

LA RESPUESTA ES VERDE 

DEL 28 DE NOVIEMBRE AL 1 DE DICIEMBRE. MADRID



DOCUMENTO FINAL DEL GRUPO DE TRABAJO

# GT-14

## Teledetección y sensores medioambientales

Coordina: Fundación Conama

### CONAMA2016

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Del 28 de noviembre al 1 de diciembre de 2016





# **DOCUMENTO FINAL**

**GRUPO DE TRABAJO Nº 14:**

**TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES**

**ENTIDAD ORGANIZADORA: FUNDACIÓN CONAMA**



**Documento Final del Grupo de Trabajo de Conama 2016**

**TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES**

**ENTIDAD ORGANIZADORA: FUNDACIÓN CONAMA**

*Miembros del Comité Técnico:*

**Coordinador:** José Javier Martínez Vázquez

**Relator:** Adolfo Comerón Tejero  
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

**Colaboradores técnicos:** Michaël Sicard  
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Josefina de la Fuente  
TechNet, S.L.

Eduardo Martínez de Rioja y del Nido  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Vicente Gómez Martínez  
Suez Water Spain

Pedro Oñorbe de Torre  
Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid

Alfonso Santos Alonso Benito  
Colegio Oficial de Ingenieros de Montes

Manuel Pujadas Cordero  
Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y  
Tecnológicas (CIEMAT)

Fernando del Castillo Rey  
Colegio Oficial de Biólogos de Andalucía

Nicanor Prendes Rubiera  
Oficina Española del Cambio Climático (OECC)



## CONTENIDO

### **1. INTRODUCCIÓN: EXO-SOSTENIBILIDAD**

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador.

### **2. AEROSOL, CLOUDS, AND TRACE GASES RESEARCH INFRASTRUCTURE (ACTRIS): PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA EN LA NUEVA INFRAESTRUCTURA DE INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA HOJA DE RUTA DEL FORO ESTRATÉGICO EUROPEO PARA INFRAESTRUCTURAS DE INVESTIGACIÓN (ESFRI).**

Adolfo Comerón Tejero. UPC.

### **3. TELEDETECCIÓN EN GENERAL Y APLICACIONES EN EL SECTOR MEDIOAMBIENTAL.**

Pedro Oñorbe de Torre. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid

### **4. LA TELEDETECCIÓN EN EL CONTROL DE LA EMISIONES DEL TRÁFICO: LECCIONES DEL PROYECTO CORETRA**

Manuel Pujadas Cordero y Aída Domínguez. CIEMAT y Josefina de la Fuente. Remote Sensing Lab, S.L.

### **5. EL USO DE LA TELEDETECCIÓN EN LOS INCENDIOS FORESTALES EN LAS ISLAS CANARIAS**

Alfonso Alonso Benito. Colegio Oficial de Ingenieros de Montes. Consultor Medioambiental en la Comunidad Canaria.

### **6. SMART AGRICULTURE**

Vicente Gómez Martínez. SUEZ WATER SPAIN.

### **7. ANTENAS REFLECTORAS PLANAS EN TECNOLOGÍA MICROSTRIP PARA RADARES METEOROLÓGICOS**

Eduardo Martínez de Rioja y del Nido, José Daniel Martínez de Rioja y del Nido y José Antonio Encinar. Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. UPM.

### **8. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE TERMINALES DE USUARIO MULTIANTENA EN REDES LTE-A**

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador. Eduardo Martínez de Rioja y del Nido y José Daniel Martínez de Rioja y del Nido. Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. UPM.



## **BREVE RESEÑA PROFESIONAL DE LOS PONENTES**

### **Relator**

**Adolfo Comerón i Tejero.** Ingeniero de Telecomunicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona, doctorado en la Universidad Paris-XI (Orsay, Francia). Catedrático del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña. Actividad de investigación actual: teledetección atmosférica mediante lidar y comunicaciones ópticas no guiadas.

### **Colaboradores Técnicos**

**Pedro Oñorbe de Torre** es Ingeniero Industrial por la ETSII-UPM y miembro de la Asociación Española de Teledetección (AET). Ha trabajado durante muchos años en proyectos de tratamientos de aguas y de basuras por tecnologías de bajo coste, tanto en su puesto de jefe de tratamientos de residuos urbanos en diversas empresas del INI como en asesorías a empresas de servicios. Es especialista en proyectos de teledetección para uso en aplicaciones de ingeniería civil sobre todo en agricultura de precisión y en aplicaciones medioambientales en minería y limnología. Lleva directamente el desarrollo de tecnologías de aplicaciones de teledetección para empresas del Centro de Investigaciones Aeroportadas de Rozas (CIAR) en Lugo.

Colaborador habitual en el Colegio de Ingenieros Industriales de Madrid (COIIM) donde es Vocal de la Comisión de Medio Ambiente y dirige el Grupo de Trabajo de “teledetección y drones”. Coordina por el COIIM la participación en proyectos de innovación con la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (F2I2), organismo que agrupa los distintos Laboratorios de Investigación de la Escuela ETSII-UPM. También, desarrolla asesoría a colegiados en proyectos medioambientales y de desarrollo rural en Latinoamérica.

**Manuel Pujadas Cordero** es Dr. en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid con más de 25 años de experiencia como investigador especializado en teledetección óptica de constituyentes atmosféricos (gases y partículas) y en físico-química de la atmósfera. Ha trabajado en numerosos proyectos de investigación nacionales e internacionales y también es autor de numerosos artículos científicos. Responsable de la Unidad de Emisiones Contaminantes del Departamento de Medio Ambiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. También es el responsable de la Oficina para el Control de Emisiones de las Grandes Instalaciones de Combustión españolas y de la Estación LIDAR del CIEMAT-Madrid, integrada en la Red



Europea de Estaciones Lidar Avanzadas, red de excelencia para el estudio a nivel continental de los aerosoles atmosféricos por tecnología LIDAR.

**Alfonso Alonso Benito** es Ingeniero Técnico Forestal por la UPM e Ingeniero de Montes por la UVA. Actualmente ha desarrollado su tesis doctoral en la Universidad de La Laguna sobre el uso de imágenes de satélite y datos LIDAR en el cartografiado de combustibles forestales, habiendo también estudiado el cartografiado de área quemada y la posibilidad de realizar inventarios forestales con datos de satélite. Dr. Alonso Benito es autor de diversas comunicaciones a congresos tanto nacionales como internacionales y de publicaciones en revistas especializadas de ámbito internacional.

**Vicente Gómez Martínez** es Ingeniero informático por la Universidad de Alicante. En 2010 se incorpora a SUEZ, concretamente en el departamento de Sistemas de Control, donde coordina los proyectos de innovación y el desarrollo e industrialización de nuevos productos/servicios. Desde 2014 se responsabiliza del departamento de desarrollo de producto y negocio en el área de Ingeniería en SUEZ Water Spain.

**Eduardo M. de Rioja y del Nido.** Ingeniero de Telecomunicación por la ETS de Ingenieros de Telecomunicación de la UPM. Realiza sus estudios universitarios con una Beca de Excelencia de la Comunidad de Madrid. Es autor de comunicaciones a congresos y publicaciones sobre redes LTE en entornos ferroviarios de Alta Velocidad y sobre antenas reflectoras planas en tecnología impresa. Actualmente cursa estudios de doctorado en el Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones de la UPM, bajo la dirección del Profesor José A. Encinar.

**José Javier Martínez Vázquez.** En 1996 comienza su participación en el Congreso Nacional del Medio Ambiente y desde el año 2000 coordina este Grupo de Trabajo sobre Teledetección y Sensores Medioambientales. Dr. Martínez Vázquez *is senior member of the IEEE.*



## ***RESUMEN DE CONTENIDO***



## **INTRODUCCIÓN: EXO-SOSTENIBILIDAD**

**José Javier Martínez Vázquez. Coordinador del Grupo de Trabajo**

En la zona del desierto de Atacama en Chile, donde se puede observar el cielo a través de la atmósfera más limpia de toda la corteza terrestre, se encuentran los observatorios astrofísicos más potentes del mundo. El telescopio ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) detectó este mismo año a 175 años luz, una estrella infante con 10 millones de años que presenta un disco prominente debido probablemente a la existencia de planetas en formación. Otro telescopio de Atacama, el de La Silla, ha avistado en agosto una estrella fría enana a 4 años luz. Próxima Centauri tiene un planeta de un tamaño 1,3 veces el de la Tierra, en la Constelación del Centauro, dentro del sistema estelar Alpha Centauri. El exo-planeta Próxima - b, gira sobre su estrella dando lugar a periodos anuales de 11 días y una temperatura en su atmósfera parecida a la de la Tierra.

La mayoría de los exo-planetas descubiertos, son mayores que la Tierra pero no tan grandes como Neptuno. Los más pequeños pueden desarrollar una superficie rocosa y una atmósfera semejante a la terrestre. Si un exo-planeta de pequeño tamaño se desplazara en torno a su estrella a una distancia adecuada podría tener un rango de temperaturas en su superficie que propiciara la existencia de agua y por lo tanto, de vida.

A principios de 2015, el telescopio espacial Kepler, detectó en la Vía Láctea una estrella de un tamaño aproximado al del Sol con un planeta no mucho mayor que la Tierra. Es lo más parecido al sistema Sol-Tierra que se ha observado hasta la fecha fuera del sistema solar. El exo-planeta se mueve alrededor de su estrella durante un año tan solo 20 días mayor que el de nuestro calendario. Como ocurre con todos los exo-planetas detectados, existe un gran desconocimiento sobre algunos detalles como la cantidad de agua que cubre su superficie o si tiene una atmósfera respirable. Se ha bautizado con el nombre de Kepler 452 – b. Con objeto de aportar nuevos datos sobre exo-planetas, la NASA prevé para el año que viene la puesta en servicio del Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) y en 2018 está programado el lanzamiento del nuevo telescopio espacial James Webb (JWST) que complementarán la información obtenida de la sonda espacial Kepler.

Si pudiéramos llegar a Kepler 452-b, y fuera un lugar habitable por la raza humana, seguramente tendría la ventaja de estar a unos niveles de sostenibilidad desconocidos para nosotros en los últimos tiempos. No obstante, tendríamos que resolver algunos problemas que surgirían en nuestro intento de desembarco allí. Está a 1500 años luz. Nuestras aeronaves, que ahora mismo triplican o cuadruplican la velocidad del sonido en el mejor de los casos, tendrían que alcanzar velocidades próximas a la de la luz. De acuerdo con los postulados de la Teoría de la Relatividad Restringida que Einstein publicó en 1905, la tripulación y el pasaje de los vuelos entre la Tierra y Kepler 452 – b sufrirían un Jet – Lag de 1500 años, tanto a la ida como a la vuelta. Dicho de otro modo, mientras que para las personas a bordo el tiempo empleado en el recorrido sería de unas horas, quizás días, en la Tierra o el exo-planeta en cuestión habrían pasado 1500 años.

A la vista de todo ello, cabe concluir que nos conviene seguir las orientaciones del Papa Francisco en su encíclica Laudato Sí, porque no sólo vamos a tardar en encontrar un habitat alternativo en el universo, sino que además va a costarnos mucho ir cogiendo sitio y sobre todo, si no nos gusta, dar la vuelta.





## **Aerosol, Clouds, and Trace Gases Research Infrastructure (ACTRIS): participación española en la nueva infraestructura de investigación atmosférica de la hoja de ruta del Foro Estratégico Europeo para Infraestructuras de Investigación (ESFRI)**

Adolfo Comerón<sup>1</sup>, Michaël Sicard<sup>1</sup>, Lucas Alados Arboledas<sup>2</sup>, Andrés Alastuey<sup>3</sup>, Begoña Artíñano<sup>4</sup>, José M. Baldasano<sup>5</sup>, Victoria Cachorro<sup>6</sup>, Carmen Córdoba Jabonero<sup>7</sup>, Emilio Cuevas<sup>8</sup>, Manuel Pujadas<sup>4</sup>, Carlos Toledano<sup>6</sup>, Margarita Yela<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Cataluña; <sup>2</sup>IISTA-CEAMA-Universidad de Granada, <sup>3</sup>CSIC-IDAEA, <sup>4</sup>CIEMAT, <sup>5</sup>BSC-CNS, <sup>6</sup>Universidad de Valladolid, <sup>7</sup>INTA, <sup>8</sup>AEMET

### **Introducción**

ACTRIS (Aerosol, Clouds, and Trace Gases Research Infrastructure) es una infraestructura de investigación atmosférica distribuida sobre el continente europeo, cuya misión es facilitar el estudio de la distribución espacio-temporal, propiedades e interacciones de constituyentes atmosféricos de vida corta. El dominio de investigación de ACTRIS es específico y distinto de los dominios de otras infraestructuras de investigación atmosférica europeas, con las cuales opera sinérgicamente. Esta especificidad, y el interés que presenta desde los puntos de vista de la comprensión de la evolución de la calidad del aire, de la meteorología y del clima, ha llevado a ACTRIS a solicitar su inclusión en la hoja de ruta del Foro Estratégico Europeo para Infraestructuras de Investigación (ESFRI por sus siglas en inglés) como infraestructura potencialmente operativa en un plazo inferior a 10 años y sostenible a largo plazo. Dicha inclusión es efectiva desde marzo de 2016. En lo que sigue se describen los antecedentes de ACTRIS, sus objetivos, los datos que proporciona y la contribución de los grupos españoles, integrados en ACTRIS-España, a la infraestructura paneuropea.

