



CONTRIBUCIÓN DE LA RED DE LIDARES EARLINET A LA INFRAESTRUCTURA EUROPEA DE INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA ACTRIS (AEROSOLS, CLOUDS, AND TRACE GASES INFRASTRUCTURE NETWORK)

Adolfo Comerón^{1*}, Michaël Sicard^{1,2}, Francesc Rocadenbosch^{1,2}

¹*RSLab, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña*

²*Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (IEEC) / Centro de Investigación Aeroespacial (CRAE), Universidad Politécnica de Catalunya*

1 Lidares de aerosoles

El acrónimo lidar, del inglés **light detection and ranging**, designa a los instrumentos que emplean radiación electromagnética a frecuencias ópticas, es decir, luz, para detectar objetos y determinar la distancia a la que se encuentran del instrumento. Se trata, pues de radares que utilizan luz en vez de radiación de microondas. Las ondas electromagnéticas a frecuencias ópticas presentan en general una fuerte interacción con los constituyentes de la atmósfera. En un lidar se utiliza un láser como emisor de luz, generalmente emitida en forma de pulsos muy cortos. Los lidares atmosféricos utilizan la luz del láser retornada por la atmósfera para obtener información sobre el estado de ésta. En este caso, el “objeto” es distribuido, pues cada sección de la atmósfera dispersa parte de la luz que le llega cuando el pulso de luz pasa por ella. Parte de la luz es dispersada hacia el instrumento (retrodispersada), donde es recogida por un telescopio, y convertida en una señal eléctrica por un fotorreceptor. A su vez, la señal eléctrica es muestreada y almacenada para su posterior análisis, del que se infieren las propiedades de la atmósfera para cuya determinación el lidar haya sido diseñado. Como se conoce la velocidad de la luz, el momento en que se adquiere la salida del fotorreceptor puede relacionarse con la distancia de la sección atmosférica que dio lugar a la señal. La figura 1 muestra el esquema típico de un lidar [1].

Entre otras aplicaciones, los lidares se emplean, por ejemplo, para obtener información sobre la distribución vertical de los aerosoles atmosféricos. Los aerosoles atmosféricos, partículas en suspensión en la atmósfera de origen natural o antropogénico, influyen en el balance radiativo global mediante sus propiedades de dispersión y absorción y afectan a la meteorología y a la calidad del aire. Los lidares de aerosoles detectan, con resolución en distancia, la radiación retrodispersada por las partículas en suspensión en la atmósfera. Los más sencillos, con una sola longitud de onda en emisión y recepción, permiten determinar las estratificaciones de los aerosoles, lo cual proporciona de por sí información interesante desde el punto de vista meteorológico; dando por buenas ciertas hipótesis, también permiten determinar los coeficientes de retrodispersión y de extinción de los aerosoles, que son utilizables en los modelos de transferencia radiativa empleados para calcular el balance radiativo del sistema tierra-atmósfera. Como en la forma de la señal lidar recibida aparecen combinados los coeficientes de retrodispersión y extinción, las hipótesis efectuadas para discriminarlos implican un conocimiento a priori de la relación entre ambos, lo cual es una limitación de los sistemas de una única longitud de onda en recepción.

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

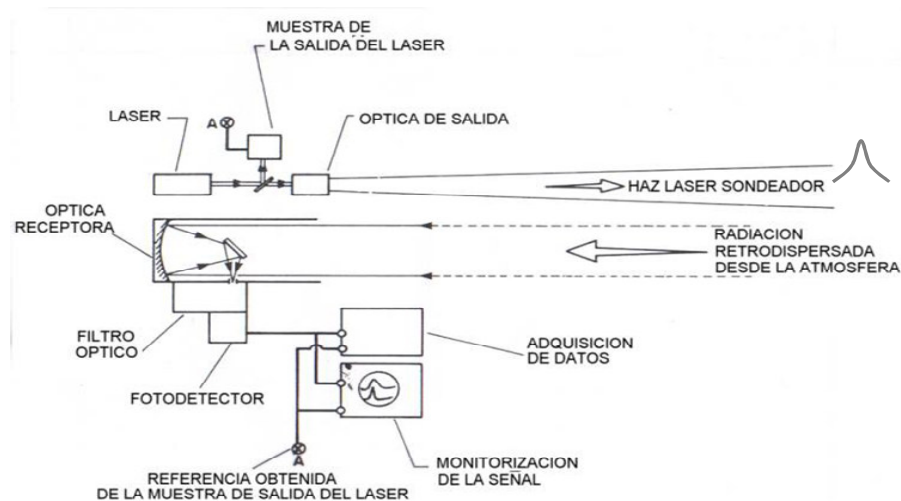


Fig. 1. Estructura básica de un lidar (figura adaptada de la referencia 1)

