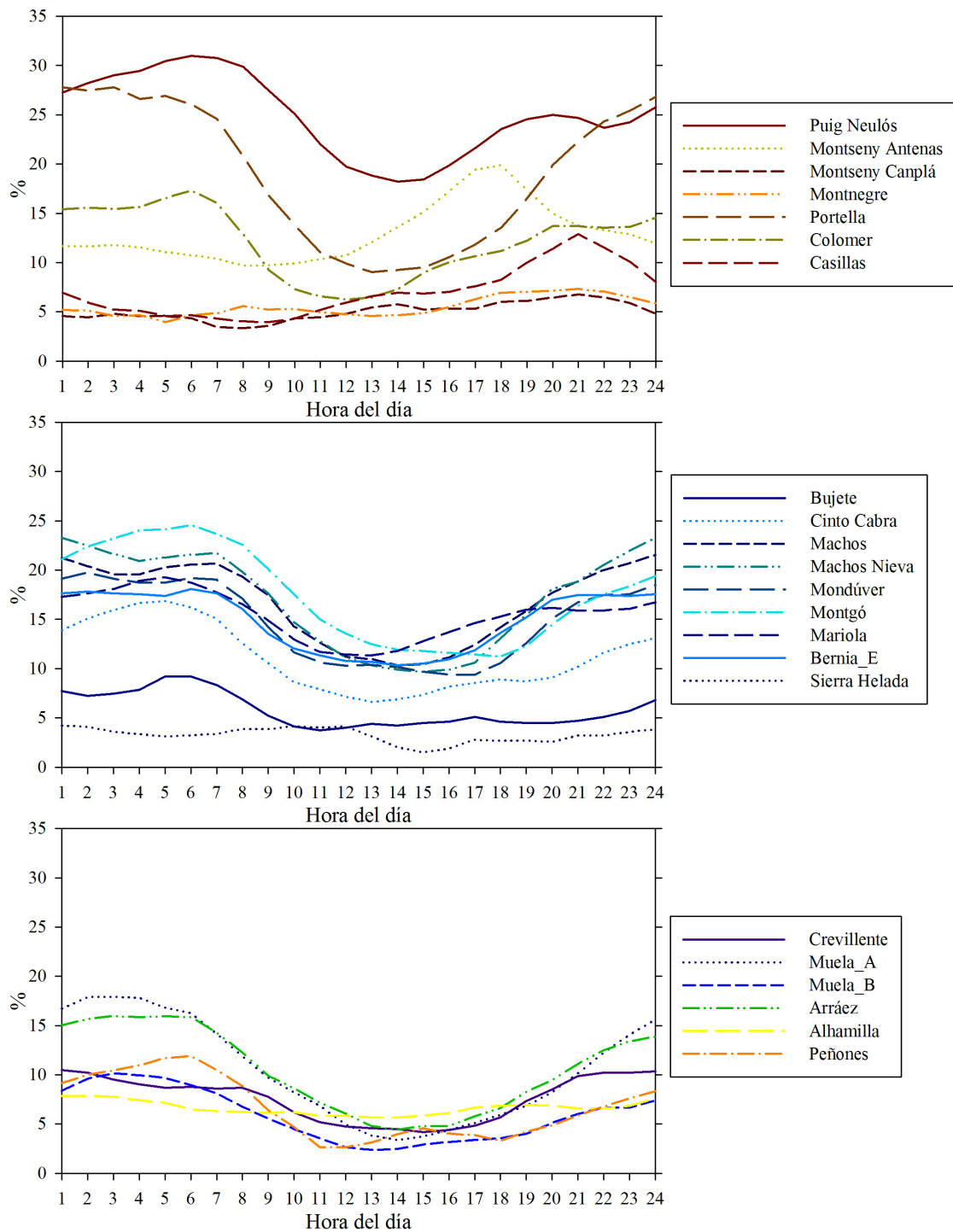


Figura 4-8: Porcentaje de días con recolección de niebla en función de la hora del día, durante el año 2011. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

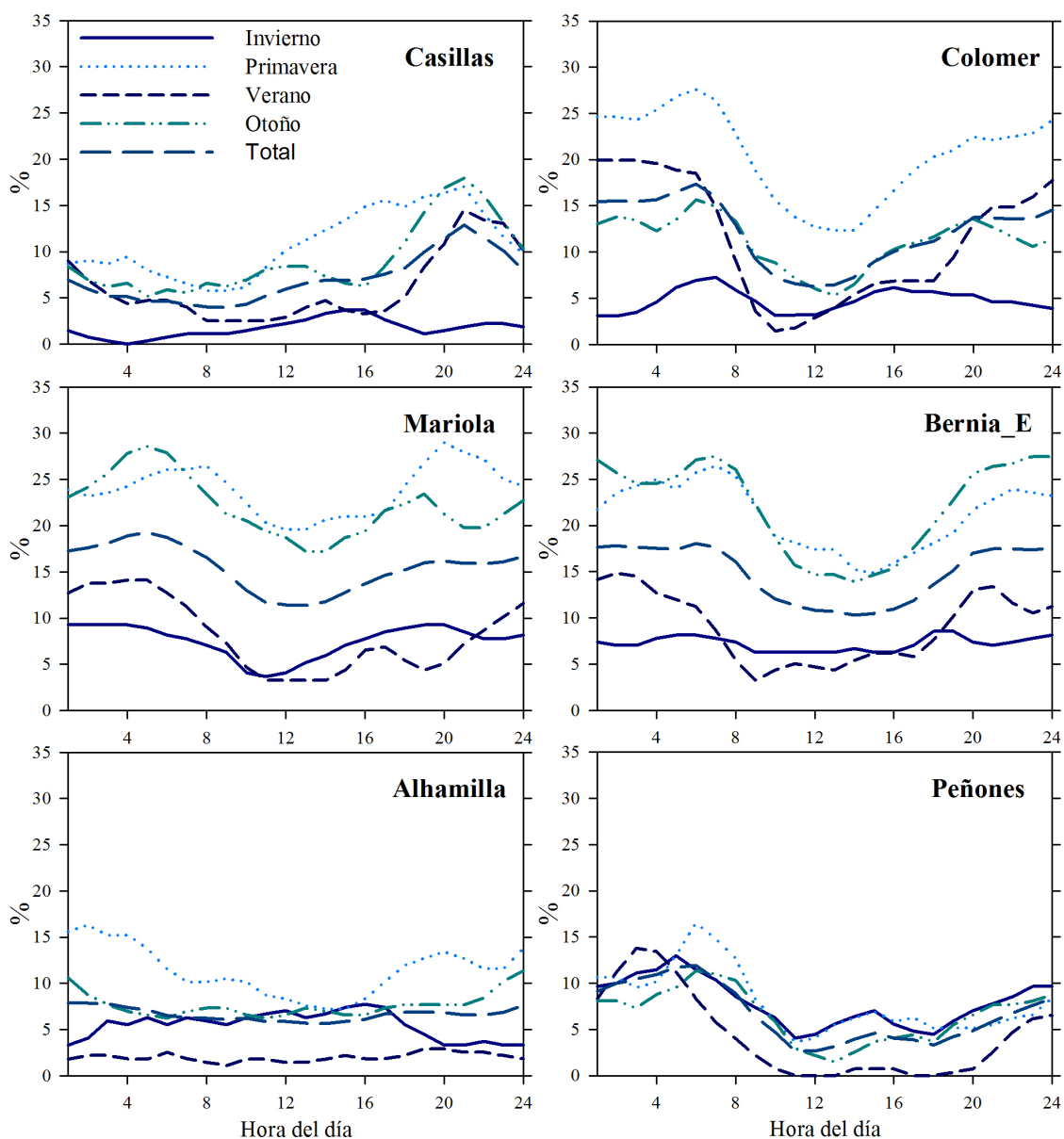


Figura 4-9: Porcentaje de días con recolección de niebla en función de la hora del día, durante el año 2011 (Total) y para cada estación del año, para los colectores Casillas y Colomer (zona norte), Mariola y Bernia_E (zona centro) y Alhamilla y Peñones (zona sur)

4.4 DURACIÓN DE LOS EPISODIOS DE NIEBLA

Con el objetivo de obtener información sobre cuánto tiempo duran los eventos de recolección de niebla, se analiza en este apartado la duración de los episodios de niebla de todos los colectores. Según Marzol (2005), se entiende por **episodio de niebla** al tiempo, expresado en horas, en el que de manera ininterrumpida este fenómeno aparece

en el lugar. En nuestro caso, lo aplicamos como el tiempo, expresado en horas, en el que de manera ininterrumpida se produce recolección de niebla, con los datos correspondientes al año 2011.

Se ha calculado la **duración, en horas, de cada episodio de niebla** que ha generado recolección de agua, independientemente de si ha habido lluvia o no. También se ha calculado la tasa de recolección de niebla de cada uno de dichos eventos, en $l/m^2/h$, como la relación entre el volumen capturado en cada evento y su duración. El cálculo de ambas variables se ha realizado a partir de los datos de niebla acumulada en una hora.

La figura 4-10 muestra la duración de cada evento de recolección de niebla frente a su tasa de captura, para todos los episodios de captura de niebla acontecidos durante el año 2011 y para todos los colectores analizados. Se han agrupado los colectores en función de su posición geográfica para facilitar la interpretación de resultados. Se observa como, en las tres grandes áreas, las duraciones más frecuentes de los episodios de niebla son menores de 5 horas, siendo también abundantes las comprendidas entre 6 y 10 horas. Este resultado coincide con los obtenidos en el apartado 4.3, donde se ha visto que las horas nocturnas son las que presentan captación de niebla con mayor frecuencia, por lo que la duración de los episodios más frecuentes no excede lo que suele durar una noche. A su vez, si exceptuamos el colector Puig Neulós que vuelve a destacar por su elevada tasa de captación, las tasas de captura suelen ser inferiores a $5 l/m^2/h$ cuando los episodios son de corta duración (entre 1 y 10 horas). Se observa también una correlación positiva entre la duración y la tasa de captación. Por lo general, los episodios de larga duración han presentado tasas de recolección de agua más elevadas que los de menor permanencia.

La zona norte del área de estudio presenta los episodios con tasas de recolección más elevadas, debido fundamentalmente a los colectores Puig Neulós y Montseny Antenas, cuyos valores promedio son los más elevados de toda la Red (figura 4-11). Sin embargo, las duraciones de los episodios no destacan por ser más largas que en las otras áreas, a pesar de presentar el episodio de mayor duración, el cual fue registrado por el colector Puig Neulós. Dicho episodio ocurrió en marzo, tuvo una duración de 81 horas (desde las 22 horas del día 13 hasta las 6 horas del 17, en marzo) y una tasa promedio de recolección de $10.5 l/m^2/h$. Del mismo modo, el Puig Neulós registró el episodio con la tasa de captura más elevada, la cual alcanzó un promedio de $12.2 l/m^2/h$ durante las 41 horas que permaneció. Dicho episodio también se midió en marzo (desde las 13 horas del día 11 hasta las 5 horas del día 13 de marzo) y registró un pico máximo de captura de $25.5 l/m^2$ durante una hora.

La zona central del área de estudio destaca por presentar un número elevado de episodios de más de 20 horas de duración. Estos episodios se han registrado tanto en colectores de interior como de costa, no sobresaliendo ningún emplazamiento en particular. Por el contrario, los colectores Bujete y Sierra Helada destacan por apenas presentar episodios de larga duración, siendo los más longevos de 27 y 22 horas respectivamente. Los episodios de mayor duración se han registrado en Machos y Machos Nieva (77 horas, entre los días 22 y 25 de marzo en ambos casos) y en Mariola (75 horas, entre el 7 y el 10 de marzo).

La parte más meridional del área de estudio concentra sus episodios en duraciones cortas, aunque también destaca por haber registrado un buen número de episodios de más de 20 horas de permanencia, tanto en colectores litorales como en los más alejados de la costa. Las tasas de captura son, en general, más bajas que en las otras áreas, con pocos episodios que hayan superado los 5 l/m²/h. El episodio de mayor duración, que a su vez fue el que registró la mayor tasa promedio de recolección, aconteció en Alhamilla y tuvo una duración de 76 horas (en marzo, desde las 8 horas del día 8 hasta las 11 horas del día 11) y un promedio de 5.6 l/m²/h, con picos de 10 l/m²/h durante determinados intervalos del evento.

En la figura 4-11 se presenta la duración y la tasa de recolección promedio de todos los episodios de niebla registrados por los colectores durante el año 2011. Las duraciones promedio de los episodios suelen oscilar entre las 3 y las 7 horas, observándose una correlación positiva entre la duración y la tasa de captura. Las tasas de captura más comunes se encuentran entre 0.5 y 0.7 l/m²/h, sobresaliendo por elevadas las registradas en Puig Neulós (1.5 l/m²/h), Montseny Antenas (1.1 l/m²/h) y Bernia_E (0.9 l/m²/h), y por escasa la de Montnegre (0.25 l/m²/h).

La parte septentrional del área de estudio alberga los emplazamientos con mayores tasas promedio de captura, así como los menos productivos. En el colector Montnegre la tasa de recolección es llamativamente pequeña, en comparación con la duración de sus episodios y con las tasas de colectores próximos. Este colector se encuentra emplazado en un paraje de vegetación muy abundante en donde fue incluso difícil encontrar una parcela despejada para instalarlo, teniendo que realizar un aclarado selectivo a su alrededor para mejorar las condiciones de muestreo. A pesar de que se procuró instalar el equipo en un lugar donde los árboles no actuasen como barrera, quizás hubiera sido necesario un aclarado más extenso para recolectar agua en mejores condiciones. Por este motivo, los datos de este colector deben ser analizados con cautela.

La zona centro y en concreto, la zona que se encuentra entre el sur de la provincia de Valencia y el norte de la de Alicante, destaca por presentar colectores, tanto de interior como de costa, con duraciones promedio elevadas, superiores a las 7 horas en Mariola y Bernia_E. Los colectores Machos, Machos Nieva, Mondúver y Montgó presentan duraciones medias superiores a las 6 horas, mientras que en el resto de toda el área de estudio tan sólo Puig Neulós supera dicho valor.

En la parte sur, Arráz y Alhamilla presentan las duraciones promedio más elevadas, con valores superiores a 5 horas, mientras que Peñones muestra el valor más bajo, con 3 horas. La tasa promedio de captura se muestra bastante homogénea entre todos los colectores, oscilando entre 0.5 y 0.7 l/m²/h. Son llamativos los resultados de los colectores Muela_A y Muela_B, los cuales están separados por tan sólo 600 metros de distancia, pero a diferente altitud. En ambos casos, la tasa promedio de captura es muy parecida, pero difieren en cuanto a la duración de los episodios. En la Muela_A, el cual se encuentra instalado a mayor altitud, los episodios de niebla son más largos, lo que se traduce en que los volúmenes de agua totales recolectados hayan sido superiores a los de su vecino Muela_B.

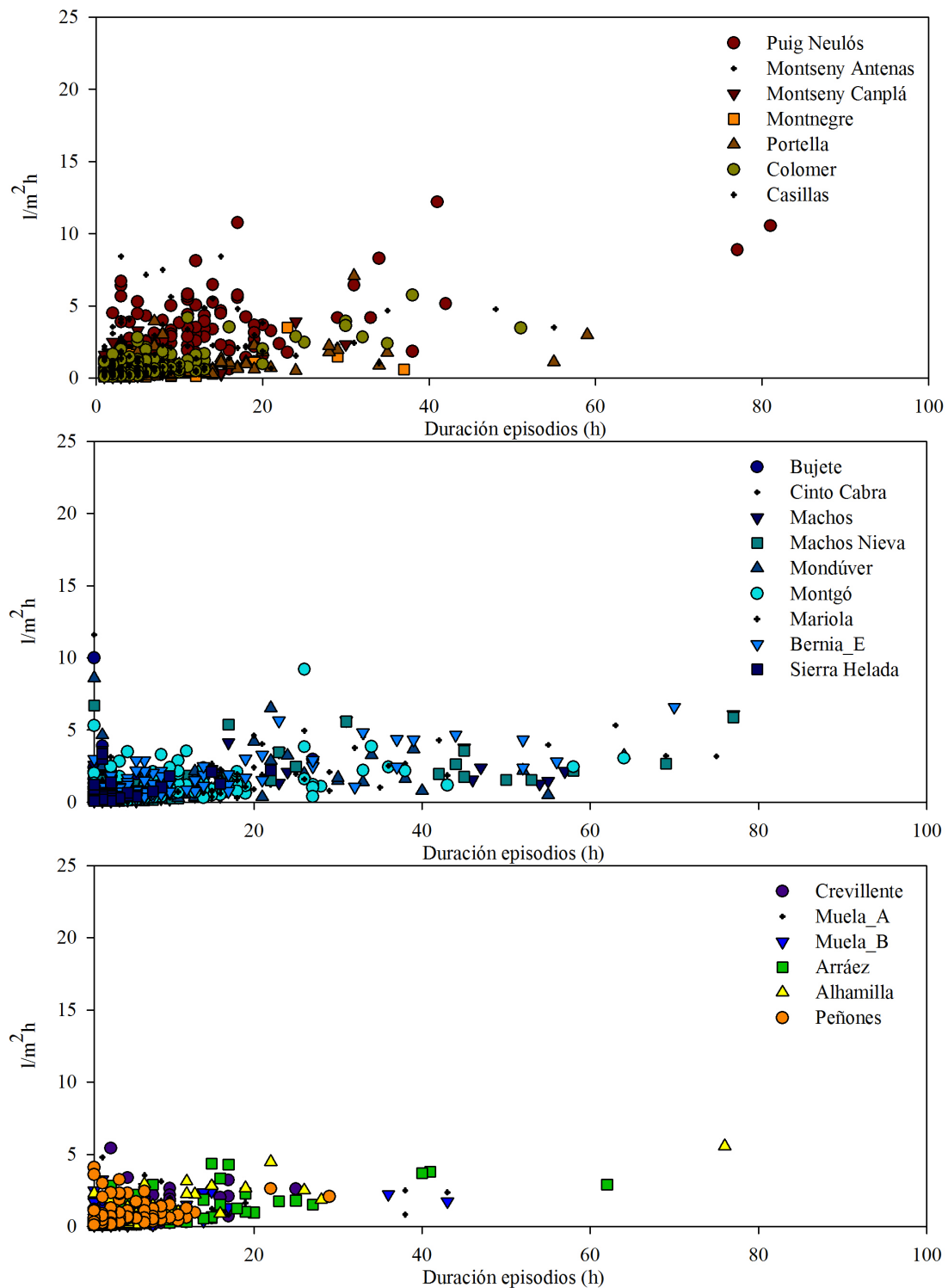


Figura 4-10: Duración de los episodios de recolección de agua de niebla en función de la tasa de captura, durante el año 2011. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

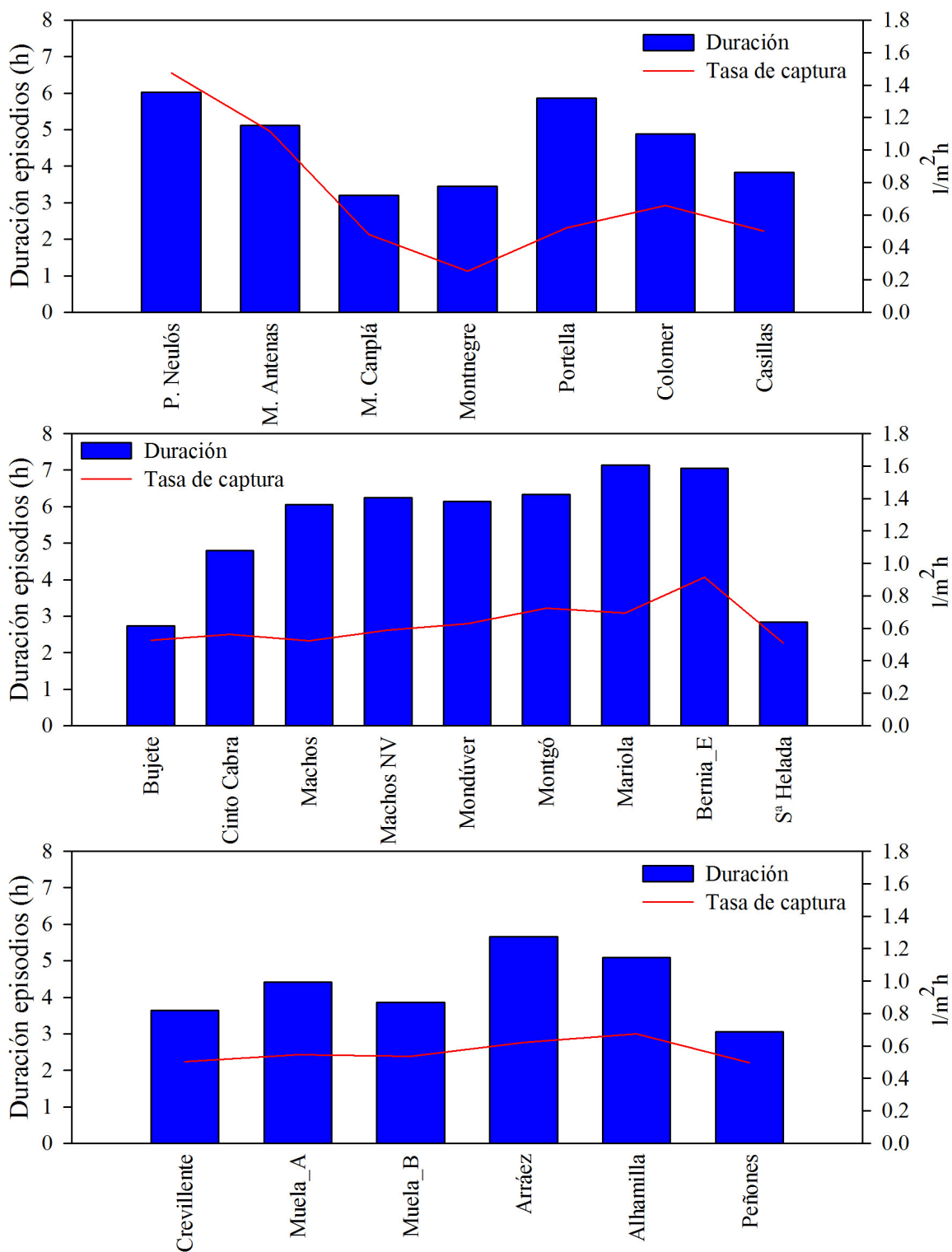


Figura 4-11: Duración media y tasa de recolección media de los episodios de niebla, durante el año 2011. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

4.4.1 EPISODIO DE RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA OCURRIDO DURANTE LOS DÍAS 22 Y 25 DE MARZO DE 2011

Durante los días 22 y 25 de marzo de 2011, tuvo lugar en muchos de los colectores de la Red, el **episodio de mayor duración y a su vez, el de mayor volumen de agua capturado** de todo el año. En la tabla 4-2 se muestra la duración del episodio de niebla en todos los colectores de la Red analizados, así como las fechas de inicio y finalización, y los volúmenes de niebla acumulados ininterrumpidamente durante el evento, así como los de lluvia. Y podemos observar que el episodio no afectó del mismo modo a todos los colectores. En aquellos situados al norte del área de estudio, la duración del episodio fue corta, entre 1 y 3 horas, valores menores que el promedio de todos los episodios de cada uno de ellos (ver figura 4-11). En cambio, en el resto de colectores de la Red, la duración del episodio fue más larga, con valores de captura ininterrumpida de niebla superiores a los tres días en algún caso, como en Machos y Machos Nieva, donde el volumen capturado superó los 450 l/m², por 38.8 mm de lluvia, en las 77 horas que duró el evento. En lugares como Bernia_E o Mariola, la recolección de niebla se prolongó cerca de 70 horas y se obtuvieron volúmenes muy importantes de niebla (460.5 y 221 l/m² respectivamente). En el sur del área de estudio, donde las precipitaciones fueron de poca importancia, también se produjeron capturas muy importantes de niebla y episodios de larga duración, como en Arráez, donde se recolectaron 179.6 l/m², en las 62 horas que duró el evento; o en Muela_A y Muela_B, donde en las 43 horas del episodio se recolectaron 101.8 y 74.6 l/m² respectivamente.

Tabla 4-2: Fechas de inicio y fin, duración y volúmenes acumulados de niebla y precipitación, del episodio de recolección de niebla ocurrido durante los días 22 y 25 de marzo de 2011, para todos los colectores de la Red

Colector	Inicio dd/m/aa-hh	Fin dd/m/aa-hh	Duración (h)	Niebla (l/m²)	Lluvia (mm)
Puig Neulós	25/3/11-09	25/3/11-12	3	1.3	0.0
M. Antenas	22/3/11-18	22/3/11-21	3	1.0	0.0
M. Canplá	23/3/11-04	23/3/11-05	1	0.1	0.0
Montnegre	25/3/11-07	25/3/11-09	2	0.2	0.0
Portella	24/3/11-16	25/3/11-09	17	12.7	0.2
Colomer	23/3/11-05	25/3/11-08	51	176.6	22.1
Casillas	22/3/11-19	24/3/11-05	34	35.1	21.8
Bujete	-	-	-	-	-
Cinto Cabra	22/3/11-21	25/3/11-12	63	335.7	86.2
Machos	22/3/11-16	25/3/11-21	77	469.4	-
Machos NV	22/3/11-16	25/3/11-21	77	452.3	38.8
Mondúver	22/3/11-19	25/3/11-11	64	206.8	83.2
Montgó	22/3/11-20	25/3/11-12	64	194.9	36.0
Mariola	22/3/11-16	25/3/11-13	69	221.0	46.3
Bernia_E	22/3/11-20	25/3/11-18	70	460.5	36.1
S ^a Helada	22/3/11-20	23/3/11-18	22	48.8	6.2
Crevillente	22/3/11-23	23/3/11-09	10	26.3	10.1
Muela_A	23/3/11-15	25/3/11-10	43	101.8	6.2
Muela_B	23/3/11-15	25/3/11-10	43	74.6	3.3
Arráez	22/3/11-21	25/3/11-11	62	179.6	13.6
Alhamilla	22/3/11-18	23/3/11-16	22	98.5	5.5
Peñones	22/3/11-18	22/3/11-19	1	0.3	0.8

Como se puede apreciar en la figura 4-12, la **nubosidad** cubrió la mayor parte del litoral mediterráneo, desde el norte del Cabo de Gata hasta el valle del Ebro, adentrándose de manera considerable hacia el interior peninsular. Por ello, la recolección de niebla fue muy abundante, tanto en los colectores litorales como en los de interior que fueron cubiertos por las nubes bajas del episodio. El día 22 de marzo comenzó a desarrollarse la nubosidad, la cual fue compactándose y extendiéndose los días 23 y 24, hasta que finalmente a partir del día 25 se fue disipando. El extremo sur de litoral, donde se encuentra el colector Peñones, así como la zona norte, con los colectores Puig Neulós, Montseny Antenas, Montseny Canplá y Montnegre, quedaron al margen de esta cobertura nubosa, lo que provocó que las duraciones de los episodios en dichos emplazamientos fueran cortas.

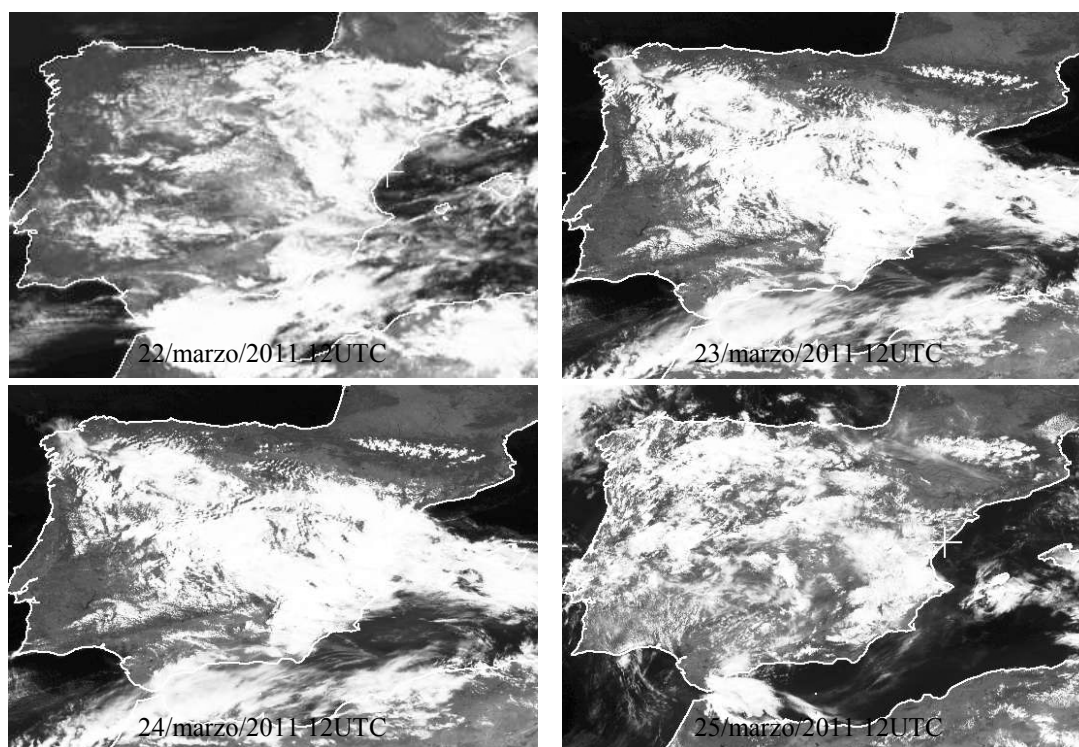


Figura 4-12: Nubosidad sobre la Península Ibérica durante el episodio de niebla ocurrido entre los días 22 y 25 de marzo de 2011 (imágenes del satélite MSG2, canales 1 (día 22) y 12 Norte (resto) obtenidas en <http://www.sat.dundee.ac.uk>)

La **situación sinóptica**, cuya evolución se muestra en la figura 4-13, estuvo marcada por un potente anticiclón centrado sobre las Islas Británicas que se extendía hasta el mar Mediterráneo, lo que favoreció la entrada de vientos de componente Este y Sudeste de largo recorrido marítimo en el litoral este peninsular. Esta situación, unida al aire frío en capas altas, provocó la inestabilización de la atmósfera, favoreciendo el desarrollo de nubosidad, que fue la causante del episodio de niebla, así como de lluvias importantes en la parte sur de la provincia de Valencia y el norte de la de Alicante. A partir del día 25 de marzo, el anticiclón se desplazó al oeste de las Islas Británicas, permitiendo la entrada de un nuevo anticiclón sobre el Mediterráneo, con leve gradiente barométrico sobre el área de estudio, cesando de este modo la entrada de vientos de levante y por tanto, desapareciendo las condiciones favorables para la formación y recolección de niebla.

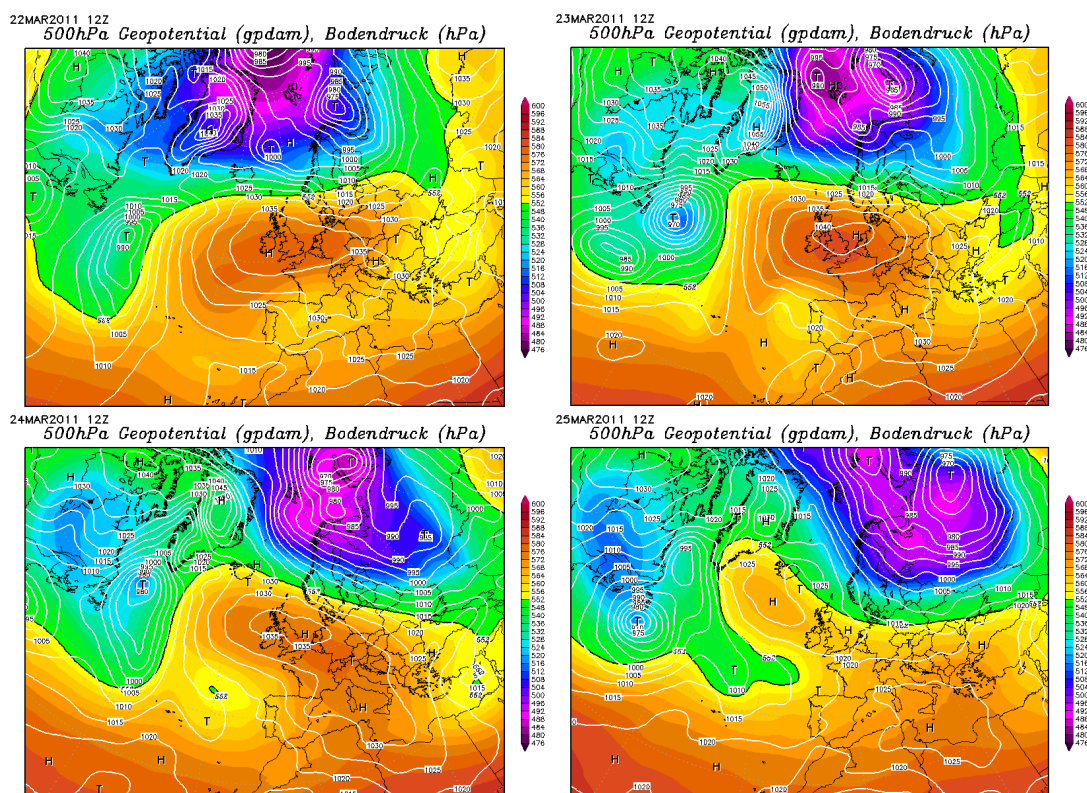


Figura 4-13: Presión a nivel del mar y altura geopotencial de 500 hPa, para los días del 22 al 25 de marzo de 2011 a las 12 h UTC. Mapas de reanálisis GFS, obtenidos en <http://www.wetterzentrale.de>

En la figura 4-14 se muestra la niebla y lluvia acumulada en una hora, así como la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, en valores medios horarios, del episodio de captación de niebla de 77 horas de duración que tuvo lugar en el colector Machos_Nieva entre las 16 h del día 22 hasta las 21 h del día 25 de marzo de 2011 y que fue el de mayor duración de todos los colectores durante ese periodo. Del

mismo modo, se comparan los valores acumulados de niebla y lluvia en todo el episodio. Como se puede observar en el gráfico superior de la figura, se recolectaron 452.3 l/m² de niebla frente a 38.8 mm de lluvia. Las mayores tasas de captura de agua por medio del colector de niebla se produjeron entre los días 23 y 24 de marzo, como muestra la pendiente de la curva, así como la gráfica inferior de la figura. En dicha gráfica podemos observar como los picos en las tasas de captación de niebla coinciden con picos en la velocidad de viento, con valores oscilando entre 8 y 14 m/s, lo que muestra una fuerte correlación entre ambas variables ($r = 0.8$). La velocidad de viento no cesó en ningún momento, estando su dirección comprendida entre 50 y 60°, salvo al final del episodio, cuando, al cambiar la procedencia del viento, cesó la recolección. La temperatura osciló entre 3 y 6°C la mayor parte del evento, mientras que la humedad relativa fue siempre del 100 %. En cuanto a la precipitación, vemos que se distribuyó uniformemente durante todo el episodio, con intensidades inferiores a 1 mm/h la mayor parte del tiempo, lo que indica que en este emplazamiento situado en el interior de la provincia de Valencia, fueron unos días grises, de cielos cubiertos y con precipitación débil, lo que supone unas condiciones óptimas para la recolección de agua por medio de los colectores de niebla.

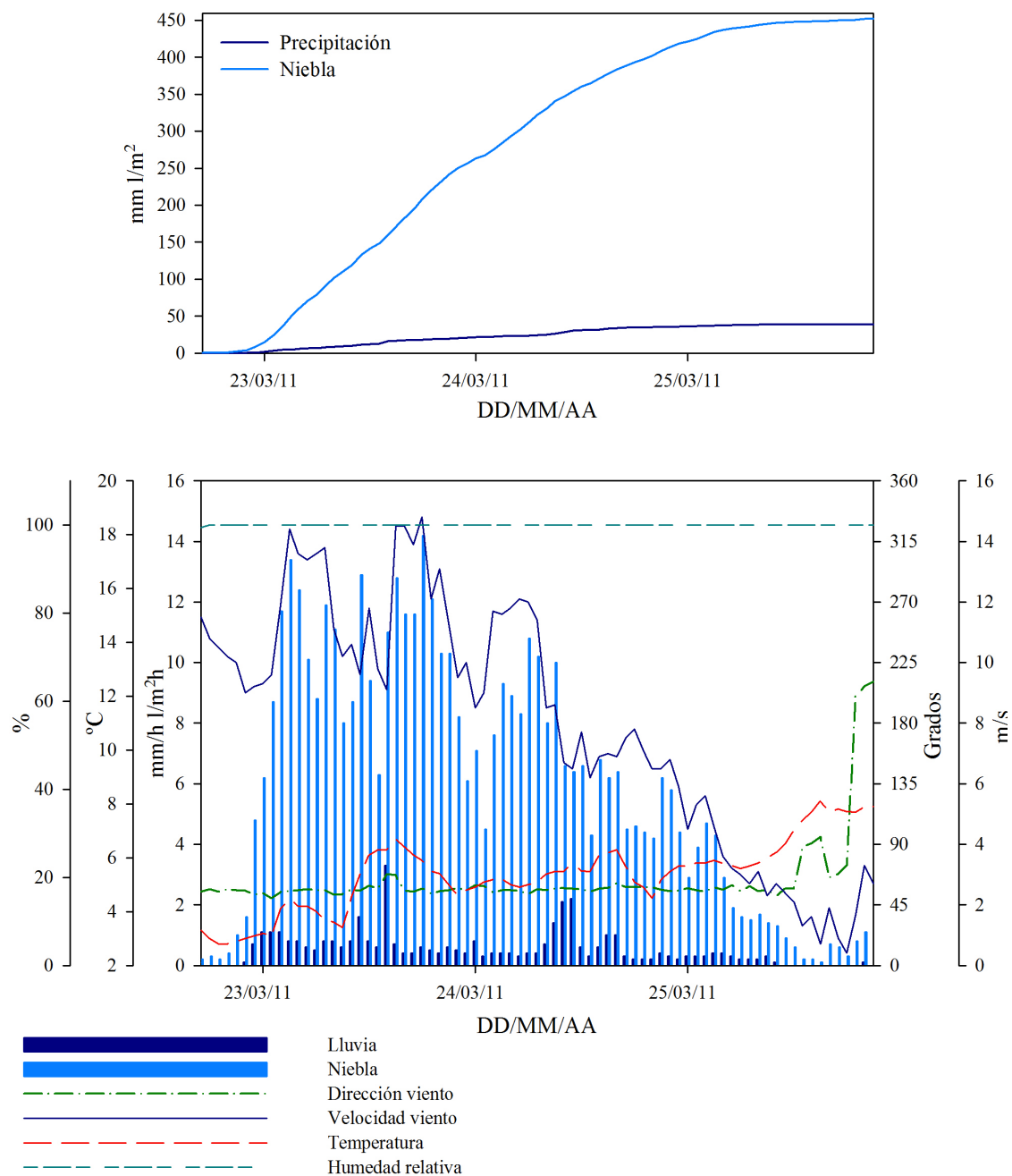


Figura 4-14: Episodio de recolección de agua de niebla ocurrido desde las 16 h del día 22 hasta las 21 h del día 25 de marzo de 2011 en el colector Machos_Nieva (Ayora, Valencia). Niebla y lluvia acumulada (arriba); niebla, lluvia, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento, valores horarios (abajo)

4.5 DIRECCIONES DE VIENTO ÓPTIMAS PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA DE NIEBLA

Conocer el comportamiento del viento y su relación con la niebla es muy importante a la hora de diseñar un sistema de aprovechamiento de agua de niebla, ya que permite orientar los captadores de tipo pantalla hacia la dirección del viento que porta los mayores volúmenes de agua, optimizando de este modo la recolección. Los colectores de niebla experimentales utilizados en este trabajo, al tener forma cilíndrica, han tenido la misma superficie de exposición en todas las direcciones del viento, por lo que su eficacia de captación ha sido independiente de esta variable meteorológica. Con este tipo de sensor, junto a los datos de dirección y velocidad de viento registrados en cada punto, se ha podido determinar la dirección óptima de captura para todos los colectores de la Red.

Cada emplazamiento de la Red presenta un régimen de vientos característico, que viene determinado, no sólo por el flujo general de la atmósfera, sino por una serie de condicionantes que provocan circulaciones locales del flujo a mesoescala e incluso microescala. Factores tales como la orientación de las sierras y valles, el tipo de suelo o la presencia de obstáculos en forma de árboles o picos de montaña en las proximidades de cada colector, tienen una influencia capital que determina las características particulares del viento en cada lugar. Dado que el viento es el medio de transporte de la niebla analizada en este trabajo, es fundamental conocer sus características (procedencia y velocidad), con el fin de poder orientar correctamente un sistema de recolección plano, ya que es el tipo que se emplea habitualmente cuando se pretende recolectar el agua de manera industrial.

La herramienta utilizada habitualmente para analizar el comportamiento del viento es la **rosa de vientos**, la cual muestra la distribución de frecuencias de la velocidad y dirección de viento de un determinado periodo de estudio, siguiendo la escala de Beaufort para la velocidad de viento y las 16 direcciones principales para la dirección. Su cálculo se realiza como la suma del número de registros que se encuentran dentro de un determinado intervalo de velocidad y de dirección de viento, dividido por el número total de registros, en tanto por ciento. Con el objetivo de poner de manifiesto la utilidad de esta herramienta a la hora de poner en funcionamiento un sistema de captación de agua de niebla que cuente con datos meteorológicos experimentales previos, se han calculado tres tipos diferentes de rosas de viento utilizando los datos de uno de los colectores, en este caso, Bernia_E, las cuales se muestran en la figura 4-15. Las rosas de viento han sido calculadas utilizando todos los datos disponibles desde que se instaló el colector, es decir, desde noviembre de 2008 hasta diciembre de 2012, siempre que existieran datos válidos de las tres variables utilizadas (niebla, dirección y velocidad de viento) y representan lo siguiente:

- Gráfico de la izquierda: rosa de vientos calculada a partir de todos los datos de viento disponibles, independientemente de si ha habido o no recolección de niebla.
- Gráfico del centro: rosa de vientos calculada a partir de los datos de viento cuando hubo recolección de niebla, eliminándose para el cálculo aquellos registros en los que no se recolectó niebla.
- Gráfico de la izquierda: variante de la rosa de vientos anterior, calculada también a partir de los datos de viento cuando hubo recolección de niebla, pero utiliza la variable Volumen de niebla acumulado, en lugar de la velocidad de viento.