### **Estructura y objetivos de ACTRIS**

La infraestructura ACTRIS tiene su origen en varias redes de medida de ámbito europeo, algunas de las cuales fueron impulsadas por distintos proyectos de los programas marco de investigación y desarrollo tecnológico de la Comisión Europea. EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network, <http://www.earlinet.org>) se inició como red de medidas de la distribución cuatridimensional (espacio-tiempo) de aerosoles mediante teledetección lidar (radar láser) en Europa mediante un proyecto del 5º Programa Marco en el año 2000. Cloudnet (<http://www.cloud-net.org/>), red de medidas de perfiles verticales de parámetros de nubes, se inició en 2001 también como proyecto del 5º Programa Marco. EUSAAR (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research, <http://www.eusaar.net/>), red de medidas de propiedades ópticas, físicas y químicas de los aerosoles mediante técnicas *in situ*, fue impulsada en 2006 por un proyecto del 6º Programa Marco. Las infraestructuras a las que estos proyectos dieron lugar se integraron en 2011, junto con una red de medidas de gases traza, en el proyecto del 7º Programa Marco ACTRIS (Aerosol, Clouds, and Trace gases Research Infrastructure Network), prolongado en 2015 en el proyecto del programa H2020 ACTRIS-2 (<http://www.actris.eu/>).



Los componentes – aerosoles, nubes y gases traza – medidos por ACTRIS tienen un efecto importante en la calidad del aire, la meteorología y la tendencia climática. Al mismo tiempo, exhiben tiempos de vida cortos en la atmósfera (entre horas y meses) y distribuciones espaciales heterogéneas, lo que hace difícil la evaluación cuantitativa de sus efectos a nivel global, en particular en cuanto a la absorción de radiación solar por el sistema tierra-atmósfera (fig. 1). Además, se influyen mutuamente mediante procesos no siempre bien conocidos, lo que añade dificultad a la caracterización de sus efectos local y globalmente. ACTRIS se propone como objetivos últimos contribuir de manera relevante al conocimiento de procesos meteorológicos y a la evaluación de tendencias climáticas, a caracterizar fenómenos de transporte de polvo y contaminantes a grandes distancias, y a mejorar la salud humana y de los seres vivos en general mediante una mejora en la calidad del aire.

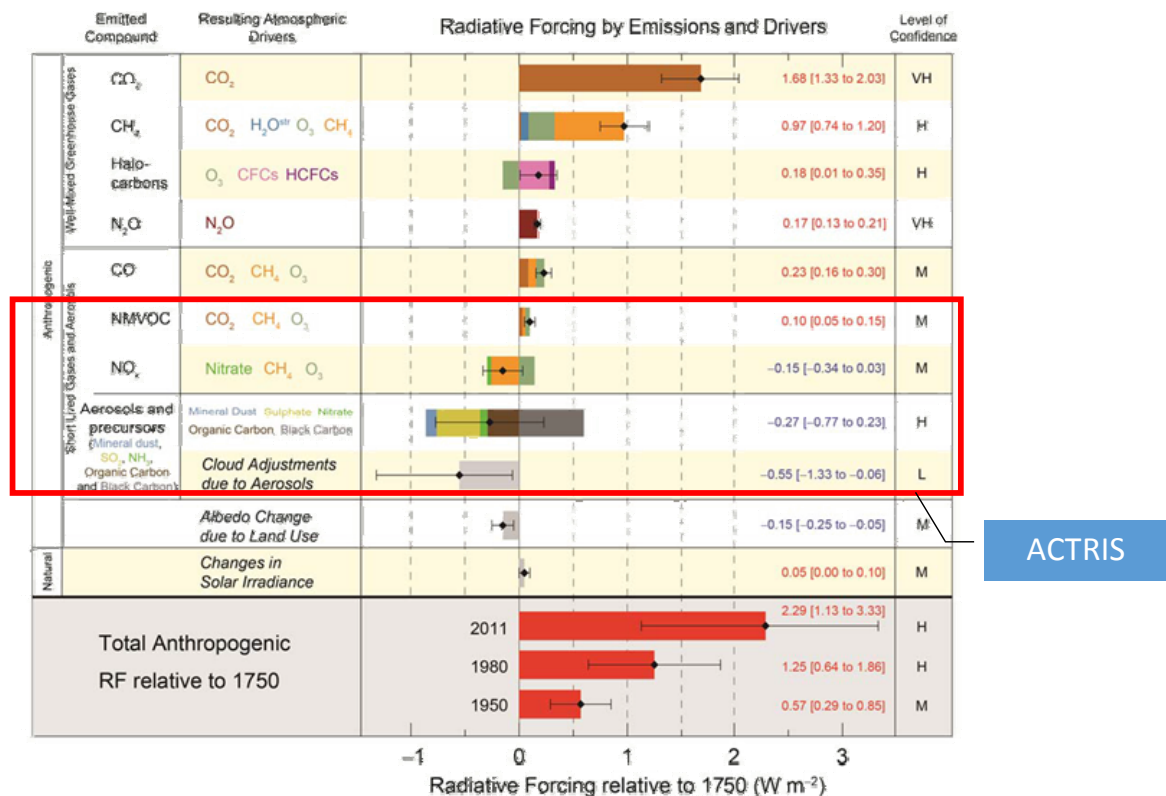


Fig. 1. Estimación del forzamiento radiativo referido al principio de la revolución industrial causado por distintos compuestos emitidos a la atmósfera. El recuadro rojo indica el dominio de trabajo de ACTRIS. Nótese la importancia del efecto y las grandes barras de incertidumbre en algunos casos. Adaptado de [1] (consultar esta referencia para más detalles).

### ACTRIS en la hoja de ruta de ESFRI

Aunque los proyectos de los Programas Marco han permitido articular a nivel continental infraestructuras que en la mayoría de los casos han sido en lo esencial desarrolladas en cada país mediante los respectivos programas nacionales, los objetivos de ACTRIS precisan de



una infraestructura de larga permanencia (varias décadas) que ofrezca las más altas prestaciones según referencias mundiales. Además, el dominio científico objeto de ACTRIS no es abordado por ninguna otra infraestructura científica permanente. Por estas razones, en marzo de 2015 se solicitó la inclusión de ACTRIS en la hoja de ruta de 2016 del Foro Estratégico Europeo para Infraestructuras de Investigación (ESFRI, <http://www.esfri.eu/>). La hoja de ruta de ESFRI “identifica un número limitado de infraestructuras de investigación que ofrecen un valor añadido particularmente alto al Área Europea de Investigación (ERA por sus siglas en inglés)” (<http://ec.europa.eu/research/era/>) [2]. ESFRI identifica, con la cooperación de los estados miembro de la Unión Europea y de los estados asociados a los Programas Marco de Investigación e Innovación, nuevas infraestructuras de investigación, o mejoras sustanciales de infraestructuras existentes, con la finalidad de completar su incubación y comenzar su implementación en un tiempo máximo de 10 años y de alcanzar su sostenibilidad para su funcionamiento a largo plazo [2].

ACTRIS ha sido incluida en la nueva hoja de ruta de ESFRI, hecha pública en marzo de 2016, en base a su demostrada madurez y a su sostenibilidad en términos de resultados científicos y avance del conocimiento, capacidad de innovación, capacidad de formación, impacto socioeconómico y promoción de la competitividad. Como infraestructura distribuida (es decir, formada por una amplia red de estaciones distribuidas geográficamente) de investigación atmosférica, completa las capacidades de otras infraestructuras distribuidas como ICOS (<https://www.icos-ri.eu/>) y IAGOS (<http://www.iagos.org/>). La primera está dedicada a la observación de gases de efecto invernadero, mientras que IAGOS estudia un conjunto de constituyentes parecido al de ACTRIS, pero mediante técnicas in situ con instrumentación instalada en aeronaves comerciales que recoge muestras a lo largo de rutas de vuelo internacionales. ICOS y IAGOS, que se encontraban en la hoja de ruta previa de ESFRI (2010), son ahora infraestructuras de referencia (landmarks) que han alcanzado la fase de implementación, nivel al que aspira ACTRIS tras el período de incubación.

La figura 2 muestra la estructura actual de observación de ACTRIS. Además, ACTRIS cuenta con las llamadas instalaciones centrales: un Centro de Datos, a través del cual se ponen a disposición de los usuarios finales y del público en general los datos y productos combinados generados por ACTRIS, y cinco centros de calibración de instrumentos para asegurar la calidad de los datos producidos, a saber: el Centro de Calibración de Radar, el Centro de Calibración de Lidar, el Centro de Calibración de Aerosoles (para instrumentación de medida de propiedades de aerosoles in situ), el Centro de Calibración de Gases Traza y el Centro de Calibración de Fotómetros Solares AERONET-Europe. Aunque los fotómetros solares no forman parte de la instrumentación específica de las estaciones de observación de ACTRIS, la mayoría de éstas poseen fotómetros integrados en la red federada AERONET, establecida por la NASA y PHOTONS (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>), cuyos datos son usados para obtener algunos de los productos de ACTRIS. AERONET-Europe canaliza la aportación europea a las necesidades de calibración de la red mundial AERONET. A estas instalaciones centrales se añadirán, a lo largo del período en que ACTRIS permanecerá en la hoja de ruta de ESFRI, las Oficinas Centrales de la infraestructura.



**Fig. 2. Infraestructura actual de observación de ACTRIS**

### **Participación española en ACTRIS**

Ocho son las instituciones españolas que han participado y participan en los proyectos ACTRIS del 7º Programa Marco, ACTRIS-2 de H2020 y en el proceso de inclusión en la hoja de ruta de ESFRI: la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), a través de su Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI) en Tenerife; el Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), a través de su Departamento de Ciencias de la Tierra; el Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA) a través de su sede en la Universidad de Granada (UGR), el Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA); el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), por medio de su Departamento de Medio Ambiente; el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), por medio del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) con sede en Barcelona; el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), mediante el Departamento de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera y en particular a través de las instalaciones de El Arenosillo en la provincia de Huelva; la Universidad de Valladolid (UVA) por medio del Grupo de Óptica Atmosférica (GOA); y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), a través del Laboratorio de Teledetección (RSLab) del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.

Dichas instituciones han constituido ACTRIS-España mediante un acuerdo de intenciones firmado en mayo de 2013, con la finalidad de promover la parte española de la infraestructura paneuropea, coordinar sus actividades y darle visibilidad.



La tabla 1 sintetiza la aportación específica a la infraestructura europea de dichas instituciones. En relación con la tabla 1, hay que tener en cuenta que los ámbitos de trabajo de las instituciones que constituyen ACTRIS-España son mucho más amplios y éstas disponen de equipamiento que proporciona a menudo un apoyo sin el cual la contribución específica a ACTRIS no sería posible (para más información, ver <http://www.bsc.es/actris/es/quienesactris-espa%C3%B1a> y los enlaces que allí se encuentran).