La figura 2 muestra la información proporcionada por la señal corregida en distancia (la señal de salida del fotorreceptor multiplicada por el cuadrado de la distancia de la que procede, en la escala de color en la figura) de un lidar de una sola longitud de onda (1064 nm en este caso) en función de la altura y el tiempo en el inicio de una irrupción de polvo sahariano sobre Barcelona. Se distinguen claramente las estratificaciones del polvo y la aparición de una gran masa que se extiende desde unos 1500 m hasta unos 3000 m entre las 14:00 UTC y las 18:00 UTC aproximadamente.

En sistemas más avanzados se incluyen los llamados canales Raman que, además de la radiación a la longitud de onda emitida por el láser, reciben la radiación retrodispersada por una especie atmosférica abundante, por ejemplo el nitrógeno, desviada en longitud de onda respecto de la de emisión por efecto Raman. Dado que la proporción de nitrógeno en la atmósfera es uniforme en toda la tierra y que su concentración puede conocerse muy bien, esta señal Raman sirve como “marcador”, pues su ley de decrecimiento en función de la altura, ligada al decrecimiento de la concentración de moléculas, puede conocerse asimismo muy bien en una atmósfera puramente molecular.

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

Adolfo Comerón, Michaël Sicard, Francesc Rocabenbosch UPC/IEEC

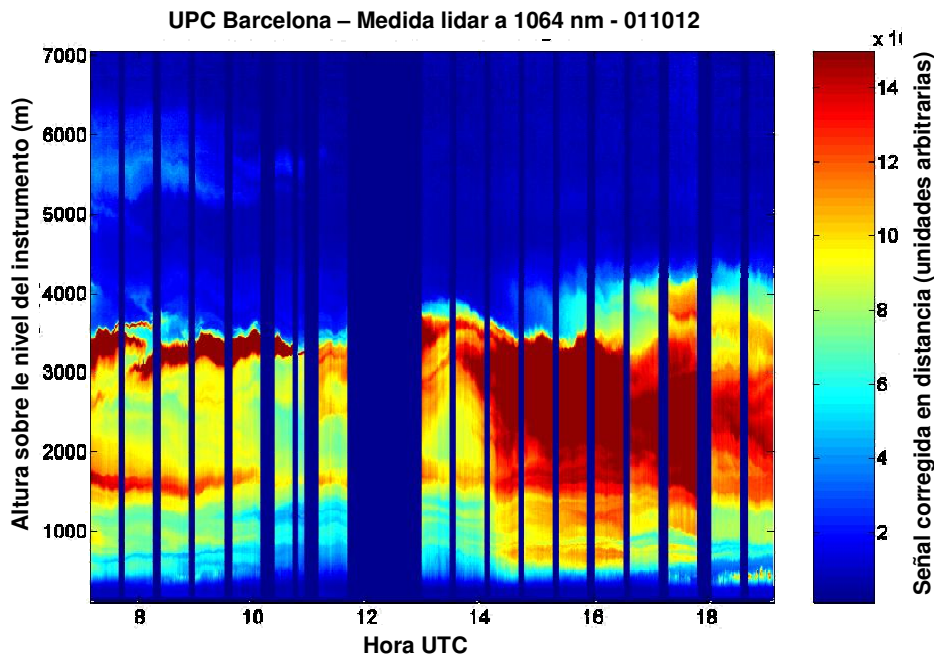


Fig. 2. Señal corregida en distancia en función del tiempo y de la altura medida por un lidar a la longitud de onda de 1064 nm al principio de una irrupción de polvo sahariano.