Como se puede observar en las figuras de la izquierda y centro, el régimen de vientos difiere en función de los datos que se utilice para su cálculo. Cuando se usan todos los datos disponibles (figura de la izquierda), los vientos más frecuentes del colector Bernia_E proceden principalmente del Oeste, con un rango amplio que abarca direcciones desde WSW hasta NNW, siendo la dirección WSW la que presenta mayores frecuencias. Sin embargo, cuando se calcula la rosa utilizando solamente los datos de viento cuando se recolectó niebla (figura del centro), el rango de direcciones se estrecha, con valores importantes entre NW y N, siendo NNW la dirección dominante. No obstante, al calcular los volúmenes de agua de niebla recolectados en cada dirección de viento (figura de la derecha), observamos que la dirección N ha sido la que más agua de niebla ha recolectado, seguida de la NNW. Por tanto, si utilizáramos esta herramienta, la primera debería ser la dirección elegida a la hora de instalar un colector de niebla de tipo pantalla si se pretende optimizar la captura. Lógicamente, a la dirección elegida habría que sumarle el volumen recolectado en la dirección opuesta ($+180^\circ$), ya que los colectores planos son igual de eficaces en ambas caras de la pantalla y comprobar que con la suma de ambos se obtiene el mayor volumen de todos los pares de direcciones.

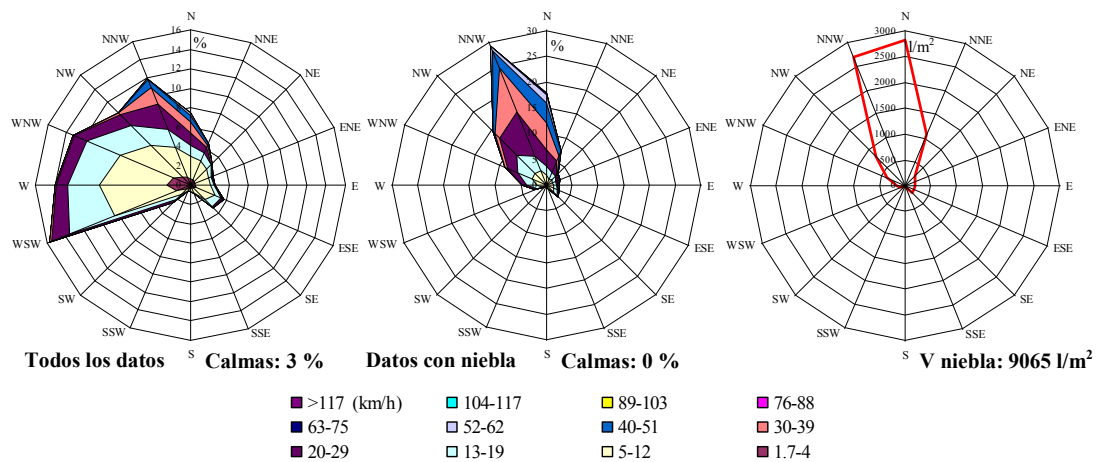


Figura 4-15: Rosas de viento del colector Bernia_E (Benissa, Alicante), elaboradas a partir de los datos del periodo comprendido entre 13/11/2008 y 31/12/2012, para cuyos cálculos se ha utilizado, izquierda: todos los datos de viento disponibles; centro: datos de viento registrados cuando se recolectó niebla; derecha: datos de viento registrados cuando se recolectó niebla, representándose el volumen capturado en cada dirección de viento

Sin embargo, con los datos disponibles (dirección de viento y volumen de niebla, en formato diezminutal), la manera más precisa de conocer la **dirección óptima** para orientar un colector de niebla de tipo pantalla, es el cálculo de Volumen equivalente de niebla en todas las direcciones de viento (Estrela et al., 2009; Valiente et al., 2010), seleccionando aquella que registre el máximo valor. Por ello, para cada colector de niebla se ha calculado dicho volumen para las principales direcciones de viento (72 direcciones: de 0 a 360°, en tramos de 5°) como la suma, para todos los datos diezminutales disponibles, del producto del volumen diezminutal de niebla registrado por el colector multiplicado por la proyección de la dirección en un eje fijo, es decir, la diferencia entre una orientación dada y la dirección del viento registrada cada 10 minutos por el colector cilíndrico, y se ha seleccionado el que ha registrado mayor valor. La expresión utilizada ha sido la siguiente:

$$\phi_T = \sum_P f_i |\cos(\theta_p - \theta_i)| \quad (1)$$

donde θ_i es la dirección de viento diezminutal registrada en el colector cilíndrico, expresada en grados con respecto al Norte,

θ_p es la dirección de viento con la que se pretende instalar perpendicularmente un captador de niebla de tipo pantalla, expresada en grados con respecto al Norte y que ha ido variando de 0 a 360° en intervalos de 5°,

f_i es el volumen de niebla por metro cuadrado registrado por el colector cilíndrico en un periodo de 10 minutos,

P es el periodo de datos disponible para cada colector, y

ϕ_T es el volumen equivalente de niebla por metro cuadrado para una dirección de viento determinada, en todo el periodo de datos disponible.

En la figura 4-16 se muestra la dirección óptima de recolección de agua de niebla calculada a partir de la expresión (1), para todos los colectores de la Red, calculada con todos los datos disponibles para cada uno de ellos. A su vez, en la tabla 4-3 se añade el volumen equivalente promedio que se podría recolectar en cada emplazamiento anualmente, utilizando un captador de tipo pantalla orientado en la dirección propuesta. Se observa como colectores cercanos pueden presentar direcciones de viento diferentes, como son los casos de la pareja de colectores formada por Montseny Antenas (2) y Montseny Canplá (3), o del grupo compuesto por Montgó (14), Bernia_E (16), Puig Campana (17) y Sierra Helada (18). Ello indica la conveniencia de realizar este tipo de estudio previamente a poner en marcha un sistema industrial de recolección de agua de niebla, para optimizar la captura.

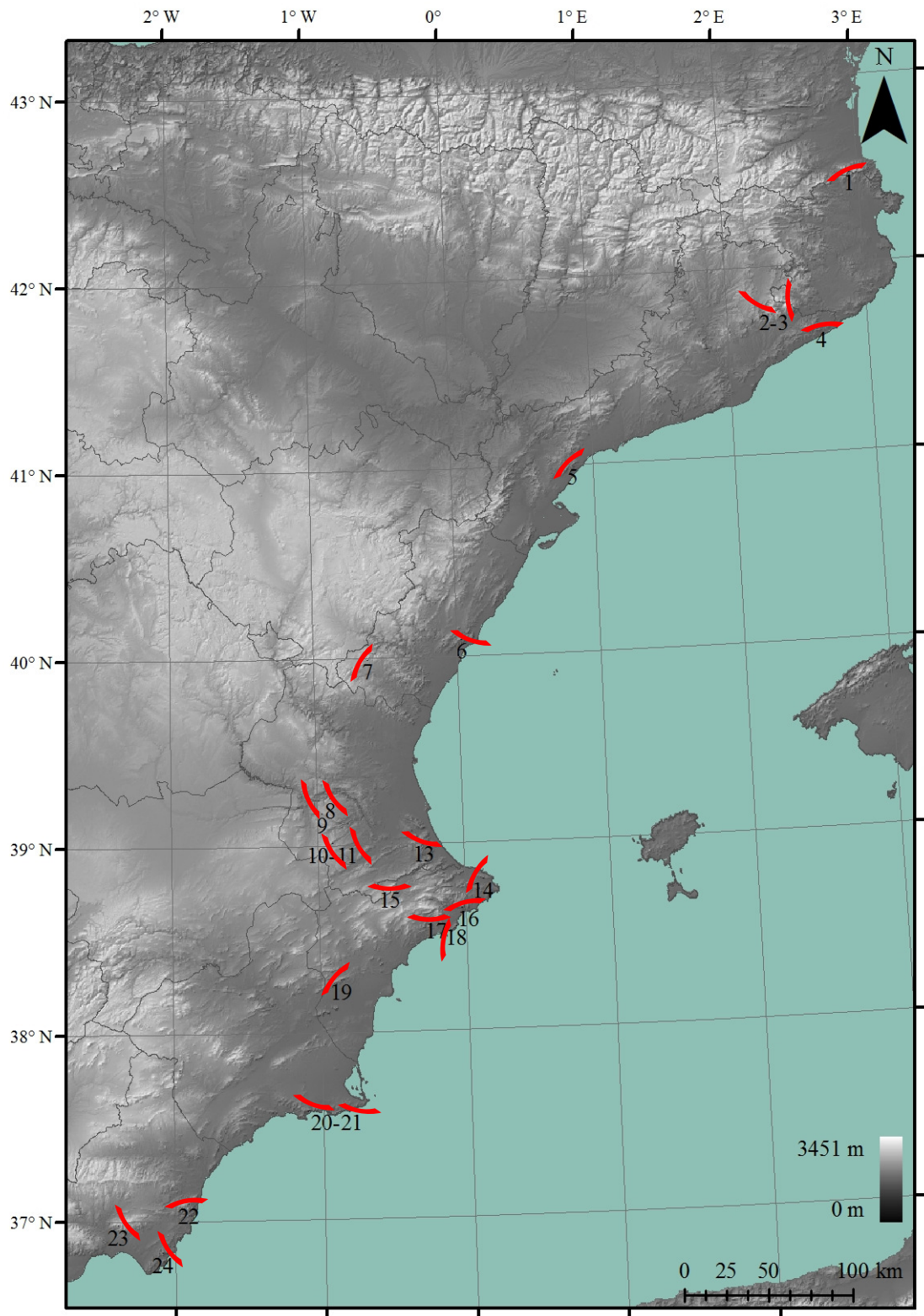


Figura 4-16: Orientación teórica con la que debería instalarse un captador de tipo pantalla para optimizar la recolección de agua de niebla en cada uno de los emplazamientos de la Red

Tabla 4-3: Dirección óptima y volumen de niebla equivalente a capturar en el caso de que se instalase un colector de tipo pantalla orientado en dicha dirección, calculados en base a los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012

Código	Colector	Periodo datos Inicio-Fin (mm/aa)	Dirección óptima (Grados)	Volumen equivalente (l/m ² /a)
1	Puig Neulós	10/09-12/12	155	6983
2	Montseny Antenas	06/10-02/12	30	2144
3	Montseny Canplá	06/10-02/12	85	373
4	Montnegre	06/10-12/12	170	153
5	Portella	11/10-12/12	135	1459
6	Colomer	06/08-12/12	20	1151
7	Casillas	03/04-12/12	120	635
8	Bujete	04/11-12/12	55	449
9	Cinto Cabra	07/10-12/12	65	899
10	Machos Nieva	06/10-12/12	55	1518
11	Machos	11/06-12/12	60	1144
13	Mondúver	07/03-12/12	20	1304
14	Montgó	07/03-12/12	120	1613
15	Mariola	06/04-12/12	0	1625
16	Bernia_E	11/08-12/12	165	1864
17	Puig Campana	06/05-02/07	0	1116
18	Sierra Helada	08/05-12/12	100	238
19	Crevillente	02/10-12/12	130	531
20	Muela_A	03/10-05/12	20	703
21	Muela_B	03/10-05/12	10	383
22	Arraez	10/10-12/12	170	980
23	Alhamilla	02/10-12/12	55	585
24	Peñones	07/10-12/12	55	545

Se ha calculado a su vez la dirección óptima de captura para las cuatro estaciones del año utilizando todos los datos disponibles, con el fin de estudiar si existen diferencias significativas entre las mismas con respecto a la dirección propuesta en la tabla 4-3 y los resultados se muestran en la figura 4-17. Y se observa como en la mayoría de los casos, las direcciones óptimas de recolección no sufren variaciones importantes entre estaciones, salvo algunos colectores como Sierra Helada, Bujete o Alhamilla. En el primero de los casos, su baja tasa de recolección debido a su escasa altitud y a su posición geográfica, hacen que no tenga una dirección de viento dominante que porte la niebla al emplazamiento (figura 4-18). En los otros dos casos, se necesitaría un periodo de tiempo más largo que el empleado para hacer los cálculos, para determinar si son importantes o no las variaciones estacionales observadas en la dirección óptima de captura. En el resto de los colectores, la figura parece mostrar que, aunque con matices, existe una dirección óptima de recolección para cada uno de ellos, con pequeñas diferencias entre estaciones. Ello indica que la mayor parte de los colectores analizados ha mostrado una dirección de viento más productiva para la recolección de agua de niebla, la cual no ha sufrido grandes variaciones a lo largo del año.

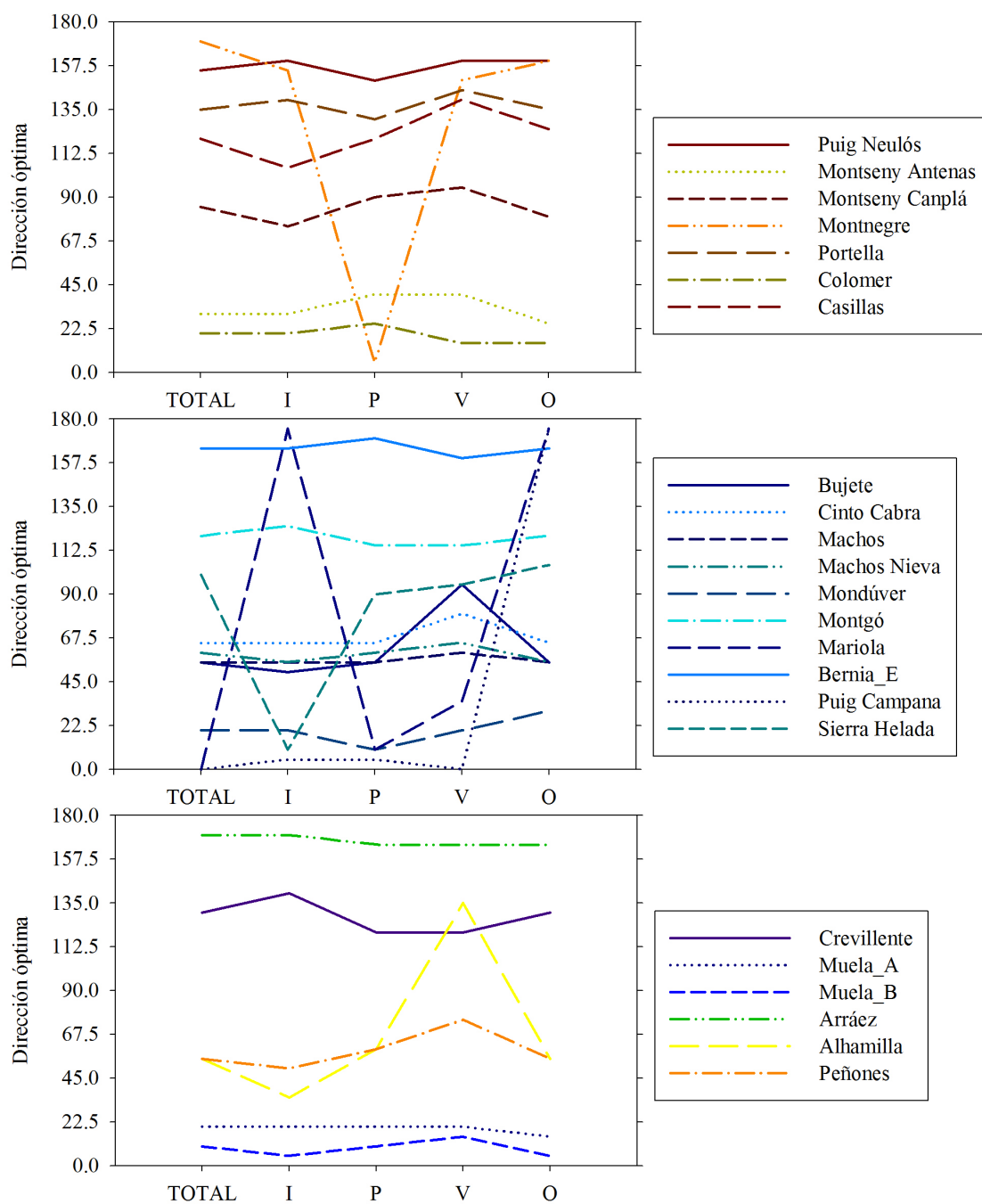


Figura 4-17: Dirección óptima de recolección de agua de niebla total y estacional (I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño) de todos los colectores de la Red, para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2012. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

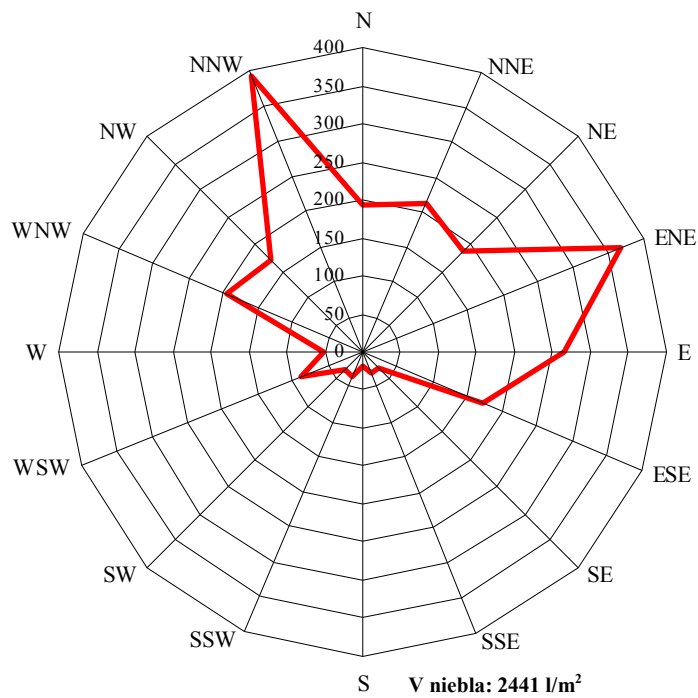


Figura 4-18: Rosa de viento del colector Sierra Helada (L'Alfàs del Pi, Alicante), elaborada a partir de los datos del periodo comprendido entre 04/08/2005 y 31/12/2012, para cuyo cálculo se ha utilizado los datos de viento registrados cuando se recolectó niebla, representándose el volumen capturado en cada dirección de viento

Capítulo 5

Análisis de los Patrones de Circulación Atmosférica para los Días de Recolección de Agua de Niebla en el Este de la Península Ibérica

La técnica es el esfuerzo para ahorrar esfuerzo

José Ortega y Gasset, filósofo

Las nieblas orográficas o de advección han sido estudiadas ampliamente con fines de aprovechamiento, pero existen pocos trabajos que traten de determinar las condiciones sinópticas que favorecen su recolección. Tan sólo se conocen algunos trabajos que analizan los patrones de circulación atmosférica para mejorar la predicción meteorológica de la niebla en general (Houssos et al., 2009; Houssos et al., 2012; van Schalkwyk, 2011; van Schalkwyk and Dyson, 2013) o que estudian episodios concretos de recolección de niebla (Fedorova et al., 2008; Fisak et al., 2009; Marzol, 2005; Marzol et al., 2011; Olivier and de Rautenbach, 2002; Valiente et al., 2011) o épocas determinadas del año con presencia de niebla (Johnstone and Dawson, 2010). Sin embargo, no se han encontrado trabajos centrados en las nieblas orográficas o de advección que determinen las situaciones sinópticas más frecuentes para su recolección utilizando series temporales largas de niebla. Por el contrario, las nieblas de radiación, que generalmente provocan un impacto negativo en la sociedad en forma de accidentes o retrasos derivado de la disminución de la visibilidad en vías de transporte (carreteras, aeropuertos, puertos, etc.), sí que han encontrado interés en la comunidad científica (Holets and Swanson, 1981; Meyer and Lala, 1990).

En general, no existe una clasificación de situaciones sinópticas general y de amplia aceptación para la Península Ibérica (Martín-Vide, 2002). Hasta la fecha, se han propuesto varias de ellas, las cuales, en función de su metodología de cálculo, se pueden dividir en dos grandes grupos: clasificaciones subjetivas y objetivas (Jorba, 2005). Las *clasificaciones subjetivas* más utilizadas han sido Lines (1981), que define 25 tipos de situaciones basadas en los mapas de 300 hPa; Font Tullot (1983) con 23 tipos que combinan mapas de superficie y 500 hPa; Martín-Vide (1991) con 16 tipos usando los mismos niveles; y Capel-Molina (2000) que sugirió una clasificación con 18 tipos basados en presión en superficie y 500 o 300 hPa (Martín-Vide, 2002; Soriano et al., 2006). Del mismo modo Millán et al. (2005) desarrolló, utilizando mapas de presión en superficie, y 500 y 300 hPa, una clasificación en función del tipo de precipitación (situaciones atlánticas, mediterráneas y convectivas) con buenos resultados para la Comunidad Valenciana. Este tipo de clasificaciones son válidas para el análisis sinóptico de episodios concretos, pero resultan inabordables cuando se analizan largas secuencias temporales (Azorin-Molina et al., 2008), además de que los resultados obtenidos pueden ser diferentes en función de la interpretación de cada investigador. Por el contrario, las *clasificaciones objetivas* permiten automatizar el cálculo de resultados, evitando la subjetividad asociada a cada investigador, permitiendo a su vez el tratamiento de series meteorológicas largas¹. Dentro de este grupo se encuentran los métodos basados en análisis multivariante, así como el que utiliza la **clasificación de Jenkinson y Collison**, en adelante JC (Jenkinson and Collison, 1977). Los primeros requieren la actuación del investigador para determinar el número de situaciones sinópticas, el nivel de la varianza explicada por las componentes, selección de un método de rotación si es necesario, etc., por lo que no son procesos totalmente objetivos, sino semi-objetivos (Grimalt et al., 2013). El segundo método es más sencillo de aplicar y su sentido físico es superior (Vicente-Serrano, 2004), por lo que ha sido el

¹ La acción COST733 (*Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European Regions*), en la que participaron investigadores de 23 países, centró su esfuerzo en determinar las clasificaciones objetivas más adecuadas para el continente europeo <http://cost733.met.no/> (Huth, 2010; Philipp et al., 2010; Philipp et al., 2014)

seleccionado para este trabajo. Además está considerado como el método más objetivo de clasificación sinóptica (Grimalt et al., 2013).

El método de JC fue desarrollado para las Islas Británicas, automatizando el método subjetivo desarrollado por Lamb (1950; 1972). Fue aplicado por primera vez a la Península Ibérica por Spellman (2000) para el estudio de la precipitación y debatida por Martín-Vide (2001; 2002). Posteriormente ha sido utilizado con buenos resultados para el estudio de la precipitación torrencial (Azorin-Molina et al., 2008; Martín-Vide, 2002), los temporales de viento (Rasilla et al., 2002), las sequías (Vicente-Serrano, 2004; Vicente-Serrano and López, 2006), las brisas marinas (Azorin-Molina, 2007; Azorin-Molina et al., 2009; Azorin-Molina et al., 2011) y más recientemente en la investigación de la erosión y los sedimentos (Nadal-Romero et al., 2014), *upwellings* (Ramos et al., 2013) o los tipos de clima (Grimalt et al., 2013). Sin embargo, hasta la fecha esta metodología no ha sido aplicada para el estudio de la recolección de niebla.

Un aspecto importante sobre el estado del tiempo que no contempla la metodología JC es la situación atmosférica en altura. Diversos estudios han analizado la dirección y velocidad del viento en capas bajas de la troposfera para determinar los patrones de nubes (Combs et al., 2001; Connell et al., 2001), y se ha visto que ambos factores son importantes para el desarrollo de brisas y vientos locales (Azorin-Molina and Chen, 2009; Blanchard and Lopez, 1984; Estoque, 1962) y por consiguiente, en la formación de nubosidad de tipo bajo en el este de la Península Ibérica (Azorin-Molina et al., 2009). Por este motivo, se ha considerado adecuado elaborar un estudio del **campo de vientos al nivel de 850 hPa**, para evaluar su influencia sobre la formación y recolección de agua a través de la niebla.

Por último, los **índices de teleconexión** han mostrado relación con diferentes variables meteorológicas en la Península Ibérica, como por ejemplo las brisas (Azorin-Molina et al., 2009; Azorin-Molina and Lopez-Bustins, 2008), el viento (Azorin-Molina et al., 2014), la acumulación de nieve y las avalanchas (García et al., 2010; Revuelto et al., 2012), la precipitación (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006; Ramis et al., 2013), el nivel del mar (Tsimplis and Shaw, 2010), las sequías (Muhlbauer et al., 2013), la temperatura (Fernández-Montes and Rodrigo, 2012) o las islas de calor en las ciudades (Lopez-Bustins et al., 2006). Pero hasta la fecha no se conoce ningún estudio que analice la influencia de los patrones de teleconexión con la recolección de agua de niebla en la Península Ibérica ni en ningún otro lugar del planeta. Los índices NAOi (North Atlantic Oscillation index), MOi (Mediterranean Oscillation index) y WeMOi (Western Mediterranean Oscillation index) explican gran parte de la variabilidad del clima en la península (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006; Palutikof, 2003; Vicente-Serrano and Trigo, 2011), por lo que han sido los utilizados en este estudio para analizar su relación con la captación de agua de niebla.

Resumiendo, el objetivo principal de este Capítulo es analizar cómo influye la circulación atmosférica en la recolección de agua de niebla mediante tres métodos de clasificación sinóptica: (a) La clasificación objetiva de Jenkinson y Collinson, la cual se basa en datos de presión en superficie; (b) El viento en capas bajas de la troposfera (850 hPa); (c) Los patrones de teleconexión NAOi, MOi y WeMOi.

5.1 METODOLOGÍA

En este análisis sinóptico, se han utilizado los datos diarios de niebla (niebla acumulada de 00 a 24 h UTC) de los 23 colectores experimentales de la Red. La posición geográfica de cada uno de ellos se puede ver en la figura 3-15 del Capítulo 3. Con el objetivo de obtener unos resultados más fiables en cada uno de los emplazamientos, se han seleccionado todos los datos disponibles para cada colector de niebla. Es por ello que el periodo de estudio difiere entre ellos, ya que los colectores no fueron puestos en funcionamiento a la vez, sino que se instalaron progresivamente. Todos los datos utilizados se encuentran dentro del periodo comprendido entre los años 2003 y 2012. El periodo de datos utilizado en cada caso se puede consultar en la tabla 3-1 del Capítulo 3.

5.1.1 MÉTODO OBJETIVO DE CLASIFICACIÓN SINÓPTICA DE JENKINSON Y COLLISON

La figura 5-1 muestra los 16 puntos cuya presión atmosférica en superficie ha sido utilizada para realizar la clasificación sinóptica. Esta rejilla ha sido empleada anteriormente en otros estudios realizados en la Península Ibérica (Azorin-Molina et al., 2008; Azorin-Molina et al., 2011; Rasilla et al., 2002; Vicente-Serrano, 2004). Los puntos representan la intersección de los paralelos 30°, 35°, 40°, 45° y 50° N con los meridianos 20°W, 10°W, 0° y 10°E y abarcan la zona delimitada entre 30° y 50°N, y 20°W y 10°E centrada sobre la Península Ibérica. Los datos diarios de presión atmosférica [$p(n)$] se obtuvieron a partir de los datos de reanálisis NCEP/NCAR de la *Climate Research Unit (CRU)*, Norwich, Reino Unido, (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/>) para el periodo de estudio 2003-2012.

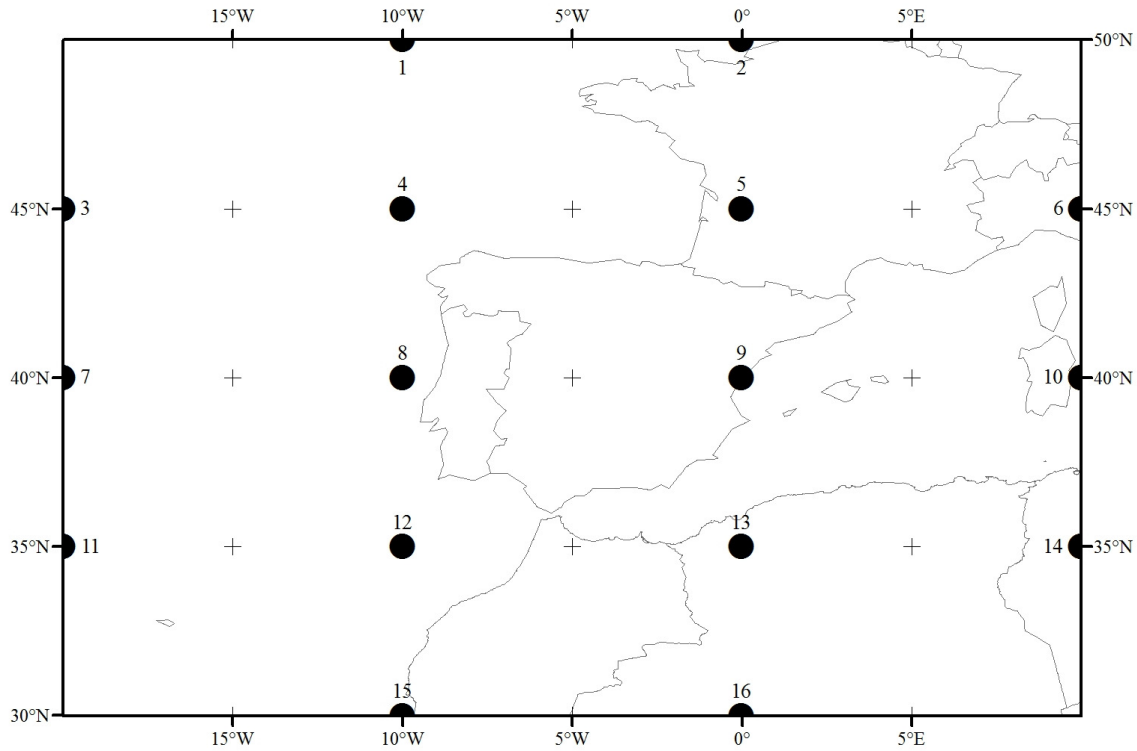


Figura 5-1: Localización de los 16 puntos de rejilla utilizados para la aplicación del método de Jenkinson y Collison

El método de JC está formado por siete ecuaciones que calculan el viento geostrófico y las condiciones de vorticidad en unidades geostróficas (hPa) para determinar con ambos el tipo de tiempo sobre el retículo definido. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$(1) \quad u = 0.5(p_{12} + p_{13}) - 0.5(p_4 + p_5),$$

$$(2) \quad v = 1.74[0.25(p_5 + 2p_9 + p_{13}) - 0.25(p_4 + 2p_8 + p_{12})],$$

$$(3) \quad V = (u^2 + v^2)^{1/2},$$

$$(4) \quad Dir = \tan^{-1}(u/v)$$

$$(5) \quad \xi_u = 1.07[0.5(p_{15} + p_{16}) - 0.5(p_8 + p_9)] - 0.95[0.5(p_8 + p_9) - 0.5(p_1 + p_2)],$$

$$(6) \quad \xi_v = 1.52[0.25(p_6 + 2p_{10} + p_{14}) - 0.25(p_5 + 2p_9 + p_{13}) - 0.25(p_4 + 2p_8 + p_{12}) + 0.25(p_3 + 2p_7 + p_{11})],$$

$$(7) \quad \xi = \xi_u + \xi_v,$$

donde la ecuación (1) calcula la componente zonal (u) del viento geostrófico en superficie a partir de la diferencia de presión atmosférica entre los puntos 12-13 (35°N) y 4-5 (45°N); la ecuación (2) calcula la componente meridiana (v) del viento geostrófico

en superficie a través del gradiente de presión atmosférica entre los puntos 5-9-13 (0°) y 4-8-12 (10°W); la ecuación (3) es el cálculo de la velocidad del viento resultante del Oeste y Sur (V) en m s^{-1} ; la ecuación (4) calcula la dirección del viento (**Dir**) en grados (0° a 360°). La dirección es calculada utilizando 8 puntos cardinales (45° por cada sector):

Si $u > 0$ y $v < 0$: $360 + D = \text{ángulos del } 4^\circ \text{ cuadrante}$

Si $u > 0$ y $v > 0$: $180 + D = \text{ángulos del } 3^\circ \text{ cuadrante}$

Si $u < 0$ y $v > 0$: $180 + D = \text{ángulos del } 2^\circ \text{ cuadrante}$

Si $u < 0$ y $v < 0$: $D = \text{ángulos del } 1^\circ \text{ cuadrante}$

La ecuación (5) es el cálculo de la vorticidad zonal (ξ_u); la ecuación (6) calcula la vorticidad meridional (ξ_v); la ecuación (7) es el cálculo de la vorticidad total (ξ) como la suma del flujo zonal y meridional.

Las constantes utilizadas en las ecuaciones (1.74; 1.07; 0.95 y 1.52), se obtuvieron de trabajos anteriores (Azorin-Molina et al., 2011; Vicente-Serrano, 2004) y se calculan a partir de la metodología propuesta por Dessouky y Jenkinson (1975).

El método identifica 27 tipos de tiempo, agrupados en cuatro categorías:

- a) Ocho tipos de flujo direccionales (N; NE; E; SE; S; SW; W; NW) caracterizados por una dirección de viento definida ($|\xi| < V$).
- b) Tipo ciclónico (C) y anticiclónico (A) relacionados con la rotación de la atmósfera ($|\xi| > 2V$). El tipo ciclónico se obtiene si $|\xi| > 0$ y el tipo anticiclónico si $|\xi| < 0$.
- c) 16 tipos híbridos, ($V < |\xi| < 2V$), que dependen de Z y de la dirección de viento, y que son una combinación de los dos tipos anteriores (AN; ANW; AW; ASW; AS; ASE; AE; ANE; CN; CNW; CW; CSW; CS; CSE; CE; CNE).
- d) Tipo sinóptico indeterminado (U) donde $V < 6$ y $|\xi| < |6|$.

El alto número de situaciones de tipo C durante el verano se debe a la presencia de la baja térmica sobre la Península Ibérica (Azorin-Molina et al., 2011). Además, al ampliar el retículo original, pasando de 9 a 16 puntos de presión, se subsanó el problema de las situaciones indeterminadas (U) (Martín-Vide, 2002), limitando la clasificación a 26 tipos de tiempo.

5.1.2 CAMPO DE VIENTOS A 850 hPa

Los datos de viento en la superficie equipotencial de 850 hPa fueron obtenidos a partir de datos de reanálisis NCEP/NCAR de la *Climate Research Unit*, Norwich, Reino Unido, (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/>) para el período de estudio 2003-2012.

Se eligieron tres puntos, uno situado al norte (P1: 42.5°N; 2.5°E), otro en el centro (P2: 40°N; 0°) y otro al sur (P3: 37.5°N; 2.5°W) del área de estudio (figura 5-3), como representativos de la circulación del viento en capas bajas de la troposfera, agrupándose los colectores de niebla en función de su proximidad (figura 3-15 del Capítulo 3), del siguiente modo: P1, desde Puig Neulós hasta Montnegre; P2, desde Portella hasta Sierra Helada; P3, desde Crevillente hasta Peñones.

El viento a 850 hPa se ha dividido en 16 tipos, en función de su dirección y velocidad:

- Ocho direcciones de viento, en intervalos de 45°, agrupadas según el siguiente criterio (figura 5-2): vientos de origen atlántico: SW (202.6°-247.5°), W (247.6°-292.5°), NW (292.6°-337.5°) y N (337.5°-22.5°); y vientos de origen mediterráneo: NE (22.5°-67.5°), E (67.6°-112.5°), SE (112.6°-157.5°) y S (157.6°-202.5°).
- Dos velocidades de viento: vientos moderados (0-5.14 m/s) y fuertes (>5.14 m/s), siguiendo la metodología utilizada en trabajos anteriores (Azorin-Molina and Chen, 2009; Connell et al., 2001; Gould and Fuelberg, 1996).

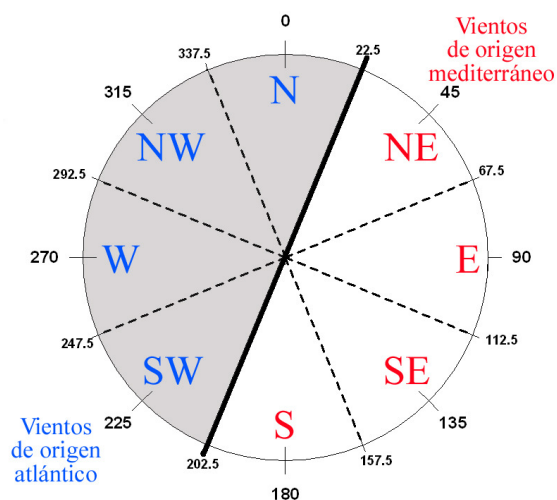


Figura 5-2: Rango de las direcciones de viento seleccionadas para los flujos al nivel de 850 hPa

5.1.3 ÍNDICES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

En este estudio sinóptico se han seleccionado tres índices de teleconexión atmosférica para el estudio (figura 5-3):

- NAOi (*North Atlantic Oscillation index*), el cual representa la diferencia entre los datos estandarizados de presión a nivel del mar del sur de la Península Ibérica (Gibraltar) y el suroeste de Islandia (Reikiavik) (Jones et al., 1997). En este trabajo el NAOi se calculó como la diferencia de presión entre los puntos de

grid 35°N-5°W y 65°N-22.5°W, utilizando datos de superficie a nivel del mar obtenidos en la *Climate Research Unit*, Norwich, Reino Unido, (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/>). Los datos diarios del índice NAO calculados a partir de reanálisis presentan un coeficiente de correlación de Pearson del 0.98 respecto a los obtenidos a partir de datos de observación para el periodo 1951-2000.

- b) MOi (*Mediterranean Oscillation index*), que constituye la diferencia entre los datos estandarizados de presión a nivel del mar de un punto situado al oeste (Gibraltar) frente a uno situado al este (Lod) de la cuenca del Mediterráneo (Palutikof, 2003). Este patrón de teleconexión fue calculado como la diferencia de presión entre los puntos 35°N-5°W y 30°N-35°E, utilizando datos de reanálisis obtenidos en <http://rda.ucar.edu/datasets/ds010.0/> (Trenberth and Paolino Jr, 1980).
- c) WeMOi (*Western Mediterranean Oscillation index*), el cual representa la diferencia entre los datos normalizados de la presión a nivel del mar entre dos puntos situados al oeste de la cuenca del Mediterráneo, en concreto entre un emplazamiento situado al sur de la Península Ibérica (San Fernando) y otro en el nordeste de Italia (Padova) (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006). Para su cálculo, se utilizaron datos de reanálisis de los puntos de grid 35°N-5°W y 45°N-10°E obtenidos en la *Climate Research Unit*, Norwich, Reino Unido, (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncep/>). Los datos diarios del índice WeMO calculados a partir de reanálisis presentan un coeficiente de correlación de Pearson del 0.94 con respecto a los obtenidos a partir de datos de observación para el periodo 1948-2000.

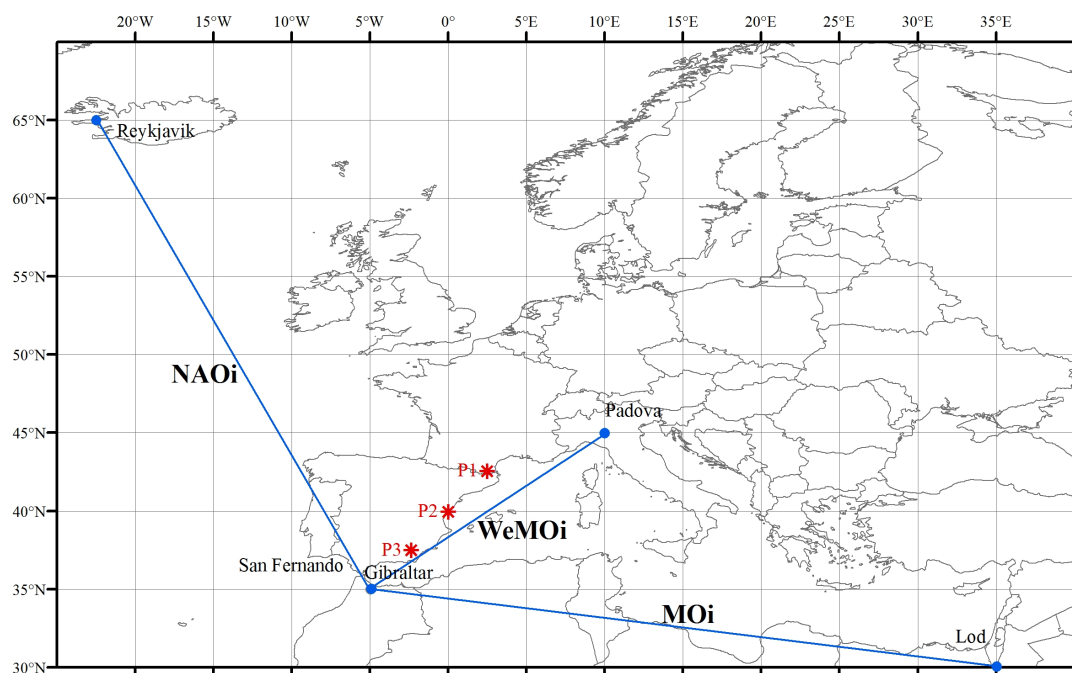


Figura 5-3: Patrones de teleconexión, señalándose los puntos de grid utilizados para su cálculo a partir de datos de reanálisis, y localización de los puntos empleados para el cálculo del viento al nivel de 850 hPa (P1, P2 y P3)

5.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.2.1 RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA EN FUNCIÓN DEL MÉTODO OBJETIVO DE JENKINSON Y COLLISON

En la figura 5-4 se presenta, para cada colector de la Red y para cada uno de las 26 situaciones sinópticas de JC, una gráfica (A) que contiene un diagrama de caja con determinados parámetros estadísticos (media, mediana, intervalo intercuartílico y percentiles 5, 10, 25, 75, 90 y 95) y un gráfico de líneas (B) que representa la frecuencia relativa de días con recolección de niebla (línea continua azul), así como el porcentaje del volumen total de agua recolectada asociado a cada situación sinóptica (línea discontinua negra), calculados a partir de los datos de recolección diaria de niebla. La frecuencia relativa de días con recolección de niebla ha sido calculada como la suma del número de días en los que se ha recolectado niebla de un determinado tipo sinóptico, dividido por el número total de días en los que ha habido recolección. Del mismo modo, el porcentaje del volumen total de agua recolectada se ha calculado sumando el volumen capturado en cada situación sinóptica, dividido por el volumen total recolectado. En la tabla 5-1 se muestran los valores de frecuencia relativa de días con recolección, el porcentaje del volumen total de agua recolectada y el promedio diario de

recolección, agrupando los diferentes tipos sinópticos en advectivos puros (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, en adelante ADV), advectivos ciclónicos (CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW y CNW, en adelante ADVC), advectivos anticiclónicos (AN, ANE, AE, ASE, AS, ASW, AW y ANW, en adelante ADVA), ciclónicos puros (C) y anticiclónicos puros (A), siguiendo la metodología descrita por Grimalt *et al.* (2013).