	<b>Teledetección de aerosol (lidar)</b>	<b>Medida de aerosol in situ</b>	<b>Medida de gases traza</b>	<b>Modelización</b>	<b>Centro de Calibración AERONET-Europe</b>
<b>AEMET</b>		X	X		X
<b>BSC-CNS</b>				X	
<b>CIEMAT</b>	X	X			
<b>CSIC</b>		X	X		
<b>IISTA-CEAMA-UGR</b>	X	X			
<b>INTA</b>		X	X		
<b>UVA</b>					X
<b>UPC</b>	X				

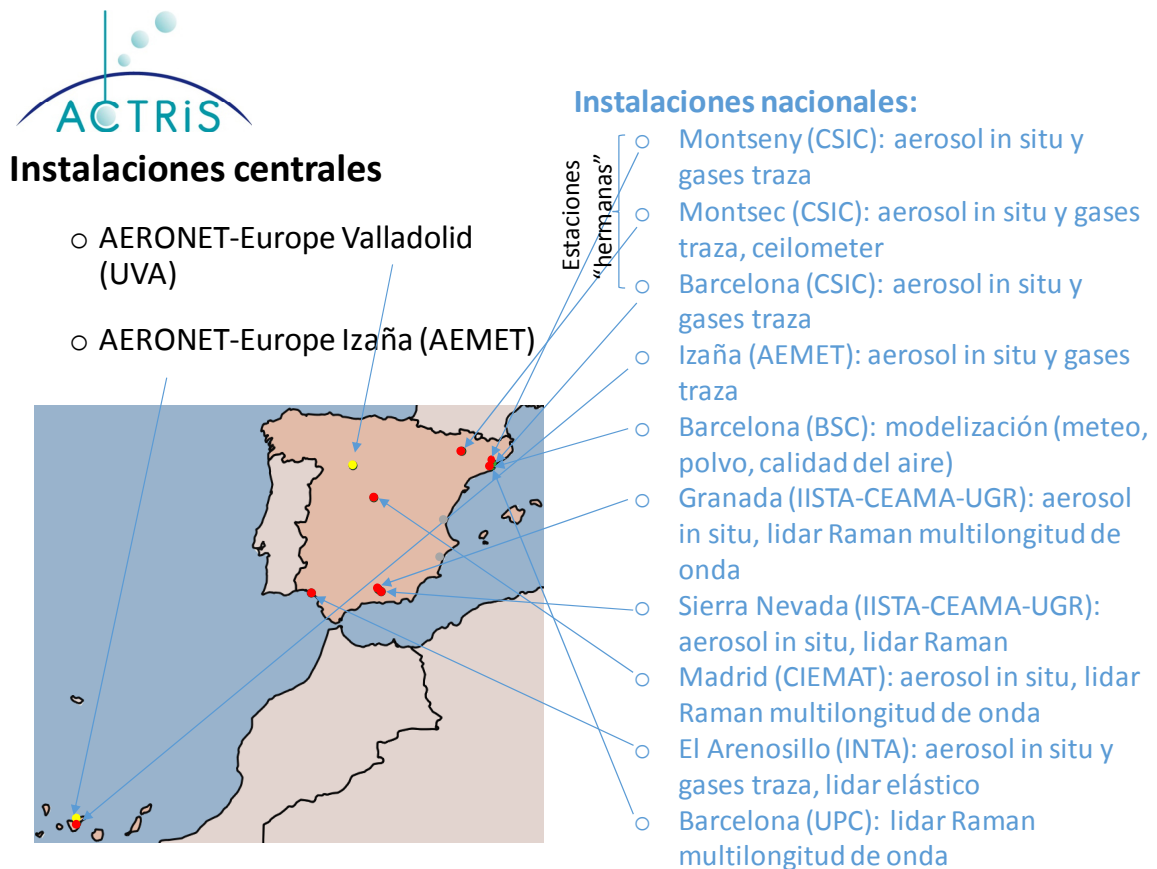
Tabla 1. Aportación de los miembros actuales de ACTRIS-España a la infraestructura.

La figura 3 muestra la distribución geográfica de la infraestructura actual de ACTRIS-España (<http://bsc.es/actris>), detallando algunos equipamientos que, aunque no forman parte específica de la infraestructura de observación, le dan apoyo (caso del ceilómetro y del lidar elástico). En dicha figura se distingue entre las instalaciones nacionales, aportación del país a la infraestructura, y las instalaciones centrales, que, aunque ubicadas en países determinados (España y Francia en el caso del Centro de Calibración AERONET-Europe), son compartidas por la totalidad de la infraestructura e incluso son usadas por organizaciones externas a ella. En la figura 4 se muestran algunas de las instalaciones de ACTRIS-España.

### **Perspectivas de futuro**

Tras la inclusión en la hoja de ruta de ESFRI, ACTRIS ha solicitado y obtenido, dentro de H2020, un proyecto llamado de fase preparatoria para infraestructuras identificadas por ESFRI (ACTRIS-PPP), destinado a ayudar a la infraestructura a alcanzar los niveles requeridos en los planos legal, financiero y, en caso necesario, técnico para su sostenibilidad dentro del espacio de investigación europeo.

En lo que respecta a ACTRIS-España, se prevé que durante la duración de este proyecto, con la ayuda de proyectos de investigación nacionales y autonómicos, se siga mejorando y consolidando la parte española de la infraestructura, con una extensión de las instituciones



**Fig. 3. Distribución geográfica de las instalaciones actuales de ACTRIS-España**

participantes a la Universidad de Valencia, a la Universidad Miguel Hernández de Elche y al Centro de Estudios Ambientales de Mediterráneo de Valencia, mientras que, mediante el proyecto de fase preparatoria se irán definiendo aspectos como el grado de participación, financiación, relaciones con la oficina central, etc.

En cualquier caso, se espera que las instituciones españolas contribuyan de manera significativa a la infraestructura paneuropea de alcance científico mundial ACTRIS, como lo han venido haciendo en los distintos proyectos europeos que han llevado hasta la misma.

### **Agradecimientos**

Resulta imposible mencionar explícitamente todos los proyectos autonómicos, nacionales y europeos gracias a los cuales, a lo largo de muchos años, se ha llevado a cabo la construcción de las infraestructuras mediante las cuales los miembros de ACTRIS-España participan en la infraestructura paneuropea ACTRIS. En lo que se refiere a la inclusión de ACTRIS en la hoja de ruta 2016 de ESFRI, los miembros de ACTRIS-España agradecen a la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad el apoyo político manifestado por parte de España ante la Comisión Europea, así como el apoyo y los consejos recibidos respecto de la participación en el proyecto de fase preparatoria ACTRIS-PPP.



**Fig. 4. Algunas instalaciones de ACTRIS-España. De arriba abajo y de izquierda a derecha: calibración de fotómetros solares en el CIAI (AEMET); superordenador Marenostrum del BSC-CNS; instalaciones del CIEMAT en Madrid; estación del Montseny (CSIC-IDAEA); estación de sondeos atmosféricos de El Arenosillo (INTA); lidar para teledetección de aerosoles de Granada (IISTA-CEAMA-UGR); calibración de fotómetros solares en el GOA (UVA); lidar para teledetección de aerosoles de UPC.**



## Referencias

[1] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

[2] ESFRI: Strategic Report on Research Infrastructures – Roadmap 2016. Science and Technology Facility Council, 2016,  
[http://ec.europa.eu/research/infrastructures/pdf/esfri/esfri\\_roadmap/esfri\\_roadmap\\_2016\\_full.pdf#view=fit&pagemode=none](http://ec.europa.eu/research/infrastructures/pdf/esfri/esfri_roadmap/esfri_roadmap_2016_full.pdf#view=fit&pagemode=none)





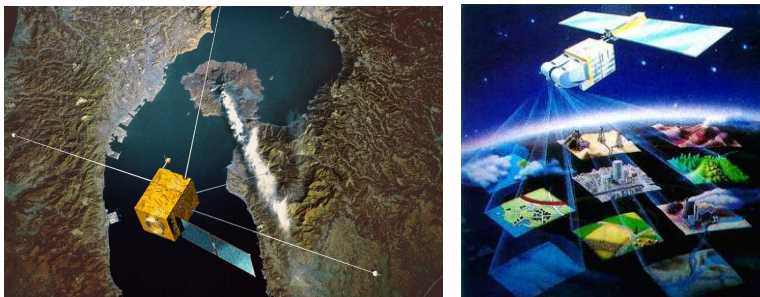
## TELEDETECCIÓN EN GENERAL Y APLICACIONES EN EL SECTOR MEDIOAMBIENTAL

*Pedro Oñorbe de Torre. Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid*

### 1.- GENERALIDADES

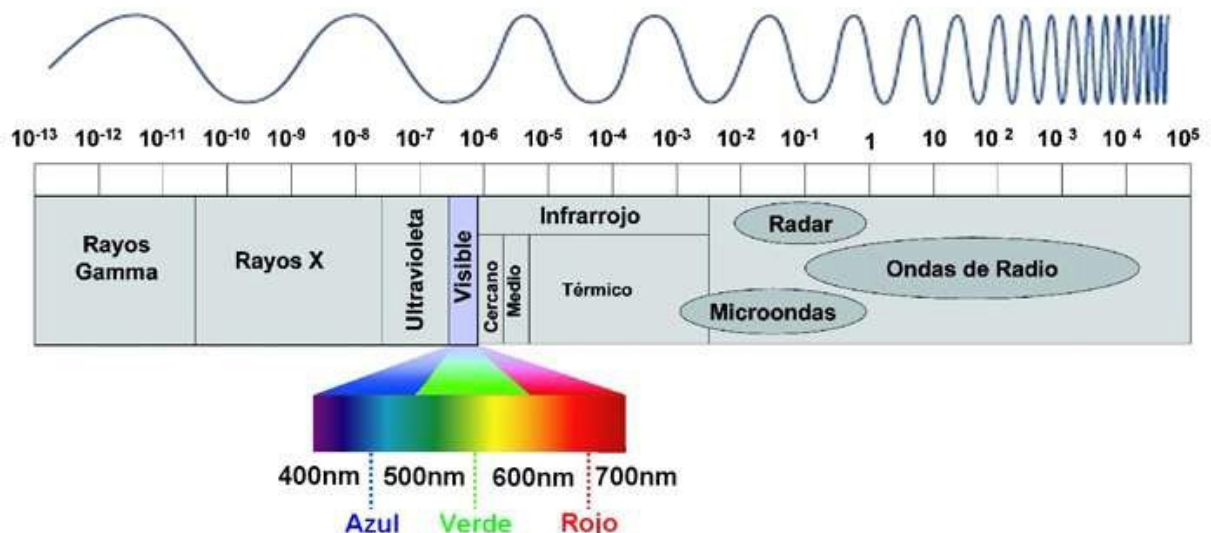
#### 1.1.- ¿Qué es la teledetección?

La técnica de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él. También incluye todo el trabajo realizado con esas imágenes, es decir, su procesamiento e interpretación.



#### 1.2.- El espectro electromagnético

Espectro electromagnético.  
Longitud de onda ( $\lambda$ ) en metros.



#### 1.3.- Equipos.

##### 1.3.1.- Satélites. Sensores remotos.

El primer satélite espacial fue el ruso Sputnik-1, lanzado en 1.957. Tenía el tamaño de una pelota, con 58 cm de diámetro.



La Teledetección desde satélites comienza en el año 1960 con el lanzamiento del TIROS-I, primer satélite meteorológico con una cámara de televisión de baja resolución espacial, que le permitiría a los meteorólogos discriminar entre nubes, agua, hielo y nieve.



Sputnik-1

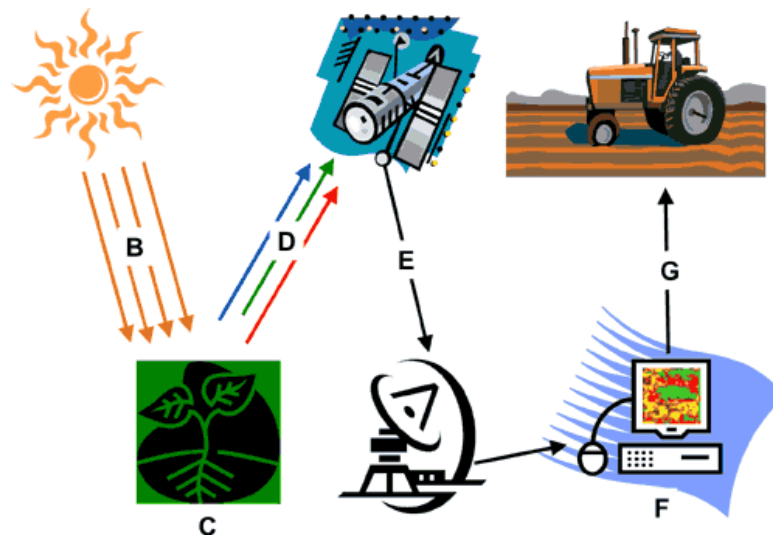


Tiros-1



Satélites actuales en órbita

Las fases de un proceso de teledetección serían:



**A** – Fuente de energía; **B** – Radiación y atmósfera; **C** – Interacción con objeto; **D** – Detección por sensor;  
**E** – Transmisión, recepción y procesamiento; **F** – Interpretación y análisis; **G** – Aplicación.



### Elementos portantes de sensores: Comparación para aplicaciones



Satélite  
Medios terrestres  
Resolución:  $\geq 2$  m  
Resolución:  $\leq 1$  cm.  
Amplitud: 10 a 50 km.  
Amplitud:  $\leq 2$  m.



Avión tripulado  
Resolución: 0,2 a 2 m  
Amplitud: 2 a 5 km.



VANT  
Resolución: 1 a 20 cm.  
Amplitud: 50 a 500 m.



#### 1.3.2.- Vehículos aéreos no tripulados (VANT).

Existe una amplia gama de ofertantes de vehículos aéreos no tripulados. Nos limitaremos a los más usuales fuera del ámbito de defensa.

##### 1.3.2.1.- Aeronaves de ala fija



Suelen usarse para inspecciones de mayor radio de acción y precisen mayor autonomía.<sup>80</sup>

Motor eléctrico - Carga de pago: 1,2 kg. - Autonomía: 90 min.

Motor de combustión - Carga de pago: 12 kg. - Autonomía 4 a 5 horas.



### 1.3.2.2.- Aeronaves de ala giratoria.



Helicóptero  
Motor de combustión  
Carga de pago: 3 kg.  
Autonomía: 60 min.



Cuadricóptero  
Motor eléctrico  
Carga de pago: 0,2 kg  
Autonomía: 15 min.



Hexacóptero  
Motor eléctrico  
Carga de pago: 2,5 kg  
Autonomía: 25 min

### 1.3.2.3.- Equipo de control de vuelo.



Las funciones del Control de Tierra son:

- ❖ Planificación de la misión que incluye la programación del plan de vuelo y de las acciones a desarrollar por las cámaras de a bordo.
- ❖ Comunicación con el UAV para transmisión de datos y órdenes tanto de funcionamiento como de telemetría.
- ❖ Almacenamiento de datos y primera comprobación.
- ❖ Transmisión en su caso a estación central.