Las desviaciones respecto de esta ley en la señal Raman realmente medida se pueden relacionar fácilmente con la extinción producida por los aerosoles. Así pues, estos sistemas que combinan canales de recepción elásticos (a la longitud de onda de emisión) y canales Raman (algo desplazados respecto de la longitud de onda de emisión), permiten determinar simultáneamente sin hipótesis a priori los coeficientes de extinción y de retrodispersión de los aerosoles, lo cual, a su vez, proporciona cierta información sobre el tipo de aerosol que se está midiendo, pues el cociente entre el coeficiente de extinción y el de retrodispersión, llamado relación lidar, depende de la composición de las partículas. La figura 3 corresponde a una medida según esta técnica. En sistemas con más prestaciones se utilizan combinaciones de canales elásticos y Raman a varias longitudes de onda; por ejemplo es típico emplear láseres de Nd:YAG, con una longitud de onda fundamental de 1064 nm (infrarrojo próximo), provistos de dobladores y triplicadores de frecuencia, con lo que se obtienen simultáneamente tres haces, uno a la longitud de onda fundamental y los otros dos a 532 nm (frecuencia doble, prácticamente en el centro del espectro visible) y 355 nm (frecuencia triple, ultravioleta próximo) simultáneamente; además de canales de recepción a estas tres longitudes de onda, se realizan canales Raman a 607 nm (una de las bandas laterales intensas del espectro Raman del nitrógeno excitado a 532 nm) y 387 nm (misma banda lateral bajo la excitación a 355 nm). No se utiliza canal Raman correspondiente a la excitación a 1064 nm, porque la sección recta Raman, que es aproximadamente proporcional a la potencia cuarta de la inversa de la longitud de onda, es demasiado baja a esa longitud de onda. Con la información que se puede extraer sobre los coeficientes de extinción y retrodispersión a las distintas longitudes

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

de onda, es posible inferir propiedades microfísicas de los aerosoles, como el radio efectivo de las partículas, concentración de las mismas, índice de refracción complejo e incluso la distribución del tamaño de las partículas [2,3]. La adición de canales de despolarización, que miden la componente despolarizada de la luz retrodispersada (los pulsos emitidos están normalmente polarizados linealmente), permite además obtener información sobre el grado de elongación de las partículas.

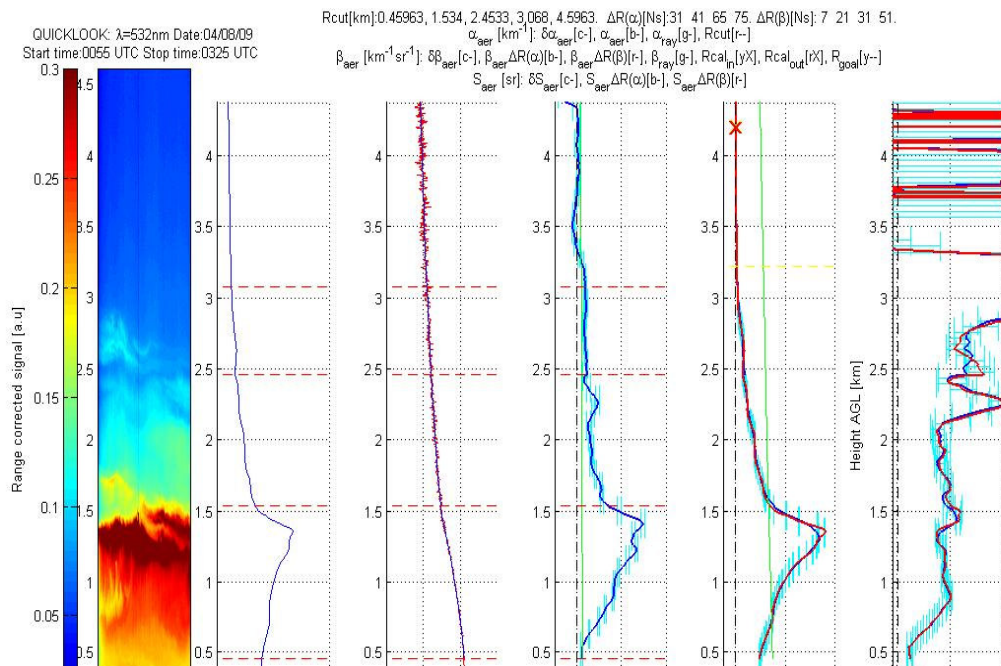


Fig. 3. Ejemplo de obtención de los coeficientes de retrodispersión y extinción a la longitud de onda de 532 nm mediante la técnica Raman. Las gráficas, empezando desde la izquierda corresponden a: a) señal elástica (532 nm) corregida en distancia (escala de color) en función de la altura y del tiempo en un intervalo de 3 horas y media; b) señal corregida en distancia en función de la altura correspondiente al promedio de las 3 horas y medias de la gráfica anterior; c) señal corregida en distancia del canal Raman (607 nm); d) coeficiente de extinción de los aerosoles a 532 nm; e) coeficiente de retrodispersión de los aerosoles a 532 nm; f) cociente entre el coeficiente de extinción y el de retrodispersión (relación lidar).