Con respecto a la **frecuencia relativa de los días con recolección de agua de niebla**, figura 5-4 (línea continua azul, gráfica B), en general en todos los colectores analizados destacan las situaciones de tipo advectivo, fundamentalmente las provenientes del primer y cuarto cuadrante, existiendo un descenso generalizado en los días de tipo S. Las situaciones puras de tipo C y A, junto a las situaciones de NE, E y SE han sido, de manera general, las que han aportado niebla con mayor asiduidad. Las gráficas muestran una curva con cuatro picos, tres más elevados (uno que engloba las situaciones de tipo NE, E y SE, y los otros dos que contienen las de tipo C y A) y uno de menor importancia (tipos W y NW). En cambio, los días ciclónicos y anticiclónicos híbridos apenas han generado días de recolección. El conjunto de las situaciones advectivas (ADV, tabla 5-1) representa en la mayor parte de los colectores analizados, el 50 % de los días con recolección de niebla, y junto a las de tipo C y A, engloba el 75 % de los días en los que se ha capturado agua. El conjunto de las situaciones advectivas ciclónicas y anticiclónicas contiene, por tanto, el 25 % de los días restantes. Estos resultados coinciden con los obtenidos en trabajos anteriores donde se analizaba la frecuencia de los tipos de JC en la misma zona de estudio (Azorin-Molina, 2007), habiéndose obtenido el mayor número de días con niebla en los tipos de tiempo más frecuentes.

En cuanto a las **situaciones sinópticas que han aportado mayor volumen de agua** durante el periodo de estudio, se observan diferencias importantes entre las distintas áreas de estudio. En la zona norte (figura 5-4a, línea discontinua negra, gráfica B), sobresalen por encima del resto, las de tipo C. Los días ciclónicos puros han aportado más del 53 % del total de agua recolectada en Montseny Canplá y Montnegre, y más del 36 % en Portella y Montseny Antenas, llegando al 22 % en Puig Neulós. El resto de patrones sinópticos no representa más del 10 % del volumen capturado en ningún caso. Conforme descendemos latitudinalmente, van ganando peso las situaciones advectivas de procedencia marítima (tipos NE, E y SE), mostrándose como las más importantes, fundamentalmente en la zona centro del área de estudio (figura 5-4b). El conjunto de estas tres situaciones ha contribuido con más de la mitad del volumen total recolectado en algunos colectores, como Sierra Helada y Bernia_E. En la mayoría de colectores, el pico se alcanza con patrones de tipo E. En la zona sur (figura 5-4c) sobresalen también las situaciones de NE, E y SE, aunque en este caso el mayor volumen se alcanza en situaciones de tipo SE. La suma de los volúmenes aportados por las tres situaciones adquiere un peso superior al 35 % en todos los colectores, excepto en Peñones. En dicho emplazamiento, debido a su posición geográfica, adquieren mayor importancia los tipos SW, W y NW, con una clara influencia del mediterráneo andaluz. En la tabla 5-1 se refleja como las situaciones anticiclónicas (ADVA y A) son las que menos volumen de agua aportan. En los colectores con tasas de recolección bajas, como por ejemplo Montseny Canplá, Montnegre o Bujete, estas situaciones apenas suponen el 5 % del volumen total. Tan sólo en la zona sur de la provincia de Valencia y la norte de Alicante, donde se encuentran los colectores Puig Campana, Montgó, Mariola o

Mondúver, este tipo de tiempo ha permitido recolectar una proporción importante del total capturado, en torno al 20 %. En el resto de emplazamientos, los días anticiclónicos han destacado por su escaso aporte hídrico.

Las **tasas de recolección de agua de niebla** más elevadas se han registrado en situaciones de tipo ciclónico, tanto puras como de tipo advectivo, existiendo diferencias en función de la situación geográfica. En la zona norte (figura 5-4a, gráfica A), los promedios diarios de captura más elevados se han obtenido en días ciclónicos con advecciones del cuarto cuadrante (CNW, CW y CN) y ciclónicos puros (C). Los valores promedio más importantes aparecen con patrones de circulación de clase CNW y CW, y en los colectores Puig Neulós y Montseny Antenas. Estas situaciones presentan tasas de recolección muy altas, que incluso llegan a superar los 100 l/m²/d en algún caso. Sin embargo, su aporte al total del volumen capturado apenas tiene importancia. Se trata por tanto de situaciones en las que no se recolecta agua de niebla con frecuencia, pero que a su vez son muy productivas. Los días con patrón de circulación de tipo C han mostrado también promedios diarios de captación importantes, con valores superiores a 50 l/m²/d en Puig Neulós, y superiores a 9 l/m²/d en el resto de los casos, excepto en Montnegre. Los días con situaciones anticiclónicas presentan, por lo general, las menores tasas de captura. Conforme descendemos latitudinalmente y fundamentalmente en los colectores situados en la zona del sur de Valencia y norte de Alicante (figura 5-4b, gráfica A), las situaciones con advecciones de flujos marítimos adquieren una mayor importancia. Así, las situaciones ciclónicas con advecciones del Este (tipos CNE, CE y CSE) son las que presentan los mayores promedios de captura en la mayoría de los colectores. El promedio más elevado se muestra en el colector Puig Campana (26.1 l/m²/d) con una situación de tipo CSE. Los colectores Mondúver, Montgó, Mariola y Bernia_E presentan también tasas elevadas, con valores comprendidos entre 18 y 20 l/m²/d en días tipo CE. Se observa a su vez como las situaciones de tipo NE, E y SE presentan valores muy elevados en la mayor parte de los colectores. Por ejemplo, en el colector Cinto Cabra la tasa más elevada se ha dado en situaciones de tipo SE (11.2 l/m²/d). Las situaciones anticiclónicas, las advecciones del W así como las advecciones ciclónicas y anticiclónicas del W han mostrado las tasas de recolección más bajas, con valores próximos a 0 l/m²/d en muchos casos. En la zona sur del área de estudio (figura 5-4c, gráfica A) se observa un comportamiento similar a la zona centro. Las tasas de recolección más elevadas se han producido en días con advecciones ciclónicas (CS y CSE) y en advecciones del S y SE. El valor más elevado lo encontramos en el colector Arráez, con 25.3 l/m²/d en días de tipo CSE. En los colectores situados en la parte más meridional (Arráez, Alhamilla y Peñones), los días de tipo CW y CNW también han mostrado valores importantes. Por lo general, las situaciones anticiclónicas puras e híbridas han sido las que han recolectado menos agua en valores promedio. En la tabla 5-1 se evidencia como las situaciones de tipo C presentan los valores promedio más elevados, incluso que el conjunto de todas las situaciones ciclónicas advectivas (ADVC), salvo en la zona que une las provincias de Valencia y Alicante, donde las situaciones de tipo ADVC alcanzan valores superiores.

Los resultados revelan como las situaciones de tipo A muestran una mayor importancia en cuanto a la frecuencia de aparición que en lo referente al volumen de agua capturada. Se trata por tanto de situaciones que, aunque aparecen con relativa frecuencia, suelen contribuir con pequeñas cantidades de agua. Las situaciones anticiclónicas puras (tipo

A) proporcionan condiciones favorables para la formación de brisas marinas (Azorin-Molina et al., 2011). Las situaciones de brisa desarrollan nubosidad baja a lo largo de la tarde-noche, siendo por tanto responsables de la formación de nieblas orográficas y nubosidad baja, las cuales permiten la captación de agua (Azorin-Molina et al., 2010). Sin embargo, su importancia en cuanto al volumen aportado es pequeña.

Por otro lado, las situaciones advectivas de procedencia marítima (NE, E, SE e incluso S en algunos casos), suponen un aporte de humedad desde el Mediterráneo hacia tierra, lo que favorece la aparición de nubosidad baja y por tanto, de niebla en las montañas litorales y prelitorales, habiéndose mostrado como favorables para recolección de niebla. A su vez, se ha detectado en estudios previos que las situaciones ciclónicas puras (tipo C) son las más importantes en días de lluvias torrenciales (Azorin-Molina et al., 2008; Martín-Vide, 2002). Son, por tanto, situaciones que benefician el desarrollo de nubosidad, la cual, en muchos casos, aparece en forma de niebla en puntos de montaña. Las situaciones ciclónicas advectivas presentan también promedios de captación muy elevados, pero a la vez son muy poco frecuentes, por lo que su peso en el volumen total capturado es pequeño. Son situaciones por lo general de mucha nubosidad y por tanto favorables para la recolección.

Se ha observado como la orientación de la línea de costa influye en la dirección de los flujos que aportan mayor humedad desde el mar hacia tierra. En la zona norte, las advecciones del N, NE y E son las que más favorecen la aparición de nieblas, mientras que en la zona centro son los flujos del NE, E y SE, y en la parte sur los de componente S y SE, habiendo también en esta última área aportes con flujos del W, favorecidos por los frecuentes vientos provenientes de dicha dirección en Almería (Viedma-Muñoz, 1998).

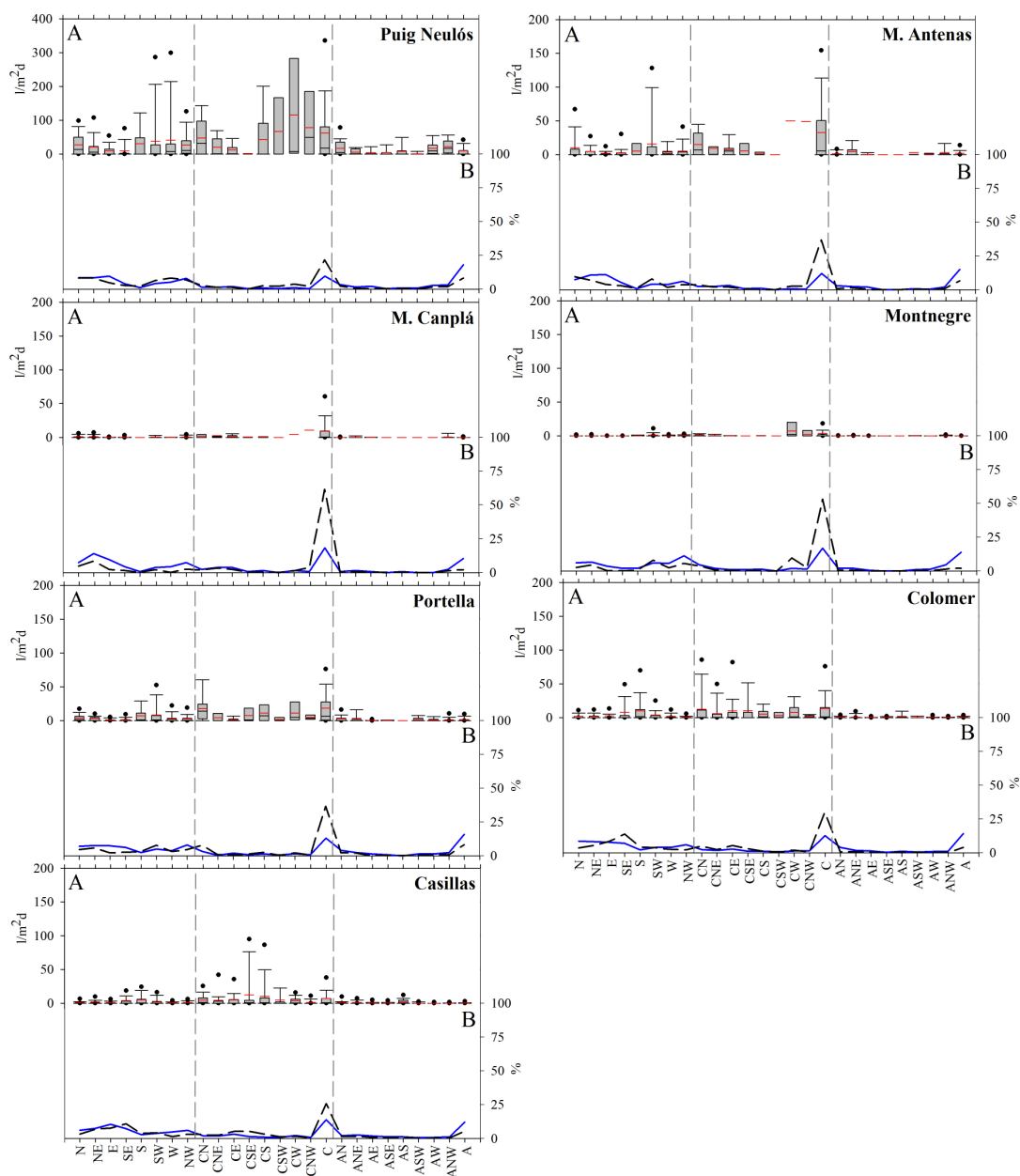


Figura 5-4 (a): Representación para los 26 tipos sinópticos de JC, divididos en tres zonas (izquierda: situaciones direccionales; centro: situaciones ciclónicas e híbridas; derecha: situaciones anticiclónicas e híbridas) y para los colectores situados al norte del área de estudio, calculado a partir de todos los datos disponibles de niebla acumulada diaria para el periodo 2003-2012, de: 1) Gráfica A: diagrama de caja (la media (línea roja), la mediana (línea negra), el intervalo intercuartílico (caja) y los percentiles 10 y 90 (bigotes), y 5 y 95 (puntos negros)); 2) Gráfica B: frecuencia relativa del número de días con recolección de niebla (línea continua azul) y porcentaje del volumen total de agua capturado por cada colector (línea discontinua negra)

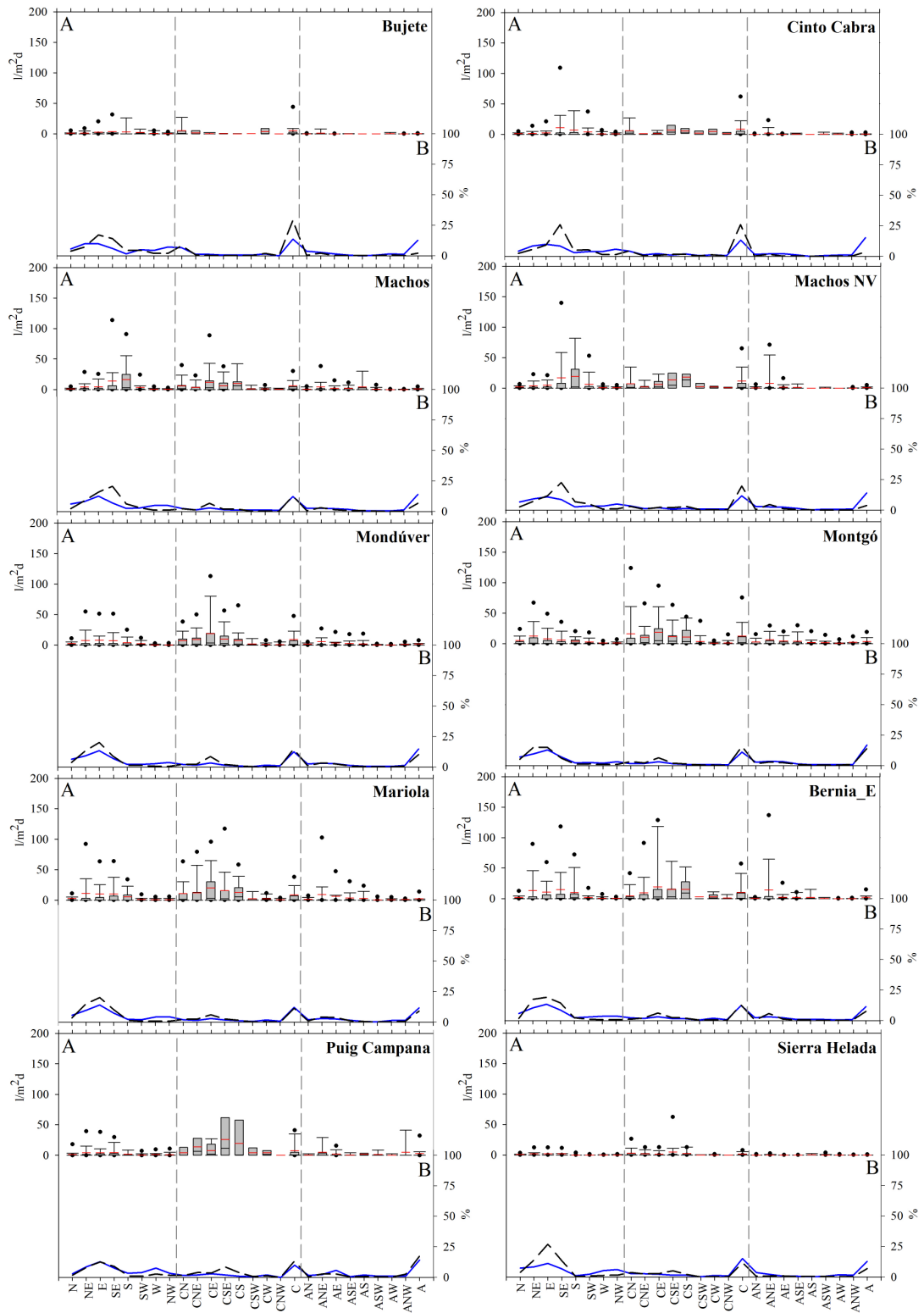


Figura 5-4 (b): Igual que la anterior, pero para los colectores situados en la zona centro del área de estudio

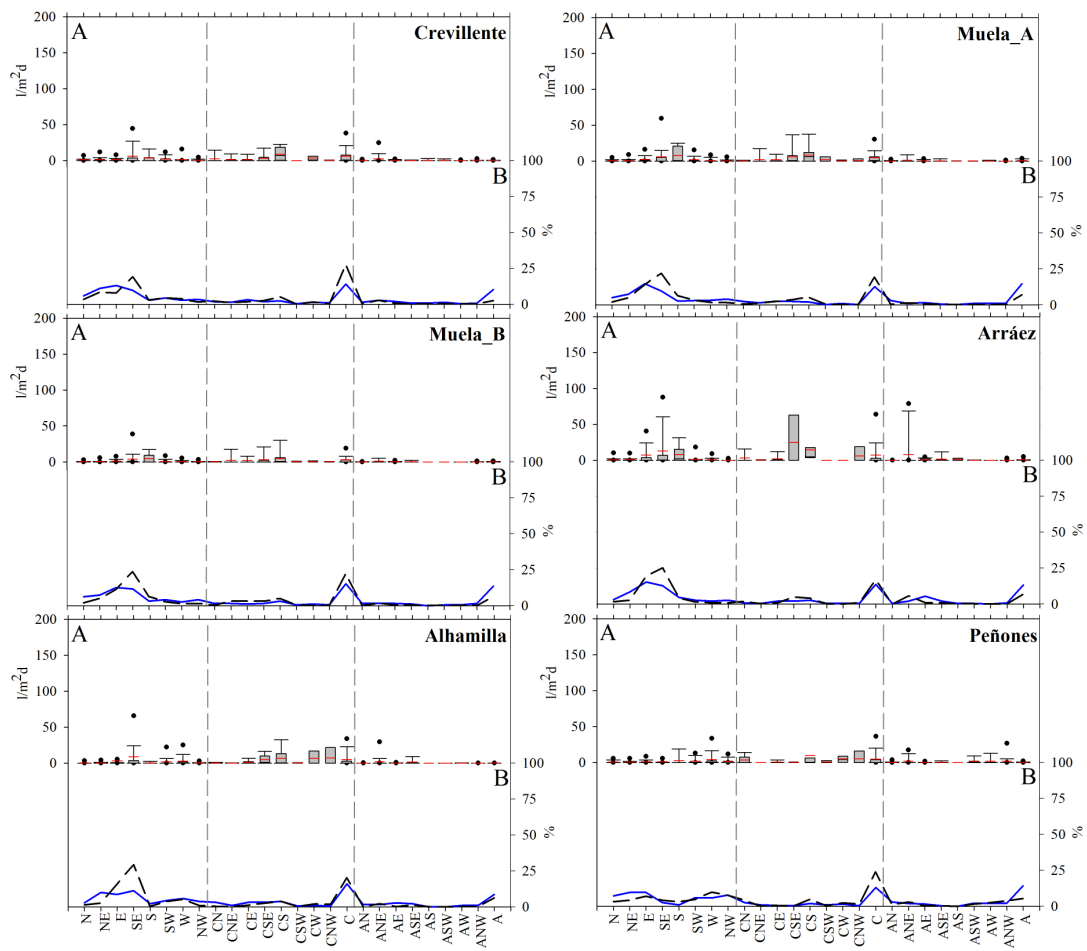


Figura 5-4 (c): Igual que la anterior, pero para los colectores situados en la zona sur del área de estudio

Tabla 5-1: Frecuencia de los días de recolección de niebla, proporción del volumen de agua capturada y tasa de recolección de agua de niebla, de todos los emplazamientos experimentales analizados, en función de la situación sinóptica (ADV, situaciones advectivas (N, NE, E, SE, S, SW, W y NW); ADVC, situaciones advectivas ciclónicas (CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW y CNW); ADVA, situaciones advectivas anticiclónicas (AN, ANE, AE, ASE, AS, ASW, AW y ANW); C, situaciones ciclónicas puras (C); A, situaciones anticiclónicas puras (A), calculadas en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012. En negrita, los valores más elevados de cada tipo y colector

Colector	Frecuencia de los días con recolección de agua de niebla (%)					Proporción del volumen recolectado de agua de niebla (%)					Tasa de recolección de agua de niebla (l/m ² /d)				
	ADV	ADVC	ADVA	C	A	ADV	ADVC	ADVA	C	A	ADV	ADVC	ADVA	C	A
Puig Neulós	49	8	15	10	18	47	16	7	22	8	21.5	36.9	11.0	62.2	9.2
Montseny Antenas	50	12	11	12	15	38	14	4	37	7	5.3	11.7	1.9	32.6	2.1
Montseny Canplá	51	14	6	18	10	22	13	2	62	2	0.5	1.9	0.2	9.3	0.1
Montnegre	44	14	12	17	14	24	17	3	53	2	0.3	1.2	0.1	3.5	0.0
Portella	47	10	13	13	16	34	16	6	37	8	3.2	8.8	1.4	18.4	1.6
Colomer	48	13	12	13	14	44	20	3	30	4	3.2	7.9	0.5	13.3	0.7
Casillas	49	14	11	14	12	41	22	6	26	5	1.9	5.9	0.7	7.5	0.5
Bujete	49	12	12	14	13	54	11	3	29	2	1.8	2.2	0.2	5.3	0.1
Cinto Cabra	48	13	10	13	15	57	11	3	26	3	3.3	3.8	0.5	8.7	0.4
Machos	49	13	12	12	14	59	14	7	13	7	4.5	6.0	1.4	6.2	1.0
Machos Nieva	50	12	12	12	14	58	11	7	20	4	5.6	6.7	1.8	11.7	0.8
Mondúver	47	13	13	12	15	49	17	9	15	10	4.9	9.1	2.3	9.2	2.0
Montgó	47	11	14	11	17	45	16	10	16	14	6.0	10.8	3.2	12.2	3.6
Mariola	50	13	13	12	12	53	15	11	11	9	6.6	11.3	3.8	9.0	2.4
Bernia_E	51	13	12	12	11	57	15	8	13	8	7.4	10.3	2.8	10.3	2.2
Puig Campana	50	11	15	10	14	37	23	10	13	17	2.9	11.2	2.0	7.3	3.0
Sierra Helada	48	13	11	15	13	62	16	4	12	7	1.3	1.9	0.2	1.6	0.3
Crevillente	53	13	10	14	10	51	15	5	28	3	1.9	2.8	0.5	6.1	0.2
Muela_A	50	12	10	13	15	56	14	3	19	7	2.3	3.0	0.5	4.8	0.7
Muela_B	52	11	8	15	14	54	15	3	22	6	1.2	1.8	0.2	3.1	0.3
Arráez	52	9	12	14	13	56	12	8	17	7	4.1	5.6	1.4	7.2	1.0
Alhamilla	49	17	10	16	9	59	11	4	20	6	2.4	2.6	0.4	5.1	0.6
Peñones	50	9	13	13	14	44	14	13	24	5	1.5	3.0	1.1	4.9	0.4

En este estudio también se ha analizado el día que ha registrado el valor máximo diario de recolección de niebla en función de la situación sinóptica (tabla 5-2). En los colectores situados al norte del área de estudio los valores pico han sido registrados en situaciones de tipo C puras, mientras que en el resto de emplazamientos, los días de flujo direccional de componente NE, E y SE han sido los que han mostrado los máximos diarios de recolección, salvo en los colectores Puig Campana y Peñones, con valores máximos logrados en días ciclónicos advectivos. El día de mayor captación de agua de niebla fue registrado en el colector Puig Neulós, en una situación sinóptica de tipo C, con un valor de $418 \text{ l/m}^2/\text{d}$ (15 de marzo de 2011). Son reseñables también los máximos alcanzados en los colectores Mariola y Montgó en situaciones advectivas de NE, con valores superiores a $300 \text{ l/m}^2/\text{d}$. En el resto de emplazamientos, los máximos también alcanzan valores importantes, superiores a $100 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en muchos de los casos y superiores a $50 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en todos ellos. En estudios anteriores, se ha visto que el método de JC clasifica como tipos ciclónicos puros situaciones que parecen híbridas, las cuales presentan circulaciones muy marcadas de componente NE, E y SE (Azorin-Molina et al., 2008). Ello quizás explica que este tipo de situación genere, no sólo lluvias torrenciales, sino también días de extraordinaria recolección de agua de niebla, ya que los vientos de componente marítima favorecen la acumulación de agua en la atmósfera y por tanto, la formación de nubosidad densa en capas bajas de la troposfera, que puede ser captada y convertida en agua líquida por medio de los colectores.

A su vez, se ha representando el valor máximo diario recolectado por cada colector de niebla por cada uno de los 26 tipos sinópticos de JC (figura 5-5). Los resultados muestran la existencia de diferencias en función de la zona de estudio. En el norte, el colector Puig Neulós ha registrado días de extraordinaria captura, alcanzándose el máximo en situaciones de tipo C y obteniendo volúmenes superiores a 300 l/m^2 en días con advecciones del W (tipos W, SW y CW). En el resto de emplazamientos, los máximos se han obtenido con patrones de tipo C, mientras que en días con advecciones de tipo SE y SW también se han recolectado valores destacables en algunos emplazamientos. Los días con situaciones de tipo A híbridas han mostrado los valores máximos diarios más discretos, salvo los días con patrones de tipo ANE, donde muchos de los colectores han superado los 20 l/m^2 . En la zona centro, la gráfica muestra una clara relación entre valores importantes de recolección y advecciones marítimas. En los tres grupos de situaciones sinópticas analizadas (advectivas, ciclónicas y anticiclónicas) se han registrado días de extraordinaria captura ($> 100 \text{ l/m}^2$) con aporte de flujos marítimos (tipos N, NE, E, SE, CN, CNE, CE, CSE, ANE y AE), así como en situaciones de tipo C y A. Por el contrario, en los días con flujos terrales (W, NW, CW, CNW, ASW y AW) aparecen los máximos más bajos. La zona sur muestra máximos diarios de menor cuantía que las otras dos áreas. Se observa también una clara influencia de los flujos marítimos en la captación, pero en este caso las situaciones de tipo E, SE, CSE, CS y ANE, junto a las de tipo C y A, son las que han mostrado los valores máximos diarios más importantes.

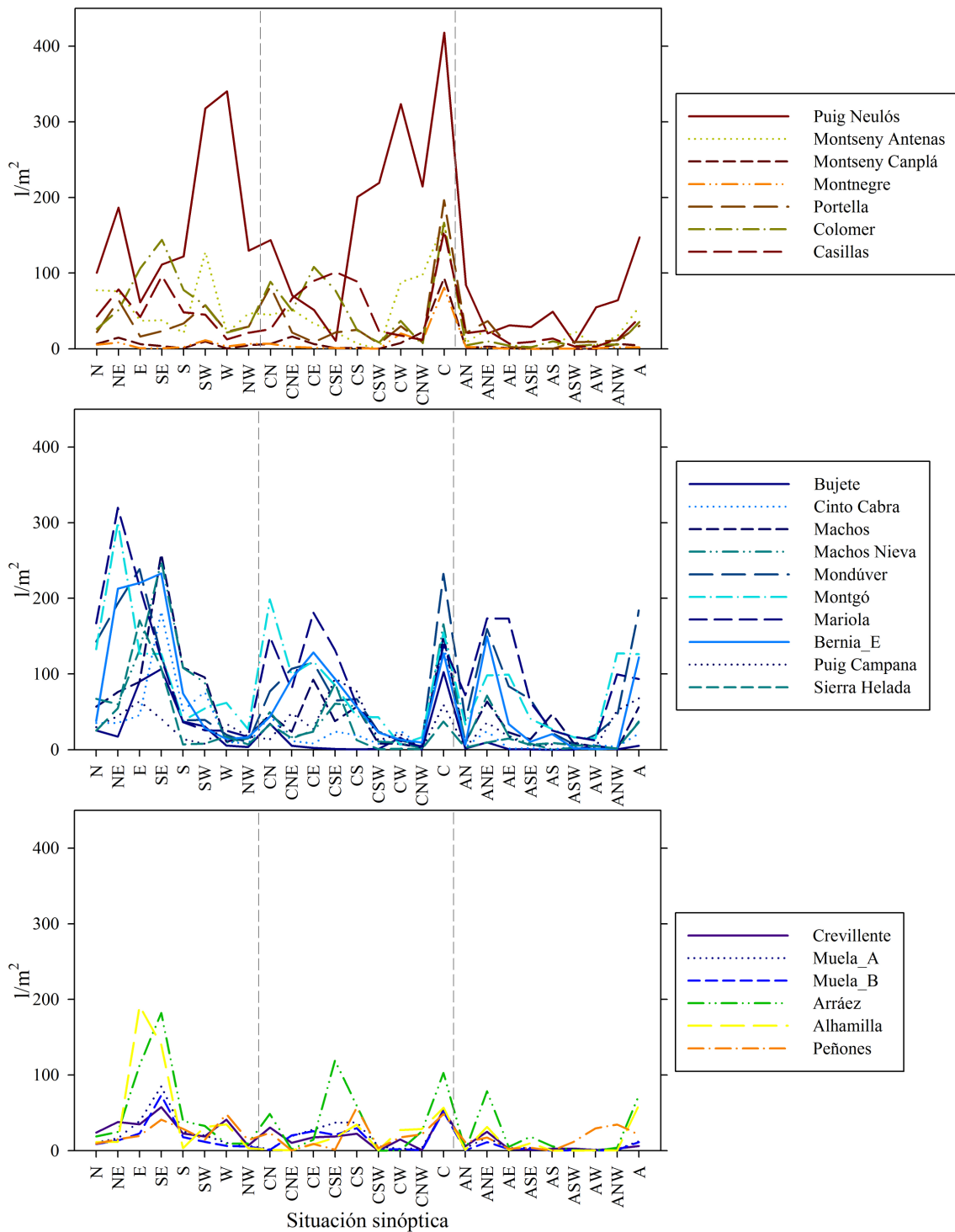


Figura 5-5: Valores máximos diarios de recolección de agua de niebla en función de la situación sinóptica de JC. Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

Tabla 5-2: Volúmenes máximos diarios recolectados en función de la situación sinóptica en superficie (según la clasificación de Jenkinson y Collison) y al nivel de 850 hPa, y valor de los índices de circulación atmosférica NAO, MO y WeMO, de todos los emplazamientos experimentales analizados, calculados en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012

Colector	V recolectado (l/m ²)	Fecha (dd/mm/aa)	Tipo JC	Flujo a 850 hPa	NAOi	MOi	WeMOi
Puig Neulós	418.0	15/03/11	C	SE fuerte	0.02	-3.54	-1.57
M. Antenas	166.8	04/11/11	C	S fuerte	-0.41	-2.33	-2.04
M. Canplá	93.8	12/03/11	C	SE fuerte	-3.23	-3.26	-2.88
Montnegre	80.7	12/03/11	C	SE fuerte	-3.23	-3.26	-2.88
Portella	196.5	12/03/11	C	S fuerte	-3.23	-3.26	-2.88
Colomer	166.7	21/04/11	C	SE fuerte	-1.27	-1.34	-2.16
Casillas	156.4	29/03/04	C	SE fuerte	-1.65	-1.98	-2.73
Bujete	106.4	14/11/12	SE	E fuerte	-0.04	-1.06	-1.69
Cinto Cabra	182.5	23/03/11	SE	SE fuerte	-1.78	-0.85	-2.88
Machos	258.1	23/03/11	SE	SE fuerte	-1.78	-0.85	-2.88
Machos NV	248.5	23/03/11	SE	SE fuerte	-1.78	-0.85	-2.88
Mondúver	238.6	20/03/12	E	E fuerte	1.70	-0.73	-1.46
Montgó	300.6	20/12/06	NE	NE moderado	2.50	-0.01	-0.43
Mariola	319.9	08/12/04	NE	NE fuerte	2.54	-0.29	-0.56
Bernia_E	232.9	23/03/11	SE	SE fuerte	-1.78	-0.85	-2.88
P. Campana	94.0	03/11/06	CSE	S moderado	-0.31	-0.33	-1.62
S ^a Helada	170.8	12/10/07	E	NE fuerte	0.31	-0.51	-0.85
Crevillent	57.8	23/03/11	SE	SE fuerte	-1.78	-0.85	-2.88
Muela_A	85.1	11/03/11	SE	SE fuerte	-1.72	-1.75	-2.18
Muela_B	73.3	11/03/11	SE	SE fuerte	-1.72	-1.75	-2.18
Arráez	182.1	07/11/12	SE	SE fuerte	0.34	-0.56	-1.61
Alhamilla	191.3	09/03/11	E	E fuerte	-0.20	-0.16	-2.09
Peñones	56.7	29/11/10	CS	SW fuerte	-4.92	-3.53	-1.29

5.2.2 RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA EN FUNCIÓN DEL FLUJO A ESCALA SINÓPTICA (850 hPa)

Al igual que en el apartado anterior, en la figura 5-6 se presenta, para cada colector de la Red y para cada uno de las 16 flujos sinópticos a 850 hPa, un diagrama de caja (gráfica A) con los principales parámetros estadísticos y un gráfico de líneas (gráfica B) con la frecuencia relativa de días con recolección de niebla (línea continua azul) y con el porcentaje del volumen total de agua recolectada asociado a cada situación sinóptica (línea discontinua negra), calculados a partir de los datos de recolección diaria de niebla (de 00 a 24 UTC) y con el procedimiento explicado en el apartado 5.2.1. A su vez, en la tabla 5-3 se muestran los valores de frecuencia relativa de días con recolección, el porcentaje del volumen total de agua recolectada y el promedio diario de recolección, agrupando los diferentes flujos sinópticos a 850 hPa en Mediterráneo-moderado (direcciones NE, E, SE y S y velocidades entre 0 y 5.14 m/s), Mediterráneo-fuerte (direcciones NE, E, SE y S y velocidades superiores a 5.14 m/s), Atlántico-moderado (direcciones SW, W, NW y N y velocidades entre 0 y 5.14 m/s), Atlántico-fuerte (direcciones SW, W, NW y N y velocidades superiores a 5.14 m/s).

Con respecto a la **frecuencia relativa de los días con recolección de agua de niebla**, figura 5-6 (línea continua azul, gráfica B), en general, en la mayor parte de los colectores analizados, las situaciones que generan mayor cantidad de días de recolección de agua son las que contienen vientos provenientes del tercer y cuarto cuadrante y, en concreto, de las direcciones SW, W, NW y N, sin que exista una clara diferencia en cuanto a la velocidad de viento. En la tabla 5-3 se puede observar como, en la mayoría de los emplazamientos, dominan los vientos de origen atlántico, fuertes en la parte norte y alternándose con moderados en el resto. En la mayor parte de los colectores situados al norte, los vientos de origen atlántico son responsables de más del 75 % de los días con recolección de agua. En la zona centro, así como en el colector Peñones, siguen dominando los vientos atlánticos y este tipo de viento está presente en más del 60 % de los días, mientras que en el resto de emplazamientos de la parte sur representa aproximadamente el 50 % de los casos. Tan sólo en Arráez dominan los vientos de origen mediterráneo, representando el 63 % de los días.

En cuanto a los **flujos sinópticos que han aportado mayor volumen de agua** durante el periodo de estudio, el comportamiento es muy diferente al observado en el estudio de frecuencias. En este caso, dominan los vientos de origen mediterráneo, aunque con matices en las diferentes zonas, siendo las velocidades fuertes las que generan mayores volúmenes recolectados en todos los casos. En la figura 5-6a (línea discontinua negra, gráfica B) podemos observar los colectores situados en la zona norte del área de estudio, que es la que presenta las mayores particularidades. En esta área, los dos colectores situados a mayor latitud, junto al colector Portella, han tenido un comportamiento diferente al resto. En estos tres emplazamientos destacan los volúmenes obtenidos en situaciones de viento fuerte en el rango de direcciones comprendidas entre SE y NW, siendo el conjunto de las situaciones de vientos atlánticos responsable de más de la mitad de los totales recolectados (tabla 5-3). Sin embargo, en el resto de lugares analizados en esta área, los vientos que han aportado los mayores volúmenes de agua son los que proceden de la dirección SE y con velocidades fuertes. En algunos casos, como en Montnegre y Montseny Canplá, este tipo de viento supone alrededor del 35 % del total. En tabla 5-3 vemos como los flujos fuertes de origen mediterráneo se han comportado como los más productivos en estos casos, llegando a representar el 60 % del total en Montnegre, y que el total de vientos mediterráneos ha tenido mayor importancia que los atlánticos. A medida que descendemos latitudinalmente, las situaciones con flujo mediterráneo van adquiriendo mayor importancia. De este modo, en la zona centro es donde mayor peso presentan. En la figura 5-6b podemos ver como, en la mayoría de los casos, las situaciones que han contribuido con mayor porcentaje al total de agua recolectada son las procedentes de las direcciones NE, E y SE y con velocidades fuertes. Son flujos de origen marítimo y que por consiguiente, suponen un aporte de humedad desde el mar hacia la costa. Entrando en detalle, se observa como en los colectores localizados en la provincia de Valencia y por tanto, más al norte de esta área, como son Bujete, Cinto Cabra, Machos, Machos Nieva y Mondúver, los vientos más importantes han sido E y SE fuertes, mientras que al resto de emplazamientos (Montgó, Mariola, Bernia_E, Puig Campana y Sierra Helada) habría que añadirles los provenientes de la dirección NE fuertes. En la tabla 5-3 se observa en todos los casos un dominio claro de las situaciones de flujo mediterráneo, bajo cuyos patrones se ha recolectado más del 64 % del total de agua en todos los emplazamientos, superando el 75 % en la mayoría. Los vientos fuertes se han comportado como los más productivos,

mientras que con los moderados se han obtenido mayores capturas que en el resto de áreas. En la parte sur del área de estudio (figura 5-6c) los emplazamientos estudiados han mostrado un comportamiento dispar. Los patrones sinópticos que han aportado mayores volúmenes en la mayor parte de estos casos han sido SE fuertes. Sin embargo, las situaciones de vientos del tercer y cuarto cuadrante han provocado capturas importantes en Crevillente, Alhamilla y Peñones. En este último caso, los flujos de dirección W fuertes han supuesto más del 30 % del volumen total. En la tabla 5-3 se advierte un dominio de los vientos de procedencia mediterránea fuertes, salvo en Crevillente y Peñones donde sobresalen los atlánticos fuertes. En conjunto, los vientos mediterráneos han aportado más agua que los atlánticos en todos los lugares de esta área, salvo en Peñones, donde el 70 % del agua se recolecta con flujos oceánicos.