Normalmente una vez programado el plan de vuelo y las mediciones a tomar, el UAV realizará su función de forma autónoma pero siempre será posible tomar el mando desde el Control de Tierra para casos de emergencia.

### 1.3.3.- Cámaras y sensores cercanos.

#### 1.3.3.1.- Cámara digital de alta definición.





Las cámaras en color tradicionales suelen proporcionar tres bandas de información por cada imagen (rojo, verde y azul), tratando de imitar el proceso de visión del sistema humano, trabajan por tanto dentro del estrecho margen del espectro electromagnético “visible” con longitudes de onda entre 400 y 700 nm.

Existen gran cantidad de tipos de cámaras digitales (RGB) de alta definición y la elección de una u otra dependerá del tipo de trabajo a realizar, condiciones del mismo, compatibilidad con software a utilizar.

La que presentamos es una Canon de 150 gr de peso y resolución de 10 Mp.

### **1.3.3.2.- Detector laser en el infrarrojo cercano**

El sensor LIDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema de teledetección que mide distancias mediante la iluminación de un objeto por un rayo laser y el análisis de la luz reflejada, midiendo especialmente el tiempo de retorno.

Puede trabajar desde longitudes de onda del espectro ultravioleta hasta longitudes de onda en el espectro infrarrojo cercano (zona no térmica).

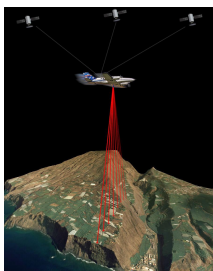
Por tanto el sistema tiene que incorporar: Un emisor laser; Un receptor; Una unidad de procesamiento; Una unidad de almacenamiento; Un sistema de localización y orientación GNSS/IMU; y un Sistema de control de vuelo si el sensor no es estático.

Se utiliza con frecuencia como tecnología para hacer mapas de alta resolución, con aplicaciones en muchas aplicaciones.

Ha sido muy popularizada por ser la tecnología aplicada por la policía en los sistemas de detección de velocidad de vehículos.

También se han desarrollado aplicaciones para trabajos batimétricos hasta 40 m de profundidad.

Suele ser transportado en vehículos aéreos tripulados pero también se estudia su adaptación a drones.





### 1.3.3.3.- Cámara termográfica.



La cámara termográfica o cámara térmica detecta y analiza radiaciones de longitud de onda incluida en el campo del infrarrojo térmico, por tanto no detectables en la zona del espectro visible ni en el infrarrojo cercano o medio.

La separación por gradientes de temperatura asignando diferentes colores permite multitud de aplicaciones que de otra forma serían indetectables.

Posteriormente ampliaremos la presentación de aplicaciones, aquí nos limitamos a enunciar algunas de las más conocidas:

- ❖ Agricultura de precisión (estrés hídrico, control de plagas, inventarios, fugas en regadíos etc).
- ❖ Estudios forestales (inventarios, planificación, incendios).
- ❖ Control ganadero (inventarios, estudios en fincas cinegéticas).
- ❖ Defectos en materiales.
- ❖ Eficiencia energética en edificios e instalaciones.
- ❖ Temas medioambientales (vertidos ilegales a cauces públicos, contaminación de suelos)
- ❖ Control de fallos en líneas eléctricas de transporte.

### 1.3.3.4.- Cámara multispectral e hiperespectral



Cámara multispectral



Cámara hiperespectral

La cámara multispectral complementa la acción de la cámara térmica detectando radiaciones del espectro infrarrojo fuera del campo térmico. El continuo desarrollo de detección de otras longitudes de onda identificativa



de distintos materiales da paso a nuevos desarrollos de sensores capaces de trabajar con multitud de bandas da paso a nuevo tipo de cámaras que agrupamos en multiespectrales y las modernas hiperespectrales trabajando hasta con más de 1.000 bandas.

Todas las bandas de una imagen hiperespectral representan una misma escena, pero cada una de ellas contiene información de un rango de longitudes de onda diferente, que pueden cubrir tanto el espectro visible como el infrarrojo. El ancho de cada banda puede estar entre 5 y 10nm según el sensor utilizado. Así, para cada punto de la imagen disponemos de una curva espectral que nos proporciona una gran cantidad de información para el punto correspondiente en la escena observada.

La primera de las aplicaciones que tuvieron los sensores hiperespectrales fue la observación de la tierra. Así, diversos sensores hiperespectrales han sido instalados en diferentes satélites y la enorme cantidad de información que proporcionan permite analizar cambios climáticos, la monitorización de cultivos, ayudar en estudios arqueológicos etc.

No obstante, según se va generalizando el uso de este tipo de sensores, también encontramos aplicaciones de los mismos a nivel de laboratorio que permiten proporcionar soluciones a diversos tipos de problemas.

Cada elemento de la naturaleza y cada agrupación de elementos tiene su propia forma de reflejar la energía recibida emitiendo en una longitud de onda específica para cada banda, viene a ser como su propio ADN, lo cual puede ser base de trabajo para detectar multitud de características no visibles para el ojo humano. Se abre por tanto un campo casi ilimitado de oportunidades de investigación.

A continuación exponemos algunos campos en los que se trabaja actualmente con sensores hiperespectrales:

- ❖ Ayuda al diagnóstico médico de cáncer de piel,
- ❖ Diseño de sensores para el plan de “la medicina en casa”.
- ❖ Análisis de obras de arte y detección de falsificaciones.
- ❖ Detección de fugas de combustible en turbinas de aviones.
- ❖ Complementa todas las aplicaciones indicadas para las cámaras térmicas como serían en agricultura la determinación de acidez en frutos cítricos o defectos internos en estructuras y en aleaciones de materiales.
- ❖ Detección de fugas en gaseoductos y oleoductos por análisis del espectro del metano.
- ❖ Detección de fugas de líquido refrigerante en instalaciones de frío.

#### **1.3.3.5.- Otros sensores de tierra.**

Hemos comentado la utilización de sensores especiales ubicados en satélites o drones, sin embargo para el trabajo cotidiano, especialmente en agricultura se precisan muchas veces mediciones muy continuadas, en cuyo caso es preferible que los sensores se encuentren colocados en el propio terreno y sean capaces de transmitir los datos deseados



prácticamente de manera constante. Multitud de empresas ofrecen sus servicios de diseño y mantenimiento de programas de control.





#### **1.3.4.- Equipo de acumulación de datos (Data Logger).**

Para los servicios de control de sensores de tierra se precisa un nuevo equipo que acumule, clasifique y reenvíe los datos aportados por los sensores, generalmente de tipo local.



Presentamos el “data logger” desarrollado por Cube Nube para su sistema de control de plantaciones.

#### **1.4.- Plataformas genéricas Big Data. “La Nube”.**

Actualmente se dispone de una enorme cantidad de datos asequibles desde Internet o servicios específicos (cuyo conjunto denominamos “la nube”) que hacen imposible el manejo para cada proyecto concreto. Por ello, determinadas empresas están desarrollando plataformas específicas para cada campo de actuación tomando datos “de la nube”, procesándolos según programas desarrollados por ellos y presentando su resultado, bien sea entregándolo otra vez a “la nube”, o más frecuentemente aplicándolo a proyectos concretos y entregando el resultado a clientes en forma de servicios especializados.

## **2.- APLICACIONES EN EL SECTOR MEDIOAMBIENTAL**

El medio ambiente puede considerarse como un sector transversal que está presente prácticamente en todo tipo de aplicaciones y dado que cada una de ellas será objeto de una presentación específica aquí nos limitaremos a hacer una breve mención.

### **2.1.- Topografía, cartografía y fotogrametría**

La posibilidad de automatización del vuelo de un dron, así como su capacidad de volar a baja altura permite la realización de ortofotografía de muy alta resolución.

Mediante técnicas estereoscópicas se realizan Modelos Digitales del Terreno (MDT) de gran precisión, así como escenarios 3D para la simulación de actuaciones o para musealización.

En estas aplicaciones hay alguna específica relacionada con el medio ambiente como son:

- ❖ Control de vertido de residuos sólidos y su cubicación
- ❖ Inspección de infraestructuras de carreteras

### **2.2.- Agricultura de precisión.**

La mayoría de las aplicaciones en agricultura de precisión se basan en la medición de 4 parámetros:



- ❖ **Medición de estrés hídrico.**  
El **CWSI** (Crop-Water-Stress-Index), que incorpora variaciones en DPV, relacionando la diferencia de temperatura de cubierta y aire, permite detectar el déficit hídrico de forma precoz y las diferencias en las parcelas a nivel de cada individuo, lo que permite saber donde efectuar correcciones del riego.
- ❖ **Medición de contenido clorofílico.**  
Indicador de estrés directamente relacionado con procesos fotosintéticos, lo que nos permite detectar clorosis incipientes causadas por deficiencias nutricionales, patógenos u otros factores de estrés que no son detectables a nivel visual. Índices como **CARI**, **TCARI**, **MCARI** han demostrado su buena relación con el contenido clorofílico. El índice **TCARI** es uno de los que se generan en los vuelos realizados con aviones sobre cultivos, obteniendo un indicador del estado nutricional por la relación demostrada entre el contenido clorofílico y el nitrógeno foliar.
- ❖ **Medición de la productividad.**  
El índice de área foliar (**LAI**) nos informa sobre el vigor del cultivo.  
El índice **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) nos indica como está trabajando un cultivo en términos de producción, pues no solo se correlaciona con el Área Foliar, sino con la cantidad de luz absorbida y por lo tanto la producción fotosintética, lo que permite también intuir deficiencias en el abonado nitrogenado.
- ❖ **Medición de estrés de cultivo.**  
El índice **PRI** (Photochemical Reflectance Index) nos informa sobre la eficiencia del uso de la luz fotosintética del cultivo. Actúa por tanto como indicador previsual de estrés, debido a su relación con la eficiencia de la fotosíntesis de la planta. Su relación con la fotosíntesis ha permitido obtener buenas relaciones entre el índice y parámetros de calidad del fruto como el ratio azúcares/ácidos en cítricos.

Todos los estudios son tendentes a optimizar parámetros como:

- Los consumos de agua en riego, sectorizando la automatización del mismo de acuerdo con el estrés hídrico de la zona.
- Deficiencias en abonado
- Detección temprana de plagas y uso racional de insecticidas.

Todos estos controles permiten una más efectiva defensa del medio ambiente tanto desde el punto de vista de la menor contaminación como en el ahorro de consumos de agua y energía

## **2.2.- Sector forestal.**

La aplicación de los sistemas de inspección desde satélites complementados con la obtención de imágenes térmicas permite optimizar varios parámetros especialmente interesantes en la lucha antiincendios:

- ❖ Inventarios de residuos forestales en campo
- ❖ Confirmación rápida de inspecciones de detección temprana de focos de incendios.
- ❖ Análisis de consecuencias después del incendio y preparación de medidas preventivas.

## **2.3.- Detección de fuga de gases.**

Las mediciones específicas de gases con cámaras multiespectrales es un campo actualmente en fuerte desarrollo en el control de conducciones de gaseoductos y oleoductos o en los circuitos de frío industrial.



Basado en las características específicas de gases como el metano o el freón permite localizar con precisión los puntos donde se producen fugas.

#### **2.4.- Sector de aguas continentales**

El tema medioambiental en este sector es especialmente significativo por la incidencia de la contaminación de aguas en la salud por ello son muchas las aplicaciones específicas entre las que mencionamos:

- ❖ Vertidos ilegales a cauces públicos.
- ❖ Seguimiento de control de márgenes
- ❖ Proliferación de algas y eutrofización de pantanos
- ❖ Inspección de infraestructuras subacuáticas con ROV

El uso combinado de cámara óptica y cámara térmica es de especial aplicación en este sector para localización exacta de puntos conflictivos por diferencia de temperatura con el entorno.

#### **2.5.- Sector minero**

Son bien conocidas las aplicaciones de estudio de impacto ambiental en el sector minero como pueden ser:

- ❖ Canteras, pizarreras, escombreras
- ❖ Control de vertido de aguas de mina
- ❖ Pueden considerarse incluidos también los estudios de contaminación de suelos en inventario y en medidas correctoras.

#### **2.6.- Sector municipal e industrial.**

También en este sector, la utilización combinada de cámara óptica y térmica, de gran importancia para los estudios de eficiencia energética



## **La Teledetección en el control de las emisiones del tráfico: Lecciones del Proyecto CORETRA.**

Manuel Pujadas <sup>(1)</sup>, Aida Dominguez <sup>(1)</sup> y Josefina De la Fuente <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

<sup>2</sup> RSLab, Remote Sensing Lab.