2 Origen y evolución de EARLINET

La red europea de lidares de investigación de aerosoles (EARLINET: European Aerosol Research Lidar Network⁴) se creó en el año 2000 con el impulso de un proyecto del 5º Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Comisión Europea. Inicialmente estaba formada por 21 lidares pertenecientes a 19 organismos de investigación. La red demostró su capacidad como herramienta para la medida de la distribución de aerosoles en las tres dimensiones del espacio (cada estación lidar mide en la dimensión vertical y el funcionamiento coordinado de las distintas estaciones distribuidas sobre Europa proporciona las otras dos) y en el tiempo (de nuevo mediante el funcionamiento coordinado de las estaciones), e inició la

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

compilación de la mayor base de datos existente hoy en día sobre la distribución de aerosoles a escala continental.

La explotación de esta base de datos permite, además de la cuantificación de la concentración de aerosoles, la determinación de sus propiedades radiativas a través de sus coeficientes de extinción y retrodispersión, el estudio de fenómenos de transporte sobre grandes distancias, como, por ejemplo, las aportaciones de polvo mineral desde el Sahara o el transporte de biomasa quemada con ocasión de grandes incendios forestales, la predicción de tendencias mediante el análisis temporal de las medidas contenidas en la base de datos, la mejora de los modelos numéricos meteorológicos y climáticos de gran escala mediante la inclusión en los mismos de una representación más exacta de los efectos de los aerosoles en cuanto a distribución y propiedades, y la mejora de la explotación de los datos de satélites de observación de la tierra, que son afectados por la presencia de aerosoles.

Tras la finalización del proyecto del 5º Programa Marco en 2003, EARLINET se constituyó como una asociación de instituciones y personas interesadas en el estudio de los aerosoles atmosféricos mediante lidar, con existencia independiente de la financiación específica de un proyecto de respaldo.

Entre 2006 y 2011, las actividades de EARLINET fueron parcialmente financiadas por el proyecto del 6º Programa Marco "EARLINET – Advanced Sustainable Observation System" (EARLINET-ASOS), cuyos objetivos eran progresar en el control de calidad de los instrumentos lidar, establecer normas comunes para incrementar la cobertura temporal de las medidas, mejorar los procedimientos de medida, procesado de datos e inversión de los parámetros microfísicos de los aerosoles a partir de las medidas de los parámetros ópticos mediante sistemas con varias longitudes de onda, mejorar la base de datos y su interficie de usuario, y fomentar la cooperación y coordinación con otras comunidades científicas en general y, en particular, con la federación global de redes de lidares de aerosoles GALION⁵, patrocinada por la Organización Meteorológica Mundial dentro del programa Global Atmospheric Watch (GAW), a la cual EARLINET, como red más desarrollada, sirve de modelo y traspasa la experiencia adquirida en cuanto a procedimientos y control de calidad de instrumentos y productos.

El marco propiciado por EARLINET-ASOS fomentó el crecimiento de EARLINET en cuanto al número de estaciones y las prestaciones de las mismas, produciéndose durante el proyecto una evolución de muchas estaciones desde configuraciones más sencillas hacia el llamado "standard de EARLINET", consistente en sistemas lidar con al menos tres canales elásticos y dos canales Raman del nitrógeno atmosférico, comúnmente basados en un lidar de Nd:YAG provisto de doblador y triplicador de frecuencia utilizando las longitudes de onda mencionadas en la sección 1. La figura 4 muestra el lidar de la estación EARLINET de la UPC, correspondiente al "standard de EARLINET". En la foto de la izquierda se ve el sistema completo; se observa, al fondo, el cabezal óptico con el láser emisor, provisto de un doblador y de un triplicador de frecuencia, y el telescopio que recoge la radiación retrodispersada desde la atmósfera; a la derecha se encuentra el rack que contiene el sistema óptico de separación de las longitudes de onda medidas (policromador) y los fotodetectores que convierten las señales ópticas en eléctricas, el sistema de muestreo y adquisición y el ordenador de control. La luz recogida por el telescopio se lleva al policromador mediante un haz de fibras ópticas.