Los **promedios de recolección de agua de niebla** más elevados se han registrado con flujos sinópticos de origen mediterráneo y velocidades fuertes en todos los casos, existiendo diferencias en función de la localización geográfica. En la zona norte (figura 5-6a, gráfica A) han sido los flujos fuertes de las direcciones SE y S los que presentan los valores más altos, habiéndose obtenido el mayor valor en Puig Neulós bajo situaciones de S fuertes, con un promedio de recolección de 156.8 l/m²/d. En otros colectores de esta zona también se han obtenido promedios destacables, como en Portella (55.7 l/m²/d, de S fuertes), Montseny Antenas (53.9 l/m²/d, SE fuertes) y Colomer (47 l/m²/d, SE fuertes). Por el contrario, los promedios más bajos se han alcanzado, en general, bajo situaciones de NE y N, tanto fuertes como moderados. En la zona central del área de estudio (figura 5-6b, gráfica A) los valores más altos también se han registrado con situaciones de flujos mediterráneos, aunque en este caso los más importantes son los provenientes de las direcciones SE y E fuertes. Machos Nieva, con un valor de 93.3 l/m²/d durante los días de SE fuertes, presenta el promedio más elevado. Machos, Cinto Cabra y Bernia_E también presentan valores superiores a 50 l/m²/d bajo las mismas condiciones sinópticas. Los flujos procedentes del interior peninsular, fundamentalmente de las direcciones NW y W aparecen como los de menores valores medios. En la zona sur (figura 5-6c, gráfica A) destacan los promedios obtenidos en los días de flujos S y SE fuertes, aunque en este caso los valores son menores que en otras áreas. De hecho, el dato más elevado lo encontramos en el colector Arráez bajo la influencia de vientos del S fuertes, con 17.7 l/m²/d de valor medio. Es destacable el colector Peñones donde observamos de nuevo valores altos de captación bajos situaciones de flujos atlánticos (3.5 l/m²/d, W fuertes). En la tabla 5-3 podemos observar como en todos los colectores, salvo en Peñones, los valores medios más altos se han encontrado con vientos de origen mediterráneo fuertes. Bajo estas situaciones, los promedios de captación son elevados y superiores a 10 l/m²/d en la mayoría de emplazamientos del norte y del centro del área de estudio. En la parte sur, salvo en Peñones, también son reseñables los valores obtenidos con estas condiciones de flujo, aunque con valores más discretos, salvo en Arráez, donde se han alcanzado 12.2 l/m²/d y en Peñones, donde dominan las situaciones atlánticas fuertes.

A modo de resumen y sin entrar en las particularidades de cada emplazamiento, se puede concluir que el mayor número de días con niebla se ha observado bajo situaciones de vientos de origen atlántico (N, NW, W y SW), sin una clara dependencia de su velocidad. Sin embargo, los mayores volúmenes de agua se han recolectado bajo la influencia de flujos con velocidades fuertes y de procedencia mediterránea, así como los

mayores promedios de captura. Tan sólo el colector Peñones ha mostrado una mayor dependencia de los flujos atlánticos, debido fundamentalmente a su situación geográfica, bien expuesta a ambos flujos.

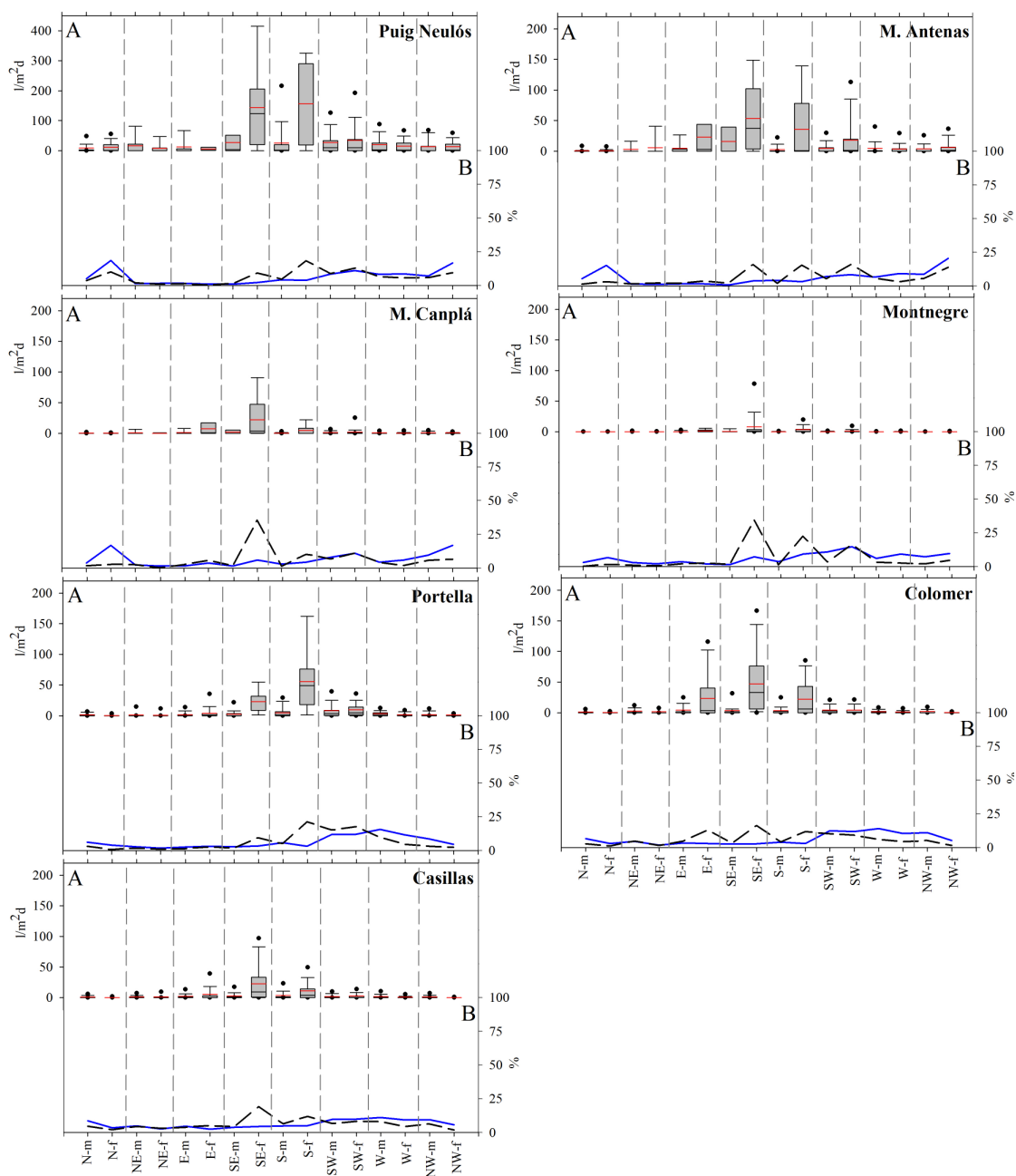


Figura 5-6 (a): Representación para los 16 tipos sinópticos de flujo a 850 hPa, divididos en ocho zonas en función de la dirección de viento (de izquierda a derecha: N, NE, E, SE, S, SW, W y NW) y en dos rangos de velocidad (m: moderados (0-5.14 m/s); f: fuertes (>5.14 m/s)) y para los colectores situados al norte del área de estudio, calculado a partir de todos los datos disponibles de niebla acumulada diaria para el periodo 2003-2012, de: 1) Gráfica A: diagrama de caja (la media (línea roja), la mediana (línea negra), el intervalo intercuartílico (caja) y los percentiles 10 y 90 (bigotes), y 5 y 95 (puntos negros)); 2) Gráfica B: frecuencia relativa del número de días con recolección de niebla (línea continua azul) y porcentaje del volumen total de agua capturado por cada colector (línea discontinua negra)

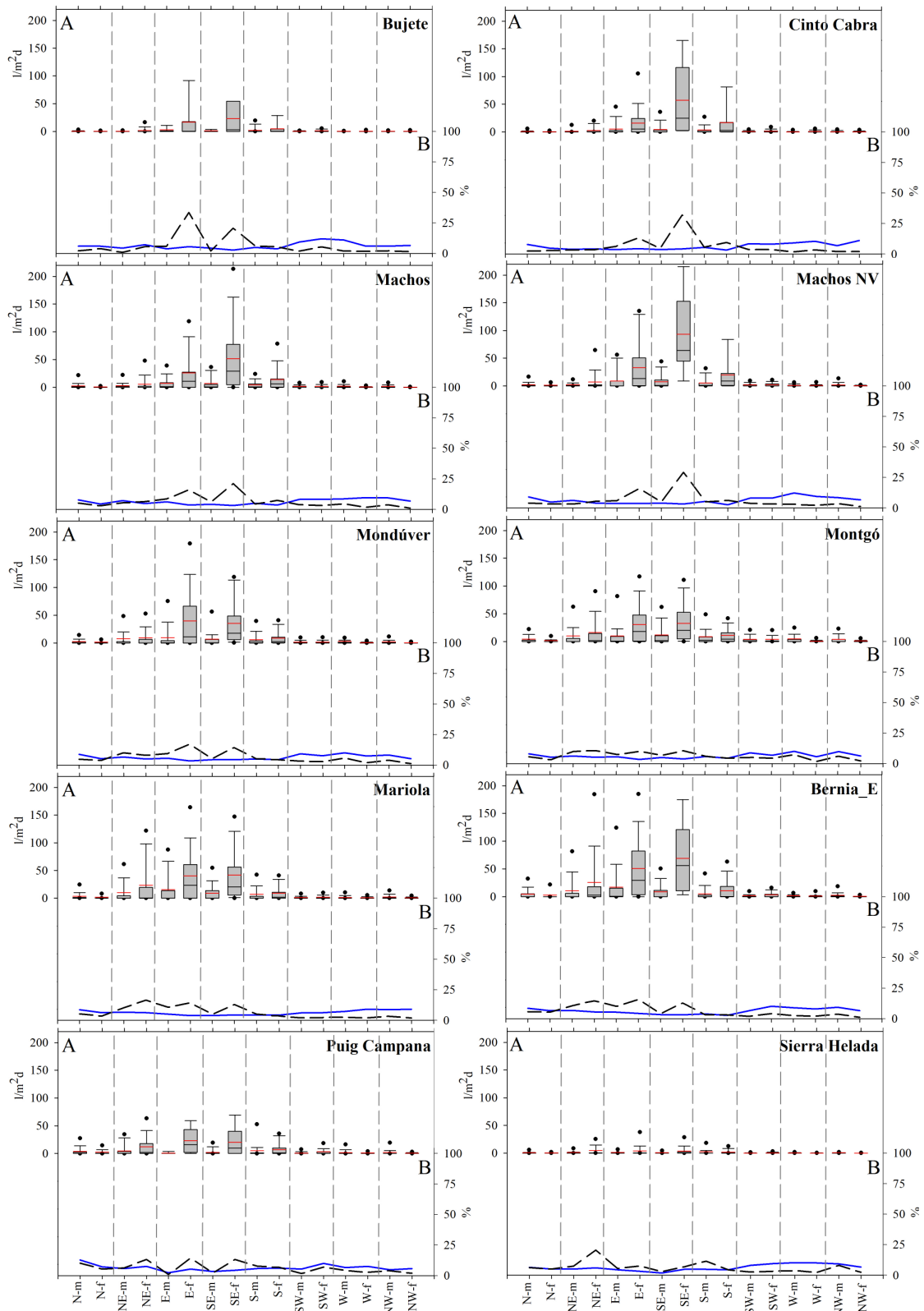


Figura 5-6 (b): Igual que la anterior, pero para los colectores situados en el centro del área de estudio

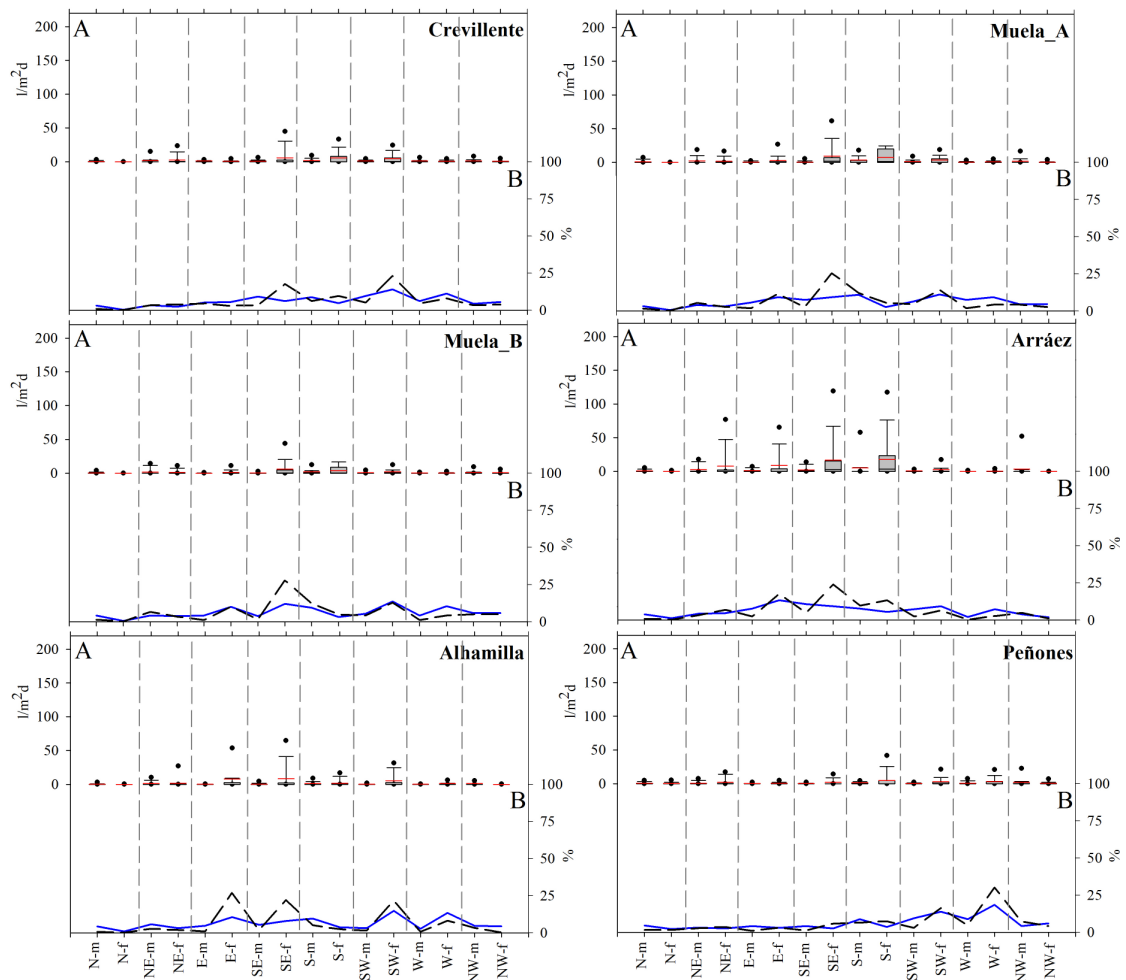


Figura 5-6 (c): Igual que la anterior, pero para los colectores situados al sur del área de estudio

Tabla 5-3: Frecuencia de los días de recolección de niebla, proporción del volumen de agua capturada y tasa de recolección de agua de niebla, de todos los emplazamientos experimentales analizados, en función del flujo de viento a 850 hPa (M-m: Mediterráneo moderado; M-f: Mediterráneo fuerte; A-m: Atlántico moderado; A-f: Atlántico fuerte; siendo Mediterráneo: direcciones NE, E, SE y S, Atlántico: direcciones SW, W, NW y N; Moderado: velocidades entre 0 y 5.14 m/s; Fuertes: velocidades superiores a 5.14 m/s), calculadas en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012. En negrita, los valores más elevados de cada tipo y colector

	Frecuencia de los días con recolección de agua de niebla (%)				Proporción del volumen recolectado de agua de niebla (%)				Tasa de recolección de agua de niebla (l/m ² /d)			
	M-m	M-f	A-m	A-f	M-m	M-f	A-m	A-f	M-m	M-f	A-m	A-f
Puig Neulós	8	8	29	55	9	29	25	38	20.1	87.0	16.8	16.6
Montseny Antenas	8	10	28	54	8	37	19	36	4.3	29.5	3.7	5.2
Montseny Canplá	8	15	26	51	8	52	18	22	0.8	8.2	0.6	0.5
Montnegre	12	21	27	41	6	60	9	25	0.2	3.0	0.1	0.3
Portella	14	11	42	32	10	34	31	25	2.5	14.3	3.7	2.8
Colomer	15	11	44	30	17	43	24	16	3.5	18.3	2.4	1.3
Casillas	18	15	39	28	19	39	26	16	2.4	8.3	1.7	0.9
Bujete	18	19	32	31	15	65	8	12	1.3	9.5	0.3	0.5
Cinto Cabra	17	16	32	35	20	58	10	12	3.4	18.0	0.7	0.8
Machos	23	15	34	29	24	51	17	8	4.9	18.8	1.8	0.7
Machos Nieva	20	14	38	29	19	57	14	9	5.3	30.5	1.7	1.1
Mondúver	22	17	36	25	30	44	18	9	7.9	20.1	2.4	1.0
Montgó	23	17	37	24	30	35	24	11	10.1	20.9	4.2	1.6
Mariola	20	19	31	30	31	47	13	9	10.6	26.9	2.3	1.3
Bernia_E	19	16	34	31	28	46	14	12	10.5	34.2	2.5	1.7
Puig Campana	17	23	29	30	17	47	20	16	3.6	14.1	2.1	1.6
Sierra Helada	16	19	34	31	27	39	21	13	1.5	3.9	0.6	0.3
Crevillente	27	19	23	31	18	34	14	35	1.3	3.4	0.9	1.7
Muela_A	28	25	22	26	22	45	12	21	1.6	5.1	1.0	1.3
Muela_B	21	29	19	30	21	46	11	22	0.8	2.9	0.5	0.7
Arráez	30	33	17	20	20	62	8	10	2.9	12.2	1.2	0.9
Alhamilla	26	26	15	34	10	53	6	31	0.8	6.3	0.5	1.7
Peñones	20	12	27	41	11	20	17	52	0.7	2.0	1.0	2.3

En la tabla 5-2 se presenta el valor máximo de recolección diaria de en función del tipo de flujo sinóptico al nivel de 850 hPa, entre otros datos. Y como se puede observar, en todos los emplazamientos, salvo en Peñones, los máximos diarios de recolección se han producido bajo situaciones de flujo de origen mediterráneo y con velocidades mayoritariamente fuertes. El flujo que ha generado el mayor número de picos en cuanto a la captación ha sido el procedente de la dirección SE y con velocidad fuerte. Este tipo de flujo fue el que generó la recolección de 418 l/m^2 en Puig Neulós el 15 de marzo de 2011, así como otros valores importantes superiores a $200 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en Machos, Machos Nieva o Bernia_E el día 23 de marzo de 2011. Situaciones de NE también han provocado días de extraordinaria captura en lugares como Montgó y Mariola, llegando incluso a superar los $300 \text{ l/m}^2/\text{d}$. El colector Peñones es el único que presenta su máximo diario de recolección con flujos de origen atlántico, en concreto, provenientes de la dirección SW y con velocidad fuerte ($56.7 \text{ l/m}^2/\text{d}$, el 29 de noviembre de 2010).

En la figura 5-7 se presentan los valores máximos diarios de captación de agua de niebla para cada uno de los 16 flujos sinópticos y para los 23 colectores de la Red, divididos en función de su localización. Y observamos como el comportamiento difiere en función de la situación geográfica. En el norte del área de estudio, las situaciones de vientos del SE y S fuertes han sido las que han provocado los máximos diarios de captación. Estas situaciones han provocado días de importante recolección, con valores superiores a los 150 l/m^2 en varios de los emplazamientos, como Montseny Antenas, Portella, Colomer o Casillas, y superiores a $300 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en Puig Neulós. En la zona central del área de estudio, los máximos se han alcanzado bajo la influencia de flujos del NE, aunque son las situaciones de E y SE con velocidades fuertes las que presentan el mayor número de máximos. Salvo por los valores obtenidos en los colectores Mondúver y Montgó, donde se han superado los $120 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en días de flujos de W, las direcciones provenientes del interior peninsular (SW, W y NW) son las que presentan los máximos menos importantes. En la parte sur, observamos como los flujos del SE fuertes, así como los del E fuertes, son los que han generado los máximos de mayor cuantía, con valores que han llegado a superar los $100 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en Arráez y Alhamilla, y sobrepasando los $50 \text{ l/m}^2/\text{d}$ en el resto. Se aprecia a su vez máximos de escaso valor bajo situaciones de N, con picos inferiores a 10 l/m^2 de recolección máxima diaria en todos los emplazamientos analizados.

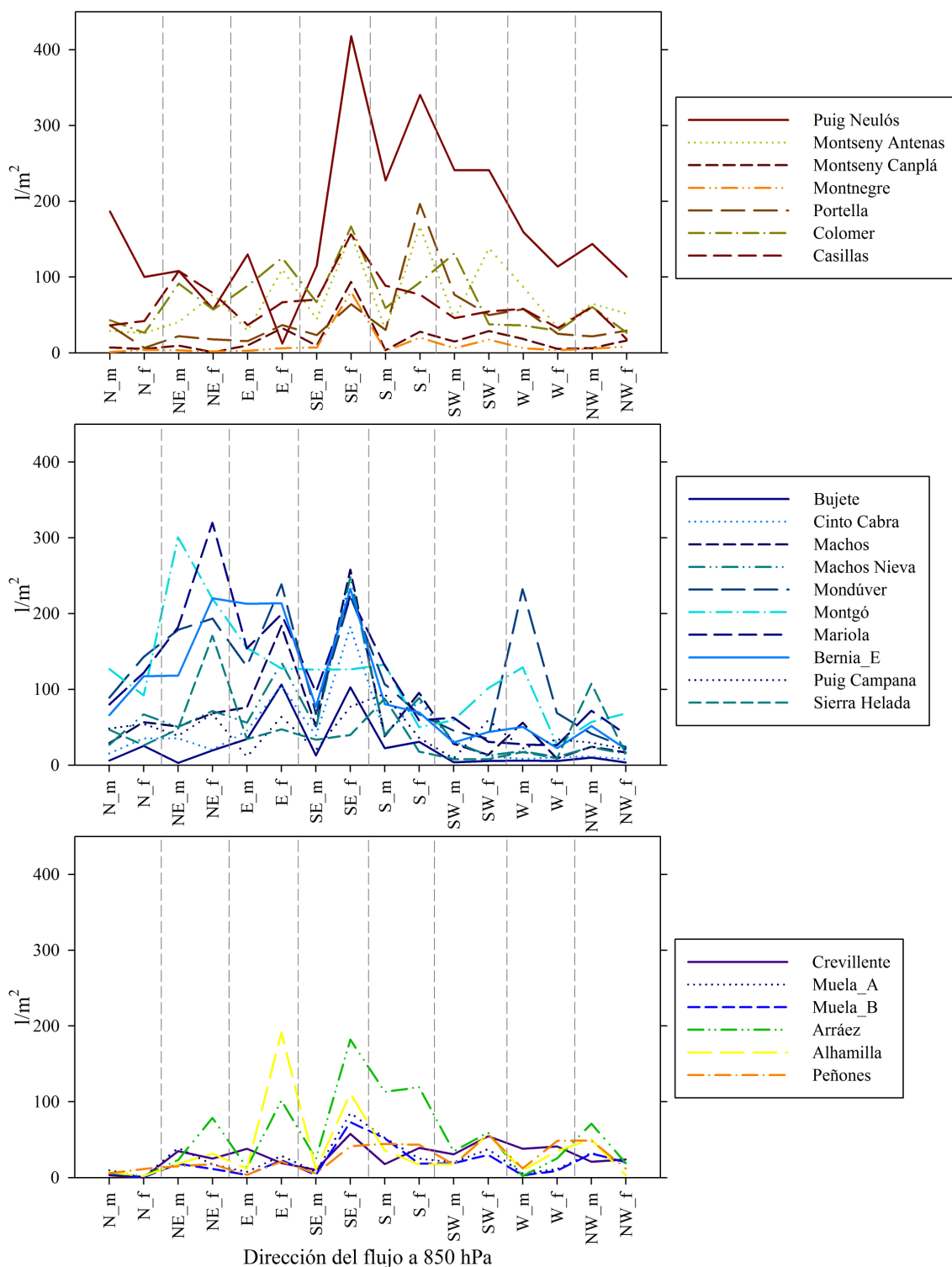


Figura 5-7: Valores máximos diarios de recolección de agua de niebla en función de los flujos sinópticos en niveles bajos (850 hPa). Arriba, colectores situados al norte de zona de estudio; centro, colectores situados en el centro; abajo, colectores situados al sur

5.2.3 RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA EN FUNCIÓN DE LOS ÍNDICES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA NAO_i, MO_i Y WeMO_i

Se ha analizado la influencia de los índices de circulación atmosférica NAO_i, MO_i y WeMO_i sobre la recolección de agua de niebla. Y para ello, en la figura 5-8 se muestra el tipo de relación lineal (positiva o negativa, calculada a través del coeficiente de correlación de Pearson) y su significación estadística, entre cada uno de los colectores y los índices de teleconexión, para las diferentes estaciones del año y para el total anual. Para su cálculo se han utilizado los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC) y los datos diarios de los patrones de circulación. A su vez, en la tabla 5-4, a modo de resumen, se muestra el número de colectores que muestra correlación positiva o negativa, significativa o no, para los tres índices y diferenciando entre estaciones del año y totales.

De los tres índices analizados, el **NAO_i** es el que presenta la correlación más débil, con un valor prácticamente nulo ($r=-0.02$) y no significativo para el cómputo anual y para el conjunto de todos los emplazamientos (figura 5-8). Sin embargo, el comportamiento difiere entre las diferentes zonas analizadas. En el N y S la señal es negativa y significativa ($p<0.05$), mientras que en la zona central la correlación es positiva y más débil. De entre todos los colectores analizados, 13 muestran valores de r significativos ($p<0.05$), mientras que 10 son no significativos (tabla 5-4). Invierno es la estación que manifiesta una señal más fuerte, con valores de r negativos en prácticamente todos los casos, y significativos en 12 (10 con $p<0.05$ y 2 con $p<0.10$). La correlación alcanza su mayor peso en esta época del año en las zonas S y N, con valores de r de -0.31 y -0.22 respectivamente, y con un valor máximo de r igual a -0.59 obtenido en Crevillente (no mostrado en la figura 5-8). Los resultados se asemejan bastante a lo que ocurre con la precipitación cuando se relaciona con el índice NAO en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica en el mes de diciembre, con señales negativas en toda el área, excepto en el sur de la provincia de Valencia, así como en Alicante y Murcia, y con correlaciones más importantes en la parte sur, debido a la influencia del índice a través del estrecho de Gibraltar (Gonzalez-Hidalgo et al., 2009). En otoño la señal del coeficiente de Pearson es prácticamente nula en el conjunto del área de estudio, así como en el N, mientras que tiene valores significativos en el resto, positivos en la zona central y negativos en el S, aunque con menor influencia que en invierno en el último caso ($r=-0.19$). Durante el verano, la señal cambia de signo y pierde fuerza en el centro y en el S, con valores negativos y positivos respectivamente, manteniéndose negativos en el N, aunque con escaso número de emplazamientos con valores significativos ($p<0.05$). Estos resultados son similares a los obtenidos por Martín-Vide y Fernández (2001) en el estudio de la precipitación peninsular. Al igual que ocurre con la lluvia, la mayor influencia de los procesos locales en la formación de las nieblas, así como la menor fuerza del índice en esta época del año, dan lugar a correlaciones no significativas en la mayoría de los casos (Martín-Vide and Fernández-Belmonte, 2001). Durante la primavera, la señal es débil en todas las áreas estudiadas y por tanto, con escasa importancia del índice en esta época del año.

El **MOi** ha exhibido una correlación negativa en el cómputo anual ($r=-0.19$), la cual ha sido significativa estadísticamente ($p<0.05$) en 21 de los 23 puntos de la Red (figura 5-8), mostrando por tanto una mayor influencia que el **NAOi** en la recolección de agua de niebla. La zona central ha sido la que ha obtenido el valor más débil de r de Pearson (-0.17), mientras que en el N y S han alcanzado -0.23 y -0.26 respectivamente (Montseny Antenas, con r igual a 0.42 en valor absoluto, presenta la correlación más fuerte (valor no mostrado en la figura 5-8)). El invierno es la estación del año con mayor influencia del **MOi**. En esta época del año, 17 de los 23 colectores revelan correlaciones significativas ($p<0.05$), siendo todas ellas negativas (tabla 5-4). Su influjo es más notable en la parte S, con correlaciones inferiores a -0.50 en lugares como Crevillente y Alhamilla. En la parte N también se alcanzan correlaciones importantes, con valores de r inferiores a -0.41 en los colectores más septentrionales, siendo los emplazamientos situados al S de esta área los que alcanzan los registros más débiles (-0.20 en Colomer y -0.16 en Casillas). La zona central, con r igual a -0.16, se ha mostrado como la menos influenciada por este patrón de teleconexión, con valores de correlación inferiores a 0.23 en valor absoluto en todos los colectores. La parte N de la costa mediterránea peninsular sigue teniendo una clara influencia del **MOi** en primavera. En esta área, todos los colectores han mostrado correlaciones negativas significativas ($p<0.05$), con registros de r inferiores a -0.46 en los cinco emplazamientos más septentrionales. Tanto en la zona central como en la parte S, los valores del coeficiente de Pearson siguen siendo negativos aunque de menor importancia, no habiendo superado en ningún caso el valor 0.27 en módulo. En el otoño, el **MOi** tiene una correlación negativa sobre todo el conjunto, con una mayor importancia sobre la zona meridional. En esta área, la correlación es fuerte, donde se ha alcanzado la señal de r más importante para este patrón de teleconexión ($r=-0.64$ en Muela_A, valor no mostrado en la figura 5-8) y con valores inferiores a -0.30 en el resto, salvo en Arráez, donde la señal, aun siendo significativa ($p<0.10$), es más débil. El verano se vuelve a mostrar como la estación del año con menor influencia del patrón de teleconexión. Para este periodo, en tan sólo 7 de los 23 colectores esta correlación es estadísticamente significativa ($p<0.05$) (tabla 5-4) y la r del conjunto de colectores es débil (-0.13).

Con un r igual a -0.25 (figura 5-8) para el conjunto de colectores y para todos los datos analizados, y con correlaciones negativas y estadísticamente significativas ($p<0.05$) para los 23 emplazamientos estudiados (tabla 5-4), el **WeMOi** se ha mostrado como el más influyente sobre la recolección de agua de los tres índices analizados, aunque con matices para las distintas zonas y épocas del año. Los valores negativos del **WeMOi** implican advecciones del ENE, E, ESE y SE sobre la vertiente mediterránea peninsular (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006), lo que supone un aporte de humedad a la atmósfera y por tanto, favorecen las condiciones para la formación de nubosidad baja que da lugar a las nieblas de advección. El invierno aparece como la estación del año con mayor influencia de este índice. La correlación es significativa ($p<0.05$) e igual a -0.28, siendo la de mayor módulo de todas las estaciones e índices analizados. En todos los colectores esta correlación es negativa y estadísticamente significativa con $p<0.10$ (y en 20 colectores con $p<0.05$), oscilando los valores de r entre -0.58 (Crevillente) y -0.20 (Peñones). En todas las áreas los valores del coeficiente de correlación son importantes, destacando la zona S con r igual a -0.41. La primavera mantiene un comportamiento similar al invierno, con una correlación significativa ($p<0.05$) e igual a -0.27 para el conjunto de emplazamientos y con 22 de los 23 colectores mostrando significación

estadística con $p < 0.10$ (y 20 colectores con $p < 0.05$). En tan sólo Peñones la correlación no es significativa e inferior a -0.20 . Durante esta época del año, la zona centro es la que presenta mayor influencia del WeMOi, con un registro de r igual a -0.31 . El otoño también muestra una correlación negativa importante para el conjunto de colectores analizados ($r = -0.20$), con una gradiente negativo de r de N a S. Todos los emplazamientos presentan correlación negativa, siendo significativa ($p < 0.10$) en 21 de los 23 lugares analizados (y en 18 con $p < 0.05$). El verano se muestra de nuevo como la estación menos influenciada estadísticamente, con un coeficiente de correlación cercano a cero ($r = -0.07$) para el conjunto de colectores. En esta época, la zona centro es la que presenta mejor respuesta a la señal del WeMOi ($r = -0.15$ significativa con $p < 0.05$).

La distribución de los volúmenes diarios de recolección de niebla frente a sus correspondientes valores diarios de los tres índices para los días con recolección de agua (figura 5-9) muestra una clara influencia de los valores negativos sobre la captación de niebla, más evidente en los índices MO y fundamentalmente el WeMOi. Para el patrón NAO, en la mayoría de los casos, los valores negativos del índice suponen entre el 60 y el 80 % del total del volumen recolectado, habiéndose captado en el intervalo $]-0.5, -2]$ el mayor porcentaje del volumen total recogido. En el caso del MOi, la importancia de sus valores negativos aumenta, habiéndose recolectado más del 70 % del volumen total en días con este signo en todos los emplazamientos, salvo en Puig Campana, y suponiendo el 90 % o más en lugares como Cinto Cabra, Bujete o Alhamilla. El intervalo en el que se ha recolectado mayor porcentaje del volumen total es principalmente $]0, -1.5]$. Con valores negativos del WeMOi se ha recolectado más del 67 % del volumen total en todos los emplazamientos, llegando al 82 % o incluso más en 20 de los 23 colectores. En los colectores del interior de la provincia de Valencia, como Bujete, Cinto Cabra, Machos o Machos Nieva, este porcentaje supera el 92 %. El rango $]-0.5, -1.5]$ ha sido el más productivo en la mayoría de lugares analizados.

A su vez, en la tabla 5-2 se observa como los valores máximos diarios de recolección de agua por medio de los colectores se han alcanzado con datos negativos para el MOi y WeMOi en todos los emplazamientos estudiados, mientras que para el NAOi algunos picos se han registrado con datos positivos del índice. En el caso del WeMOi muchos de los máximos se han dado en días con valores del índice entre -2 y -3 . En el MOi, en la mayoría de los colectores los máximos se han registrado en días con valores del índice superiores, salvo en algunos puntos localizados en los extremos N y S del área de estudio, donde el valor del índice era inferior a -3 . Con el patrón NAO no se observa un dominio claro de ningún rango de valores, habiéndose registrado los máximos diarios con datos diarios del índice que van desde 2.54 hasta -4.92 .

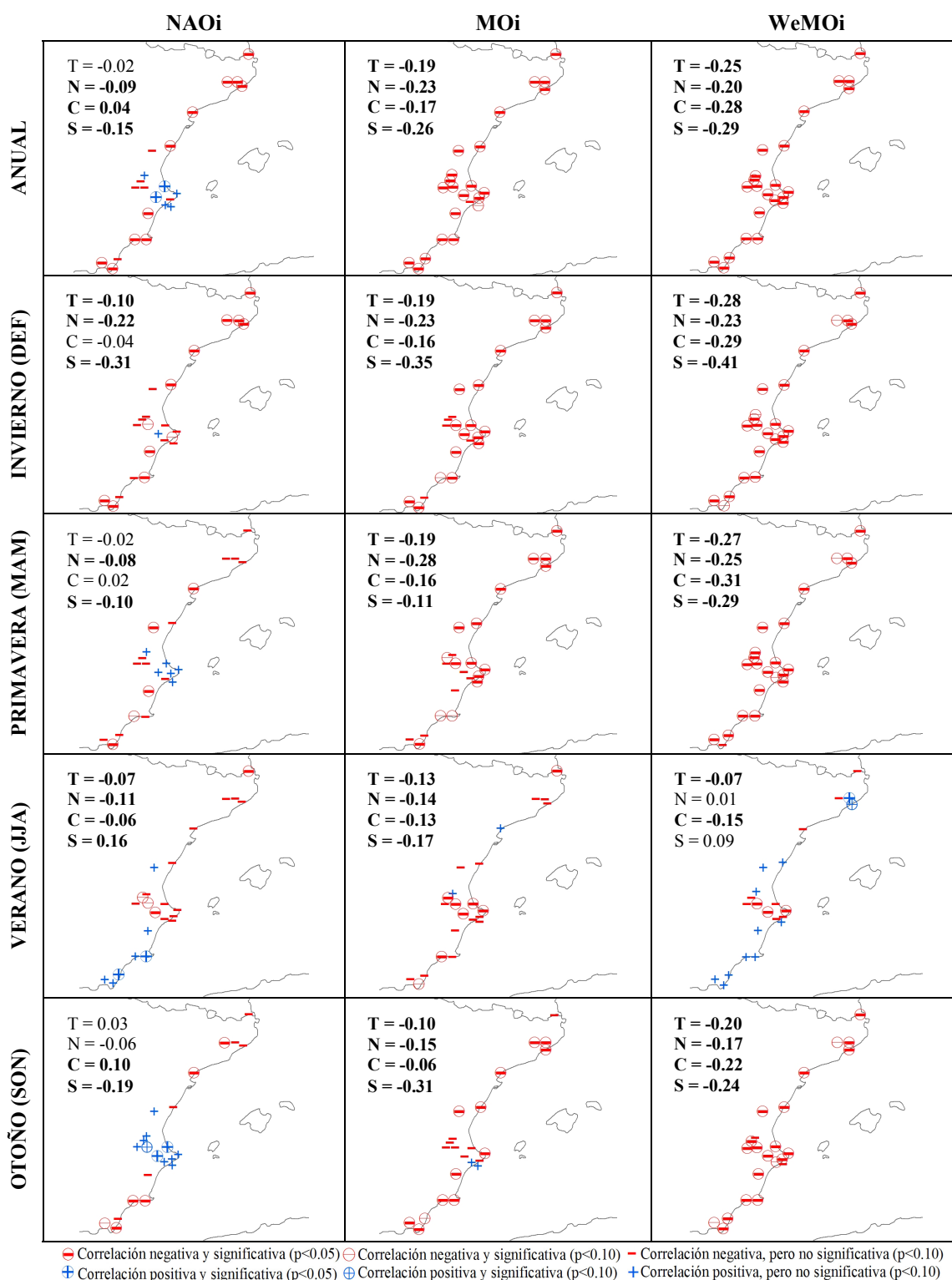


Figura 5-8: Distribución espacial anual y estacional de la señal del índice de correlación de Pearson y el nivel de significación entre la recolección de agua de niebla y los patrones de teleconexión NAOi, MOi y WeMOi, para todos los emplazamientos analizados y para los datos disponibles del periodo 2003-2012. En la parte superior izquierda, se muestra el coeficiente de correlación de Pearson (en negrita valores significativos, $p < 0.05$) para T (todos los colectores), N (colectores situados al N del área de estudio, de Puig Neulós a Casillas), C (colectores localizados en el centro, de Bujete a Sierra Helada) y S (colectores emplazados en el S, de Crevillente a Peñones)

Tabla 5-4: Número de colectores, anual y estacional, que muestran correlación (Pearson, $p < 0.05$) negativa y no significativa, negativa y significativa, positiva y no significativa, positiva y significativa, entre los datos de recolección diaria de agua de niebla y los patrones de teleconexión NAOi, MOi y WeMOi, calculado a partir de todos los datos disponibles de la Red de Colectores desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012

	NAOi				MOi				WeMOi			
	(-)	(-)< 0.05	(+)	(+)< 0.05	(-)	(-)< 0.05	(+)	(+)< 0.05	(-)	(-)< 0.05	(+)	(+)< 0.05
Anual	6	11	4	2	2	21	0	0	0	23	0	0
Invierno	12	10	1	0	6	17	0	0	3	20	0	0
Primavera	13	4	6	0	10	13	0	0	3	20	0	0
Verano	14	2	5	2	14	7	2	0	8	3	11	1
Otoño	7	5	9	2	9	12	2	0	5	18	0	0

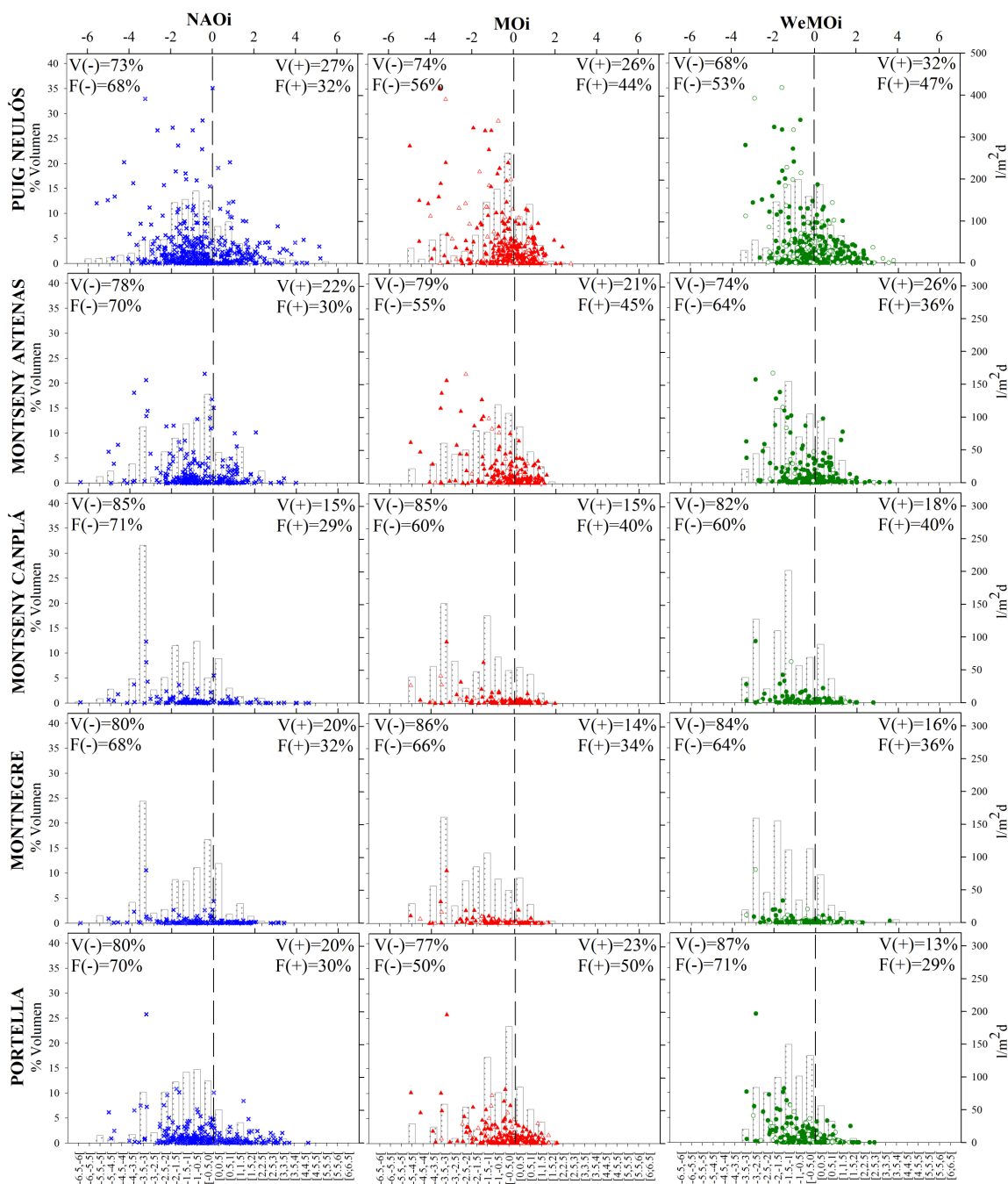


Figura 5-9: Distribución estadística de los valores diarios de NAOi, MOi y WeMOi (eje de abscisas superior) frente a la niebla acumulada diaria (de 0 a 24 h UTC) (eje de ordenadas derecho), así como del porcentaje del volumen total de agua capturado (eje de ordenadas izquierdo) en función del valor diario de NAOi, MOi y WeMOi distribuido en rangos de 0.5 del valor de cada índice (eje de abscisas inferior), para todos los emplazamientos analizados y para los datos disponibles del periodo 2003-2012, ordenados de Norte a Sur. En las esquinas superiores de cada gráfica se muestran el porcentaje del volumen total acumulado (V) y del número total de días con recolección de niebla (F), en función del tipo de señal de cada índice (negativa a la izquierda y positiva a la derecha)