[manuel.pujadas@ciemat.es](mailto:manuel.pujadas@ciemat.es)

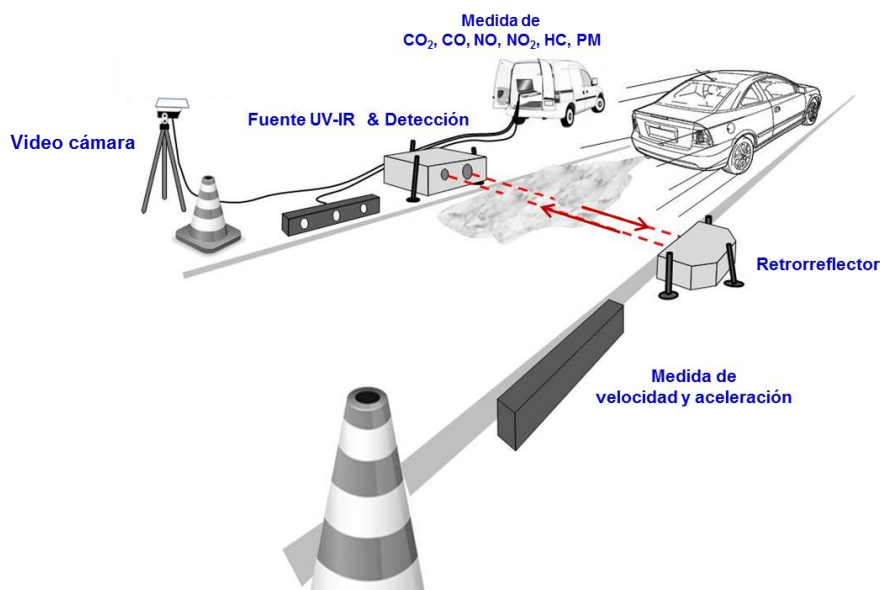
### **Introducción**

La vigilancia de la calidad del aire ambiente y el control de las emisiones a la atmósfera han sido ámbitos gestionados tradicionalmente mediante el empleo de técnicas de medida basadas en la toma de muestras de aire o humos y en su análisis. No obstante, la aplicación de técnicas de detección remota óptica, que no necesitan realizar muestreos, ha ido ganando protagonismo de manera progresiva en ambos terrenos en los últimos 25 años. En el caso de la medida de emisiones, el uso de este tipo de técnicas se ha dirigido principalmente a las procedentes de fuentes fijas (chimeneas), pero la teledetección aplicada al control de las emisiones producidas por fuentes móviles (tráfico de vehículos) también es técnicamente posible desde hace bastantes años. Esta aplicación concreta nació en EE.UU. a finales de la década de los 80 del pasado siglo y en poco tiempo se pasó del prototipo inicial desarrollado en la Universidad de Denver <sup>[1]</sup> a una versión comercial denominada sistema Remote Sensing Device, cuyas sucesivas versiones pronto lograron el reconocimiento y apoyo oficiales en aquel país. Desde entonces esta tecnología está considerada en EE.UU. una valiosa herramienta para el control de las emisiones del tráfico y en varios estados es habitualmente utilizada por las autoridades competentes. Por el contrario, en los países europeos el uso de esta tecnología se ha restringido exclusivamente al ámbito de la pura investigación aplicada y de los estudios técnicos especializados, pero gracias a iniciativas como la del proyecto español CORETRA y a sus resultados, esta situación podría empezar a cambiar en un futuro próximo. En esta ponencia se comentan algunos de los aspectos más relevantes de este proyecto.

### **Tecnología RSD**

La tecnología RSD (Remote Sensing Device) permite caracterizar por técnicas ópticas no intrusivas las emisiones del escape de los vehículos de manera directa y en condiciones reales de circulación por carretera. A través de dos haces luminosos (ultravioleta e infrarrojo) que cruzan perpendicularmente la carretera un instrumento RSD puede medir las concentraciones de diferentes contaminantes (monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), hidrocarburos (HC) y partículas PM) presentes en la estela de humos que los vehículos dejan a su paso.

Durante cada medida, el sistema también registra la velocidad y aceleración instantáneas del vehículo y toma imágenes de su placa de matrícula, lo que posteriormente permite averiguar sus características técnicas. En la figura 1 se muestra el despliegue experimental típico que se realiza al trabajar con sistemas RSD.



**Figura 1.** Esquema de la configuración habitual de los elementos que conforman un instrumento RSD genérico durante la realización de medidas de emisiones en carretera. (Ilustración adaptada de <sup>[3]</sup>)

Los equipos RSD permiten determinar concentraciones gaseosas linealmente integradas en el camino óptico de medida, por ello sus resultados corresponden a las ratios de concentración de los contaminantes detectados en cada penacho frente al CO<sub>2</sub>, gas mayoritario.

### El Proyecto CORETRA

El proyecto CORETRA (Control Remoto de las Emisiones del Tráfico), financiado por la Fundación Biodiversidad (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente) <sup>[2]</sup> <sup>[3]</sup> y por el CIEMAT, se llevó a cabo entre 2014 y 2015 con dos objetivos independientes: 1º) La realización de un análisis metrológico de los resultados ofrecidos por la tecnología RSD, 2º) El estudio del comportamiento emisor del parque circulante español de vehículos M1 (turismos) mediante el uso de esta tecnología.

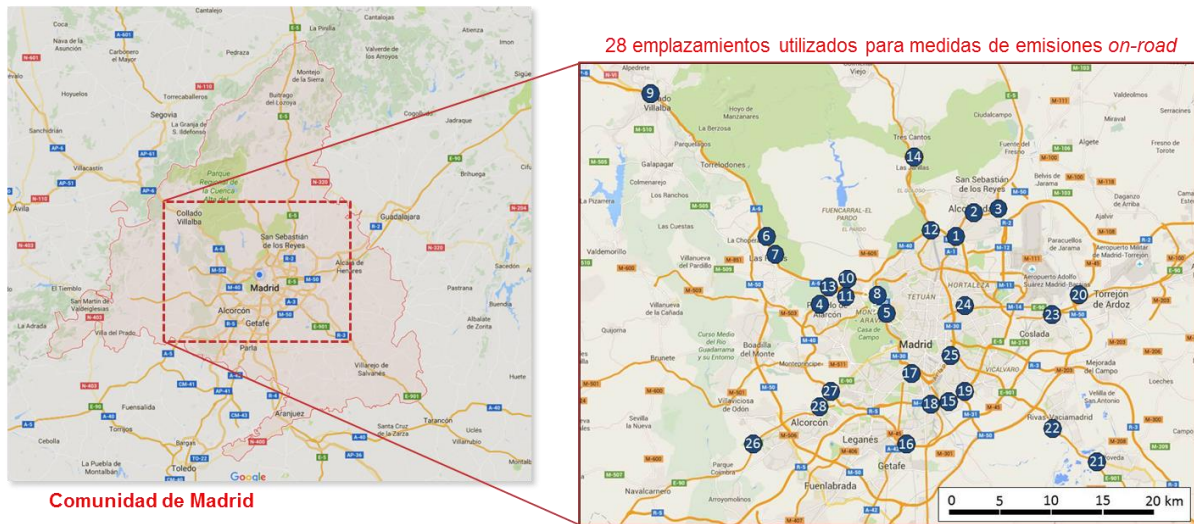


La evaluación metrológica planteada en el primer objetivo se abordó sometiendo a un instrumento AccuScan RSD 4600 de ESP<sup>[4]</sup>, modelo que se considera representativo del estado del arte de la tecnología RSD, a un profundo análisis de los resultados que producía al medir penachos gaseosos producidos en condiciones controladas. un. Para ello se utilizó una estrategia basada en medir con el equipo RSD penachos de gases de emisión generados a partir de botellas de gases de calibración de concentración conocida (materiales de referencia patrón). Esos gases se fueron liberando a la atmósfera de manera controlada desde un vehículo NISSAN Leaf (100% eléctrico) a través de un tubo de escape simulado y los penachos sintéticos producidos fueron caracterizados por el instrumento RSD sometido a evaluación. Las medidas se realizaron tanto en configuración dinámica (coche en circulación por una carretera convencional) como en configuración estática (con el vehículo parado) en una zona abierta alejada de otras fuentes, y el resultado de cada una de las medidas obtenidas pudo ser directamente evaluado frente a los valores esperados que venían determinados por las concentraciones de referencia de CO<sub>2</sub>, CO, NO y HC (propano) presentes en las botellas.

También se realizaron ensayos con banco motor, midiendo simultáneamente con RSD y PEMS (Portable Emission Monitoring System) las emisiones reales procedentes de la combustión, en este caso para estudiar la posible influencia de parámetros tales como la potencia vehicular específica (VSP) sobre la calidad de las medidas del instrumento RSD. En total se realizaron más de 1000 ensayos controlados.

El estudio de las incertidumbres asociadas con estas medidas de las ratios de concentración de CO/CO<sub>2</sub>, HC/CO<sub>2</sub> y NO/CO<sub>2</sub> producidas por el instrumento RSD han mostrado que el parámetro que el fabricante denomina “Plume Size” (contenido de CO<sub>2</sub> presente en el penacho y su persistencia durante el tiempo de medida) es el que determina principalmente el valor de la incertidumbre. Se ha encontrado que cuando la concentración media de CO<sub>2</sub> en un penacho es superior a 20% cm la incertidumbre media de los valores de las ratios no llega al 10% pero si el Plume Size es inferior al 20% cm, la incertidumbre puede acercarse al 12%. Estos resultados coinciden bien con la información que la empresa ESP, fabricante del equipo, incluye en la descripción técnica del mismo puesto que declara dos niveles de incertidumbre en sus medidas en función del valor del Plume Size: si el PS > 20% cm la incertidumbre máxima es del 10% y si el PS < 20% cm la incertidumbre máxima es del 15%.

Para abordar el segundo objetivo del proyecto CORETRA se consideró que el parque circulante de la Comunidad de Madrid es representativo del parque circulante español, por lo que se realizaron dos campañas de medida de emisiones en la red de carreteras de esta región. Para ello se utilizó el mismo sensor remoto AccuScan RSD4600 previamente evaluado, que fue instalado en 28 puntos de medida distribuidos según se muestra en la figura 2. Este despliegue experimental permitió la obtención masiva de datos de emisiones en modo “on-road”, es decir, en las carreteras y sin alterar las condiciones de circulación de los vehículos.



**Figura 2.** Distribución geográfica de los puntos de medida utilizados en el proyecto CORETRA desarrollado en la red de carreteras de la Comunidad de Madrid. (Ilustración adaptada de [3])

Se obtuvieron registros válidos de más de 194.000 vehículos (turismos + furgonetas) de los que más de 140.000 correspondieron a turismos individuales, es decir, sin repetición.

El análisis detallado de esta gran base de datos ha permitido conocer el comportamiento emisor en condiciones reales de esa parte de nuestra flota, de forma que los resultados promedio obtenidos cuentan con gran peso estadístico, algo muy difícil de conseguir utilizando otro tipo de tecnologías o metodologías. Una investigación pormenorizada de todos estos datos [4] ha permitido identificar y documentar aspectos importantes relacionados con la distribución y evolución de las emisiones de los vehículos en función de la norma Euro bajo la que fueron fabricados, de su tipo de motor y cilindrada, del fabricante, etc.

En la Tabla 1 se presentan los valores medios de las ratios de gases obtenidos en las campañas agrupados según el tipo de combustible y la normativa Euro de los vehículos registrados. Estos resultados permiten obtener una visión de conjunto interesante y extraer algunas conclusiones llamativas. La más sorprendente es que la introducción de las sucesivas normas Euro, cada vez más exigentes con los límites de emisión permitidos, no siempre ha tenido el efecto reductor esperado. Este es el caso de las emisiones de  $\text{NO}_x$  de la flota diésel, tal y como indican los valores de las ratios de  $\text{NO}/\text{CO}_2$  puesto que los valores medios apenas se han visto modificados con las distintas normas Euro.

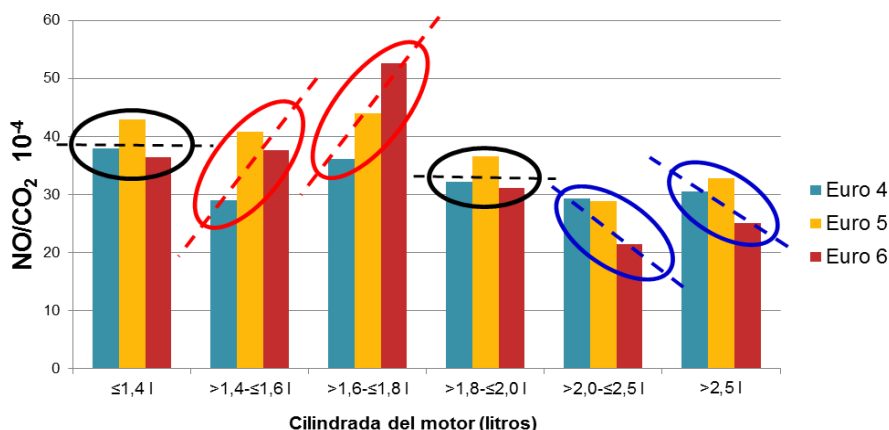


Llama la atención de modo especial que las emisiones de NO (y por extensión de NO<sub>x</sub>) de vehículos Euro 4, Euro 5 y Euro 6 diésel son similares a las de los vehículos más antiguos Pre-Euro o Euro 1, destacando de modo claro el repunte de las mismas en el caso de los Euro 5 diésel (marcado en rojo en la figura).