La foto de la derecha es una vista frontal del sistema en funcionamiento, en que se ve el haz verde de 532 nm de longitud de onda correspondiente al segundo armónico de

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

la longitud de onda fundamental del láser de Nd:YAG; al haz verde, e invisibles para el ojo humano, se superponen un haz a la longitud de onda fundamental del láser (1064 nm, infrarrojo próximo) y otro a la longitud de onda del tercer armónico (355 nm, ultravioleta próximo).

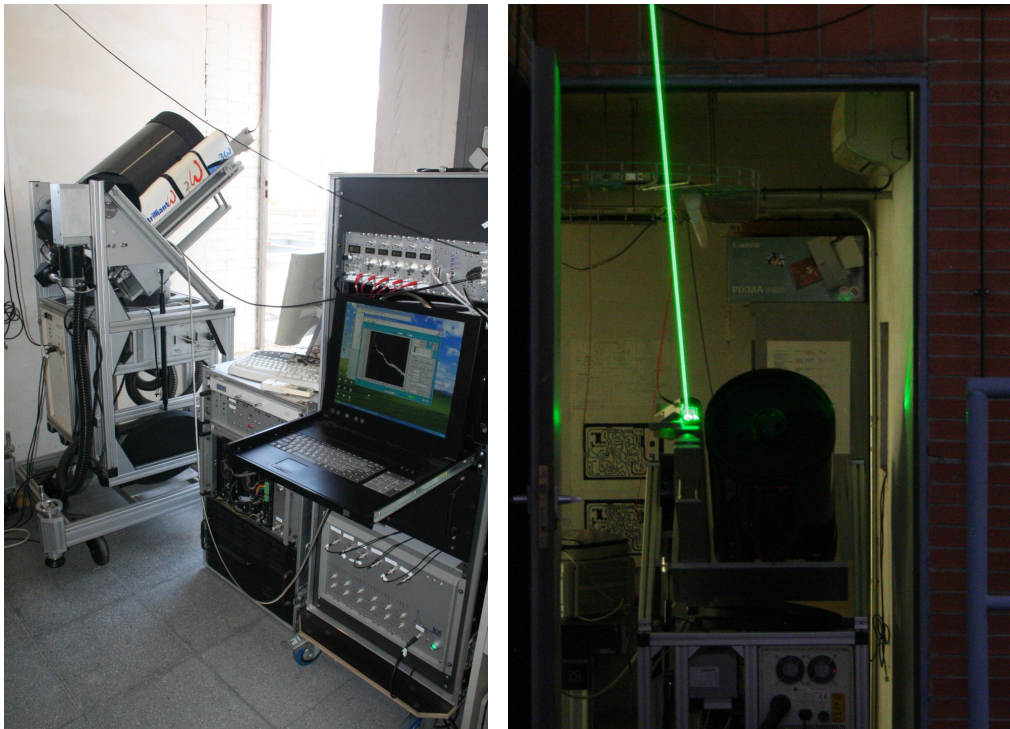


Fig. 4. El sistema lidar de la estación EARLINET de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña). Izquierda: Sistema completo. Derecha: vista frontal del sistema en funcionamiento.

Los datos de EARLINET pueden obtenerse, tras aceptar las condiciones de utilización, de la base de datos accesible desde su página web⁴.

3 La infraestructura ACTRIS

Desde abril de 2011, EARLINET es la componente de medida remota de aerosoles con resolución en distancia de la infraestructura ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network⁶), respaldada hasta 2015 por un proyecto europeo del 7º Programa Marco del mismo nombre. La figura 5 muestra el estado actual de EARLINET en ACTRIS, con 30 estaciones lidar en funcionamiento coordinado distribuidas en Europa, doce de ellas (círculos rojos) correspondientes como mínimo al “standard de EARLINET” descrito en la sección 2, que permiten obtener información sobre el tipo de aerosol e incluso determinar sus propiedades microfísicas, nueve (círculos verdes) que, aunque con menos canales que las anteriores, están dotadas de canales Raman del nitrógeno que permiten determinar los coeficientes de extinción y retrodispersión de los aerosoles sin necesidad de hipótesis sobre una relación entre ambos (sección 1) y nueve sistemas relativamente sencillos (círculos azules) que no

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

poseen canales Raman. Además, quince sistemas (símbolo III sobre fondo azul adicional) están dotados de canales de despolarización que permiten obtener información adicional sobre las propiedades microfísicas de las partículas que constituyen el aerosol (sección 1).