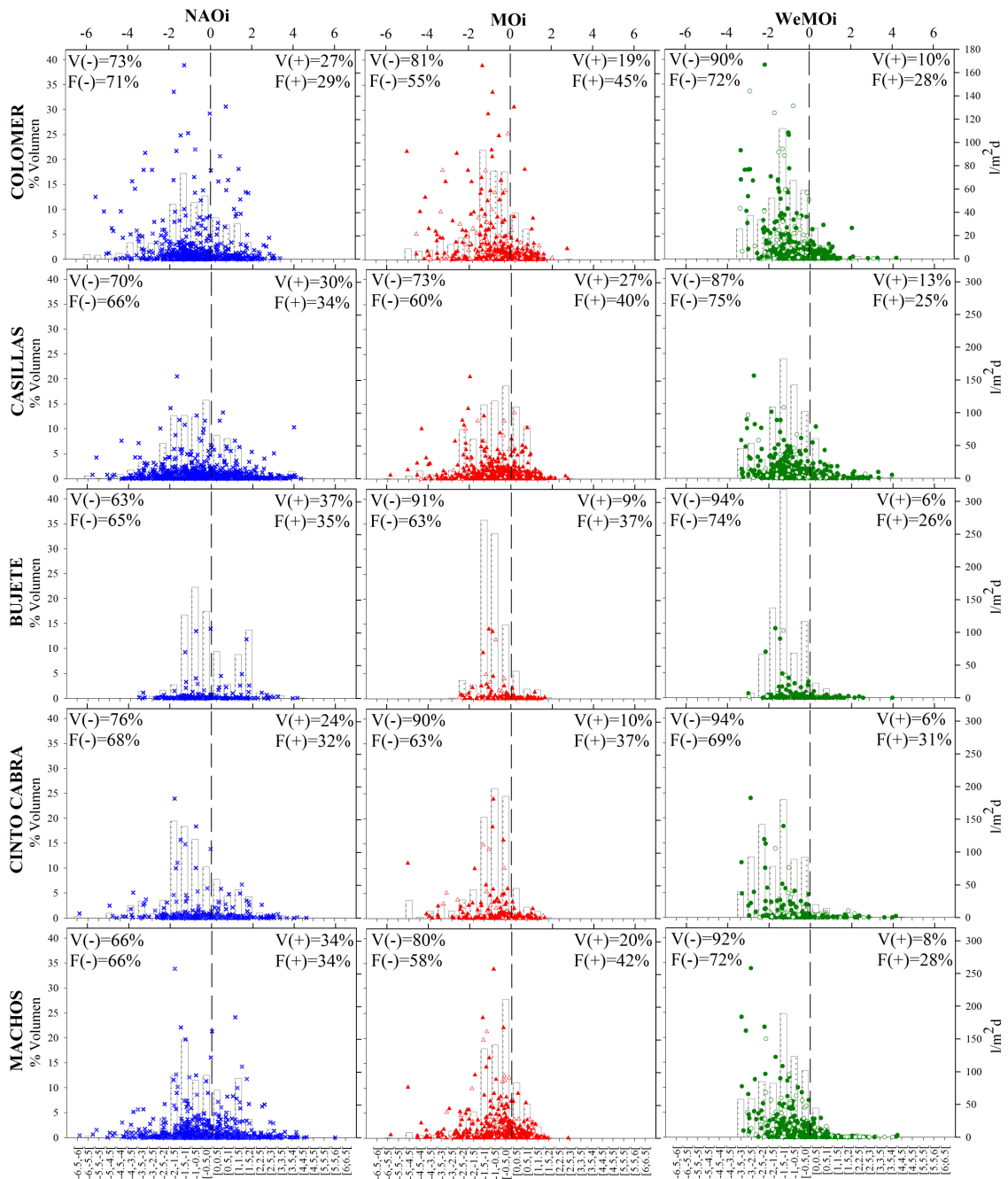


Figura 5-9: Continuación de la anterior

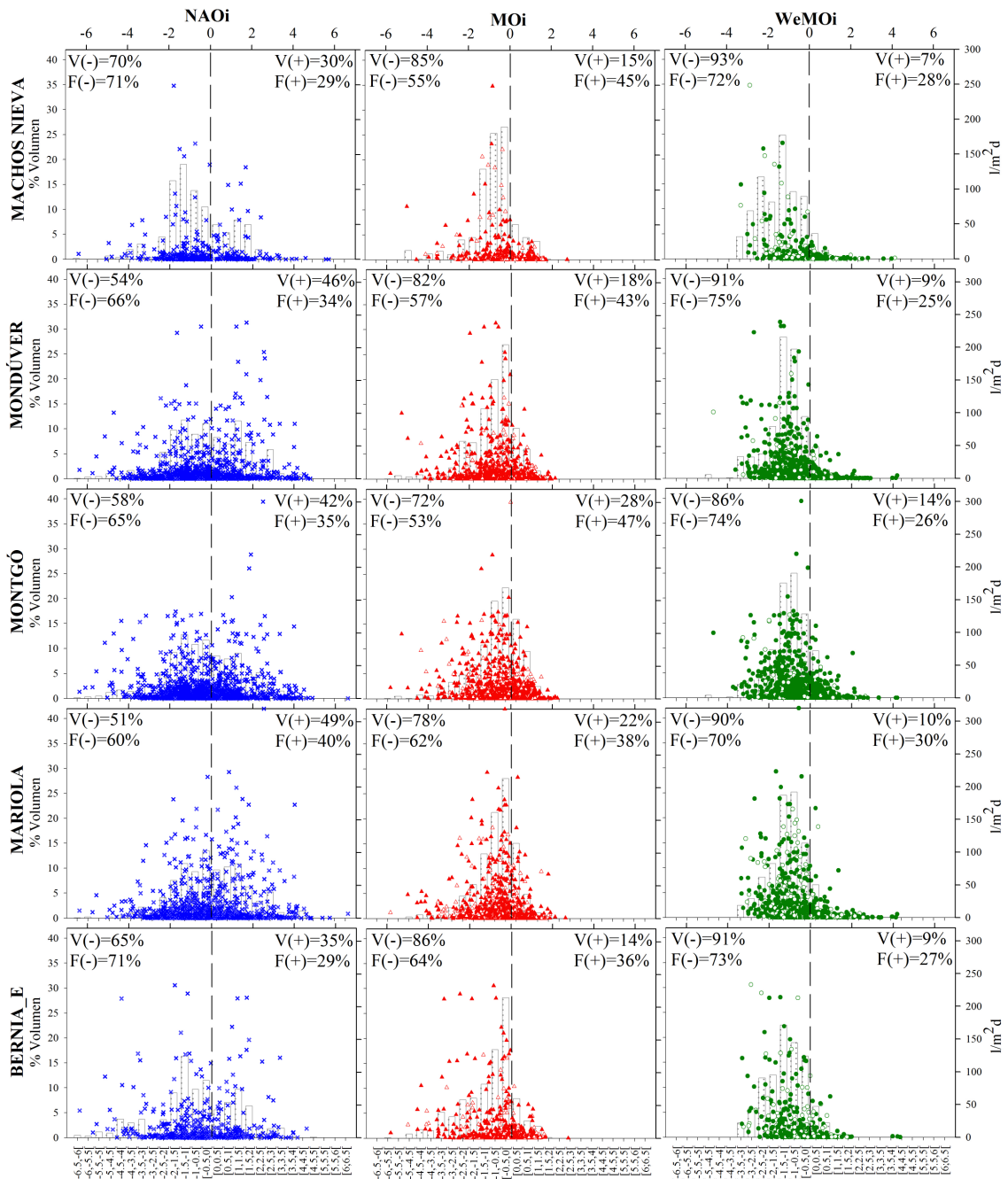


Figura 5-9: Continuación de la anterior

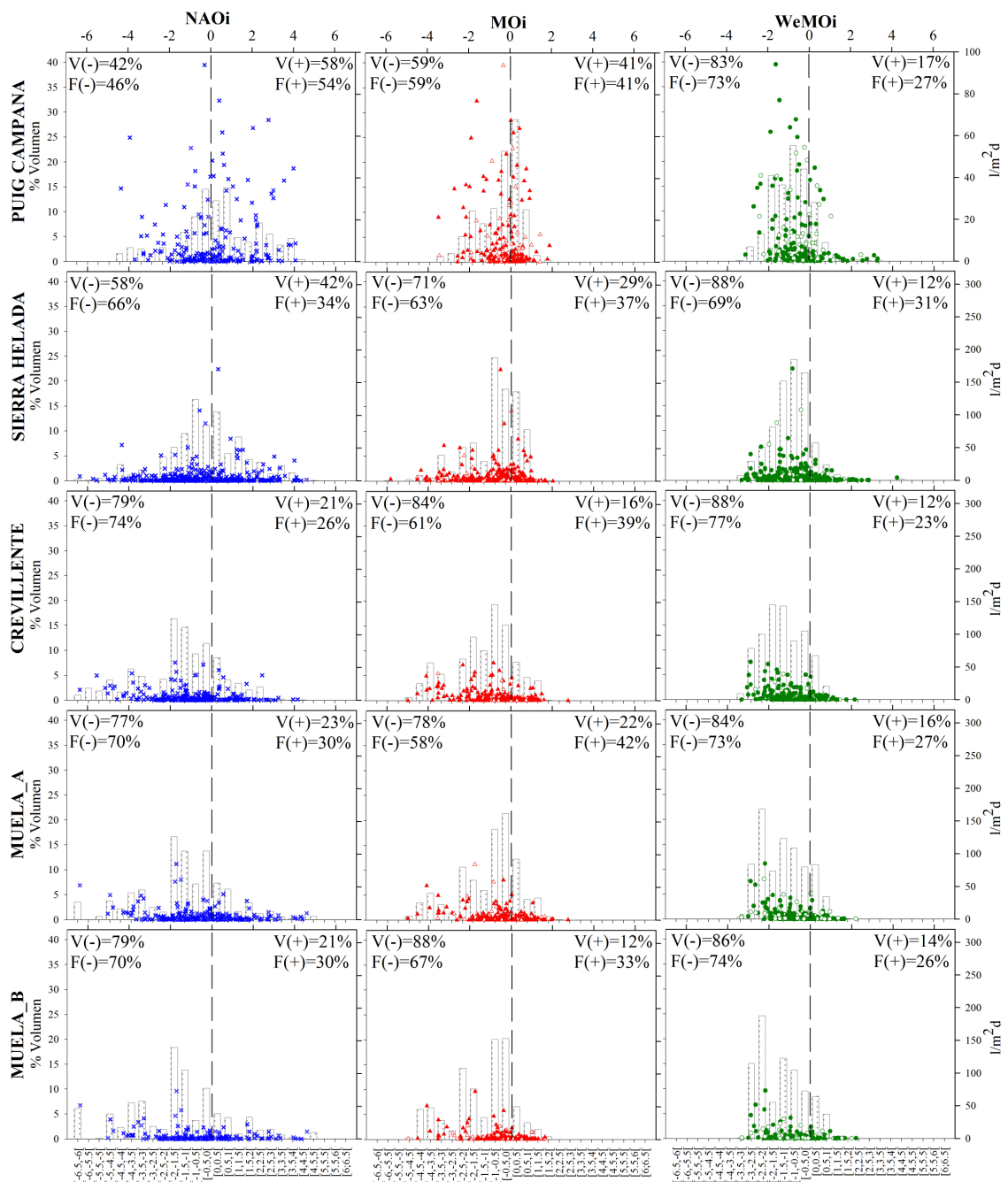


Figura 5-9: Continuación de la anterior

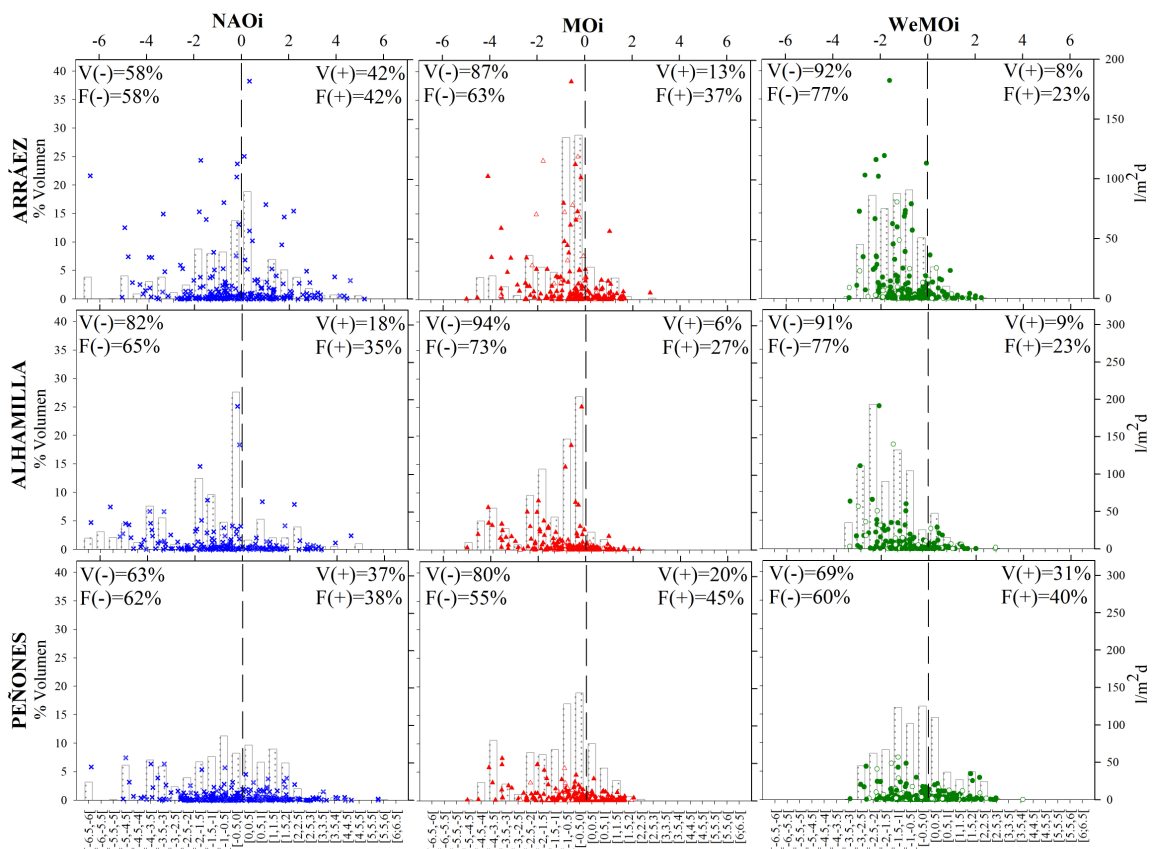


Figura 5-9: Continuación de la anterior

5.2.4 CONDICIONES SINÓPTICAS Y VALORES DE LOS ÍNDICES NAO, MO Y WeMO QUE FAVORECEN UN MAYOR NÚMERO DE DÍAS Y DE VOLUMEN DE RECOLECCIÓN DE AGUA POR MEDIO DE LOS COLECTORES DE NIEBLA

A modo de resumen, la tabla 5-5 recoge, para los 23 colectores de niebla analizados, las condiciones sinópticas en superficie según la clasificación de Jenkinson y Collison, la dirección y velocidad del viento al nivel de 850 hPa, y los valores de los patrones de teleconexión NAO, MO y WeMO, que han producido mayor número de días y mayor volumen recolectado de agua por medio de los colectores de niebla.

En cuanto a las situaciones que han generado mayor número de días con recolección de agua, de modo general, destacan a nivel de superficie las situaciones de tipo A y C, así como las advecciones del E (tipo E). En altura son los flujos atlánticos los que portan la niebla más frecuentemente, sin que la velocidad parezca tener una clara influencia. Y con respecto a los patrones de circulación atmosférica, sobresalen el rango $[-1.5, -1[$ para el NAOi y $[-0.5, 0[$ para el MOi y el WeMOi.

Por lo que se refiere a las situaciones que han dado lugar a los mayores porcentajes del total del volumen de agua recolectado, al nivel de superficie son las situaciones de tipo C, SE y E las que dominan. Al nivel de 850 hPa, son los vientos fuertes y de origen mediterráneo (SE, E y NE) los que se han mostrado como los más productivos. En todos los patrones de teleconexión analizados destacan los valores negativos. En el NAOi no existe un rango que prevalezca sobre el resto, habiéndose recolectado volúmenes importantes en el intervalo que se extiende desde 0 a -3. El MOi que ha producido las mayores capturas se encuentra dentro del rango $[-0.5, 0[$, mientras que en el WeMOi sobresalen los valores del índice comprendidos en el intervalo $[-1.5, -1[$.

Tabla 5-5: Tipo sinóptico de Jenkinson y Collison, dirección y velocidad del viento (m: moderada (0-5.14 m/s); f: fuerte (>5.14 m/s)) al nivel de 850 hPa y valor de los índices de teleconexión NAO, MO y WeMO en intervalos de 0.5, que han producido el mayor número de días y de volumen de agua recolectado, en cada uno de los colectores de la Red, calculado en base a los datos de niebla acumulada diaria (de 00 a 24 UTC), con los datos disponibles desde julio de 2003 hasta diciembre de 2012

Colector	Número de días con recolección					Volumen de agua recolectado				
	Tipo JC	Flujo a 850 hPa	NAO	MO	WeMO	Tipo JC	Flujo a 850 hPa	NAO	MO	WeMO
Puig Neulós	A	N-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	S-f	[-1,-0.5[	[-0.5,0[	[-1,-0.5[
Montseny Antenas	A	NW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	SE-f	[-0.5,0[	[-1,-0.5[	[-1.5,-1[
Montseny Canplá	C	N-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	SE-f	[-3.5,-3[	[-3.5,-3[	[-1.5,-1[
Montnegre	C	SW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	SE-f	[-3.5,-3[	[-3.5,-3[	[-3,-2.5[
Portella	A	W-m	[-1.5,-1[	[0,0.5[	[-0.5,0[	C	S-f	[-1,-0.5[	[-0.5,0[	[-1.5,-1[
Colomer	A	W-m	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	SE-f	[-1.5,-1[	[-1.5,-1[	[-1.5,-1[
Casillas	C	W-m	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	SE-f	[-0.5,0[	[-0.5,0[	[-1.5,-1[
Bujete	C	SW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	E-f	[-1,-0.5[	[-1.5,-1[	[-1.5,-1[
Cinto Cabra	A	NW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	SE	SE-f	[-2,-1.5[	[-1,-0.5[	[-1.5,-1[
Machos	A	W-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	SE	SE-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-1.5,-1[
Machos Nieva	A	W-m	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	SE	SE-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-1.5,-1[
Mondúver	A	W-m	[-1,-0.5[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	E	E-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-1.5,-1[
Montgó	A	W-m	[-1,-0.5[	[0,0.5[	[-0.5,0[	C	NE-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-1,-0.5[
Mariola	E	W-f	[-0.5,0[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	E	NE-f	[-0.5,0[	[-0.5,0[	[-1,-0.5[
Bernia_E	E	SW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	E	E-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-1.5,-1[
Puig Campana	A	N-m	[0,0.5[	[0,0.5[	[-0.5,0[	A	E-f	[0.5,1[	[0,0.5[	[-1,-0.5[
Sierra Helada	C	W-m	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	E	NE-f	[-1,-0.5[	[-1,-0.5[	[-1,-0.5[
Crevillente	C	SW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	SW-f	[-2,-1.5[	[-1,-0.5[	[-2,-1.5[
Muela_A	E	SW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	SE	SE-f	[-2,-1.5[	[-0.5,0[	[-2.5,-2[
Muela_B	C	SW-f	[-0.5,0[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	SE	SE-f	[-2,-1.5[	[-0.5,0[	[-2.5,-2[
Arráez	E	E-f	[-1,-0.5[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	SE	SE-f	[0,0.5[	[-0.5,0[	[-1,-0.5[
Alhamilla	C	SW-f	[-1.5,-1[	[-0.5,0[	[-1,-0.5[	SE	E-f	[-0.5,0[	[-0.5,0[	[-2.5,-2[
Peñones	A	W-f	[-1,-0.5[	[-0.5,0[	[-0.5,0[	C	W-f	[-1,-0.5[	[-0.5,0[	[-0.5,0[

Capítulo 6

Caracterización Química del Agua de Niebla y de Lluvia

No importa cuan lento vayas, lo importante es nunca detenerse

Confucio, filósofo

Previamente a la utilización del agua obtenida a través de la niebla, se considera indispensable conocer sus características químicas, de modo que su uso no suponga riesgo alguno para la salud de las personas o para las especies vegetales o animales que la pretendan consumir. Estudios previos realizados en otros lugares del mundo en donde se han llevado a cabo experimentos similares a los nuestros, han analizado las características químicas del agua de niebla recolectada, habiendo obtenido diferentes resultados. En lugares como Sudáfrica (Olivier and de Rautenbach, 2002) o Namibia (Eckardt and Schemenauer, 1998), el agua de niebla recolectada cumplía los estándares de la Organización Mundial de la Salud, siendo considerada entonces apta para el consumo humano, mientras que en las Islas Canarias (Marzol, 2005), Sultanato de Omán (Schemenauer, 1992) y Chile (Schemenauer and Cereceda, 1992), el agua de niebla analizada resultó, en términos generales, adecuada para fines agrícolas y forestales o, tras una ligera corrección de alguno de los parámetros analizados, susceptible de consumo humano. Sin embargo, estudios sobre la deposición de niebla llevados a cabo en bosques situados por encima de 800 metros del centro de Europa, han encontrado varias muestras de niebla con valores de pH y concentraciones de SO_4^{2-} en el rango de fitotóxicos (Lange et al., 2003), mientras que en otros estudios realizados en Chile, los bajos niveles de pH, así como las altas concentraciones de nitratos encontradas en las muestras desaconsejaban su uso para consumo humano (Beiderwieden et al., 2005). Muchos de estos estudios coinciden en la heterogeneidad de la calidad del agua de niebla a lo largo del tiempo, pudiendo estar influenciada por las características meteorológicas de las distintas épocas del año y por los cambios en los usos del suelo o de las actividades antropogénicas en las proximidades del punto de muestreo, siendo importante caracterizar la calidad del agua de niebla en distintas estaciones del año y previamente a proceder a su uso o consumo. A su vez, estudios anteriores han puesto de manifiesto la importancia que tiene la contaminación por deposición atmosférica en la calidad del agua de niebla (Fisak et al., 2009; Schemenauer and Cereceda, 1992), por lo que debe tenerse en cuenta a la hora de realizar los análisis. Debido a que el sistema de recolección de agua de niebla propuesto en este trabajo, se mantiene expuesto permanentemente a la atmósfera, recibe el impacto de partículas o aerosoles que son empujados por el viento o la lluvia, provocando la contaminación del material de recolección tanto por deposición seca como húmeda. Es por ello que se considera importante analizar las principales características químicas del agua de niebla contaminada por acción de los agentes atmosféricos y compararla con agua de niebla pura, la cual no ha sido previamente contaminada. Es importante resaltar que en el caso de que se implantase un sistema de recolección masiva de agua de niebla, éste se encontraría permanentemente expuesto a la atmósfera, por lo que la calidad química del agua obtenida no dependería tan sólo de la niebla, sino también de la contaminación que haya podido recibir el colector.

Por tanto, se considera fundamental caracterizar químicamente el agua de niebla recolectada en nuestra zona de estudio, para determinar de este modo sus posibilidades de utilización, distinguiendo entre agua de niebla pura y agua de niebla con deposición atmosférica. Es importante mencionar que los captadores de niebla más utilizados para la recolección masiva de agua, como el *Large Fog Collector* (LFC, Capítulo 2, apartado 2.1.1), no sólo recolectan agua procedente de la niebla, sino que también lo hacen de la lluvia, cuando ésta es empujada por el viento. Por ello, se ha considerado importante incluir en este trabajo el análisis de las características químicas del agua de lluvia.

La química del agua de niebla y de lluvia es el resultado de diferentes procesos físicos entre los que se encuentra el recorrido seguido por las masas de aire y la naturaleza y magnitud de las fuentes de emisión. De hecho, en las últimas décadas, debido fundamentalmente al impacto ambiental generado por la lluvia ácida en bosques y edificios históricos del norte de Europa y Estados Unidos, la comunidad científica ha prestado especial atención al carácter transfronterizo de la contaminación atmosférica, calculándose en algunos casos las trayectorias seguidas por las masas de aire para determinar las fuentes de emisión de contaminantes. Así, en España se han realizado estudios sobre la contaminación del agua de lluvia y sus recorridos previos en el País Vasco (Ezcurra et al., 1988), Cataluña (Ávila and Alarcón, 1999) o la Comunidad Valenciana (Carratalá, 1993). Sin embargo, todavía no se han llevado a cabo en nuestro país estudios de este tipo sobre la calidad del agua de niebla capturada por métodos artificiales y su relación con las trayectorias seguidas por las masas de aire que han propiciado su formación los días previos a su recolección.

Por todo ello, el objetivo de este Capítulo es analizar por primera vez las características químicas del agua de niebla capturada por métodos pasivos y artificiales en un punto de montaña del este de la Península Ibérica. Como primera parte de este estudio, se ha analizado la composición química del agua de niebla pura y del agua de niebla contaminada por deposición atmosférica, comparándose ambas con el agua de lluvia. En la segunda parte del estudio, se analiza la estacionalidad en la calidad del agua de niebla pura, así como el recorrido previo seguido por las masas de aire portadoras de la niebla. Para el experimento se ha escogido un punto situado en la zona central del área de estudio, el pico del Mondúver, situado por encima de los 800 metros de altitud y se han recogido sistemáticamente muestras de agua niebla y de lluvia durante dos periodos, un primero de ocho meses de duración y un segundo de veintiún meses.

6.1 METODOLOGÍA

El lugar seleccionado para el estudio se encuentra en la zona central del área de estudio, de modo que sea lo más representativo posible para el conjunto de la Red de Colectores. En concreto, se ha elegido el colector Mondúver (Capítulo 3, apartado 3.3, colector número 13), el cual se encuentra en el término municipal de Xeresa, al sudeste de la provincia de Valencia. Se trata de un pico situado a 843 metros de altitud y a 8 km de la costa, que forma parte de una sierra con orientación SE-NW, tratándose de la primera línea de montaña que se encuentran las nubes procedentes del Mediterráneo al llegar a la costa (figura 6-1). La precipitación media anual y la temperatura del lugar son 750 mm y 14°C, además de tratarse de un lugar con presencia habitual de niebla (ver resultados en Capítulo 4, apartado 4.1). El régimen de vientos se caracteriza por la presencia frecuente de vientos de componente marítima durante los meses más cálidos del año, así como por la aparición de vientos de interior, habitualmente de mayor intensidad que los anteriores, durante los meses más fríos.

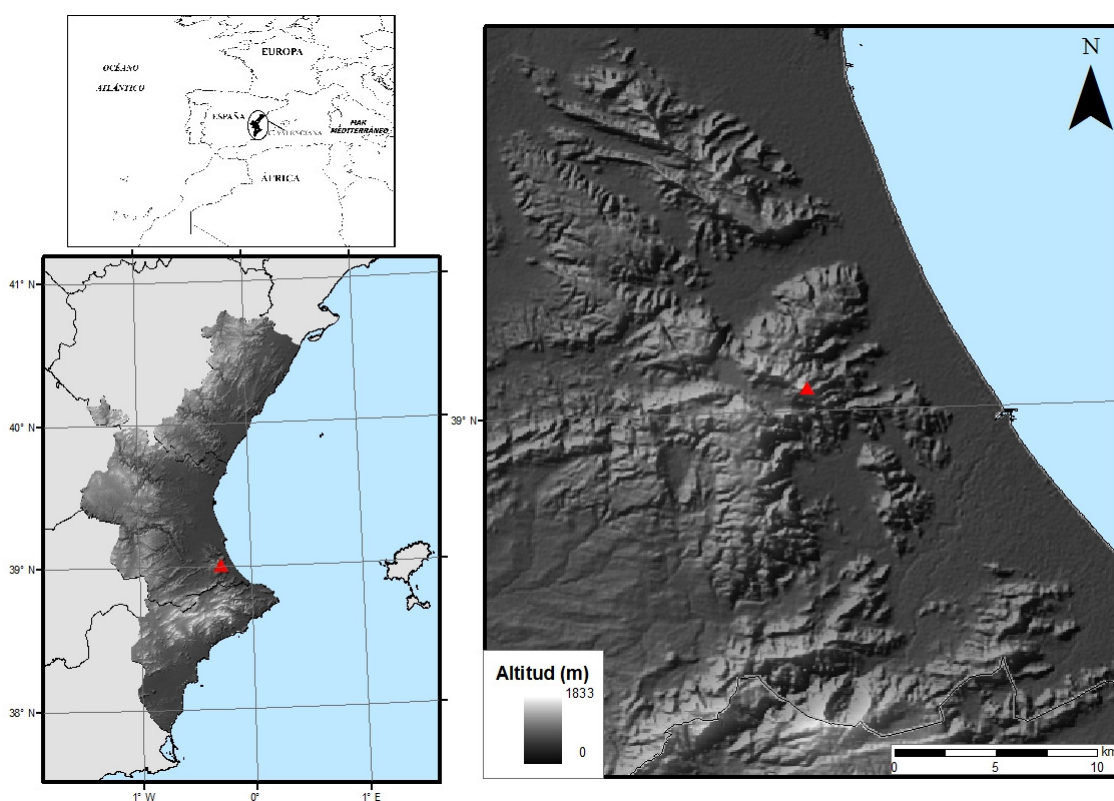


Figura 6-1: Localización del lugar de muestreo situado en la cima del monte Mondúver (Xeresa, Valencia) y características orográficas del relieve cercano

Los motivos fundamentales para escoger este punto como lugar del experimento fueron su posición central dentro de la zona de estudio de la Red de Colectores, su buena accesibilidad (con carretera asfaltada hasta la cima, lo que facilitó el trabajo de campo) y la presencia permanente en el lugar de personal público dedicado a la vigilancia contra incendios y que han sido los encargados de realizar la toma de muestras.

Las muestras de agua de niebla y lluvia fueron recogidas en dos fases: una en la que se obtuvieron las muestras de agua de niebla y lluvia puras, y otra en la que el colector de niebla y el pluviómetro estuvieron expuestos permanentemente al ambiente, obteniéndose por tanto muestras de agua de niebla y lluvia contaminadas por deposición atmosférica. En ambos casos, el experimento se completó con los datos obtenidos en el mismo lugar por el colector de niebla Mondúver, el cual está dotado, además del sensor para capturar agua de niebla, de un pluviómetro, un termómetro, un higrómetro, un anemómetro y una veleta, que aportaron información diezminutal sobre las condiciones del tiempo y que permitieron conocer la hora exacta de la recogida de las muestras (figura 6-2).

A continuación se detalla la metodología de recolección de las muestras de niebla y lluvia en ambas fases:

6.1.1 MUESTRAS DE AGUA DE NIEBLA Y LLUVIA PURAS

Las muestras de niebla pura y lluvia pura fueron tomadas en el periodo comprendido entre diciembre de 2009 y agosto de 2011. En total se obtuvieron 34 muestras de niebla pura y 21 de lluvia pura. Las muestras fueron recolectadas por el personal de vigilancia contra incendios que permanece en la cima del pico 24 horas al día. Para garantizar la calidad de las muestras y evitar su contaminación por deposición seca u otros meteoros, los sensores encargados de su captación tan sólo eran expuestos al ambiente cuando existía presencia de niebla o lluvia. Una vez recogida la muestra o cuando desaparecía el meteoro que se estaba muestreando, los sensores eran lavados intensamente con agua desionizada, cubiertos por un protector plástico y guardados en el interior de la caseta de vigilancia forestal hasta el siguiente muestreo. Por tanto, el sensor de recogida de niebla tan sólo era expuesto al ambiente cuando había niebla en el lugar, siendo lavado y protegido cuando ésta desaparecía; del mismo modo que el sensor de lluvia se expuso tan sólo en los momentos que estaba lloviendo, lavándose con agua desionizada y guardándose posteriormente. Las muestras fueron tomadas en botellas esterilizadas de 250 ml de polietileno, se etiquetaron con la fecha y hora del inicio y fin del muestreo, y se mantuvieron refrigeradas hasta su envío al laboratorio.

Las muestras de niebla fueron recogidas mediante un captador de agua de niebla pasivo, cilíndrico y de tipo arpa, basado en el ASRC (*Atmospheric Science Research Center, State University of New York* (Falconer and Falconer, 1980)) y de similares características a los utilizados en otros estudios (Beiderwieden et al., 2005; Eckardt and Schemenauer, 1998; Lange et al., 2003; Schemenauer, 1992; Schemenauer and Cereceda, 1992; Strater et al., 2010). Se trata de un colector idéntico al utilizado por el colector Mondúver de la Red de Colectores, el cual ha sido descrito con detalle en el Capítulo 3, apartado 3.2.1. El agua recolectada por el colector era conducida a través de un tubo de silicona hasta una botella de 250 ml de polietileno colocada a ras de suelo. La base inferior del colector estaba dispuesta a una altura de 1.5 m. No fue necesario colocar en la parte superior del colector un protector contra la lluvia, ya que cuando ésta estaba presente, el colector era protegido y resguardado de la misma para evitar su contaminación (figura 6-2).



Figura 6-2: En primer plano, colector de niebla pura, y en segundo plano, colector de niebla con deposición atmosférica. Nótese la diferencia de color entre ambos colectores debido a la contaminación sufrida por el segundo tras el paso del tiempo

Las muestras de lluvia pura se recogieron utilizando la carcasa de un pluviómetro (TB, Ultimeter, USA), de 20.3 cm de diámetro abierto y 324 cm² de superficie de captación, a la cual se le conectaba una botella de 250 ml de polietileno directamente en su desagüe. La boca del pluviómetro se instalaba a 30 cm del suelo (figura 6-3).



Figura 6-3: A la izquierda, dispositivo utilizado para la recolección de las muestras de lluvia pura; a la derecha, detalle de la botella de polietileno localizada en el interior de la carcasa encargada del almacenamiento de la muestra

6.1.2 MUESTRAS DE AGUA DE NIEBLA Y LLUVIA CON DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA

Las muestras de agua de niebla y lluvia con deposición atmosférica fueron recolectadas en periodos de 15 días entre abril y diciembre de 2008. En total se obtuvieron 18 muestras de niebla y 11 de lluvia a través de los sensores de recolección que no habían sido protegidos de la contaminación atmosférica entre los muestreos. Como sensor de recogida de muestras de agua de niebla con deposición atmosférica se utilizó el mismo modelo que el utilizado para las muestras de niebla pura, pero en este caso no fue sometido a un proceso de limpieza previo al primer muestreo ni entre muestreos. Este sensor estaba situado a 3 metros sobre el nivel del suelo y formaba parte del colector Mondúver de la Red de Colectores (figura 6-2). Como sensor de recogida de agua de lluvia con deposición se utilizó el pluviómetro de balancín (7856M, Davis Instruments, USA), situado en lo alto del colector Mondúver, de 16.5 cm de diámetro abierto y 214 cm² de superficie de captación (figura 6-2). Tanto para la niebla como para la lluvia, una vez las muestras eran recogidas, el agua era conducida a través de una manguera de silicona a sendas botellas de 2 litros de polietileno, las cuales estaban protegidas del sol por medio de un material reflectante que las cubría. Cada 15 días, el agua de niebla y de lluvia con deposición recogidas por los sensores y almacenada en las botellas de 2 litros de polietileno, eran depositadas en botellas de 0.5 litros de polietileno y llevadas al laboratorio para su análisis. Las botellas de 2 litros se vaciaban del agua restante y sin limpiar, se volvían a colocar para utilizarlas en el siguiente análisis. Los sensores de muestreo no fueron limpiados entre muestreos ni anteriormente al primer análisis.

6.1.3 ANÁLISIS QUÍMICOS

Las muestras de agua de niebla y de lluvia, tanto las puras como las contaminadas por deposición atmosférica, se almacenaron en botellas de 250 ml de polietileno previamente limpiadas con agua desionizada y se mantuvieron en la oscuridad dentro de un frigorífico a una temperatura de 4°C hasta su análisis. Se midió la conductividad utilizando un conductímetro Jenway modelo 4520 y el pH con un pH-metro Crison modelo GLP21. Posteriormente las muestras se filtraron a través de un filtro Sartorius de acetato de celulosa de 0.45 µm de tamaño de poro, midiéndose los aniones (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) por cromatografía iónica (Dionex DX120; columna AS4A; supresión ASRS 300; y eluyente Na₂CO₃/NaHNO₃), los cationes (Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺) mediante ICP óptico (Perkin Elmer 4300 DV) y la alcalinidad mediante Gran Titration (Crison Compact Titrator). Los límites de detección, en mg l⁻¹, fueron: Cl⁻ 0.05, NO₃⁻ 0.04, SO₄²⁻ 0.09, Ca²⁺ 0.005, Na⁺ 0.005, K⁺ 0.01, y Mg²⁺ 0.001.

Todos los análisis incluyeron muestras sintéticas de concentraciones conocidas para comprobar la precisión y la exactitud de los resultados. Los análisis fueron realizados en el laboratorio químico del CEAM. El CEAM participa habitualmente como laboratorio de intercomparación de WMO-GAW (*World Meteorological Organization-Global Atmosphere Watch*) y EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*).

6.1.4 TRAYECTORIAS

Las retro-trayectorias han sido ampliamente utilizadas para identificar el origen y la ruta de las masas de aire, así como para estudiar la advección de contaminantes atmosféricos y la coherencia del origen de las masas de aire y la concentración de sus respectivos contaminantes (Ávila and Alarcón, 1999; Beiderwieden et al., 2005; Strater et al., 2010). En este trabajo, para cada muestra de niebla pura, se ha calculado su retro-trayectoria utilizando el modelo HYSPLIT (*Air Resources Laboratory's HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (Draxler and Rolph, 2010; Rolph, 2010)). Este programa informático ofrece muy buenos resultados en la modelización del transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos, aunque también puede ser utilizado para simular trayectorias de masas de aire. El modelo puede ser ejecutado directamente desde la página web del *Air Resources Laboratory* de NOAA (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), o, como se ha realizado en este trabajo, puede ser instalado en un ordenador y ser usado a través de una interfaz gráfica. El *software* utiliza como *input* los datos generados por el modelo del Centro Nacional para la Predicción Ambiental (*National Centers for Environmental Prediction* (NCEP)) del Servicio Nacional de Meteorología estadounidense (ficheros GDAS (*Global Data Assimilation System*)).

Cada trayectoria indica la ruta seguida por la masa de aire que ha generado una muestra de niebla durante los cinco días previos a su colecta (120 horas) y a un metro sobre el nivel del suelo.

6.1.5 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Los análisis estadísticos fueron realizados solamente para las muestras de niebla pura. Previamente a realizar los análisis estadísticos y para asegurar la condición de normalidad, los datos de niebla pura fueron transformados mediante su logaritmo. La muestra comprendía 34 observaciones y 10 variables (pH, conductividad, alcalinidad, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}). Dos análisis estadísticos fueron realizados: un análisis de cúmulos o *cluster* y un análisis de componentes principales. El análisis *cluster* realizado utilizó el método k-medias y la distancia euclídea al cuadrado, y permitió dividir las muestras en dos grupos. El análisis de componentes principales extrajo dos factores los cuales explicaban el 81 % de la varianza y facilitó la interpretación de los resultados.

6.2 RESULTADOS

6.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE NIEBLA Y DE LLUVIA PURAS

En la tabla 6-1 se presentan los valores estadísticos del pH, conductividad, alcalinidad y los principales iones de las muestras de niebla pura y de lluvia pura recolectadas durante los 21 meses que duró esta fase del experimento. A pesar de que la mayoría de los parámetros analizados presentaban distribuciones asimétricas, se ha utilizado el valor medio de las muestras, así como el máximo y el mínimo, para poder compararlo con estudios similares realizados en otros lugares del mundo en los que también se utiliza dicho parámetro estadístico (tabla 6-2).