	Gasolina			Diésel		
	CO/CO <sub>2</sub>	HC/CO <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup>	NO/CO <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup>	CO/CO <sub>2</sub>	HC/CO <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup>	NO/CO <sub>2</sub> 10 <sup>-4</sup>
Pre-Euro	0,16	70,1	95,4	0,003	9,6	37,2
Euro 1	0,07	35,2	55,6	0,0028	9,1	40,1
Euro 2	0,03	13,6	34,2	0,0036	6,9	47,8
Euro 3	0,01	4,8	16,4	0,0024	3,8	47,5
Euro 4	0,007	0,5	6,6	0,0016	1,7	33,4
Euro 5	0,004	0,16	3,8	0,0014	0	40,2
Euro 6	0,002	2,06	3,9	0,0009	0	37

**Tabla 1** Ratios medias de CO/CO<sub>2</sub>, NO/CO<sub>2</sub> y HC/CO<sub>2</sub> para los vehículos turismos registrados durante las campañas de CORETRA considerando su distribución por normativa Euro y combustible.

El resumen del análisis de los datos promedio de las emisiones de NO en estos tres segmentos de la flota diésel se recoge en el histograma de la Figura 3, en donde las ratios medias han sido clasificadas por cilindrada del motor, habiéndose marcado de modo esquemático las tendencias observadas.



**Figura 3** Valores promedio de NO/CO<sub>2</sub> para los vehículos diésel Euro 4, Euro5 y Euro 6 registrados durante CORETRA, clasificados según la cilindrada de su motor. (Ilustración adaptada de [5])





En esta figura se observa que en promedio las emisiones de NO (y por tanto de NO<sub>x</sub>) de los vehículos Euro 5 diésel son superiores a las de los Euro 4 diésel en todas las cilindradas y que esta tendencia media creciente se ha mantenido también en los Euro 6 para los motores con cilindradas comprendidas entre los 1.4 y 1.8 litros.

Otro resultado importante del proyecto CORETRA se ha obtenido al establecer sobre el conjunto de datos registrados, y siguiendo criterios estadísticos, unos límites máximos de emisión para llegar a considerar a un vehículo como “vehículo Alto Emisor”. Los límites fijados son: NO/CO<sub>2</sub>=88 10<sup>-4</sup>; HC/CO<sub>2</sub>= 80 10<sup>-4</sup>; CO/CO<sub>2</sub>= 0,18

Al filtrar la base de datos del proyecto aplicando estos criterios se encontró que un 5-7% de los vehículos turismos de la flota tiene características de vehículos Altos Emisores y que estos se encuentran distribuidos en el conjunto del parque sin seguir un patrón claro y sin que ello se pueda vincular con la antigüedad ni con la tecnología de los vehículos. En este sentido y como hecho destacable, hay que señalar que el 35% de los Altos Emisores existentes en el parque circulante de turismos son vehículos Euro 5 diésel.

Como indicador de la importancia de esta situación señalar que para contaminantes tan importantes como el NO<sub>x</sub>, ese 5-7% de Altos Emisores pueden ser responsable del 30% de las emisiones totales de ese contaminante producidas por todo el parque circulante.

### **Lecciones del proyecto CORETRA:**

A partir del desarrollo de CORETRA se pueden extraer las siguientes conclusiones:

El sistema AccuScan RSD4600 de detección remota óptica permite realizar de manera instantánea medidas no intrusivas de emisiones de vehículos individuales en situación de circulación real y resulta idóneo para evaluar grandes flotas en poco tiempo. Se ha confirmado que las incertidumbres de las medidas proporcionadas por este equipo se encuentran en el rango del 10-15%.

El estudio del comportamiento emisor del parque circulante español realizado con una muestra de más de 190.000 vehículos ha permitido detectar grandes diferencias en la evolución de las emisiones de los turismos gasolina y diésel a partir de la aprobación de las sucesivas normativas Euro, constatando que la implementación de éstas ha producido efectos desiguales según los contaminantes a controlar.

Se ha documentado que las emisiones de NO<sub>x</sub> de turismos diésel Euro 4, 5 y 6 ha seguido una evolución anómala ya que en los últimos 10 años las ratios de NO/CO<sub>2</sub> de estos vehículos apenas han variado con la introducción de las nuevas normas Euro, e incluso se ha registrado un empeoramiento progresivo de la situación para ciertas motorizaciones. Esta tendencia general está bastante condicionada por el comportamiento de ciertos modelos de vehículos cuya presencia en el parque circulante español es importante.



El incremento de las emisiones de NO<sub>x</sub> debidas al tráfico que se deriva de este resultado es contraria a lo previsto por las autoridades europeas tras la aprobación de las normas Euro sucesivas y puede explicar en cierta medida el empeoramiento de diferentes parámetros indicadores de la calidad del aire de nuestras ciudades en los últimos años. Por otro lado, estos resultados también confirman que hay grandes diferencias entre las emisiones producidas por los vehículos en condiciones de circulación real y las producidas durante los ensayos de certificación y que esta situación afecta a bastantes fabricantes y modelos.

El proyecto CORETRA también ha permitido actualizar el conocimiento relacionado con la presencia en el parque circulante español de vehículos turismos con elevados índices de emisión respecto al comportamiento medio de la flota (Altos Emisores). Parece obvio que con un marco legislativo adecuado, el empleo de técnicas de medida remota de emisiones ayudaría a localizar esos Altos Emisores y a forzar su corrección, lo que permitiría reducir el volumen de emisiones del parque circulante contribuyendo de manera efectiva a mejorar la calidad del aire, objetivo final de este tipo de acciones.

Por todo ello parece obvio que las Técnicas de Detección Remota Óptica están en condiciones de ser eficaces herramientas que ayuden a la gestión ambiental y energética al permitir comprobar sobre una parte sustancial de la flota los efectos reales alcanzados con la aprobación de nuevos límites de emisión, o la eficacia de la aplicación de nuevas tecnologías de reducción de emisiones, evitando inconvenientes y falta de representatividad derivados de la aplicación de controles de emisiones de vehículos de carácter muestral.

En resumen, el conocimiento adquirido durante el desarrollo del proyecto CORETRA contribuirá a reenfocar en el futuro las metodologías del control de emisiones del tráfico, no sólo a nivel nacional sino también europeo. El previsible endurecimiento del marco normativo regulador y controlador de las emisiones individuales de los vehículos, tanto en la fase de certificación y homologación de cada modelo como posteriormente en condiciones de conducción real, requerirá sin duda de la aplicación de técnicas de teledetección óptica para alcanzar sus objetivos.

### **Agradecimientos**

Los autores quieren expresar su agradecimiento explícito a la Fundación Biodiversidad y al CIEMAT por su apoyo económico al proyecto CORETRA y a la Dirección General de Tráfico por el apoyo y cobertura recibidos para realizar los despliegues instrumentales en carretera.



## Referencias

[1] Bishop, G.A., J.R. Starkey, A. Ihlenfeldt, W.J. Williams and D.H. Stedman (1989), “IR Long-Path Photometry: A Remote Sensing Tool for Automobile Emissions”, *Analytical Chemistry*, Vol 61 (10), pp 671–677.

[2] <http://fundacion-biodiversidad.es/es/cambio-climatico-y-calidad-ambiental/proyectos-convocatoria-ayudas/coretra-control-remoto-de-emisiones-tr%C3%A1fico>

[3] [http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/documentacion-oficial/memoriatecnica\\_proyectocoretra\\_tcm7-442289.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/documentacion-oficial/memoriatecnica_proyectocoretra_tcm7-442289.pdf)

[4] [http://esp-global.com/en\\_US/RSD/AccuScan-Products](http://esp-global.com/en_US/RSD/AccuScan-Products)

[5] Pujadas, M., A. Domínguez-Sáez, J. De la Fuente (2017), “Real-driving emissions of circulating Spanish car fleet in 2015 using RSD Technology”, *Science of the Total Environment* 576 (2017) 193–209, 576, 193–209



## **USO DE LA TELEDETECCIÓN EN LOS INCENDIOS FORESTALES EN LAS ISLAS CANARIAS**

*Alfonso S. Alonso-Benito*

Colegio Oficial de Ingenieros de Montes  
Consultor Medioambiental en la Comunidad Canaria

**RESUMEN:** El uso de la teledetección en los incendios forestales se puede aplicar en tres momentos: antes del evento, durante el mismo, o a posteriori. Este trabajo consta de dos partes, en una primera centrada en la fase anterior al incendio, se presentan resultados obtenidos en el cartografiado de los combustibles forestales a nivel insular, con la actualización del mapa de combustibles en la isla de El Hierro con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS. El cartografiado se ha obtenido en dos niveles, un primer nivel con cinco tipos de combustibles, y un segundo nivel, con 19 tipos de combustibles. Para la clasificación, se han usado seis algoritmos de clasificación supervisados y dos algoritmos no supervisados. Los resultados obtenidos, muestran que en el primer nivel, el acierto total tiene un rango de entre 44% y 84%, en el segundo nivel, los resultados no son aceptables, siendo el error global medio del orden del 60%. En la segunda parte, tras ocurrir un incendio, se presentan las evaluaciones de áreas quemadas tras un gran incendio forestal (los que superan las 500 ha), en los incendios de 2016 ocurridos en la isla de La Palma con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel-2A, y en la isla de Madeira (Portugal) con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS.

**Palabras clave:** Landsat 8 OLI/TIRS, Sentinel 2A, El Hierro, Madeira, tipos de combustibles, área quemada



## 1. INTRODUCCIÓN

Sabiendo de las graves situaciones que provoca un incendio forestal, los gestores públicos pueden actuar sobre los mismos en tres momentos distintos (GAO, 2003): previo al incendio, durante el incendio y después del incendio.

Las actividades previas a un incendio se centran en minimizar el riesgo. Consisten en el seguimiento de cambios en la vegetación, el control de los combustibles forestales y la observación y predicción de las variables meteorológicas temperatura, humedad y viento fundamentalmente. Otras actividades durante esta fase incluyen la gestión de los recursos humanos y la evaluación de los materiales disponibles. Las actividades que se llevan a cabo durante un incendio incluyen la detección del mismo, la planificación del ataque contra el fuego y el envío de recursos. Con respecto a las actividades post-incendio se incluye la evaluación del impacto del fuego (cuanto, cómo y dónde se ha quemado), los mecanismos de estabilización que protejan frente a los efectos secundarios del fuego (inundaciones, contaminación de la cuenca o erosión de la superficie), la rehabilitación de las zonas afectadas y la realización de trabajos de restauración.

En este trabajo se muestran dos aplicaciones utilizando teledetección aplicadas en la fase previa del incendio y a posteriori. La primera parte, presenta los resultados obtenidos en el cartografiado de los combustibles forestales a nivel insular, actualización del mapa de combustibles en la isla de El Hierro con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS. En el entorno de las islas Canarias, también se han cartografiado los combustibles a nivel municipal usando imágenes ASTER (Alonso-Benito *et al.*, 2013), y a nivel local enfocado en una zona forestal de gran heterogeneidad con fusión de imágenes de muy alta resolución espacial, WorldView-2 y datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Alonso-Benito *et al.*, 2016). En la segunda parte, tras ocurrir un incendio, se presentan las evaluaciones de áreas quemadas tras un gran incendio forestal (los que superan las 500 ha), en los incendios de 2016 ocurridos en las islas de La Palma con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel-2A, y la isla de Madeira (Portugal) con imágenes Landsat 8 OLI/TIRS.

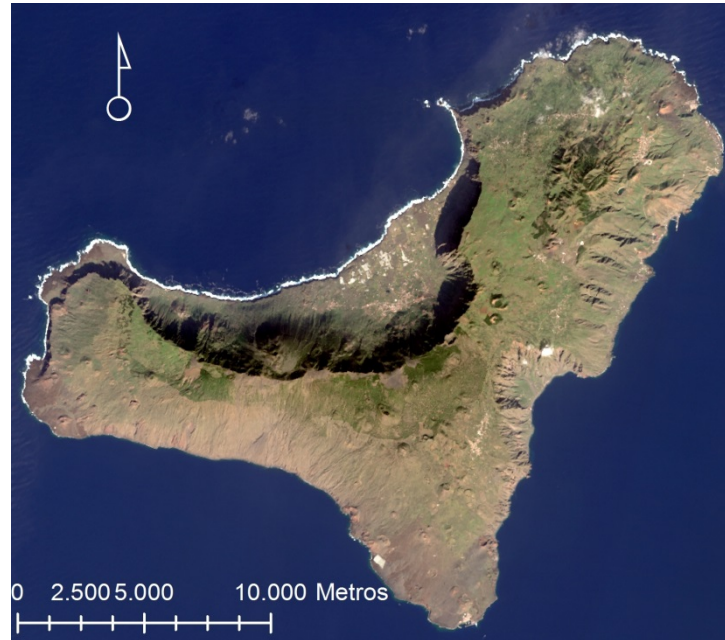
## 2. Mapas de combustibles

### 2.1 Área de estudio

El Hierro es la isla más pequeña del Archipiélago canario, conocida como isla del Meridiano, está situada entre los 27° 38' y 27° 51' N de latitud y los 17° 53' y 18° 09' W de longitud (Figura 1). Es una isla volcánica montañosa, cuya altitud máxima el Pico del Malpaso con 1.501 m.s.n.m. El clima está condicionado por su proximidad al trópico, y se encuentra influenciada por los alisios, lo cual, asociado al relieve de la isla, le da distintas zonas climáticas, no lloviendo más de 150 mm anuales en las costas del sur, y superando los



750 mm en el lado norte de la isla. El 58,1% de la superficie de la isla se encuentra protegida, siendo desde enero del año 2000 Reserva de la Biosfera de la UNESCO.