Fig. 5. EARLINET en ACTRIS. Círculo rojo adicional: la estación satisface como mínimo el “standard de EARLINET”; círculo verde: estación que no llega al “standard de EARLINET”, pero que está dotada de al menos un canal Raman; círculo azul: la estación no posee canales Raman; símbolo III sobre fondo azul: la estación está dotada de canales de polarización; sol amarillo: hay en funcionamiento un fotómetro solar de AERONET en la estación o sus proximidades.

En ACTRIS confluyen, además de EARLINET, las infraestructuras de EUSAAR (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research⁷), centrada en el estudio de aerosoles mediante instrumentos de medida *in-situ* de las propiedades químicas, físicas y ópticas de los aerosoles, de CLOUDNET⁸, dedicada a la teledetección de nubes y aerosoles, y la infraestructura existente de medida de gases traza, que no había sido agrupada oficialmente bajo un proyecto común hasta la fecha.

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)

Además, existe una relación estrecha con la red de fotómetros solares AERONET⁹, que, a través de AERONET-Europa, proporciona servicios de calibración a los fotómetros solares de que muchas de las estaciones de ACTRIS también están equipadas (soles amarillos en la figura 5). La distribución de las distintas partes de la infraestructura de ACTRIS aparece en la figura 6.

ACTRIS tiene como objetivos proporcionar datos mediante observaciones de largo plazo a escala regional para investigaciones climáticas y de calidad del aire, proporcionar acceso a grandes infraestructuras a investigadores externos, desarrollar nuevas herramientas de integración de los datos adquiridos mediante las distintas técnicas usadas en la infraestructura, favorecer la formación de científicos y usuarios de datos en el campo de las observaciones atmosféricas y promover el desarrollo de nuevas tecnologías de observación de aerosoles, nubes y gases traza mediante la

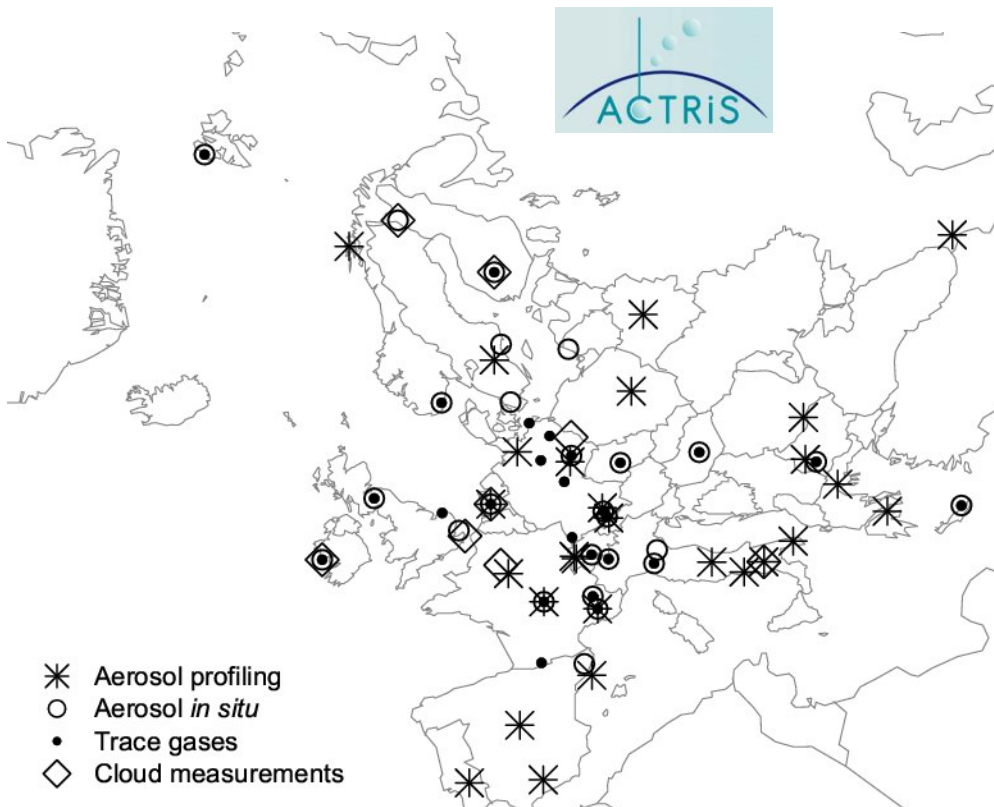


Fig. 6. Distribución de los componentes de la infraestructura de ACTRIS.

asociación de PyMEs al proyecto.