Con respecto al agua de niebla pura, en la tabla 6-1 se observa como el pH medio de las muestras de niebla pura ha sido 6.6, con valores muestrales que han variado entre 7.7 y 5.1. Este valor de pH es superior a la mayoría de estudios previos realizados en otros lugares del mundo, excepto para los análisis realizados en las Islas Canarias, Omán o Namibia, en donde se midieron valores similares. Este elevado valor se puede deber a que el pH no fue medido *in situ* en el lugar de muestreo nada más recolectarse las muestras, sino que era medido días después en el laboratorio. La conductividad media fue de $125.5 \mu\text{S cm}^{-1}$, con un valor máximo de 240 y un mínimo de 21.3, ambos alcanzados en muestras recogidas en invierno (datos no mostrados), lo que demuestra la heterogeneidad de las muestras. De cualquier manera, los valores de conductividad obtenidos en todas las muestras pueden considerarse bajos y cumplen holgadamente el umbral de calidad del agua para consumo humano que marca la legislación española (BOE, 2003). Debido a esta escasa conductividad, las concentraciones de los principales iones son, en general, bajas. Los iones predominantes son los nitratos y sulfatos, de origen supuestamente antropogénico, los cloruros y el catión sodio, elementos de origen marino, y el catión calcio. Estos resultados eran los esperables, debido a que a los pies del monte Mondúver existe una intensa actividad agrícola y turística, a la cercanía al mar y a la naturaleza calcárea del terreno de la zona de estudio, y a su vez, se asemejan

bastante a los obtenidos en las Islas Canarias, Alemania o El Tofo (Chile). Todos los parámetros analizados se encuentran dentro de los umbrales permitidos para consumo humano de la legislación española.

Con respecto al agua de lluvia pura, en la tabla 6-1 se observa como el pH es bastante similar al obtenido con la niebla pura, así como a los obtenidos en estudios similares de lluvia en España (Ávila and Alarcón, 1999). Sin embargo, tanto la conductividad como la concentración de los principales iones son inferiores a las obtenidas a través de la niebla pura. Estos resultados son acordes a los obtenidos en otros estudios (Beiderwieden et al., 2005) en donde ya se había visto que el agua de niebla suele presentar mayor carga iónica que la de lluvia. Esto se puede deber a las diferencias en cuanto a la formación de las gotas de niebla y lluvia. Las primeras se forman en las capas bajas de la atmósfera, por lo que tienen mayor influencia de las actividades antropogénicas y naturales de la superficie terrestre y marina, mientras que las segundas se forman en niveles superiores de la atmósfera y por tanto, en un ambiente menos contaminado por las capas superficiales de la tierra (Beiderwieden et al., 2005). Los iones predominantes han sido los cationes de calcio y sodio, aunque en concentraciones muy bajas, cumpliendo todos los parámetros analizados con la legislación vigente para consumo humano.

Tabla 6-1: Composición química del agua de niebla pura y del agua de lluvia pura, muestreadas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011 y valores legales permitidos para consumo humano por la legislación española. Conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, alcalinidad en $\mu\text{eq l}^{-1}$, concentraciones de iones en mg l^{-1}

	Agua de niebla pura	Agua de lluvia pura	Límite legal (R.D.140/2003)
Nº muestras	34	21	
pH medio	6.6	6.5	6.5-9.5
<i>máx.</i>	7.7	7.5	
<i>mín.</i>	5.1	5.6	
Cond. medio	125.5	44.3	2500
<i>máx.</i>	240.0	170.1	
<i>mín.</i>	21.3	2.9	
Alc. medio	175.7	92.1	-
<i>máx.</i>	597.1	254.4	
<i>mín.</i>	25.2	23.1	
Ca²⁺ medio	7.4	3.8	-
<i>máx.</i>	17.0	14.0	
<i>mín.</i>	2.1	0.3	
K⁺ medio	0.7	1.1	-
<i>máx.</i>	1.6	12.0	
<i>mín.</i>	0.2	0.1	
Mg²⁺ medio	1.4	0.8	-
<i>máx.</i>	3.2	4.6	
<i>mín.</i>	0.3	0.1	
Na⁺ medio	8.5	3.9	200
<i>máx.</i>	28.0	19.7	
<i>mín.</i>	0.2	0.2	
Cl⁻ medio	12.7	5.4	250
<i>máx.</i>	38.2	31.5	
<i>mín.</i>	1.1	0.3	
NO₃⁻ medio	15.2	3.5	50
<i>máx.</i>	41.6	10.9	
<i>mín.</i>	2.7	0.1	
SO₄²⁻ medio	8.4	3.3	250
<i>máx.</i>	17.8	11.5	
<i>mín.</i>	2.1	0.2	

Tabla 6-2: Composición química del agua de niebla pura en distintos lugares del mundo. Conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, concentraciones de iones en mg l^{-1}

	Teno España (1)	Anaga España (2)	Patache Chile (3)	Patache Chile (4)	El Tiro Ecuador (5)	Lugstein Alemania (6)	Ashinhaib Omán (7)	Tofo Chile (8)	Gobabeb Namibia (9)
pH	7.0	6.8	3.3	2.5	4.5	4.01	7.4	4.7	6.2
Cond.	52.7	127.0	400	2000	26.0	-	-	-	-
Ca²⁺	0.0	4.8	2.4	8.4	0.3	1.6	15.0	1.0	1.2
K⁺	0.5	0.7	1.0	8.6	0.5	0.8	1.1	0.5	0.2
Mg²⁺	0.5	1.5	2.2	11.5	0.1	0.1	2.9	0.7	0.4
Na⁺	5.8	20.0	16.3	85.1	0.4	1.7	24.0	5.4	2.9
Cl⁻	13.9	24.4	23.8	109.9	0.3	2.3	44.0	8.7	4.8
NO₃⁻	-	-	17.4	136.4	2.5	14.0	4.7	1.6	3.4
SO₄²⁻	2.8	9.7	42.3	350.6	2.1	12.1	3.4	12.3	3.2

(1) Teno Alto, Islas Canarias, España; altitud: 790 m; dist. al mar: 5.5 km (Marzol, 2005)

(2) Anaga, Islas Canarias, España; altitud: 842 m; dist. al mar: 4.0 km (Marzol, 2005)

(3) Alto Patache, Desierto de Atacama, Chile; altitud: 820 m; dist. al mar: 3.0 km (Strater et al., 2010)

(4) Alto Patache, Desierto de Atacama, Chile; altitud: 820 m; dist. al mar: 3.0 km (Strater et al., 2010)

(5) El Tiro, Cordillera de los Andes, Ecuador; altitud: 2 825 m; dist. al mar: 100.0 km (Beiderwieden et al., 2005)

(6) Lugstein-Kahleberg, Erzgebirge, Alemania; altitud: 820 m; dist. al mar: - (Lange et al., 2003)

(7) Ashinhaib, región de Dophar, Sultanato de Omán; altitud: 900 m; dist. al mar: 15.0 km (Schemenauer, 1992)

(8) El Tofo, Chungungo, Chile; altitud: 780 m; dist. al mar: 6.0 km (Schemenauer and Cereceda, 1992)

(9) Gobabeb, Desierto Central, Namibia; altitud: 420 m; dist. al mar: 550 km (Eckardt and Schemenauer, 1998)

6.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE NIEBLA Y DE LLUVIA CONTAMINADAS POR DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA

En la tabla 6-3 se presentan los valores estadísticos del pH, conductividad, alcalinidad y los principales iones de las muestras de niebla y de lluvia con deposición atmosférica recolectadas durante los nueve meses que duró esta fase del experimento. A su vez y a modo de comparación, se muestran en dicha tabla los resultados de los análisis químicos obtenidos en dos lugares de Sudáfrica en donde la metodología empleada fue similar a la nuestra.

Con respecto al agua de niebla con deposición atmosférica, se observa que el valor del pH medio fue de 6.4, cuantía similar a la obtenida con las muestras de niebla pura. Sin embargo, las mayores diferencias entre ambos tipos de niebla se encuentran en la conductividad y en las concentraciones de todos los iones analizados. En el caso de la niebla con deposición, la conductividad es dos veces superior a la de la niebla pura. Ello se traduce en que las concentraciones de los iones de la niebla con deposición son también del orden de dos a cinco veces superiores a los de la niebla pura. Los iones predominantes en este caso son los nitratos, así como el calcio, sodio y cloro. Se observa por tanto como la deposición atmosférica que se deposita sobre el colector de niebla es arrastrada por el agua de niebla, aumentando la conductividad y el contenido

iónico del agua resultante. La contribución de la deposición atmosférica a la calidad del agua de niebla ya había sido alertada en otros estudios (Schemenauer, 1992; Schemenauer and Cereceda, 1992) y los resultados aquí obtenidos se asemejan bastante a los logrados en lugares como Lepelfontein (Sudáfrica) en los que se ha empleado una metodología de muestreo similar (Olivier and de Rautenbach, 2002). De cualquier modo, todos los parámetros analizados cumplen con la legislación vigente en cuanto a agua para consumo humano, aunque el valor promedio de los nitratos se encuentra próximo al límite legal, incluso su valor máximo muestreado supera dicho umbral.

En cuanto al agua de lluvia con deposición atmosférica, se observa del mismo modo un incremento de la conductividad y de las concentraciones de todos los iones en comparación con las muestras de lluvia pura, permaneciendo el pH sin grandes cambios. La conductividad de la lluvia con deposición es del orden de dos veces superior a la de la lluvia pura, mientras que las concentraciones de todos los iones son del orden de dos a cinco superiores, a excepción del potasio, cuya concentración es un 40 % superior. La comparación de los análisis entre la lluvia y la niebla con deposición atmosférica muestra que, al igual que ocurría con la niebla y lluvia puras, tanto la conductividad como las concentraciones de iones del agua de lluvia con deposición son menores que las de la niebla con deposición. Todos los parámetros analizados cumplen con la legislación vigente en cuanto a agua para consumo humano.

Tabla 6-3: Composición química del agua de niebla y de lluvia con deposición atmosférica, muestreadas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre abril y diciembre de 2008 y en Tshanowa y Lepelfontein (Sudáfrica) entre septiembre de 2000 y agosto de 2001. Conductividad en $\mu\text{S cm}^{-1}$, alcalinidad en $\mu\text{eq l}^{-1}$, concentraciones de iones en mg l^{-1}

	Mondúver Agua de niebla con deposición atmosférica	Mondúver Agua de lluvia con deposición atmosférica	Tshanowa Sudáfrica Niebla con deposición atmosférica (1)	Lepelfontein Sudáfrica Niebla con deposición atmosférica (2)
Nº muestras	18	11	1	1
pH medio	6.4	6.9	5.9	7.2
máx.	6.8	7.5		
mín.	5.3	6.3		
Cond. medio	286.9	88.1		
máx.	840.0	335.0		
mín.	11.1	22.2		
Alc. medio	264.4	290.4		
máx.	710.3	619.1		
mín.	26.8	67.4		
Ca²⁺ medio	37.6	19.8	2.7	14.0
máx.	179.2	82.4		
mín.	0.6	1.9		
K⁺ medio	1.4	1.4	1.1	2.5
máx.	4.4	7.4		
mín.	0.1	0.1		
Mg²⁺ medio	6.1	4.3	3.1	11.8
máx.	28.0	19.7		
mín.	0.1	0.4		
Na⁺ medio	30.8	21.6	3.4	26.4
máx.	179.5	129.8		
mín.	0.5	0.7		
Cl⁻ medio	28.1	16.7	8.9	35.7
máx.	84.0	102.1		
mín.	1.2	1.7		
NO₃⁻ medio	47.7	14.8	0.0	7.8
máx.	165.9	127.2		
mín.	0.1	0.2		
SO₄²⁻ medio	21.4	8.1	2.9	23.3
máx.	83.0	50.8		
mín.	1.7	1.5		

(1) Tshanowa, provincia del Norte, Sudáfrica; altitud: 1 004 m; dist. al mar: - (Olivier and de Rautenbach, 2002)

(2) Lepelfontein, provincia del Cabo Oeste, Sudáfrica; altitud: 200 m; dist. al mar: 5 km (Olivier and de Rautenbach, 2002)

Los colectores de niebla pasivos como el diseñado y utilizado en este trabajo, así como los utilizados en proyectos de aprovechamiento de agua en otros lugares del mundo (véase Capítulo 2), al permanecer expuestos a la atmósfera de manera continua, presentan contaminación por deposición atmosférica. Ello hace que la conductividad y la concentración de los principales iones sean del orden de dos a cinco veces superior a las obtenidas en muestras de niebla pura (no contaminadas por deposición atmosférica y que sólo se pueden obtener experimentalmente, protegiendo al colector de toda deposición atmosférica y exponiéndolo al ambiente tan sólo en los momentos que existe la presencia de niebla). En otros estudios en donde se ha valorado la deposición atmosférica en el agua de niebla, se ha visto que la concentración de iones en los primeros minutos de recogida de las muestras de niebla es muy superior al resto de instantes de muestreo, debido al efecto de lavado sobre la deposición que ejercen las primeras gotas de niebla (Beiderwieden et al., 2005; Schemenauer and Cereceda, 1992). Tras este primer lavado, las concentraciones de iones son mucho menores y tienden a homogeneizarse a lo largo del tiempo.

6.2.3 TRAYECTORIAS Y ESTACIONALIDAD

Para analizar las diferencias en la composición química del agua de niebla pura en función de la época del año y del recorrido seguido por las masas de aire portadoras de las muestras analizadas, se realizó un análisis *cluster* con las 34 muestras obtenidas, así como un análisis de componentes principales (PCA) para interpretar los resultados. El análisis *cluster* identificó dos grupos distintos, el primero de ellos contenía 26 de las muestras, mientras que el segundo estaba formado por las 8 restantes. El PCA extrajo dos factores que explicaban el 68.4 % y el 12.2 % del total de la varianza. El factor número 1 (CP1) estaba relacionado positivamente con la conductividad y con la concentración de todos los iones analizados, por lo que puede considerarse un factor representativo de la carga iónica de cada muestra. El factor número 2 (CP2) presentaba cargas negativas importantes para el pH, la alcalinidad y el catión Ca^{2+} , por lo que puede considerarse un factor de alcalinidad-acidez de las muestras (tabla 6-4).

Tabla 6-4: Componentes principales de los parámetros químicos analizados de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el monte Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011

Parámetro químico	Componente 1	Componente 2
pH	0.191	-0.705
Conductividad	0.376	-0.004
Alcalinidad	0.282	-0.466
Ca^{2+}	0.325	-0.208
K^+	0.324	-0.041
Mg^{2+}	0.326	0.222
Na^+	0.341	0.222
Cl^-	0.335	0.302
NO_3^-	0.291	0.159
SO_4^{2-}	0.336	0.158

La figura 6-4 representa el gráfico de dispersión de las muestras de agua de niebla pura en el espacio de las dos componentes principales obtenidas en el análisis estadístico, estando identificada cada muestra con el número de *cluster* en el que ha sido incluida. Como se puede observar en la figura, el análisis estadístico distingue claramente los diferentes grupos. Por un lado, los miembros del *cluster* 1 se encuentran a la derecha del gráfico de dispersión, presentando por tanto valores mayores de CP1, lo que significa mayores niveles de conductividad y de concentración de iones. Por otro lado, los miembros del *cluster* 2 están a la izquierda del gráfico y presentan por tanto valores menores de CP1, por lo que son muestras con menor carga iónica. La CP2, representada en el eje de ordenadas, recoge la mayoría de los miembros del *cluster* 1 en valores próximos a cero, lo que significa que son muestras con pH neutro, mientras que las muestras que pertenecen al *cluster* 2 presentan mayor variabilidad en esta componente.

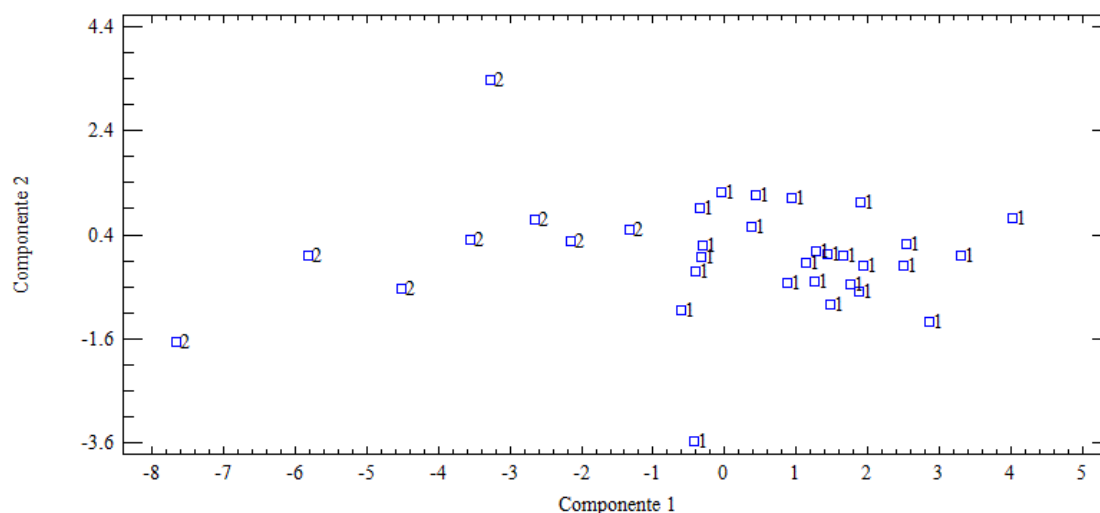


Figura 6-4: Representación de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011 en el espacio de los dos factores obtenidos en el análisis de componentes principales. Las muestras están identificadas con el número de cluster al que corresponden

Uno de los factores que puede influir en la composición química de las muestras de agua de niebla, es el recorrido de las masas de aire portadoras de las mismas los días previos al muestreo. Por ello, en la figura 6-5 se representa, para cada *cluster*, el recorrido de las masas de aire las 120 horas previas al muestreo. Las muestras pertenecientes al *cluster* 1 producen, en general, largos recorridos sobre el mar Mediterráneo, llegando muchas de ellas a zonas próximas de las islas de Córcega y Cerdeña y al norte de Túnez, incluso algunas de ellas provenientes del este europeo. Estas muestras presentan, en general, niveles más elevados de conductividad y de concentración de iones que las muestras del *cluster* 2. Sin embargo, las muestras del *cluster* 2 presentan, en general, mayores recorridos sobre la Península Ibérica y sobre

países del oeste y norte de Europa, incluso sobre las Islas Británicas, y menores recorridos sobre el mar Mediterráneo. Los miembros de este grupo presentan, en general, valores menos elevados de conductividad y de concentración de iones que las muestras del *cluster* 1.

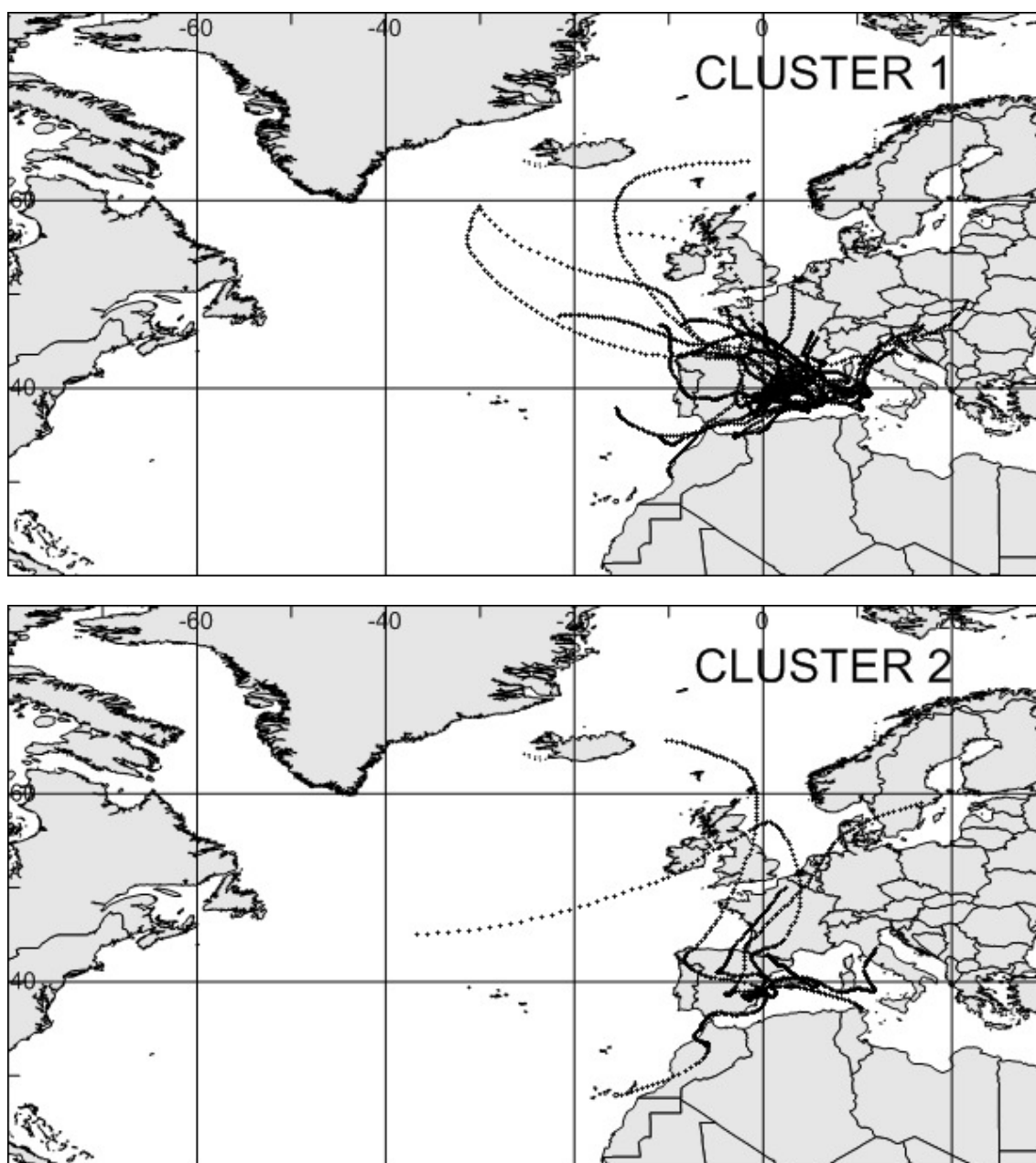


Figura 6-5: Recorrido de las masas de aire para cada una de las muestras de niebla pura incluidas en cada cluster las 120 h previas a alcanzar el monte Mondúver (Xeresa, Valencia). Cada punto corresponde a una hora de viaje

Otro aspecto importante a analizar que puede tener importancia en las características químicas de las muestras analizadas, es el momento temporal en que han sido recogidas.

Por ello, en la figura 6-6 se representa un gráfico de dispersión que recoge, a modo de ejemplo, la conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración de nitratos (mg l^{-1}), en logaritmo, para las muestras de niebla pura. Cada muestra está identificada con el grupo en el que ha sido incluido según el análisis *cluster*, así como por la estación del año en la que ha sido recolectada. Los miembros de un mismo grupo están rodeados por un círculo que los identifica y cuyo centroide ha sido representado con una cruz. Se observa como los miembros del *cluster* 1, situados en el margen superior derecho de la figura, representan muestras obtenidas fundamentalmente en primavera (50 %) y en verano (23 %) y constituyen las de mayor nivel de conductividad y de concentración de nitratos. Por el contrario, los miembros del *cluster* 2 se hallan a la izquierda del gráfico, por lo que presentan valores inferiores de conductividad y de concentración de nitratos, habiendo sido el 63 % de ellas recogidas en invierno y el 37 % en primavera.

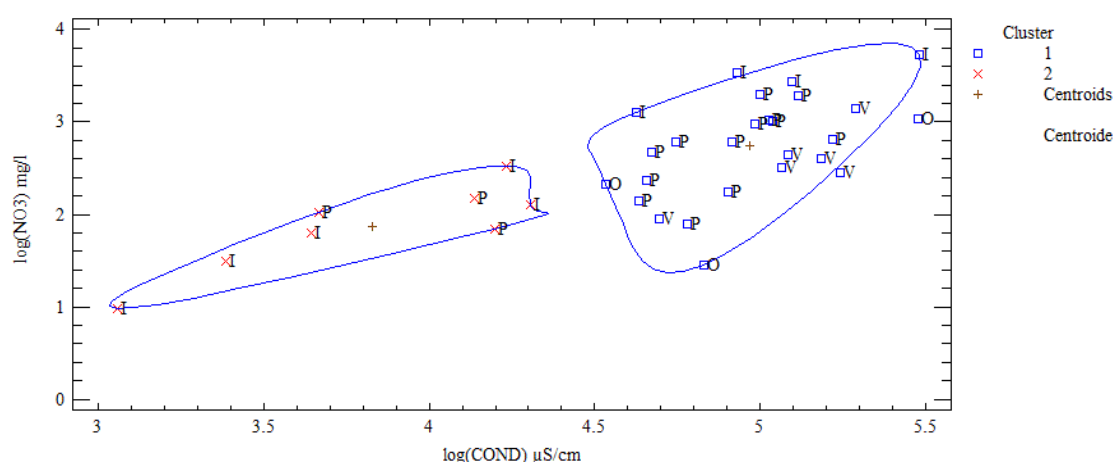


Figura 6-6: Gráfico de dispersión de la conductividad (logaritmo, $\mu\text{S cm}^{-1}$) frente a la concentración de NO_3^- (logaritmo, mg l^{-1}) de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el colector Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011. Cada muestra representa un análisis y está identificada por el número de cluster en el que está incluida y por la estación del año en la que ha sido recogida (I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño)

En la figura 6-7 se representa las concentraciones medias, en mg l^{-1} , de los principales iones de las muestras obtenidas de agua de niebla pura, en función de la estación del año. Como se puede observar, las muestras obtenidas en verano y en otoño presentan las mayores concentraciones de iones (suma de todas las concentraciones de cationes y aniones), mientras que las de invierno son las de menor concentración, habiéndose mostrado la primavera como una estación intermedia. Estos datos coinciden con los resultados obtenidos en el análisis *cluster* anterior, en donde las muestras de verano se mostraban como las más cargadas iónicamente, mientras que las de invierno aparecían en el *cluster* de menor concentración de iones. Analizando con detalle cada una de las estaciones del año, es reseñable como el invierno, a pesar de ser la estación del año con menor concentración total de contaminantes, contiene los mayores niveles de concentración de nitratos, con un valor promedio de 18.1 mg/l . En primavera y en

verano, los iones predominantes son el cloruro y los nitratos, mientras que en otoño dominan los cloruros y el sodio.

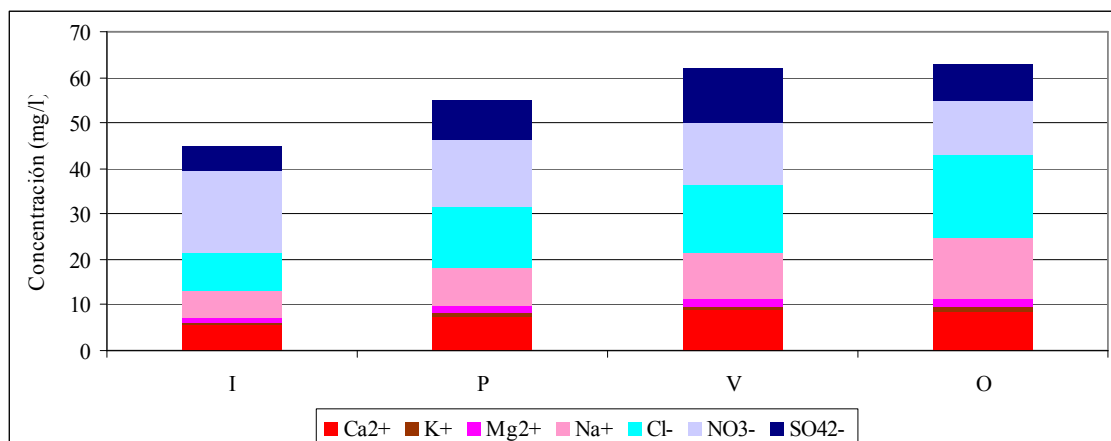


Figura 6-7: Concentraciones de los principales iones (mg l^{-1}) de las muestras de agua de niebla pura obtenidas en el monte Mondúver (Xeresa, Valencia) entre diciembre de 2009 y agosto de 2011 en función de la estación del año (I: Invierno; P: Primavera; V: Verano; O: Otoño)

A modo de conclusión, podemos decir que se han observado diferencias en cuanto a las características químicas de las muestras de niebla pura en función del recorrido seguido por la masa de aire que las ha originado, así como en función de la estación del año en la que han sido recolectadas. Las muestras con un mayor recorrido sobre el mar Mediterráneo han presentado mayores concentraciones de iones que las que han registrado menor recorrido marítimo. Estas muestras se han recogido fundamentalmente en verano, aunque también en primavera y otoño. Tradicionalmente los meses de verano están asociados a situaciones meteorológicas de mesoescala, en los que dominan las circulaciones locales en forma de brisa con fenómenos de recirculación sobre el mar Mediterráneo, que provocan la confinación de contaminantes sobre su cuenca. Ello puede provocar que las nieblas obtenidas en esta época del año presenten mayor carga iónica que las obtenidas en el resto, como por ejemplo en invierno donde dominan las situaciones asociadas a frentes atlánticos.

De cualquier modo y en el caso de que se pretenda utilizar el agua de niebla en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica para consumo humano, se recomienda la realización de análisis químicos continuados en el tiempo, no sólo del agua de niebla obtenida directamente a través del colector, sino del agua acumulada en los depósitos de almacenamiento. A su vez, los análisis químicos deberían incluir metales pesados, así como análisis microbiológicos.

Capítulo 7

Aprovechamiento del Agua Obtenida Mediante la Captación de Niebla en el Este Peninsular: Propuesta de Aplicaciones

*Human history is basically a list of things that couldn't be done
and then were done*

Boyan Slat, inventor y fundador de *The Ocean Cleanup*

El fin último de todo trabajo científico es poner en práctica y al servicio de la sociedad el conocimiento acumulado durante la fase de investigación. Ese es el principal objetivo de cualquier persona o entidad que ha destinado esfuerzos y recursos económicos a indagar algo, hasta entonces desconocido. La manera en que se lleve a cabo la aplicación del conocimiento adquirido dependerá en gran medida del contexto geográfico y social donde se quiera realizar. Cada lugar tiene sus propias necesidades sociales y la puesta en funcionamiento de una nueva aplicación debe tratar de cubrir las de la mejor manera posible.

Como se ha visto en el Capítulo 2, en la actualidad se están llevando a cabo numerosos proyectos de aprovechamiento del agua procedente de la niebla en diferentes lugares del mundo. Aunque la mayoría de ellos son lugares con escasos recursos económicos y con necesidades vitales muy básicas, donde cualquier aporte adicional de agua supone un cambio positivo en las condiciones de vida de su población, también existen casos de sistemas de aprovechamiento funcionando en sociedades como la nuestra, donde las necesidades básicas están cubiertas y donde el consumo de agua es muy elevado. Tal es el caso de las Islas Canarias, y en concreto la isla de Tenerife, donde la recolección de agua de niebla trata de suplir las necesidades en determinadas áreas rurales de difícil acceso, siendo un aporte fundamental en el abastecimiento de agua de determinadas casetas forestal y en balsas de uso agrícola (Marzol, 2005).

En el caso que nos ocupa, donde el objetivo principal es el plantear opciones de aprovechamiento del agua obtenida a través de la recolección artificial de la niebla en el este de la Península Ibérica, hay que tener en cuenta el tipo de sociedad en la que vivimos, fijándonos principalmente en dos aspectos: la densidad de población y el consumo de agua por habitante y día.

En primero lugar, es bien sabido que nuestra zona de estudio se encuentra altamente poblada, con ciudades que presentan las densidades de población más altas de España. Tal es el caso de Barcelona y Valencia y sus áreas metropolitanas, con municipios por encima de los 20 000 hab/km² en 2013, según datos del Instituto Nacional de Estadística. La población alcanza las mayores densidades en las zonas litorales y alrededor de las grandes urbes como Barcelona, Valencia, Castellón, Alicante y Murcia, con valores superiores a los 250 hab/km² a lo largo de todo el litoral, salvo algunas áreas del norte de la Comunidad Valenciana y Sur de Cataluña, así como el sur de Murcia y Almería. Las zonas de interior se encuentran más despobladas, con densidades que en algunas áreas no superan los 5 hab/km² (figura 7-1), y concentran la mayor parte de la superficie forestal y agrícola de la región.

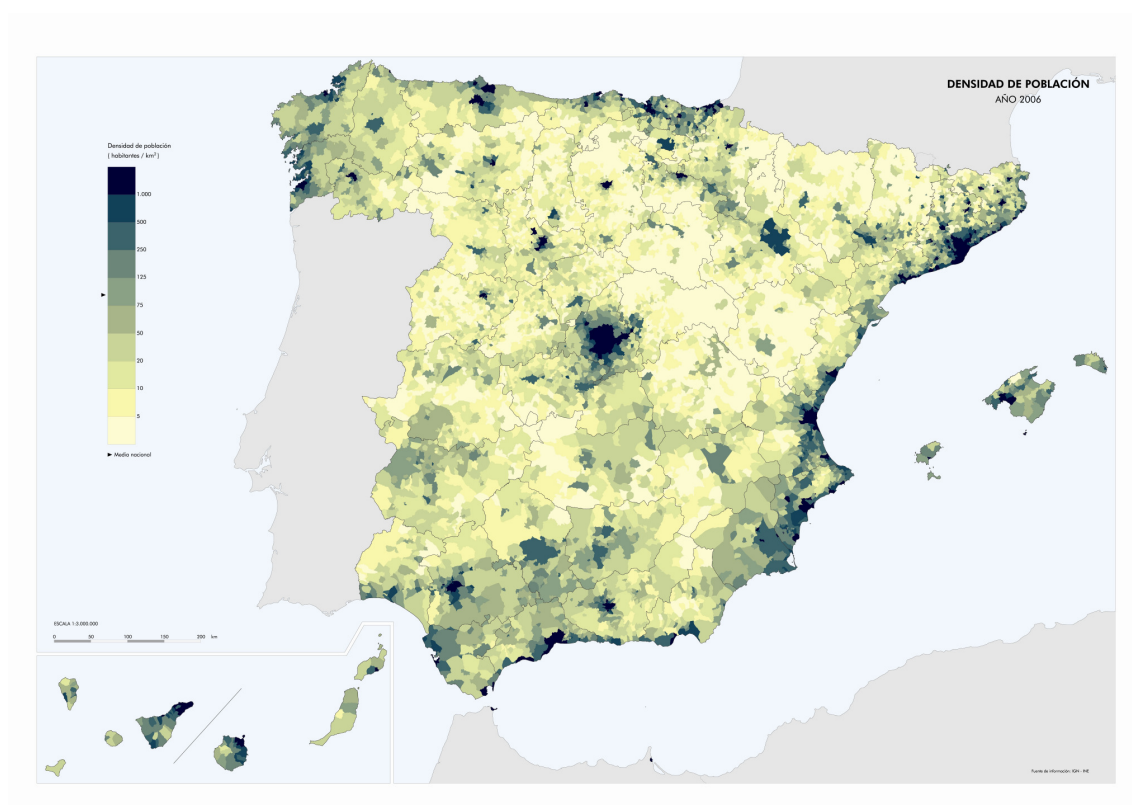


Figura 7-1: Densidad de población municipal de España en el año 2006 (Instituto Geográfico Nacional)

En cuanto al consumo de agua y según datos del Instituto Nacional de Estadística del año 2011, el consumo medio de un hogar español es de 142 litros por habitante y día. Las comunidades autónomas en donde se localiza la Red de Colectores presentan valores similares al promedio nacional, oscilando entre 130 l/hab/d en Cataluña y 152 l/hab/d en la Comunidad Valenciana y la Región de Murcia (figura 7-2). En cuanto al origen del agua suministrada a los hogares españoles, el 65 % procedió de aguas superficiales, mientras que el 30 % tuvo su origen en aguas subterráneas. Tan solo el 5 % fueron otro tipo de aguas (desaladas del mar o salobres).

Vivimos por tanto en una sociedad con un alto consumo de agua, propio de las civilizaciones altamente industrializadas, y donde las necesidades básicas están cubiertas. Es por ello que una tecnología como la desarrollada en este trabajo, donde el volumen de agua que se puede recolectar es, en general, modesto y es función de la superficie de los colectores de niebla que se pongan en funcionamiento, debe de tratar de cubrir necesidades concretas en lugares remotos, donde los medios tradicionales de abastecimiento no llegan o su acceso es complicado. O bien suponer un aporte adicional en zonas rurales o forestales donde los consumos son menores o puntuales.

Por todo ello, el objetivo de este Capítulo es proponer diferentes formas de aprovechamiento del agua recolectada a través de sistemas pasivos de captura de niebla,

en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica. Para ello se ha tenido en cuenta, en primer lugar, el tipo de tecnología utilizada, la cual se basa fundamentalmente en la simplicidad y, en segundo lugar, en el contexto demográfico y social en donde vivimos, donde tanto el número de habitantes como el consumo de agua es elevado. Las aplicaciones pensadas en este trabajo tienen una vertiente medioambiental y se han basado fundamentalmente en aumentar el grado de éxito de las repoblaciones forestales, el apoyo a la extinción de los incendios forestales y el suministro de agua a la fauna silvestre y la agricultura en sectores de difícil acceso.

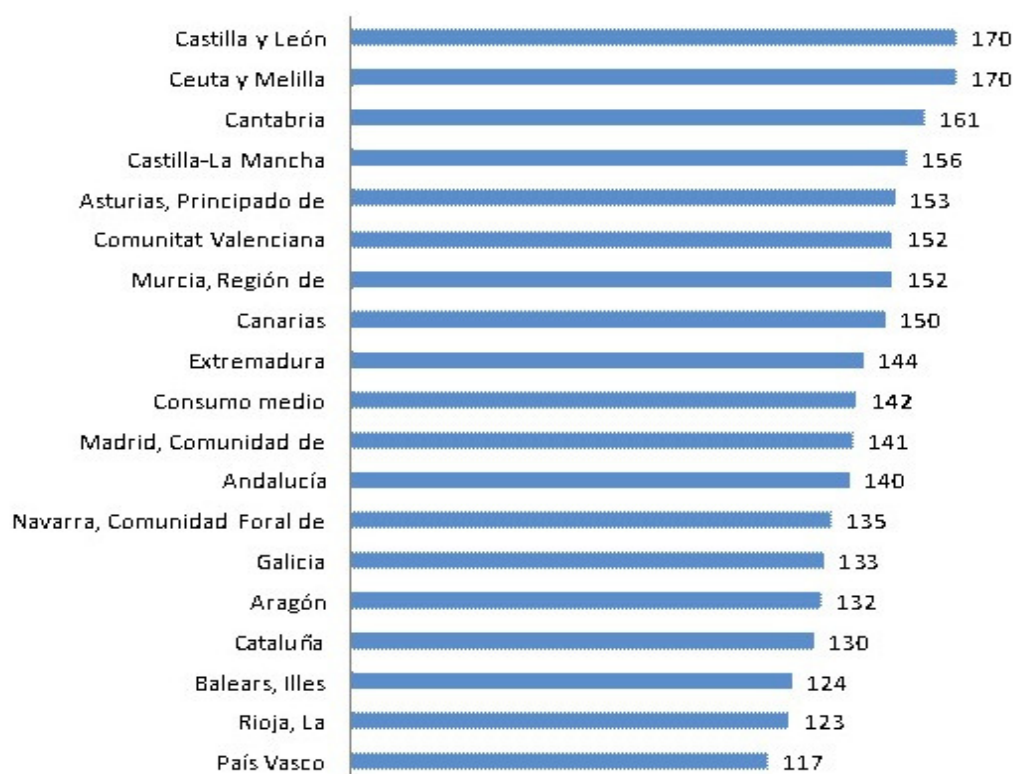


Figura 7-2: Consumo de agua en los hogares españoles en 2011, en función de las comunidades autónomas, en litros por habitante y día (Instituto Nacional de Estadística)

7.1 APLICACIÓN DE RIEGOS DE APOYO EN LABORES DE REFORESTACIÓN

La aplicación de riegos de apoyo en labores de reforestación es una herramienta recomendada en áreas áridas y semiáridas (Allen, 1995; Bainbridge, 2002; Lovich and Bainbridge, 1999), donde son habituales los periodos severos de escasez de agua y la precipitación tiene un carácter irregular e imprevisible. Este déficit de agua puede provocar tasas de mortalidad altas en plántulas recién sembradas. En condiciones secas,

se ha determinado que los períodos de 120 días consecutivos (o incluso períodos de 70 o 80 días) sin ningún evento de lluvia significativamente mayor de 5 mm, provocan altas tasas de mortalidad en plántulas de especies mediterráneas durante su primer verano en el campo (Vallejo et al., 2000). En nuestra área de estudio no son infrecuentes los períodos de sequía de más de 80 días, fundamentalmente durante los meses estivales, por lo que un riego de socorro a las plántulas para suplir esta carencia puede ayudar a incrementar el porcentaje de supervivencia en las repoblaciones forestales. Además, en el Capítulo 4 se ha visto como la captura de niebla en verano puede suponer un aporte adicional de agua y ayudar a suplir la tradicional escasez de lluvia típica del clima mediterráneo.

La idea es la siguiente: establecer uno o varios colectores de niebla de tipo LFC (Capítulo 2, apartado 2.1.1), cuyo número dependerá de las necesidades a cubrir, conectado a un sistema de almacenamiento de agua (balsas o depósitos), donde se irá acumulando el agua recolectada. Un sistema de riego conectado a las balsas será el encargado de hacer llegar el agua a las plantas cuando sea requerida.