**Figura 1.** Imagen del satélite Landsat 8 OLI/TIRS de la Isla de El Hierro (RGB 432).

Gran parte de los ecosistemas marinos y terrestres de las Islas Canarias, se encuentran presentes en El Hierro, siendo una de las islas con mayor superficie protegida de todo el archipiélago, 58,1%. Desde el 22 de enero de 2000, la UNESCO declaró a la isla, como “Reserva de la Biosfera”, reconociendo así las particulares características del territorio y su apuesta de futuro por el desarrollo sostenible.

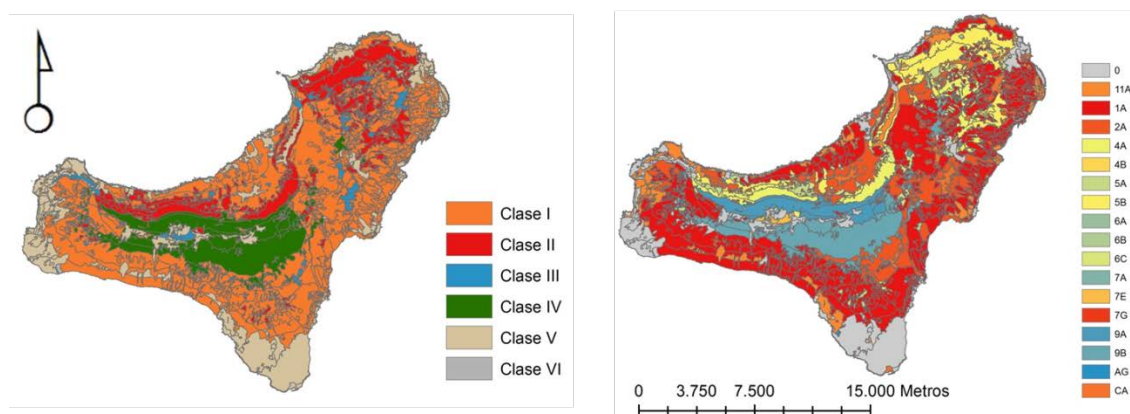
La Reserva de la Biosfera divide la isla en tres áreas básicas: el núcleo central (1.219 ha, de las que 150 ha son marinas), una zona de protección perimetral (15.909 ha, de las que 750 ha son marinas) y una zona de transición con 12.472 ha. En el núcleo central se encuentran las áreas más frágiles desde el punto de vista de la biodiversidad, y está compuesta principalmente por los espacios protegidos de mayor valor, destacando la Reserva Natural Integral de Mencafete, la Reserva Natural Integral de Roques de Salmor y la Reserva Natural Especial de Tibataje, donde podemos encontrar el bosque termófilo de sabinas, conocido como “El Sabinar”, bosques de laurisilvas o la presencia de endemismos incluidos en el Libro Rojo de la Flora Vascular Amenazada de España como la hierba *Cerastium sventenii* Jalas. En la zona perimetral, se desarrollan actividades compatibles con la biodiversidad. El resto de la isla se encuentra en la zona de transición, donde se encuentran las áreas más transformadas por la actividad humana, y apenas tienen interés de cara a la biodiversidad, e incluye la mayoría de los núcleos habitados de la isla.



## 2.2 Combustibles forestales

Los gestores forestales utilizan programas de modelación de incendios forestales, tanto para estudiar los incendios pasados, como para predecir el comportamiento de los mismos. Entre los modelos de simulación de comportamiento del fuego más conocidos cabe citar FARSITE (Finney 2004) o BehavePlus (Andrews, 2009), entre otros. Estos programas, se alimentan de numerosas capas de información; mapa de vegetación, vientos, humedad, temperatura, infraestructuras existentes, y mapas de combustibles, ésta última es la que se cartografía mediante teledetección.

Los *tipos de combustibles* se pueden definir como “*aquellas asociaciones vegetales, con especies, formas, tamaños y continuidad, que presentan un mismo comportamiento ante un incendio forestal*” (Merril & Alexander, 1987). De las numerosas clasificaciones de combustibles forestales que existen (Arroyo *et al.*, 2008), la Isla de El Hierro utiliza una clasificación propia adaptada a la vegetación canaria, realizada bajo el proyecto FORESMAC (FORESMAC, 2013), el cual presenta 5 clases que se subdividen en 19 tipos de combustibles (Figura 2 y Tabla 1).



**Figura 2.** Mapa de combustibles forestales para el nivel 1 (cinco clases, y la Clase VI son zonas no combustibles) a la izquierda, y mapa de combustibles forestales en el nivel 2 (19 clases) a la derecha.



**Tabla 1.** Clases y tipos de combustibles adaptados a la isla de El Hierro.

Clases	Tipos de Combustibles ( <i>Fuel Type, FT</i> )
Clase I. Pastizales	<ul style="list-style-type: none"><li>• FT 1A: herbazal con cubierta de matorral &lt; 25%.</li><li>• FT 2A: herbazal con cubierta de matorral entre 33-66%.</li></ul>
Clase II. Matorrales	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Altura &lt; 1.2 m<ul style="list-style-type: none"><li>• FT 5A: Especies termófilas (<i>Codesus spp.</i> and <i>Retama spp.</i>) con herbáceas.</li><li>• FT 5B: Especies termófilas con especies suculentas (<i>Euphorbia spp.</i>)</li></ul></li><li>○ Altura &gt; 1.2 m<ul style="list-style-type: none"><li>• FT 4A: Brezo (<i>Erica arborea</i> L.) a formaciones de monteverde</li><li>• FT 4B: <i>Codesus spp.</i>, <i>Erica arborea</i> L. and <i>Cistus spp.</i></li><li>• FT 6A: Matorral denso, invasor de tierras agrícolas abandonadas.</li><li>• FT 6B: Matorral termófilo con especies suculentas (<i>Euphorbia spp.</i>)</li><li>• FT 6C: <i>Retama spp.</i> y <i>Erica arborea</i> L. con FCC* &gt;50%.</li></ul></li></ul>
Clase III. Cobertura del arbolado >50%.	<ul style="list-style-type: none"><li>• FT 7A: Eucaliptales, sotobosque con zarzas, brezos y helechos.</li><li>• FT 7D: Pinar (<i>Pinus canariensis</i> C.Sm. ex DC.) con sotobosque predominante de brezo y Monteverde.</li><li>• FT 7E: Pinar (<i>Pinus canariensis</i> C.Sm. ex DC.) con sotobosque predominante de Monteverde.</li><li>• FT 7G: Pinar (<i>Pinus canariensis</i> C.Sm. ex DC.) con sotobosque de especies termófilas y xerófilas.</li></ul>
Clase IV. Sotobosque con bosque de FCC <15%.	<ul style="list-style-type: none"><li>• FT 9A: Monteverde limpio</li><li>• FT 9B: Pinar (<i>Pinus canariensis</i> C.Sm. ex DC.) limpio</li></ul>
Clase V. Formaciones xerófilas	<ul style="list-style-type: none"><li>• FT 11A: Arbolado con FCC&lt;50%, con predominio de formaciones xerófilas (cardonales y tabiabales).</li></ul>

\* FCC = Fracción de Cobertura Cubierta.





### 2.3 Datos del sensor utilizado

Una imagen del 25 de diciembre de 2013 del sensor Landsat 8 OLI/TIRS ha sido utilizada. En la Tabla 2 se muestran los datos del satélite utilizado, Landsat 8 OLI/TIRS, para la realización del mapa de combustibles.

La imagen usada fue corregida radiométrica y geoméricamente, con el objetivo de obtener una imagen que reproduzca de la forma más fiel posible la energía reflejada y las características espaciales de la zona de estudio.

**Tabla 2.** Características del satélite utilizado para el cartografiado de combustibles.

	<b>Landsat 8 OLI/TIRS</b>
<i>Rango espectral (<math>\mu m</math>)</i>	0,43 – 12,51
<i>Resolución espacial (m) (PAN/VNIR/SWIR/TIR)*</i>	15/30/30/100
<i>Ancho de barrido (km)</i>	185 x 170 *
<i>Resolución radiométrica (bit)</i>	12 / 16
<i>Resolución temporal</i>	16 días
<i>Número de bandas (PAN/VNIR/SWIR/TIR)</i>	1/6/2/2
<i>Fecha de adquisición</i>	Diciembre 2013
<i>Costo adquisición</i>	gratis
<i>WRS Path/Row</i>	208 / 41

\*PAN = pancromático / VNIR = visible e infrarrojo próximo / SWIR = infrarrojo corto / TIR = térmico.

\* Landsat 8 OLI/TIRS toma los datos de forma continua, y se ofrece en escenas de 185 x 179 km.

### 2.4 Metodología

Se han evaluado ocho clasificadores, seis son algoritmos supervisados: paralelepípedo, máxima probabilidad (Maximum Likelihood), distancia de Mahalanobis, mínima distancia, mapeo del ángulo espectral (Spectral Angle Mapper) y divergencia de la información espectral (Spectral Information Divergence). Y dos son algoritmos no supervisados: Isodata y K-Medias. En la clasificación supervisada se han utilizado áreas de entrenamiento elegidas de acuerdo a la variabilidad de cada tipo de combustible, y siempre, evitando las zonas de transición entre diferentes tipos. Estas áreas de entrenamiento fueron parcelas circulares con superficies variables y distribuidas aleatoriamente sobre la isla. La selección de las mismas, fue hecha en base a una interpretación visual de las fotos aéreas de la isla y al mapa de combustibles digitalizado que tiene el Cabildo de El Hierro. En total, se eligieron 200 parcelas, de las que el 50% se usaron para entrenar los algoritmos, y el 50% restante para validar los resultados. La validación de los mapas se calcula mediante los errores de



cantidad (quantity disagreement) y de ubicación (allocation disagreement) (Pontius & Millones, 2011).

La clasificación de los combustibles, se realizó en dos niveles. En un primer nivel solo se tuvieron en cuenta cinco clases (herbazales, matorrales, bosques con cubierta superior al 50%, bosques con cubierta inferior al 15% y formaciones xéricas), y en un segundo nivel se considerando 19 tipos de combustibles.

## 2.5 Resultado

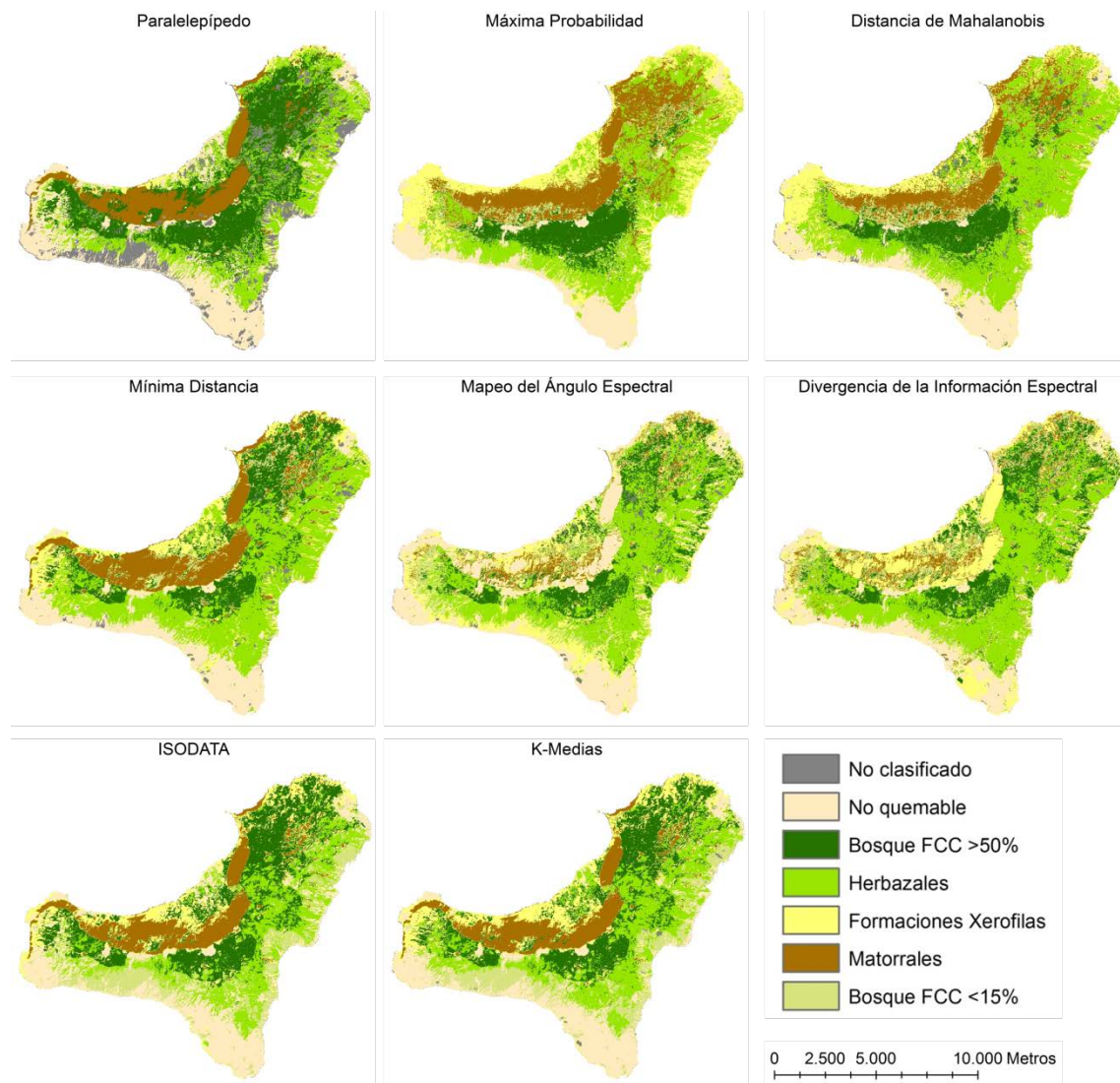
En la Figura 3 se pueden ver los ocho mapas generados para el nivel 1 (cinco clases de tipos de combustibles). Visualmente, no se aprecian diferencias significativas entre ellas, pero en los mapas de los algoritmos de mapeo del ángulo espectral y divergencia de la información espectral, la clase de matorral fue subestimada.