Dentro de ACTRIS, EARLINET, además de contribuir a la base de datos integrada de productos de aerosoles, mantiene los procedimientos de control de calidad de los instrumentos lidar (comprobaciones periódicas internas, campañas de intercomparación de lidares), introduce controles de calidad en las medidas brutas y

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)



en las medidas invertidas y define nuevos parámetros que se incluirán en las medidas, además de los coeficientes ópticos (extinción y retrodispersión), relación lidar y exponentes de Ångström, que ya existían en la base de datos de EARLINET antes de ACTRIS, como la relación de despolarización, la detección de estratificaciones y la determinación de las propiedades geométricas y ópticas de las mismas, y la evaluación de la incertidumbre en las medidas. Además fomenta la utilización de la llamada cadena única de cálculo, programa de procesado de datos centralizado y automatizado, desarrollado dentro del proyecto EARLINET-ASOS (sección 2), cuya entrada son los datos brutos de los distintos sistemas lidar y cuya salida son los productos lidar (coeficientes ópticos, etc...), cuya utilización debe contribuir a mejorar la calidad de las inversiones y a reducir el tiempo transcurrido entre una medida y la inclusión de sus resultados en la base de datos.

Por otra parte, EARLINET lleva también a cabo dentro de ACTRIS una tarea de investigación científico-técnica destinada, por una parte, a aumentar las capacidades de medida diurna de los canales Raman, cuyas prestaciones, debido a lo débil de la señal, se degradan mucho si no se limita lo suficiente la radiación de fondo que reciben y, por otra, al desarrollo del funcionamiento sinérgico de lidares y fotómetros solares para, a partir de la combinación de los datos proporcionados por ambas clases de instrumentos, obtener información resuelta en distancia sobre algunas propiedades microfísicas de los aerosoles.

El futuro de ACTRIS se contempla idealmente como una infraestructura distribuida estable, cuyas prestaciones y cobertura irían aumentando con el tiempo, probablemente en el marco del Foro Estratégico Europeo sobre Infraestructuras de Investigación (ESFRI). Desde ahora mismo, los datos proporcionados por las distintas estaciones e instrumentos de la infraestructura están disponibles, después de aceptar las condiciones de uso, desde el centro de datos de ACTRIS accesible desde su portal web⁶.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a los siguientes organismos, que han contribuido a hacer posible el trabajo presentado en esta ponencia mediante la financiación de los proyectos indicados: Comisión Europea, por el proyecto del 7º Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico "Aerosols, Clouds, and Trace gases Research Infrastructure Network (ACTRIS)" (Grant Agreement No. 262254); Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), por los proyectos TEC2009-09106 "Lidares elástico-Raman: integración, procesado de datos y explotación (red europea y misiones espaciales)" y UNPC10-4E-442 "Unmanned unattended lidar (radar laser) station"; Ministerio de Ciencia e Innovación, por la Acción Complementaria CGL2011-13580-E/CLI "Participación española en ChArMEx (The Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment) – ChArMEx – SP2".

Contribución de la red de lidares EARLINET a la infraestructura europea de investigación atmosférica ACTRIS (Aerosols, Clouds, and Trace Gases Infrastructure Network)



REFERENCIAS

- [1] R. M. Measures: “Laser Remote Sensing. Fundamentals and applications”. John Wiley & Sons, 1984
- [2] Detlef Müller, Ulla Wandinger, Dietrich Althausen, Ina Mattis, Albert Ansmann, “Retrieval of physical particle properties from lidar observations of extinction and backscatter at multiple wavelengths”, *App. Opt.*, **37**, 12, pp. 2260-2263, Abril de 1998.
- [3] L. Osterloh, C. Böckmann, R. E. Mamouri, A. Papayannis, “An Adaptive Base Point Algorithm for the Retrieval of Aerosol Microphysical Properties”, *The Open Atmospheric Science Journal*, **2011**, 5, pp. 61-73, 2011.
- [4] <http://www.earlinet.org/>
- [5] <http://alg.umbc.edu/galion/>
- [6] <http://www.actris.net/>
- [7] <http://www.eusaar.net/>
- [8] <http://www.met.reading.ac.uk/radar/cloudnet/>
- [9] http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/