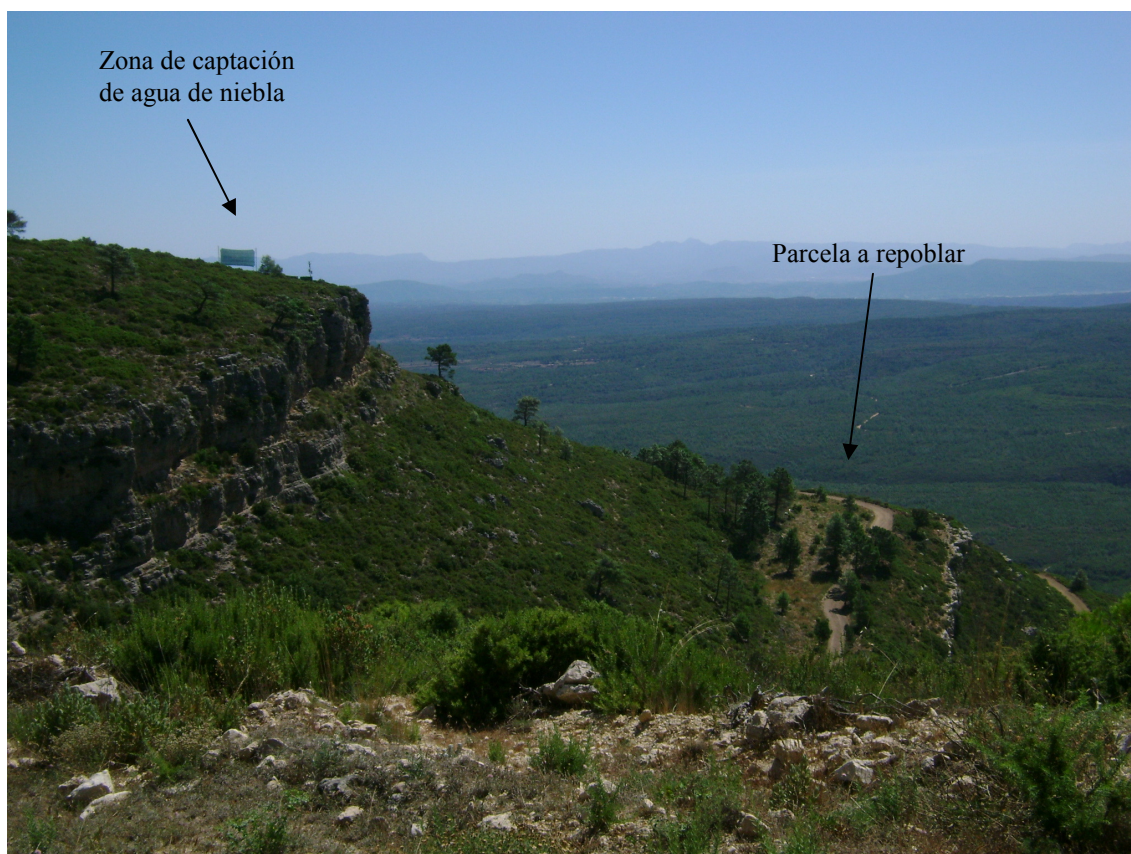


Figura 7-3: Sistema de aprovechamiento empleado en Ayora (Valencia), el cual se divide en una zona de captación de agua (parte superior izquierda) y en la parcela a repoblar (parte inferior derecha)

Un ejemplo de este tipo de aprovechamiento fue llevado a cabo por el CEAM entre 2007 y 2010 y sus resultados fueron publicados en Estrela et al. (2009) y Valiente et al. (2011). En este caso, se realizó una restauración forestal en una parcela de 2 500 m² degradada por sucesivos incendios forestales y situada en Ayora (Valencia). El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el aumento de la supervivencia de las plántulas tras el aporte de riegos controlados en verano. El agua utilizada para realizar los riegos había sido recolectada previamente por medio de un captador de niebla plano de tipo LFC.

La parcela experimental donde se llevó a cabo el aprovechamiento tenía dos partes claramente diferenciadas: una zona de captación de niebla, con todos los elementos necesarios para recoger y almacenar el agua, y la parcela de reforestación propiamente dicha, donde se distribuyó el agua de niebla recogida para el riego. La zona de captación de niebla se encontraba 40 metros por encima de la parcela de reforestación, lo que permitió realizar el riego por gravedad (figura 7-3). Previamente a la puesta en marcha del sistema de aprovechamiento, se instaló en el lugar el colector Machos (Capítulo 3, apartado 3.3), el cual permitió determinar el potencial de recolección del lugar y la orientación adecuada del colector LFC. Con esta información, se decidió instalar un colector plano de tipo LFC de 18 m² con una orientación de 55° con respecto al norte, conectado a tres depósitos de almacenamiento interconectados de 1 000 l cada uno. Un sistema de conducción llevaba el agua por gravedad desde la zona de almacenamiento hasta la zona a repoblar. Se decidió repoblar la parcela con 620 plántulas de un año de *Pinus pinaster* y *Quercus ilex*, sembradas a intervalos regulares y con una densidad de plantación de 2 500 orificios por hectárea. El riego se realizó a través de un sistema de goteo por microtubos a 20-25 cm de profundidad, para evitar la evaporación del agua. Y se establecieron cuatro tratamientos: uno de precipitación natural (control, C), uno o dos riegos en verano (W1 y W2) y uno de exclusión de lluvia (-W) (figura 7-4).

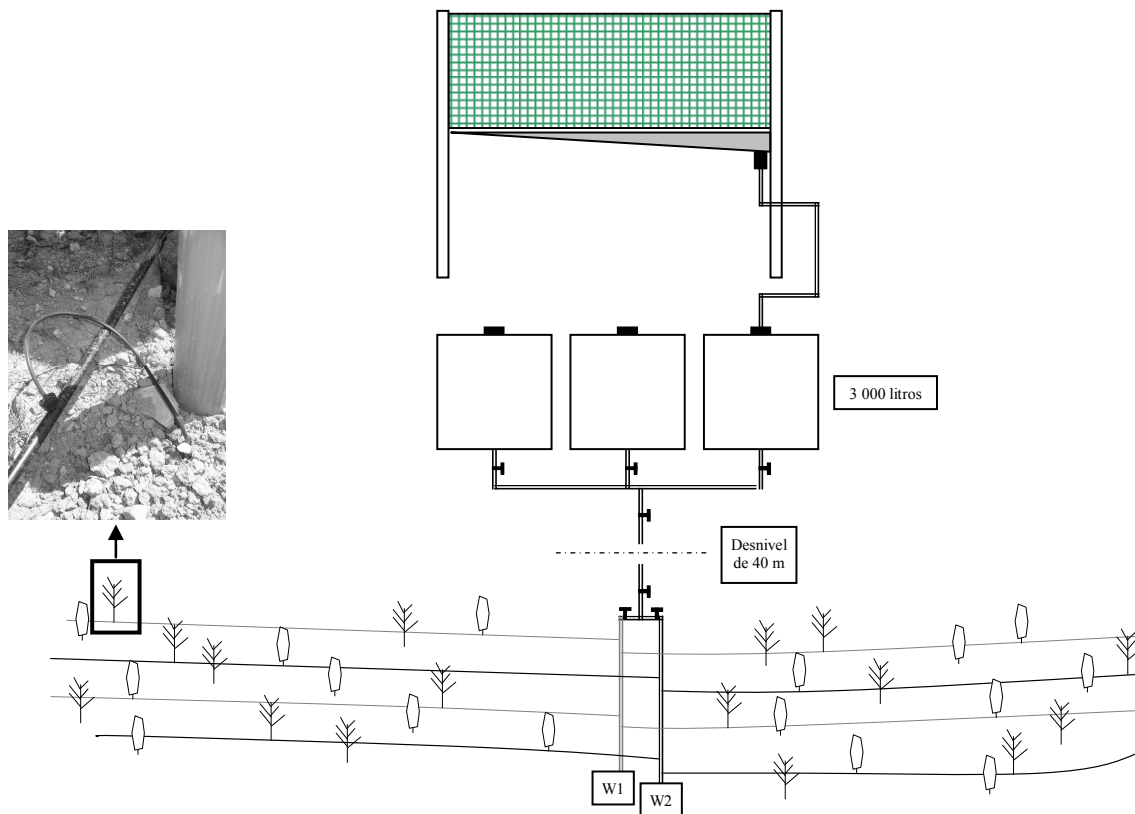


Figura 7-4: Esquema del experimento llevado a cabo en Ayora (Valencia), con el sistema de captación de agua y almacenaje en la parte superior, y la parcela de repoblación y el sistema de riego en la parte inferior

Tras la instalación del colector plano de 18 m^2 , en cuatro meses los depósitos de almacenamiento estuvieron completamente llenos, lo que permitió realizar con éxito los riegos previstos. A pesar de que el verano no fue lo suficientemente estresante como para generar una fuerte limitación de agua en las plantas, el experimento produjo un incremento significativo del porcentaje de supervivencia, fundamentalmente en la encina, en las plántulas que habían sido sometidas a tratamientos de riego controlado en verano, con porcentajes cercanos al 100 %. En los pinos, este porcentaje superó el 80 % (figura 7-5).

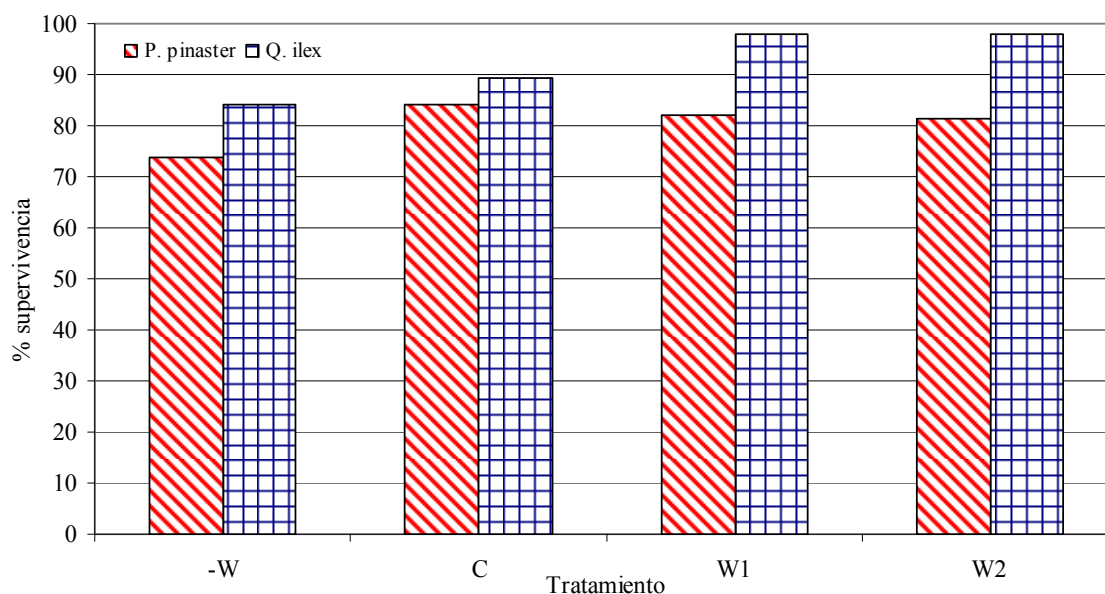


Figura 7-5: Porcentaje de supervivencia durante el año 2007 de las plántulas de *Pinus pinaster* y *Quercus ilex* en función del tratamiento (-W: exclusión de agua; C: control; W1: un riego; W2: dos riegos) llevados a cabo en Ayora (Valencia). Fuente: Estrela et al., 2009; Valiente et al., 2011, modificada

7.2 ABASTECIMIENTO DE BALSAS DESTINADAS A LA EXTINCIÓN DE INCENDIOS O DE USO AGRÍCOLA

Una de las herramientas fundamentales utilizada en la extinción de incendios forestales son las balsas o depósitos de agua. Una amplia red de los mismos, distribuida estratégicamente a lo largo del territorio a proteger, facilita la rápida intervención de los medios aéreos de extinción (helicópteros) y puede ayudar a minimizar las superficies calcinadas.

La idea es simple y se basa en establecer uno o varios colectores de niebla de tipo LFC (Capítulo 2, apartado 2.1.1), cuyo número dependerá de las necesidades a cubrir, conectado al depósito o la balsa de extinción de incendios, donde se irá acumulando el agua recolectada (figura 7-6).

Este tipo de sistema puede permitir establecer depósitos de agua colocados estratégicamente en determinados puntos clave, donde debido a razones logísticas, económicas o ambientales, no se han podido instalar, o donde su mantenimiento es muy caro. Muchos de los depósitos utilizados en las labores de extinción de incendios son abastecidos por camiones cisternas, con el consiguiente sobre coste económico. Esta

puede ser una solución alternativa en lugares donde exista la presencia de nieblas orográficas o de advección.

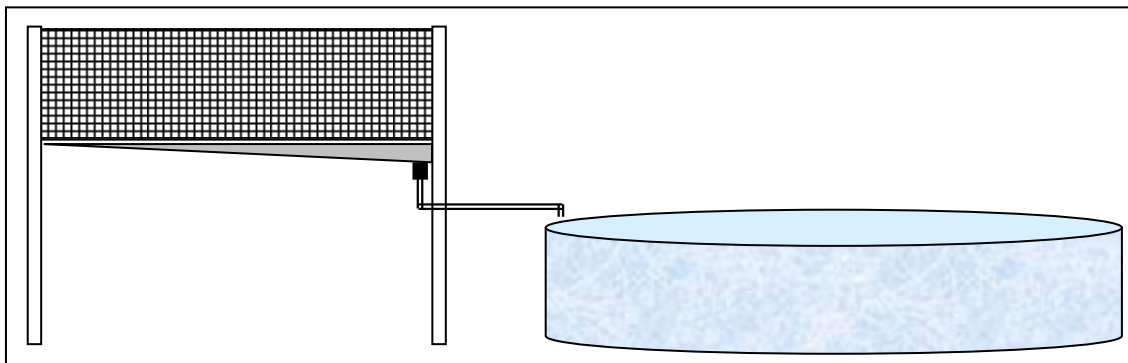


Figura 7-6: Esquema de la instalación propuesta para el abastecimiento de balsas de extinción de incendios (Estrela et al., 2008)

Otro modo de utilizar este sistema de aprovechamiento es como fuente suplementaria de agua en el abastecimiento de balsas para el riego agrícola, tal y como se realizó en Tenerife (Marzol, 2005). En este caso, se aprovechó la valla que rodeada la balsa como soporte de las mallas recolectoras de agua. El agua capturada por las mismas era destinada al llenado de las balsas, cuya fuente de abastecimiento principal era agua de bombeo (figura 7-7).



Figura 7-7: Balsa de uso agrícola instalada en Teno Alto (Tenerife), cuya valla protectora se cubrió con malla para la recolección de agua de niebla y que se utilizó como aporte suplementario al llenado de la balsa (Marzol, 2005)

En este tipo de aprovechamiento, donde normalmente se necesitan volúmenes elevados de agua, la recolección de niebla debe pensarse como una fuente suplementaria de agua, que aporte una cantidad extra de una manera sencilla y económica, y que permita reducir los costes de mantenimiento de la instalación.

7.3 SUMINISTRO DE AGUA EN ABREVADEROS PARA LA FAUNA SILVESTRE

Tal y como ya se ha mencionado anteriormente, una característica importante en los lugares de clima mediterráneo son los habituales periodos severos de escasez de agua, fundamentalmente durante los meses estivales. A ello hay que añadir los años calificados como secos y muy secos por la Agencia Estatal de Meteorología en cuanto a la pluviometría y que muchas áreas del este peninsular han sufrido en los últimos dos lustros. Esto ha provocado la ausencia de precipitaciones importantes en muchas zonas forestales de nuestra zona de estudio, dando lugar en la actualidad a un monte calificado por los expertos y por muchos de los lugareños bien conocedores del terreno como *seco*. La primera consecuencia de esta sequedad del terreno es el elevado riesgo de incendios forestales, donde la vegetación seca incrementa su potencial combustible. Pero otra consecuencia derivada de los prolongados periodos de sequía es el déficit hídrico al que está sometida la fauna silvestre, con graves problemas para cubrir sus necesidades básicas.

Por ello, pensamos que la utilización de colectores de niebla en zonas forestales puede ayudar a paliar el estrés hídrico al que está sometida la fauna silvestre. La idea es establecer un sistema igual que el anterior, pero en este caso el suministro de agua se realizaría a los abrevaderos artificiales para los animales (figura 7-8).

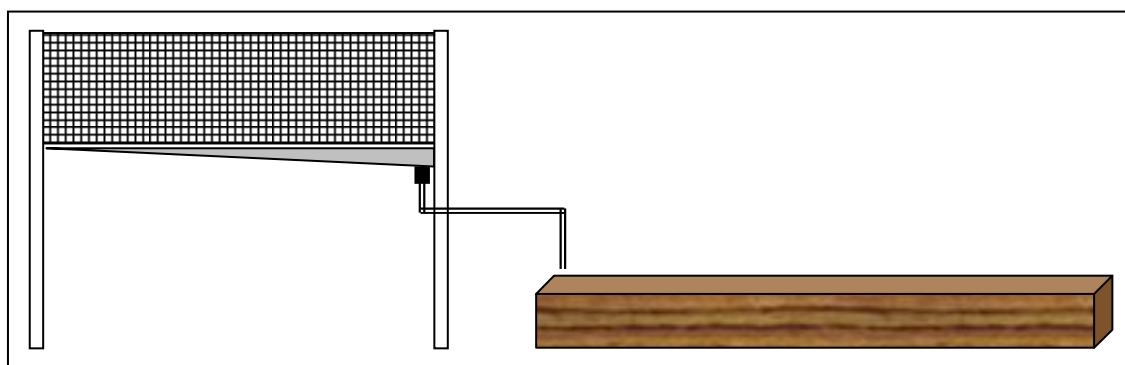


Figura 7-8: Esquema de la instalación propuesta para el suministro de agua en abrevaderos para la fauna silvestre

En esta línea llevan trabajando desde el año 2010 el CEAM y la Conselleria de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente en la Reserva Valenciana de Caza de Muela de Cortés. Se trata de un paraje natural de 36 009 ha localizado en el interior de la provincia de Valencia, con un elevado interés cinegético, tanto para la caza menor como para la mayor, debido principalmente a la presencia de poblaciones de cabra montés y muflón. Sin embargo, la ausencia de precipitaciones de los últimos años ha alertado a los técnicos de la Reserva de la dificultad de encontrar agua por parte de la fauna allí presente, teniendo que utilizar camiones cisterna para abastecer los bebederos. Por dicho motivo, CEAM instaló en el área el colector Cinto Cabra en el año 2010 y el colector Bujete en el 2011 (Capítulo 3, apartado 3.3), con el objetivo de evaluar el potencial de captación de agua de niebla y con el fin último de abastecer los abrevaderos con esta tecnología, evitando en lo posible el uso de los camiones cisterna. Tras unos años de toma de datos, se obtuvo la información necesaria para determinar el potencial de recolección de agua en ambos puntos (el Capítulo 4 recoge toda la información detallada sobre los resultados obtenidos). La tasa anual de captura de agua de niebla de Cinto Cabra fue de 2.6 l/m²/d, mientras que en Bujete se registró 1.4 l/m²/d. A pesar de que ambas tasas pueden considerarse bajas en comparación con las obtenidas en otros puntos de la Red (ver Capítulo 4, tabla 4-1), se pensó que podían ser suficientes para poner en práctica un sistema de aprovechamiento pionero, que no requiere de grandes consumos hídricos, como es el abastecimiento de un abrevadero de fauna silvestre forestal. De este modo, en 2014 se pasó a la fase de aplicación y se instaló un colector de agua de niebla en las proximidades de uno de los lugares estudiados, en concreto, de Cinto Cabra. En este caso, se diseñó e instaló por parte de los técnicos de la Conselleria un colector de niebla en forma de árbol. Se trata de un dispositivo de unos 3.5 m de altura, que utiliza sus acículas plásticas como material de captación. Las ramas recogen el agua condensada en las acículas y actúan como tuberías, transportando el agua hasta el interior del tronco, el cual es hueco. Una manguera situada en la parte inferior del dispositivo es la encargada de llevar el agua hasta el abrevadero. Su diseño ha sido pensado para que no tuviese impacto ambiental en la Reserva (figura 7-9).



Figura 7-9: Colector de niebla en forma de árbol instalado en la Reserva Valenciana de Caza de Muela de Cortes para abastecer un abrevadero para la fauna silvestre (imágenes cedidas por la Reserva Valenciana de Caza de Muela de Cortes de la Generalitat Valenciana)

Capítulo 8

Conclusiones

No me arrepiento de las miles de veces que vine a casa con las manos vacías, después de haber perdido todas mis provisiones y cebo. Cuando los días se hacen tan sombríos como ese, entonces sabes que pronto encontrarás el tesoro

Soichiro Honda, empresario fundador de *Honda Motors*

Este trabajo muestra los resultados más relevantes obtenidos durante más de diez años de estudio y sintetiza el trabajo realizado en tres proyectos de investigación dotados de financiación pública. Durante este tiempo, se ha logrado diseñar, poner en funcionamiento y mantener una **Red de Colectores de Agua de Niebla** en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica, en un área que abarca desde el Pirineo oriental hasta el Cabo de Gata. En total, 24 colectores de agua de niebla (23 experimentales y 1 industrial) fueron instalados progresivamente en lugares que a priori contaban con las condiciones necesarias para la captura de agua de niebla, y fueron controlados y asistidos para que generasen información meteorológica de calidad, que ha sido la base para la obtención de los resultados aquí presentados. Esta Red constituye por tanto uno de los principales legados de este trabajo de investigación a la sociedad. Es nuestro deseo que el CEAM, como propietario actual de la Red, apoyado económicamente por el gobierno valenciano, apueste por su continuidad, de modo que se siga generando información de calidad para realizar investigaciones con series meteorológicas más largas, que permita obtener conclusiones más robustas que requieren ventanas temporales más amplias.

Se ha observado como la tecnología descrita y desarrollada en esta tesis ha servido para poner en práctica proyectos de aprovechamiento de agua obtenida a partir de la niebla en diferentes lugares del mundo. En la mayoría de los casos, se trata de países en desarrollo, donde esta tecnología simple y barata les permite cubrir de manera parcial o total una de sus necesidades más básicas, como es el acceso al agua potable. En nuestro país, y en concreto en la isla canaria de Tenerife, se utiliza esta técnica desde hace varios años con fines agrícolas y forestales, dando buenos resultados. Ello nos hace pensar que en nuestra zona de estudio también sería posible poner en marcha sistemas de captación de agua de niebla que funcionaran como fuente de abastecimiento suplementaria en labores agrícolas o forestales. La mayoría de casos estudiados sigue utilizando la técnica de captura desarrollada en los años ochenta, basada en colectores planos y malla tipo *raschel*. Este tipo de tecnología es adecuada cuando se pretende llevar una labor de investigación que permita comparar resultados con los obtenidos en otros lugares del mundo. También es apropiada en lugares con escasos recursos económicos, ya que se trata de una tecnología que utiliza materiales muy baratos. Sin embargo, existe todavía un largo camino por andar en cuanto a la búsqueda de nuevos materiales de captación y diseño de los colectores, ya que pensamos que con ello sería posible optimizar la eficiencia de recolección. Ya existen trabajos en donde se han probado nuevos materiales textiles (Sarsour et al., 2010), así como variantes tridimensionales de los colectores LFC (Lummerich and Tiedemann, 2009; Tiedemann and Lummerich, 2010) que han mejorado las tasas de captación en comparación con los sistemas tradicionales. Es por tanto ésta una nueva vía de investigación en la que, invirtiendo recursos y tiempo, las posibilidades de mejorar la tecnología actual son muy elevadas. La mejora en la eficiencia en los sistemas de captación de agua permitiría valorar el uso de esta técnica en aplicaciones y lugares que hasta la fecha no se han contemplado.

Otro de los hitos más importantes alcanzados en esta investigación ha sido el diseño y construcción de un colector de niebla experimental, que unido al resto de sensores meteorológicos que lo acompañan, conforma un **sistema integrado para la investigación del potencial de agua de niebla**. La ventaja de incorporar otros sensores

meteorológicos al sistema es que otorga un valor añadido a los datos de recolección de agua de niebla, permitiendo conocer, por ejemplo, las direcciones de viento que optimizan la captura o el porcentaje de contaminación de lluvia en los datos de niebla. Del mismo modo, al estar todos los sensores meteorológicos y demás equipos electrónicos anclados en un único mástil, se consigue disponer de un sistema integrado de fácil disposición en campo por medio de un solo punto de anclaje, lo que simplifica su instalación y puesta en marcha. El sistema propuesto, el cual en la mayoría de los casos ha sido instalado en lugares con condiciones meteorológicas duras debido al fuerte viento o a la lluvia e incluso, en algunos casos, a la nieve, se ha comportado de manera robusta. Salvo en algún caso durante los primeros años de investigación donde vientos superiores a 180 km/h consiguieron derribarlo, en el resto de emplazamientos el sistema integrado ha soportado con firmeza las inclemencias del tiempo, permitiendo obtener la información meteorológica deseada. A su vez, los colectores de niebla experimentales propuestos han cumplido su función y sus materiales han aguantado sin deterioro apreciable los casi 10 años que alguno de ellos ha permanecido a la intemperie. Bien es cierto que durante los últimos meses de la etapa de toma de datos (2003-2012) y tras su finalización (a partir del año 2013), en alguno de los colectores de tipo arpa más antiguos se han observado hilos de nylon rotos. Es posible que con el tiempo, la radiación solar unida a la presión ejercida por el viento, provoque la rotura paulatina de los hilos de nylon en los colectores de tipo arpa a partir de los 9-10 años de vida. Este dato debería tenerse en consideración cuando se pretenda mantener en funcionamiento durante años un sistema de este tipo. En los colectores de tipo malla no se ha observado ningún deterioro en los materiales durante el periodo de tiempo que han estado operativos, aunque bien es cierto que ha sido relativamente corto (2009-2012 en el más antiguo de ellos). En cuanto al mantenimiento de los equipos, los principales problemas han sido producidos por la rotura de los sensores de viento tras fuertes temporales de viento y/o lluvia, y la obturación de los conductos que transportan y desaguan el agua en los colectores de niebla y pluviómetros. También se han observado en algunos casos fallos en el sistema de comunicación (fundamentalmente por fallo del *software* del módem que se ha solucionado con un simple reseteo o de las tarjetas SIM telefónicas que requerían su reemplazo), así como descarga de baterías en los colectores más antiguos. Un buen sistema de control de calidad de datos anómalos permite detectar estos problemas. Se considera por tanto fundamental establecer un sistema periódico de visitas para realizar tareas básicas de mantenimiento, como la limpieza de los conductos de desagüe en colectores y pluviómetros, al menos, cada 6 meses.

Otro aspecto importante a destacar sobre el sistema de prospección de agua de niebla, es la posibilidad de, a partir de los datos obtenidos por un colector experimental, estimar el volumen de agua que podría haberse recolectado utilizando un colector de tipo pantalla, que es el que habitualmente se usa cuando se pretende aprovechar el agua de manera industrial. Para ello es necesario disponer de datos de la dirección y velocidad de viento, los cuales nos indican la procedencia de la niebla y, por tanto, el ángulo de choque con la malla recolectora. El sistema propuesto podría ser una buena herramienta para su utilización en la gestión de zonas forestales, ya que, además de ofrecer información sobre el potencial de recolección de agua de niebla, permite obtener datos de las principales variables meteorológicas, como son la temperatura y humedad relativa del aire, la lluvia y la dirección y velocidad de viento. Además, el sistema permite, con pequeñas modificaciones, añadir otros sensores meteorológicos que pudieran ser de

interés. La información meteorológica es clave para realizar una correcta gestión de este tipo de enclaves.

El análisis de los datos registrados por los colectores de la Red ha permitido conocer el **potencial de recolección de agua de niebla** de los 23 emplazamientos en donde se han instalado equipos experimentales. Es difícil extraer conclusiones en cuanto a la distribución latitudinal o longitudinal de la recolección de niebla, ya que otros factores como la altitud, el cual ha sido analizado experimentalmente, la orientación de las montañas o el tipo de relieve próximo, pueden resultar claves en la captura. A lo largo de todo el perfil latitudinal analizado se han observado emplazamientos con elevadas tasas de captación, tanto en zonas próximas a la línea de costa como de interior. Sobresale por encima del resto el colector Puig Neulós, cuyos promedios de captación han sido extraordinariamente elevados y comparables a los obtenidos en lugares como Perú (Ortega et al., 2007; Villegas et al., 2007) o el Sultanato de Omán (Cereceda and Schemenauer, 1998), que son dos de las mayores tasas de captura descritas en la literatura. En el resto de emplazamientos estudiados se han obtenido promedios de captación menos elevados, aunque también importantes en algunos casos. En lugares costeros como Arráez, Bernia_E, Mondúver, Montgó y Portella, o en otros situados en montañas más alejadas de la costa como Mariola, Machos o Montseny Antenas, donde en algún caso la distancia al mar alcanza los 60 km, se han obtenido volúmenes considerables de agua de niebla. Del mismo modo que se han registrado tasas de captación discretas en emplazamientos de todas las zonas analizadas, tanto en colectores costeros (Montnegre, Muela_B y Sierra Helada) como en otros más alejados del mar (Bujete y Montseny Canplá). Un aspecto que ha puesto de manifiesto este trabajo ha sido la importancia de una correcta selección de la altitud para optimizar la captación de agua de niebla. Diferencias menores de 100 m pueden provocar variaciones considerables en los volúmenes recolectados. Se ha observado como en la parte centro y sur del área de estudio se necesita una altitud superior a 500 m para obtener tasas de captura importantes. Sin embargo, en la parte más septentrional de la región estudiada y en concreto, en las provincias de Barcelona y Gerona, los colectores situados entre 600 y 850 m han recolectado volúmenes muy discretos de agua de niebla, habiéndose observado elevadas tasas de captación a altitudes superiores a 1 200 m.

Otro aspecto relevante a destacar es el **comportamiento de la niebla en el periodo estival**. En nuestra área de estudio, con un clima típicamente mediterráneo, uno de los principales rasgos que caracteriza el verano son los tradicionales periodos prolongados de ausencia de lluvias, que pueden llegar a provocar restricciones en el consumo o incrementos en la mortalidad en plántulas de especies forestales (Vallejo et al., 2000), entre otros muchos problemas. Las tasas de recolección de agua de niebla durante esta estación del año también son menores que en el resto de estaciones en la mayoría de emplazamientos analizados, pero este descenso no es tan acusado como ocurre con la precipitación. Se ha observado como es posible recolectar con relativa frecuencia agua de niebla durante el verano, en periodos donde no ha habido lluvia. El pantano barométrico que domina la Península Ibérica en esta época del año, favorece la formación de circulaciones locales que en su vertiente mediterránea provoca el desarrollo de nubosidad baja (Azorin-Molina et al., 2011). Estas nubes no suelen provocar lluvia pero sí niebla al entrar en contacto con las montañas litorales (Azorin-Molina et al., 2009; Azorin-Molina et al., 2010). En algunos emplazamientos

analizados, donde la precipitación estival es prácticamente inexistente, se ha observado que la relación entre el agua de niebla recolectada y la lluvia se incrementa durante estos meses. Tal es el caso de los colectores Peñones y Puig Campana, donde esta relación es de 4 a 1 en favor de la niebla. Pensamos por tanto, que esta fuente alternativa de agua, desconocida y sin uso humano hasta la fecha en nuestra área, puede ayudar a que se lleven a cabo con mayores posibilidades de éxito actividades, fundamentalmente en el ámbito forestal o agrícola, que no son posibles con la ausencia de agua.

Uno de los temas más importantes estudiados en este trabajo ha sido el **análisis de las condiciones sinópticas de los días con recolección de agua de niebla** en todos los emplazamientos de la Red, tanto a nivel de superficie como en capas bajas de la atmósfera, así como la influencia de tres patrones de teleconexión sobre la captación. Para ello se ha seleccionado un método de clasificación objetivo cuyos resultados no dependiesen de la interpretación del investigador y que pudiera extrapolarse para el estudio de la niebla en otros lugares. Este es un trabajo pionero, ya que hasta la fecha no se habían realizado estudios de este tipo utilizando series largas de recolección de niebla. En los estudios previos que tratan de aprovechar la niebla como recurso hídrico, tan sólo se han encontrado referencias a las condiciones generales de la atmósfera de episodios concretos de captación (Marzol, 2005; Marzol et al., 2011; Valiente et al., 2011), sin analizar ventanas temporales más amplias (mensuales o anuales) y sin el empleo de clasificaciones automáticas. La metodología empleada ya se había utilizado con éxito sobre la Península Ibérica sobre otras variables meteorológicas como la precipitación (Martín-Vide, 2002; Martín-Vide and Fernández-Belmonte, 2001) o las brisas (Azorin-Molina, 2007; Azorin-Molina et al., 2011; Azorin-Molina and Chen, 2009) y tras los resultados obtenidos, también se considera adecuada para el estudio de la captación de niebla. Para el caso que nos ocupa, se han logrado resultados interesantes, a pesar de que sería necesario disponer de series de recolección de niebla más largas para obtener unas conclusiones más fiables. Con series temporales cortas en términos climatológicos como la nuestra, cualquier situación de carácter extraordinario que haya generado recolección anómala de niebla, tanto por exceso como por defecto, ha podido provocar enmascaramiento en los resultados. De cualquier modo, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- A nivel de superficie, las situaciones advectivas de procedencia marítima, al suponer un aporte de humedad de mar a tierra, así como las ciclónicas, son las más favorables para la recolección de agua de niebla. La dirección de los flujos más favorable para la captura varía a lo largo de todo perfil latitudinal analizado, teniendo una clara relación con la orientación de la línea de costa. Las situaciones anticiclónicas producen por lo general un elevado número de días con niebla, pero con unas tasas de captura discretas.
- En altura (a nivel de 850 hPa), las condiciones más favorables para la captura de agua de niebla son los vientos con velocidades fuertes (>5.14 m/s) y de procedencia mediterránea. Los vientos de origen atlántico provocan en general mayor número de días con niebla que los mediterráneos, pero generan menor recolección de agua.
- De los tres patrones de teleconexión analizados (NAOi, MOi y WeMOi), el WeMOi es el que ha mostrado una mayor influencia sobre la recolección de

niebla, fundamentalmente durante los meses de invierno y primavera, con valores del índice negativos y significativos estadísticamente en la mayor parte de colectores estudiados. El MOi también ha mostrado una influencia negativa y significativa estadísticamente sobre el total de emplazamientos analizados, mientras que el NAOi ha sido el que ha presentado menor importancia. A su vez, se ha observado un dominio claro de los valores negativos sobre la recolección de niebla, más evidente en el índice MO y fundamentalmente en el WeMOi.

Durante la investigación se llevaron a cabo análisis químicos continuados en el tiempo para conocer la **calidad del agua de niebla** recolectada y determinar si pudiera tener restricciones de uso. Por un lado, se analizó las características químicas básicas del agua de niebla pura, la cual no había recibido previamente ningún tipo de contaminación y se observó que cumplía con la legislación española en cuanto a consumo humano. Del mismo modo, se analizó el agua de niebla tal y como la aprovecharía un usuario final, lo que significa extraída directamente del depósito de almacenamiento de un colector de niebla expuesto permanentemente al ambiente y por tanto, contaminada por la acción de los agentes atmosféricos (viento, lluvia, etc.). En este caso, el agua presentaba mayor carga iónica que la procedente de niebla pura, pero seguía cumpliendo con la legislación vigente. Uno de los resultados más destacables fue conocer cómo varía la calidad del agua de niebla en función de la época del año. Y se pudo observar que existen diferencias en función de la estación anual y que muchas de las muestras obtenidas en verano presentaban una carga iónica elevada en comparación con las obtenidas en otras épocas del año. A su vez, se ha observado como tanto la conductividad como la concentración de iones son superiores en el agua de niebla que en la de lluvia. Ello puede deberse a la altitud en la atmósfera donde han sido formados ambos fenómenos meteorológicos. La niebla se forma en capas bajas de la atmósfera y de menor altitud que las capas donde se origina lluvia. Por tanto, se encuentra a menor distancia de la superficie terrestre y marítima, que son las fuentes de todos los contaminantes analizados, por lo que tiene mayor probabilidad de ser contaminada. Por contra, la lluvia se forma en niveles más altos de la troposfera y menos contaminados por partículas originadas sobre la superficie de la tierra. Con los resultados obtenidos podemos concluir que el agua de niebla capturada en los muestreos de esta investigación ha cumplido con la legislación española vigente, siendo apta para consumo humano y, por tanto, también adecuada para uso agrícola o forestal. De cualquier modo, si se pretende utilizar agua capturada mediante esta tecnología, se debería hacer un seguimiento periódico y continuado de su calidad química, evitando de este modo riesgos para la salud del usuario final.

El fin último de cualquier trabajo científico es traspasar la frontera que separa la investigación de la parte práctica y pasar a la fase de aplicación donde la sociedad se pueda beneficiar de todos los recursos invertidos y del conocimiento acumulado en los años previos de estudio. Por suerte, esta investigación ha dado origen a dos sistemas de aprovechamiento que han permitido por un lado, suministrar riegos de auxilio en una restauración forestal experimental, y por otro, abastecer abrevaderos para la fauna en una reserva forestal. Tras analizar los datos de recolección de agua de niebla de todos los colectores de la Red, podemos decir que existe el potencial necesario para poder desarrollar con éxito sistemas de aprovechamiento en muchos de los emplazamientos

estudiados. A su vez, existen otros muchos enclaves en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica que no se han podido estudiar por falta de tiempo y de recursos económicos, que a buen seguro también resultarían adecuados, ya que presentan condiciones geográficas y climatológicas similares a muchos de los lugares analizados. Debe tenerse en cuenta que por el tipo de sociedad en donde vivimos, con elevados consumos hídricos y de densidad de población, el uso ambiental del agua es el más apropiado.

Bibliografía

- S. Abdul-Wahab, H. Al-Hinai, K. Al-Najar, y M. Al-Kalbani. Fog water harvesting: quality of fog water collected for domestic and agricultural use. *Environmental Engineering Science* 24 (4): 446-456, 2007.
- S. Abdul-Wahab, H. Al-Hinai, K. Al-Najar, y M. Al-Kalbani. Feasibility of fog water collection: a case study from Oman. *Journal of water supply: research and technology. AQUA* 56 (4): 275-280, 2007.
- S. Abdul-Wahab y H. Al-Hinai. Investigation of the potential of fogwater harvesting in the western mountainous parts of Yemen. *Arab gulf journal of scientific research* 25 (1-2): 50-58, 2007.
- S. Abdul-Wahab y V. Lea. Reviewing fog water collection worldwide and in Oman. *International Journal of Environmental Studies* 65 (3): 487-500, 2008.
- S. Abdul-Wahab, H. Al-Hinai, K. Al-Najar, y M. Al-Kalbani. Fog and rain water collection from trees in the Dhofar Region in the Sultanate of Oman. *The Journal of Engineering Research* 6 (1): 51-58, 2009.
- S. Abdul-Wahab, A. M Al-Damkhi, H. Al-Hinai, K. Al-Najar, y M. Al-Kalbani. Total fog and rainwater collection in the Dhofar region of the Sultanate of Oman during the monsoon season. *Water International* 35 (1): 100-109, 2010.
- H. I. Abualhamayel y P. Gandhidasan. Design and testing of large fog collectors for water harvesting in Asir region, Kingdom of Saudi Arabi. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 116-119.
- A. N. Acosta-Baladón. *Las precipitaciones ocultas y sus aplicaciones a la agricultura*, Ornex (Francia): Agrometeorological Applications Associates, S.A.R.L., 1996.
- C. D. Ahrens. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, Belmont (Estados Unidos): Brooks/Cole, Cengage Learning, 1994.
- C. D. Ahrens. *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*, South Melbourne (Australia): Cengage Learning, 2010.
- G. A. Al-hassan. Fog water collection evaluation in Asir Region–Saudi Arabia. *Water Resources Management* DOI: 10.1007/s11269-009-9410-9, 2009.
- O. R. Al-Jayyousi y M. S. Mohsen. Evaluation of fog collection in Jordan. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* 13 (3): 195-199, 1999.
- S. A. Alesh. Work done on fog and fog collection (moisture capture) in the Sultanate of Oman. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 417-420.
- E Allen. Restoration ecology: limits and possibilities in arid and semiarid lands. En: *Proceedings of the Wildland Shrub and Arid Land Restoration Symposium, Las Vegas*,

- NV*, Octubre 19-21, 1993, Ogden, Utah: Intermountain Research Station Forest Service U.S. Department of Agriculture, 1995, p. 7-15.
- J. H. Apigian. A critical look at the development of fog water collection in Nepal. Nepal Community Development Foundation (NCDF) y Nepal Water for Health (NEWAH). Kathmandu, Nepal: 2005.
- M. Ataroff y M. E. Naranjo. Atmospheric water inputs in a cloud forest fragment in El Cañadón, Andes of Venezuela. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 367-370.
- C. Azorin-Molina. A climatological study of sea breezes in Alicante. Sea breeze fronts over the Iberian Mediterranean area and the isle of Mallorca. Universidad de Alicante. 2007. Tesis.
- C. Azorin-Molina, J. Olcina, E. Moltó, E. Martínez, y B. Zaragoza. Análisis sinóptico objetivo de las precipitaciones torrenciales en el este de la Península Ibérica. editado por M. J. Estrela, CEAM, Colección Interciencias UNED Alzira-Valencia, 2008, p. 57-76.
- C. Azorin-Molina y J. A. Lopez-Bustins. An automated sea breeze selection technique based on regional sea-level pressure difference: WeMOi. *Int.J.Climatol.* 28 (12): 1681-1692, 2008.
- C. Azorin-Molina, A. Sanchez-Lorenzo, y J. Calbo. A climatological study of sea breeze clouds in the Southeast of the Iberian Peninsula (Alicante, Spain). *Atmósfera* 22 (1): 33-49, 2009.
- C. Azorin-Molina y D. Chen. A climatological study of the influence of synoptic-scale flows on sea breeze evolution in the Bay of Alicante (Spain). *Theoretical and Applied Climatology* 96 (3-4): 249-260, 2009.
- C. Azorin-Molina, D. Corell, M. J. Estrela, y J. A. Valiente. Fog water collection under sea breeze conditions in the western Mediterranean basin (Valencia region, Spain). En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 65-68.
- C. Azorin-Molina, S. Tijn, D. Chen, y M. Baldi. A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *Int.J.Climatol.* 31 (3): 468-486, 2011.
- C. Azorin-Molina, S. M. Vicente, T. R. McVicar, S. Jerez, A. Sanchez-Lorenzo, J. I. López-Moreno, J. Revuelto, R. M. Trigo, J. A. Lopez-Bustins, y F. Espirito-Santo. Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-2011. *J.Climate* En prensa, 2014.
- A. Ávila y M. Alarcón. Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain. *Atmospheric Environment* 33 (11): 1663-1677, 1999.
- M. J. Baeza, J. Raventos, A. Escarré, y V. R. Vallejo. Fire Risk and Vegetation Structural Dynamics in Mediterranean Shrubland. *Plant Ecology* 187: 189-201, 2006.
- M. J. Baeza, A. Valdecantos, J. A. Alloza, y V. R. Vallejo. Human disturbance and environmental factors as drivers of long-term post-fire regeneration patterns in Mediterranean forests. *J.Veg.Sci.* 18: 243-252, 2007.

- D. Bainbridge. Alternative irrigation systems for arid land restoration. *Ecological Restoration* 20 (1): 23-30, 2002.
- D. Bajracharya y A. Pokhrel. Implementation method and impact of fog water supply schemes: a case study in the middle hills of Eastern Nepal. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 261-263.
- E Beiderwieden, T Wrzesinsky, y O. Klemm. Chemical characterization of fog and rain water collected at the eastern Andes cordillera. *Hydrology and Earth System Sciences* 9: 185-191, 2005.
- D. O. Blanchard y R. E. Lopez. Variability of the convective field pattern in South Florida, and its relationship to the synoptic flow. En: *NOAA TEch. Memo. ERL ESG-4, Boulder, CO*, 1984, p. 77pp.
- BOE. REAL DECRETO 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. 2003.
- M Calderon, P. Cereceda, H. Larrain, P. Osses, L. Pérez, y M. Ibáñez. Alto Patache fog oasis in the Atacama Desert: Geographical basis for a sustainable development program. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 202-205.
- W. Canto y A. Cruzat. Application of techniques for capturing fog water in the restoration of Fray Jorge Forest, Chile. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 231-234.
- J. N. Cape. Direct damage to vegetation caused by acid rain and polluted cloud: Definition of critical levels for forest trees. *Environmental Pollution* 82 (2): 167-180, 1993.
- J. J. Capel-Molina. *Los climas de España*, Oikus-tau, S.A. Ediciones, 1981.
- J. J. Capel-Molina. *El clima de la península Ibérica*, Barcelona: Ariel, 2000.
- A. Carratalá. Caracterización química de la precipitación en la Comunidad Valenciana: distribución espacial y temporal. Universidad de Alicante. 1993. Tesis.
- V. Carter, R. S. Schemenauer, P. Osses, y H. Streeter. The Atacama Desert fog collection project at Falda Verde, Chile. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 391-394.
- P. Cereceda, R. S. Schemenauer, y M. Suit. An alternative water supply for chilean coastal desert villages. *International Journal of Water Resources Development* 8 (1): 53-59, 1992.
- P. Cereceda y R. S. Schemenauer. Producción de agua de niebla en Perú. *Alisios* 3: 63-74, 1993.

- P. Cereceda, R. S. Schemenauer, y F. Velasquez. Variación temporal de la niebla en El Tofo-Chungungo, Región de Coquimbo, Chile. *Revista de Geográfica Norte Grande* 24: 103-111, 1997.
- P. Cereceda y R. S. Schemenauer. Fogwater collection at El Tofo, Chile and other coastal sites in South America and Arabia. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 409-411.
- P. Cereceda, L. Villegas, P. Osses, y R. S. Schemenauer. Evaluation of the use of fog water for regeneration of arid ecosystems. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 461-463.
- P. Cereceda, P. Osses, H. Larrain, M. Farias, M. Lagos, R. Pinto, y R. S. Schemenauer. Advective, orographic and radiation fog in the Tarapacá region in Chile. *Atmospheric Research* 64 (1-4): 261-271, 2002.
- P. Cereceda. Los atrapanieblas en Chile: avances y desafíos de una tecnología alternativa para el desarrollo rural y combate a la desertificación. Primer seminario chileno sobre eficiencia hídrica. Universidad de las Américas. Santiago de Chile. 30 de Octubre de 2008. 2008.
- C. L. Combs, N. A. Stuart, M. DeMaria, y T. H. Vonder Haar. Wind regime GOES cloud cover composites for the Wakefield, VA county warning area. 11th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Madison, WI. 165-167, 2001.
- Comisión Europea. Plan para salvaguardar los recursos hídricos de Europa. COM(2012) 673 final, 2012. 11-14-2012.
- B. H. Connell, K. J. Gould, y J. F. W. Purdom. High-resolution GOES-8 visible and infrared cloud frequency composites over Northern Florida during the summers 1996-99. *Wea.Forecasting* 16 (6): 713-724, 2001.
- D. Corell. Estudio del agua de niebla en la Comunidad Valenciana: diseño y puesta en marcha de un colector de agua de niebla y análisis de los resultados obtenidos. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia. 2006. CST/GIQUIMA - 10.
- D. Corell, C. Azorin-Molina, M. J. Estrela, J. A. Valiente, F. Sanz, F. Pastor, y S Barceló. Fog water chemistry in the western Mediterranean basin (Valencia region, Spain). En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 69-72.
- D. Corell, J. A. Valiente, M. J. Estrela, F. Garcia, y C. Azorin-Molina. Red de colectores de agua de niebla de la Fundación CEAM. Valencia (España): (II Jornades de Meteorologia i Climatologia de la Mediterrània Occidental. Valencia. 11-12 marzo de 2010), 2010. 03-11-2010.
- D. Corell, M. J. Estrela, y J. A. Valiente. Obtenció d'aigua a partir de la boira en el Montnegre y en d'altres indrets del litoral Mediterrani. *La revista del Montnegre y del Corredor, L'Aulet, número 11, noviembre 2011* 11: 21-25, 2011.

- A. Cruzat. El uso de las nieblas en la recuperación del Parque Nacional Bosque Fray Jorge. En: *Historia Natural del Parque Nacional Bosque Fray Jorge*, editado por F. A. Squeo, J. R. Gutiérrez, y I. R. Hernández, La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena, 2004, p. 281-292.
- J. M. Cuadrat y M. F. Pita. *Climatología*, Madrid (España): Ediciones Cátedra, 1997.
- T. E. Dawson y P. E. Vidiella. Plant-fog interections in California and Chile. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 225-228.
- T. E. Dawson. Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia* 117 (4): 476-485, 1998.
- C. J. de Rautenbach y J. Olivier. An operational "Water from fog" initiative at Lepelfontein along the West Coast of South Africa. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H. Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 243-245.
- T. M. Dessouky y A. F. Jenkinson. An objective daily catalogue of surface pressure, flow and vorticity indices for Egypt and its use in monthly rainfall forecasting. *Synoptic Climatology Branch Memorandum* 46 (Meteorological Office: Bracknell), 1975.
- R. Dominguez Llosa, R. Dausab, F. Herero, C. Cuenca, S. Kooitjie, y J. Gomasab. Atrapar agua de niebla. Estudio de viabilidad para la instalación de redes atraparoras de niebla en el desierto costero de Namibia. Enero 2005-Enero 2007. Fundación Bastos y Fundación de la Comunidad Topnaar. 2007.
- R. R. Draxler y G. D. Rolph. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. 2010.
- L. Dyson. A fog water community project in South Africa. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 287-290.
- F Eckardt y R. S. Schemenauer. Fog water chemistry in the Namib desert, Namibia. *Atmospheric Environment* 32 (14-15): 2595-2599, 1998.
- C. M. Escobar, L. E. Ortiz, R. Ortiz, G. D. Sánchez, y C. Cárdenas. Evaluación del agua aportada por la precipitación horizontal (neblina), como fuente hídrica alternativa para satisfacer las demandas básicas del sector rural en la cuenca alta del río Tuluá. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC, Grupo de Gestión y Apoyo a la Ingeniería Agrícola de Colombia-Gaiacol. Convenio 105 de 2007, 2008.
- C. M. Escobar, A. López, H. F. Aristizabal, y J. M. Molina. Operational fog collection and its role in environmental education and social reintegration: A case study in Colombia. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): Universidad de Münster, 2010, p. 133.

- M. A. Estoque. The Sea Breeze as a Function of the Prevailing Synoptic Situation. *J.Atmos.Sci.* 19 (3): 244-250, 1962.
- M. J. Estrela y M. M. Millán. *Manual práctico de introducción a la meteorología*, Valencia: Fundación CEAM, 1994. 351 páginas.
- M. J. Estrela, M. M. Millán, D. Peñarrocha, y F. Pastor. *De la gota fría al frente de retroceso. Las precipitaciones intensas en la Comunidad Valenciana*, Valencia: Centro Francisco Tomás y Valiente UNED, 2002. 260 páginas.
- M. J. Estrela, J. A. Valiente, D. Corell, y M. M. Millán. Fog collection in a region of the western Mediterranean Basin: evaluation of the use of fog water for the restoration of wildfire burnt areas. The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa. M2, 2004. 2004/CONG/19.
- M. J. Estrela, J. A. Valiente, D. Corell, y D. Fuentes. Collection of fog water for the restoration of degraded forest areas in a western Mediterranean basin region. Preliminary results. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 113-116.
- M. J. Estrela, J. A. Valiente, D. Corell, y M. M. Millán. Fog collection in the western Mediterranean basin (Valencia region, Spain). *Atmospheric Research* 87: 324-337, 2008.
- M. J. Estrela, D. Corell, y J. A. Valiente. La captura de agua de niebla en el abastecimiento de balsas de extinción de incendios forestales. Polop (España): (I Simposio Nacional Sobre Incendios Forestales (SINIF). Polop, Alicante, Spain. 6-7 noviembre de 2008), 2008. 11-06-2008.
- M. J. Estrela, J. A. Valiente, D. Corell, D. Fuentes, y A. Valdecantos. Prospective use of collected fog water in the restoration of degraded burned areas under dry Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (11): 1896-1906, 2009.
- M. J. Estrela, J. A. Valiente, D. Corell, y C. Azorin-Molina. Análisis de la variabilidad espacial de la captación pasiva de agua de niebla en relación a la estacionalidad y a los patrones de viento en una región mediterránea (Comunidad Valenciana). En: *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC) Serie A, n.º. 7. Clima, Ciudad y Ecosistemas*, editado por F. Fernández García, E. Galán, y R. Cañada, Madrid: Asociación Española de Climatología (AEC), 2010,
- W. Eugster. Fog research. *Die Erde* 139 (1-2): 1-10, 2008.
- A. Ezcurra, H. Casado, J. P. Lacaux, y C. Garcia. Relationships between meteorological situations and acid rain in Spanish Basque country. *Atmospheric Environment (1967)* 22 (12): 2779-2786, 1988.
- M. Falciai y A. Giacomini. Recuperación de las lomas del desierto costero peruano-chileno utilizando el agua de las neblinas. En: *Memorias del IV Congreso Latinoamericano de Ecología*, 2000, p. 248-250.
- R. E. Falconer y P. D. Falconer. Determination of cloud water acidity at a mountain observatory in the Adirondack Mountains of New-York State. *Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres* 85 (NC12): 7465-7470, 1980.

- N. Fedorova, V. Levit, y D. Fedorov. Fog and stratus formation on the coast of Brazil. *Atmospheric Research* 87: 268-278, 2008.
- S. Fernández-Montes y F. S. Rodrigo. Trends in seasonal indices of daily temperature extremes in the Iberian Peninsula, 1929-2005. *Int.J.Climatol.* 32 (15): 2320-2332, 2012.
- D. M. Fernández y G. Ruiz. Central California water collection from coastal fog: an initial study. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 221-224.
- Jaroslav Fisak, Miroslav Tesar, y Daniela Fottova. Pollutant Concentrations in the Rime and Fog Water at the Milesovka Observatory. *Water Air Soil Pollution* 196 (1-4): 273-285, 2009.
- D. T. Fischer y C. J. Still. Evaluating patterns of fog water deposition and isotopic composition on the California Channel Islands. *University of California Postprints* 2788, 2007.
- D. T. Fischer, C. J. Still, y A. P. Williams. Significance of summer fog and overcast for droughts stress and ecological functioning of coastal California endemic plant species. *Journal of Biogeography* 36: 783-799, 2009.
- Fog Newsletter. *Fog Newsletter* (Octubre, Issue 2), 1999.
- Fog Newsletter. *Fog Newsletter* (Mayo, Issue 4), 2000.
- FogQuest News. *FogQuest News* (Febrero, Issue 9), 2003.
- FogQuest News. *FogQuest News* (Octubre, Issue 21), 2007.
- I. Font Tullot. *Climatología de España y Portugal*, Instituto Nacional de Meteorología, 1983.
- D. Fuentes, A. Valdecantos, J. Baeza, J. A. Valiente, D. Corell, y M. J. Estrela. Aportes hidrológicos por agua de niebla en repoblaciones forestales. Úbeda (España): (Libro de resúmenes. IX Congreso de la Asociación Española de Ecología Terrestre. La dimensión ecológica del desarrollo sostenible: Ecología, del conocimiento a la aplicación. Úbeda (España)), 2009. 10-22-2009.
- G. Gabriel y L. Jauze. Fog water interception by *Sophora denudata* trees in a Reunion upper-montane forest, Indian Ocean. *Atmospheric Research* 87: 338-351, 2008.
- E. Gallicchio. Informe final: Identificación de proyecto de desarrollo regional-local para la zona de Chungungo, La Higuera, Chile. The International Development Research Centre, Canada. 2003.
- P. Gandhidasan y H. I. Abualhamayel. Fog collection as a source of fresh water supply in the Kingdom of Saudi Arabia. *Water and Environment Journal* 21 (1): 19-25, 2007.
- P. Gandhidasan y H. I. Abualhamayel. Exploring fog water harvesting potential and quality in the Asir region, Kingdom of Saudi Arabia. *Pure Appl. Geophys.* 169 (5-6): 1019-1036, 2012.

- C. Garcia, J. C. Peña, G. Martí, P. Oller, y P. Martínez. WeMOI and NAOi influence on major avalanche activity in the Eastern Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology* 64 (2): 137-145, 2010.
- A. L. García y M. C. Arango. Evaluation and quantification of the hydrological potential of the fog at the Ipuana's Hill, Guajira Desert, Colombia, South America. En: *The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa*, 2004, p. A3.
- J. L. García, R. S. Schemenauer, M. Rosato, y P. Cereceda. Guatemala fog collection project, 2004. En: *The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa*, 2004, p. N1.
- T. Gherezghiher. Progress project report for fog harvest 2007. The Munich Re Foundation. 2007.
- T. Gherezghiher. Fog Collection Pilot Project (FCPP) in the Eastern Escarpments of Eritrea. Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 252.
- A. Gil Olcina y J. Olcina Cantos. *Climatología general*, Barcelona (España): Editorial Ariel, S.A., 1997.
- J. C. Gonzalez-Hidalgo, J. A. Lopez-Bustins, P. Stepanek, J. Martin-Vide, y M. De Luís. Monthly precipitation trends on the Mediterranean fringe of the Iberian Peninsula during the second-half of the twentieth century (1951-2000). *Int.J.Climatol.* 29 (10): 1415-1429, 2009.
- J. Goodman. The collection of fog-drip. *Water Resources Research* 21 (3): 392-394, 1985.
- J. Goodman. Fog drip collection in coastal central California. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer and H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 401-404.
- C. Goodness. The construction of daily rainfall scenarios for Mediterranean sites using a circulation type approach to downscaling. Universidad de Anglia del Este. 2000. Tesis.
- K. J. Gould y H. E. Fuelberg. The Use of Goes-8 Imagery and RAMSDIS to Develop a Sea Breeze Climatology Over the Florida Panhandle. 8th Conference on satellite meteorology and oceanography. American Meteorological Society. Atlanta, GA, USA: 100-104, 1996.
- M. Grimalt, M. Tomás, G. Alomar, J. Martín-Vide, y M. C. Moreno-García. Determination of the Jenkinson and Collison's weather types for the western Mediterranean basin over the 1948-2009 period. Temporal analysis. *Atmosfera* 26 (1): 75-94, 2013.
- J. Grunow. Nebelniederschlag [Precipitación oculta, en alemán]. *Ber.Deutsch.Wetterd.U.S.Zone* 42: 30-34, 1952.
- J. Grunow. The Productiveness of Fog Precipitation in Relation to the Cloud Droplet Spectrum. En: *Physics of Precipitation: Proceedings of the Cloud Physics Conference, Woods Hole, Massachusetts, June 3GÇô5, 1959*, American Geophysical Union, 1960, p. 110-117.
- B. Henderson y D. Falk. Fog water collection in Ecuador: an appropriate technology for the rural poor? En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog*

- Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 281-284.
- T. Hernando-Olmo y R. Gil-Casanova. Evaluación del potencial de captación de niebla mediante sistemas tridimensionales durante el período invernal 2011/2012. *Montes: revista de ámbito forestal* 111: 30-38, 2012.
- S. Holets y R. N. Swanson. High-Inversion Fog Episodes in Central California. *J.Appl.Meteor.* 20 (8): 890-899, 1981.
- E. E. Houssos, C. J. Lolis, y A. Bartzokas. The main characteristics of atmospheric circulation associated with fog in Greece. *Natural Hazards and Earth System Science* 9 (6): 1857-1869, 2009.
- E. E. Houssos, C. J. Lolis, A. Gkikas, N. Hatzianastassiou, y A. Bartzokas. On the atmospheric circulation characteristics associated with fog in Ioannina, north-western Greece. *Int.J.Climatol.* 32 (12): 1847-1862, 2012.
- S. A. Hsu. *Coastal meteorology*, San Diego (USA): Academic Press Inc., 1988.
- R. Huth. Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST733 collection: First results. *Physics and Chemistry of the Earth* 35 (9-12): 388-394, 2010.
- IPCC. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. En: *IPCC, 2007: Summary for Policymakers. En: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2007, p. 7-22.
- A. F. Jenkinson y B. P. Collison. *An initial climatology of gales over the North Sea*, Synoptic Climatology Branch Memorandum No. 62, Meteorological Office, Bracknell., 1977.
- P. Jiménez, G. Calamini, G. Franceschetti, P. Cereceda, y H. Puig. Fog as a new water resource for the sustainable development of the ecosystem of the Peruvian and Chilean coastal desert. European Community Directorate General XII. Contract N° TS3 CT94 0324 Final report 1995-1999, 2000.
- J. A. Johnstone y T. E. Dawson. Climatic context and ecological implications of summer fog decline in the coast redwood region. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010.
- P. D. Jones, T. Jonsson, y D. Wheeler. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *Int.J.Climatol.* 17 (13): 1433-1450, 1997.
- O. Jorba. Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas. Universidad Politécnica de Cataluña. 2005. 03-2005. Tesis.
- J. O. Juvik, D. Nullet, P. Banko, y K. Hughes. Forest climatology near the tree line in Hawai'i. *Agricultural and Forest Meteorology* 66 (3-4): 159-172, 1993.

- J. O. Juvik y D. Nullet. A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions - Comment. *J.Appl.Meteor.* 34 (9): 2108-2110, 1995.
- J. O. Juvik, J. Delay, y L. Tango. Climatological and hydrological field monitoring. En: *Biodiversity Assessment of Tropical Island Ecosystems: PABITRA Manual for Interactive Ecology and Management*, editado por D. Mueller-Dombois, K. W. Bridges, y C. Daehler, Honolulu (Estados Unidos): 2005, p. 71-88.
- E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne, y Dennis Joseph. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull.Amer.Meteor.Soc.* 77 (3): 437-471, 1996.
- O. Klemm, R. S. Schemenauer, A. Lummerich, P. Cereceda, M. V. Marzol, D. Corell, J. van Heerden, D. Reinhard, T. Gherezghiher, J. Olivier, P. Osses, J. Sarsour, E. Frost, M. J. Estrela, J. A. Valiente, y G. M. Fessehaye. Fog as a Fresh-Water Resource: Overview and Perspectives. *Ambio* 41 (3): 221-234, 2012.
- H. H. Lamb. Types and spells of weather around the year in the British Isles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 76: 393-438, 1950.
- H. H. Lamb. *British Isles weather types and a register of the daily sequences of circulation patterns, 1861-1971*, Londres: 1972.
- C. A. Lange, J. Matschullat, F. Zimmermann, G. Sterzik, y O. Wienhaus. Fog frequency and chemical composition of fog water-a relevant contribution to atmospheric deposition in the eastern Erzgebirge, Germany. *Atmospheric Environment* 37 (26): 3731-3739, 2003.
- H. Larrain, F. Velbsquez, P. Cereceda, R. Espejo, R. Pinto, P. Osses, y R. S. Schemenauer. Fog measurements at the site "Falda Verde" north of Chañaral compared with other fog stations of Chile. *Atmospheric Research* 64 (1-4): 273-284, 2002.
- A. Lines. *Perturbaciones típicas que afectan a la península Ibérica y precipitaciones asociadas*, Instituto Nacional de Meteorología, 1981.
- J. Llop y G. Alomar. Clasificación sinóptica automática de Jenkinson y Collison para los días de precipitación mayor o igual a 100 mm en la franja litoral catalana e Islas Baleares. 8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología. Cambio climático. Extremos e impactos. Salamanca, 25-28 septiembre de 2012. Salamanca: 449-458, 2012. 09-25-2012.
- J. A. Lopez-Bustins, J. Martín-Vide, M. C. Moreno-García, y J. Raso. Urban heat island intensity in Barcelona and the Western Mediterranean Oscillation. Preprints Sixth International Conference on Urban Climate, Universidad de Göteborg, Suecia. 830-833, 2006.
- C. Louw, J. van Heerden, y J. Olivier. The South African fog-water collection experiment: Meteorological features associated with water collection along the Eastern escarpment of South Africa. *Water SA* 24 (4): 269-280, 1998.
- J. E. Lovich y D. Bainbridge. Anthropogenic degradation of the southern California desert ecosystem and prospects for natural recovery and restoration. *Environmental Management* 24 (3): 309-326, 1999.

- A. Lummerich y K. Tiedemann. Fog farming: linking sustainable land management with ecological renaturation in arid areas by means of reforestation. Conference on International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development. Universidad de Hamburgo, del 6-8 de octubre de 2009. 2009. 10-2009.
- K. I. A. Mac Quarrie, A. Pokhrel, Y. Shrestha, P. Osses, R. S. Schemenauer, F. Vitez, K. Kowalchuk, y R. Taylor. Results from a high elevation fog water supply project in Nepal. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 227-229.
- O. Makuti, J. R. Henschel, H. Kolb, V. P. Mtuleni, V. Siteketa, y E. S. Shanyengana. Testing fog collectors in the Namib Desert. En: *The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa, 2004*, p. H9.
- J. Martín-Vide y D. Fernández-Belmonte. El índice NAO y la precipitación mensual en la España peninsular. *Investigaciones Geográficas* 26: 41-58, 2001.
- J. Martín-Vide y J. A. Lopez-Bustins. The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int.J.Climatol.* 26 (11): 1455-1475, 2006.
- J. Martín-Vide. *Mapas de tiempo: fundamentos, interpretación e imágenes de satélite*, Barcelona: Oikos-tau, 1991.
- J. Martín-Vide. *Fundamentos de climatología analítica*, Madrid (España): Editorial Síntesis, S.A., 1999. 113 páginas.
- J. Martín-Vide y J. Olcina Cantos. *Climas y tiempos de España*, Madrid: Alianza Editorial, S.A., 2001.
- J. Martín-Vide. Limitations of an objective weather-typing system for the Iberian peninsula. *Weather* 56 (7): 248-250, 2001.
- J. Martín-Vide. Aplicación de la clasificación sinóptica automática de Jenkinson y Collison a días de precipitación torrencial en el este de España. En: *La información climática como herramienta de gestión ambiental*, editado por J. M. Cuadrat, S. M. Vicente, y M. A. Saz, Zaragoza: 2002, p. 123-127.
- M. V. Marzol y P. Valladares. Evaluation of fog water collection in Anaga (Tenerife, Canary Islands). En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 449-452.
- M. V. Marzol. Fog: Drinking water for rural zones. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 247-250.
- M. V. Marzol. Fog water collection in a rural park in the Canary Islands (Spain). *Atmospheric Research* 64: 239-250, 2002.

- M. V. Marzol y G. García-Santos. Time variations of fog during summer in the Canary Islands. The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa. H3, 2004.
- M. V. Marzol. *La captación del agua de niebla en la isla de Tenerife*, Tenerife, Canarias: Caja General de Ahorros de Canarias, 2005.
- M. V. Marzol, A. Alaeddine, J. Sánchez-Megía, y A. Derhem. Evaluation of fog collection in Ifni, Morocco. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 387-390.
- M. V. Marzol y J. Sánchez-Megía. La implementación de un sistema de obtención de agua de niebla para el desarrollo sostenible en Ifni (Marruecos). (póster). VI Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua. 2008.
- M. V. Marzol y J. Sánchez-Megía. Fog water harvesting in Ifni, Morocco. An assessment of potential and demand. *Die Erde* 139 (Special Issue: fog research) (1-2): 97-119, 2008.
- M. V. Marzol y J. Sánchez-Megía. El potencial hídrico de los *stratocumulus* subtropicales. El caso de Canarias y Marruecos. 2008.
- M. V. Marzol, J. Sánchez-Megía, A. Yanes, A. Derhem, y J. Bargach. Meteorological Patterns and fog water in Morocco and the Canary Islands. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 56-59.
- M. V. Marzol, J. Sánchez-Megía, y A. Yanes. Meteorological patterns and fog water collection in Morocco and the Canary Islands. *Erdkunde* 65 (3): 291-303, 2011.
- M. B. Meyer y G. Garland Lala. Climatological Aspects of Radiation Fog Occurrence at Albany, New York. *J.Climate* 3 (5): 577-586, 1990.
- M. Mileta. Fog precipitation on mountains in Croacia. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 413-416.
- M. Mileta. Fog water collection at the Mountain Velebit near the Adriatic Sea. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H. Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 265-268.
- M. Mileta. Results from fog water collection on Mt Velebit in Croatia. En: *The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa*, 2004, p. H4.
- M. Mileta. Seven years of fog measurements with SFC in Croatia. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 29-32.
- M. Mileta y T. Likso. Fog water collection with SFC on the mountain Velebit (Croatia) during the period 2000-2009. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog*,

- Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 240-242.
- M. M. Millán. Sustainable development, water resources and global change in the Mediterranean Basin. Conferencia Mediterránea del Agua. Del 21 al 24 de mayo. Valencia, España. 1997. 05-21-1997.
- M. M. Millán, M. J. Estrela, y V. R. Vallejo. Evaluation of the hidrological inputs in the Mediterranean basin. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 281-284.
- M. M. Millán, M. J. Estrela, y J. Miró. Rainfall components: variability and spatial distribution in a mediterranean area (Valencia region). *J.Climate* 18: 2682-2705, 2005.
- J. M. Molina y C. M. Escobar. La neblina como fuente de agua: evaluación de su colección en el sur de los Andes colombianos usando mallas de polipropileno. *Revista Avances En Recursos Hídricos (Universidad Nacional de Colombia)* 12: 33-41, 2005.
- J. M. Molina. Spatial and temporal variability of fog water collection in a mountainous zone of Southern Colombia. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 101-104.
- J. M. Molina y C. M. Escobar. Fog collection variability in the Andean mountain range of Southern Colombia. *Die Erde* 139 (Special Issue: fog research) (1-2): 127-140, 2008.
- M. Mousavi-baygi. The implementation of fog water collection systems in Northeast of Iran. *International Journal of Pure and Applied Physics* 4 (1): 13-21, 2008.
- V. P. Mtuleni, J. R. Henschel, y M. K. Seely. Evaluation of fog-harvesting potential in Namibia. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 179-182.
- S. Muhlbauer, A. C. Costa, y M. Caetano. The influence of north atlantic oscillation on local drought occurrences in the iberian peninsula using the vegetation temperature condition index. 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference and EXPO, SGEM 2013; Albena; Bulgaria; 16-22 Junio 2013. 2: 903-912, 2013.
- M. Mundo-Molina, P. Martínez-Austria, A. Figueroa-Gallegos, J. J. Muciño-Porras, y R. Ballinas-Avendaño. Fog collection as a water source for small rural communities in Chiapas Mexico. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 405-408.
- E. Nadal-Romero, N. Cortesi, y J. C. Gonzalez-Hidalgo. Weather types, runoff and sediment yield in a Mediterranean mountain landscape. *Earth Surface Processes and Landforms* 39 (4): 427-437, 2014.

- A. A. Nomanan. Investigation of the potential of fogwater harvesting in the western mountainous parts of Yemen. *Arab gulf journal of scientific research* 25 (1-2): 50-58, 2007.
- J. Olivier. A high elevation fog water collection experiment in South Africa. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 441-443.
- J. Olivier. A prototype fog water collection system in Northern Province of South Africa. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H. Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 239-242.
- J. Olivier y C. J. de Rautenbach. The implementation of fog water collection systems in South Africa. *Atmospheric Research* 64 (1-4): 227-238, 2002.
- J. Olivier. Fog-water harvesting along the west coast of South Africa: a feasibility study. *Water SA* 28 (4): 349-360, 2002.
- J. Olivier. Fog harvesting: An alternative source of water supply on the West Coast of South Africa. *GeoJournal* 61 (2): 203-214, 2004.
- J. Olivier y H. Rautenbach. Local-scale impacts on fog water harvesting potential at Kleinzee, South Africa. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 395-398.
- Organización Meteorológica Mundial. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-Nº 8*, Genova (Suiza): Secretariado de la Organización Meteorológica Mundial, 1996.
- A. Ortega, C. Talavera, P. Jiménez, y L. Villegas. The use of fog water in the ecosystems restoration in arid zones: Lomas of Atiquipa. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 241-244.
- P. Osses, R. S. Schemenauer, P. Cereceda, y H. Larrain. Los atrapanieblas del Santuario del Padre Hurtado y sus proyecciones en el combate a la desertificación. *Revista Norte Grande de Geografía* 27: 61-67, 2000.
- P. Osses, R. S. Schemenauer, y M. Leibbrand. Fog collection evaluation in the Sadaa Governorate, Yemen. En: *The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa, 2004*, p. M1.
- J. Palutikof. Analysis of Mediterranean Climate Data: Measured and Modelled. En: *Mediterranean Climate*, editado por Hans Jürgen Bolle, Springer Berlin Heidelberg, 2003, p. 125-132.
- A. Philipp, J. Bartholy, C. Beck, M. Erpicum, P. Esteban, X. Fettweis, R. Huth, P. James, S. Jourdain, F. Kreienkamp, T. Krennert, S. Lykoudis, S. C. Michalides, K. Pianko-Kluczynska, P. Post, D. R. Álvarez, R. Schiemann, A. Spekat, y F. S. Tymvios. Cost733cat - A database of weather and circulation type classifications. *Physics and Chemistry of the Earth* 35 (9-12): 360-373, 2010.

- A. Philipp, C. Beck, R. Huth, y J. Jacobeit. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int.J.Climatol.*, 2014.
- A. Pokhrel y K. I. A. Mac Quarrie. Climatology of Hindu Kush-Himalayas. Potential for fog water collection. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 257-259.
- A. G. Ponette-González, K. C. Weathers, y L. M Curran. Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology* DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01985.x: 1-18, 2009.
- S. Prada, M. Oliveira da Silva, C. Figueira, M. Menezes de Sequeira, y A. Pontes. Fog water collection in Madeira Island (Portugal). En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 277-280.
- S. Prada, M. Menezes de Sequeira, C. Figueira, y M. O. da Silva. Fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal). *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (6-7): 1179-1187, 2009.
- C. Ramis, V. Homar, A. Amengual, R. Romero, y S. Alonso. Daily precipitation records over mainland Spain and the Balearic Islands. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (10): 2483-2491, 2013.
- A. M. Ramos, A. C. Pires, P. M. Sousa, y R. M. Trigo. The use of circulation weather types to predict upwelling activity along the western Iberian Peninsula coast. *Continental Shelf Research* 69: 38-51, 2013.
- D. Rasilla, J. C. García, y C. Garmendia. Los temporales de viento: propuesta metodológica para el análisis de un fenómeno infravalorado. En: *La información climática como herramienta de gestión ambiental: bases de datos y tratamiento de series climatológicas. Reunión Nacional de Climatología*, editado por J. M. Cuadrat, S. M. Vicente-Serrano, y M. A. Saz, Albarracín, España: Universidad de Zaragoza, 2002, 2002, p. 129-136.
- J. Revuelto, J. I. López, E. Morán, S. Fassnacht, y S. M. Vicente. Variabilidad interanual del manto de nieve en el pirineo: tendencias observadas y su relación con índices de teleconexión durante el periodo 1985-2011. 8º Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología. Cambio climático. Extremos e impactos. Salamanca, 25-28 septiembre 2012. 2012.
- F. Rey. La captación de agua de niebla en el macizo del Montseny, Catalunya. En: *Clima y agua: la gestión de un recurso climático*, editado por M. V. Marzol, P. Dorta, y P. Valladares, Tabapress, 1996, 1996, p. 351-354.
- R. Rollenbech, J. Bendix, y P. Fabian. Fog precipitation with no limits: long term observation in the Andes depression of Loja in south Ecuador. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 13-16.

- G. D. Rolph. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://ready.arl.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. 2010.
- R. L. Román. Obtención de agua potable por métodos no tradicionales. Obtención de agua a partir de las Camanchacas. *Ciencia al Día Internacional* 2 (2): 1-13, 1999.
- M. Rosato, F. Rojas, y R. S. Schemenauer. Not just beneficiaries: fostering participation and local management capacity in the Tojquia fog-collection project, Guatemala. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 248-251.
- M. Rosato, R. S. Schemenauer, y A. Roldán. Fostering success: Lessons from the Tojquia fog collection project. En: *Proceeding of 6th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 19-24 mayo 2013*, Yokohama, Japón: 2013, p. 21
- A. A. Sabino. Fog water collection in Cape Verde Islands: an alternative source of water for agriculture and domestic use. En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 445-448.
- A. A. Sabino y J. Moreno. Potential regions for fog water collection in Cape Verde. The Monte Verde. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H. Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 269-272.
- A. A. Sabino. Experiments conducted in Cape Verde. Constraints on fog collection development projects. The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa. A2, 2004. 2004/CONG/19.
- A. A. Sabino. Fog collection in the Natural Park of Serra Malagueta. An alternative source of water for the communities. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 425-428.
- L. M Santana-Pérez. La precipitación de niebla en la provincia de Santa Cruz de Tenerife. Cabildo de Tenerife. Área de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. 1987.
- J. Sarsour, T Stegmaier, M. Linke, y H. Planck. Bionic development of textile materials for harvesting water from fog. En: *Proceedings of Fifth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. Münster, Alemania. 25-30 de julio de 2010*, Münster (Alemania): Universidad de Münster, 2010, p. 88.
- R. S. Schemenauer, H. Fuenzalida, y P. Cereceda. A neglected water resource: the Camanchaca of South America. *Bulletin American Meteorological Society* 69 (2): 138-147, 1988.
- R. S. Schemenauer y P. Cereceda. Fog-water collection in arid coastal locations. *Ambio* 20 (7): 303-308, 1991.
- R. S. Schemenauer y P. Cereceda. The quality of fog water collected for domestic and agricultural use in Chile. *Journal of Applied Meteorology* 31 (3): 275-290, 1992.

- R. S. Schemenauer. Monsoon cloudwater chemistry on the Arabian Peninsula. *Atmospheric Environment* 26A (9): 1583-1587, 1992.
- R. S. Schemenauer y P. Cereceda. Meteorological conditions at a coastal fog collection site in Peru. *Atmósfera* 6 (003): 175-188, 1993.
- R. S. Schemenauer y P. Cereceda. A proposed standard fog collection for use in high elevations regions. *J.Appl.Meteor.* 33 (11): 1313-1322, 1994.
- R. S. Schemenauer y P. Cereceda. Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum* 18 (2): 91-100, 1994.
- R. S. Schemenauer, C. M. Banic, y N. Urquizo. High elevation fog and precipitation chemistry in southern Quebec, Canada. *Atmospheric Environment* 29 (17): 2235-2252, 1995.
- R. S. Schemenauer y P. Cereceda. The Role of Canadian Institutions in the Development of the Fog Collection Technology Currently Being Used in Arid Regions of the World. 8th Biennial Jerusalem Conference in Canadian Studies of the Israel Association for Canadian Studies and the Halbert Centre for Canadian Studies, Jerusalem, Israel, 25-29 June 2000. 2000.
- R. S. Schemenauer, P. Osses, F. Lara, C. Zywina, y P. Cereceda. Fog collection in the Dominican Republic. En: *Proceedings of Second International Conference on Fog and Fog Collection. St. John's, Canada. July 15-20, 2001*, editado por R. S. Schemenauer y H Puxbaum, International Development Research Centre (IDRC), 2001, p. 235-238.
- R. S. Schemenauer, P. Osses, y M. Leibbrand. Fog collection evaluation and operational projects in the Hajja Governorate, Yemen. En: *The Third International Conference on Fog, Fog Collection and Dew. 11-15 October. Cape Town, South Africa, 2004*, p. N2.
- R. S. Schemenauer, M. Rosato, y V. Carter. Fog collection projects in Tojquia and La Ventosa, Guatemala. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 383-386.
- R. S. Schemenauer. Fog: a sustainable source of water for people, forest and afforestation. Expoagua Zaragoza 2008 S.A. 2008.
- R. Semenzato, M. Falciai, y E. Bresci. The project "Fog as a new water resource for the sustainable development of the ecosystems of the Peruvian and Chilean coastal desert". En: *Proceedings of the First International Conference on Fog and Fog Collection. Vancouver, Canada. July 19-24, 1998*, editado por R. S. Schemenauer y H. Bridgman, Ottawa, Canada: International Development Research Centre (IDRC), 1998, p. 457-460.
- E. S. Shanyengana, J. R. Henschel, M. K. Seely, y R. D. Sanderson. Exploring fog as a supplementary water source in Namibia. *Atmospheric Research* 64 (1-4): 251-259, 2002.
- E. S. Shanyengana, R. D. Sanderson, M. K. Seely, y R. S. Schemenauer. Testing greenhouse shade nets in collection of fog for water supply. *Journal of water supply: research and technology.AQUA* 52: 237-241, 2003.

- C. Soriano, A. Fernández, y J. Martín-Vide. Objective synoptic classification combined with high resolution meteorological models for wind mesoscale studies. *Meteorology and Atmospheric Physics* 91 (1-4): 165-181, 2006.
- G. Spellman. The application of an objective weather-typing system to the Iberian peninsula. *Weather* 55 (10): 375-385, 2000.
- E Strater, A Westbeld, y O. Klemm. Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile. *Environmental Science And Pollution Research* 17 (9): 1563-1573, 2010.
- S. Tarawneh. Fog water harvesting five sites south of Mazar-Karak (1992-1994) Jordan. *Alexandria Engineering Journal* 43 (1): 55-65, 2004.
- K. Tiedemann y A. Lummerich. The fog catchers. Bayern. The magazine 2/2007: 64-69, 2007.
- K. Tiedemann y A. Lummerich. Fog harvesting on the verge of economic competitiveness. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): Universidad de Münster, 2010, p. 192.
- K. E. Trenberth y D. A. Paolino Jr. The Northern Hemisphere sea-level pressure data set: trends, errors and discontinuities. *Monthly Weather Review* 108 (7): 855-872, 1980.
- M. N. Tsimplis y A. G. P. Shaw. Seasonal sea level extremes in the Mediterranean Sea and at the Atlantic European coasts. *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (7): 1457-1475, 2010.
- A. Valdecantos, M. J. Baeza, y V. R. Vallejo. Vegetation management for promoting ecosystem resilience in fire-prone Mediterranean shrublands. *Restoration Ecology* 17: 414-421, 2009.
- J. A. Valiente, M. J. Estrela, y D. Corell. A fog collection network in the Valencia Region (Western Mediterranean Basin). En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 399-402.
- J. A. Valiente, M. J. Estrela, D. Corell, D. Fuentes, y A. Valdecantos. Fog water collection and reforestation on mountain locations in a western Mediterranean basin region. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 52-55.
- J. A. Valiente, M. J. Estrela, D. Corell, D. Fuentes, y A. Valdecantos. Fog water collection and reforestation at a mountain location in a western Mediterranean basin region: air-mass origins and synoptic analysis. *Erdkunde* 65 (3): 277-290, 2011.
- V. R. Vallejo, I. Serrasolses, J. Cortina, J. P. Seva, A. Valdecantos, y A. Vilagrosa. Restoration strategies and actions in Mediterranean degraded lands. En: *In Desertification in Europe: Mitigation strategies, land-use planning*, editado por G. Enne y C. Zanolla, Luxembourg: Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000, p. 221-233.
- J. van Heerden, J. Olivier, y L Van Schalkwyk. Fog water systems in South Africa: An update. En: *Proceeding of 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew 25-30 julio 2010*, Münster (Alemania): University of Münster, 2010, p. 160.

- L. van Schalkwyk. Fog forecasting at Cape Town Internacional Airport: A climatological approach. Universidad de Petroria (Sudáfrica). 2011. Tesis.
- L. van Schalkwyk y L. Dyson. Climatological Characteristics of Fog at Cape Town Internacional Airport. *Wea.Forecasting* 28 (3): 631-646, 2013.
- S. M. Vicente-Serrano. Evolución espacio-temporal de las sequías en el sector central del valle del Ebro: causas y consecuencias ambientales. Universidad de Zaragoza. 2004. Tesis.
- S. M. Vicente-Serrano y J. I. López. The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in Northeast Spain. *Int.J.Climatol.* 26 (11): 1427-1453, 2006.
- S. M. Vicente-Serrano y R. M. Trigo. *Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region*, New York: Springer, 2011.
- M. Viedma-Muñoz. Análisis de las direcciones de los vientos en Andalucía. *Nimbus* 1: 153-168, 1998.
- L. Villegas, P. Jiménez, C. Talavera, y A. Ortega. Evaluation of fog water catchment in Atiquipa Lomas (Arequipa-Peru) from 2002 to 2006. En: *Proceedings of the Fourth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, editado por A. Biggs y P. Cereceda, Atacama Desert Center. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007, p. 225-227.
- G. Vince. Out of the mist. *Science* 330 (6005): 750-751, 2013.