Los mapas generados considerando los 19 tipos de combustibles, presentan errores muy altos, con unos acierto totales que toman valores de entre 19 y 34%, siendo el algoritmo de máxima probabilidad el que muestra un mejor acierto. Estos errores elevados, indican, que este tipo de algoritmos de clasificación no son útiles para clasificar tantos tipos de combustibles.

En la Tabla 3, se muestran los aciertos totales y los errores obtenidos para los mapas generados teniendo en cuenta cinco tipos de combustibles. El algoritmo de máxima probabilidad es el que muestra mejores datos, con un acierto total del 84%, y unos errores de cantidad y ubicación del 7 y 9%, respectivamente.

**Tabla 3.** Acierto total y errores por cantidad y ubicación para el nivel 1 de clasificación.

Algoritmo	Acierto total (%)	Error por cantidad (%)	Error por ubicación (%)
Paralelepípedo	44	32	24
Mínima Distancia	58	21	21
Distancia de Mahalanobis	74	20	18
Máxima Probabilidad	84	7	9
Mapeo del Ángulo Espectral	48	34	18
Divergencia de la Información Espectral	49	32	19
Isodata	58	24	18
K-Medias	61	19	20



**Figura 3.** Nivel 1 considerando cinco clases de combustibles, una de no quemable (no combustible) y la correspondiente a no clasificado.



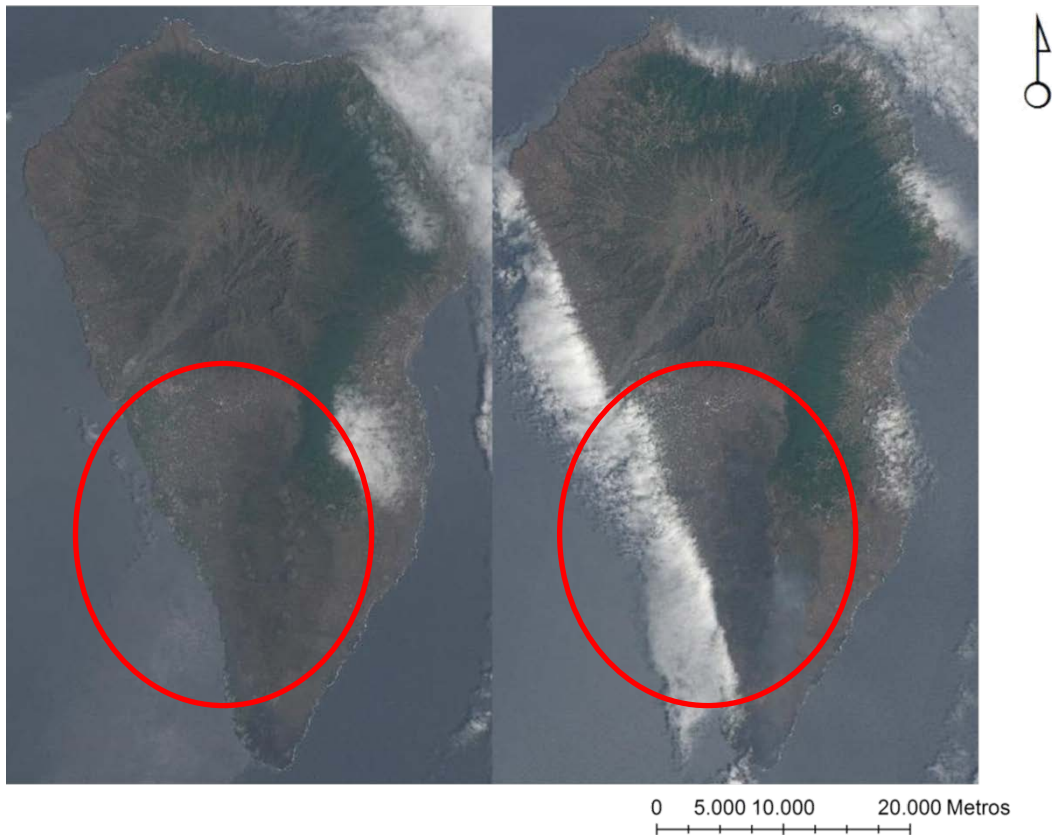
### **3. Cartografiado de área quemada**

Una vez ocurrido el incendio, uno de los usos más habituales de la teledetección es el cartografiado de área quemada. Son muchos los trabajos publicados sobre el tema a nivel global (Moreno-Ruiz *et al.*, 2012; Tansey *et al.*, 2008; Simon *et al.*, 2004) o a nivel local (Alonso-Benito *et al.*, 2008). En el siguiente apartado se exponen los resultados obtenidos para los incendios ocurridos el pasado agosto en las islas de La Palma (España) y Madeira (Portugal), usando imágenes de los satélites Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel 2A.

#### **3.1 Incendio de La Palma**

El pasado verano en la Isla de La Palma, se produjo un GIF que afectó a casi el 7% de la superficie de la isla. Basado en la información existente (Figura 4 y Tabla 4), se ha cartografiado el área quemada.

En la isla de La Palma, la zona afectada está cubierta es un 64,8% por pinares de pino canario (*Pinus canariensis* C.Sm. ex DC), un 16,2% por matorrales de crespas (*Descurainia gilvae-Plantaginetum webii*), con predominio de la crespa (*Plantago webii* Barn.), la hierba pajonera (*Descurainia gilva* Svent.) o el rosquito de cumbre (*Pteroccephalus porphyranthus* Svent.), y un 8,5% por vegetación rupícola típica de los malpaíses recientes con predominio de vinagreras (*Rumex lunaria* L.), cornicales (*Periploca laevigata* Aiton) o higuierillas (*Euphorbia lamarckii* Sweet). El resto de superficie a afectado en menor medida a otras formaciones vegetales, así como a arenas volcánicas y desplomes costeros según datos oficiales del Cabildo de La Palma (disponibles online en la dirección <https://goo.gl/E9xqgw>).



**Figura 4.** Imágenes de Sentinel 2A antes (derecha) y después (izquierda) del incendio ocurrido en agosto de 2016 en la Isla de La Palma.

**Tabla 4.** Datos del incendio e imágenes pre/post incendio empleadas para el cartografiado del área quemada.

Satélite usado	Fecha Incendio	Imagen pre incendio	Imagen post incendio
Landsat 8	3/08/2016 – 7/08/2016	26/07/2016	11/08/2016
Sentinel 2A		28/07/2019	07/08/2016 *

\*Las imágenes posteriores presentaban nubes y no podían utilizarse cuando se realizó la descarga de las mismas.

Las imágenes utilizadas son de los satélites Landsat 8 OLI/TIRS (en la Tabla 4 se encuentran sus características) y Sentinel 2A, cuyas características están en la Tabla 5.



**Tabla 5.** Características del satélite Sentinel 2A utilizado para el cartografiado de áreas quemadas.

	<b>Sentinel 2A</b>
<i>Rango espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	0,44 – 2,19
<i>Resolución espacial (m)</i> <i>(NUBES/RGB/NIR/SWIR)*</i>	60/10/20/20
<i>Ancho de barrido (km)</i>	290
<i>Resolución radiométrica (bit)</i>	8 / 12 / 16
<i>Resolución temporal</i>	16 días
<i>Número de bandas (NUBES/RGB/NIR/SWIR)</i>	3/4/4/2
<i>Costo adquisición</i>	gratis

\*NUBES = bandas especiales para aerosoles, vapor de agua y cirrus /  
RGB = incluye las bandas RGB y una banda NIR / NIR = infrarrojo  
próximo / SWIR = infrarrojo corto.

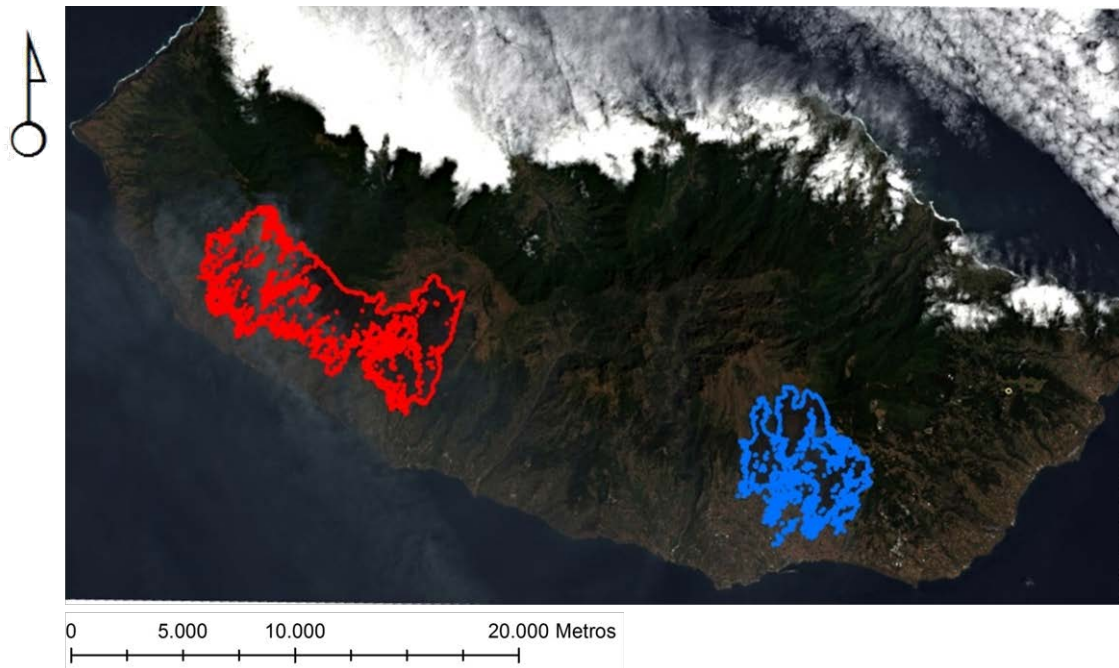
Tanto la imagen Landsat 8 OLI/TIRS como Sentinel 2<sup>a</sup> fueron corregidas radiométrica y geoméricamente, para obtener los valores de reflectancia en la superficie, una vez limpiado el efecto de la atmósfera.

### **3.2 Incendio de Madeira**

A principios de agosto y coincidiendo con una alerta naranja por ola de calor establecida por el IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera), se produjeron dos incendios (Figura 5) en la costa sur de la isla de Madeira.

Los incendios (Tabla 6) ocurrieron en la vertiente sur de la isla, de acuerdo a datos de la DRFCN (*Direcção Regional de Florestas e Conservação da Natureza*), el 84% de los incendios ocurridos en la isla de Madeira, tienen lugar en esta zona, debido a su carácter más antropizado, que la vertiente norte, representada por un terreno con orografía más compleja y menos intervenido.

El incendio de los municipios de la Calheta y Ponta do Sol, afectó por completo a un área encuadrada en el *Parque Natural da Madeira* (este parque ocupa el 67% de la isla). La parte norte de este incendio afectó en menor medida a las áreas clasificadas como ZEP y ZEC *Laurissilva da Madeira* y *Maciço montanhoso central da ilha da Madeira*. El incendio del municipio de Funchal, quemó casi un 50% del Parque Natural da Madeira, el otro 50% afectó al área urbana de la ciudad, obligando al desalojo de servicios sanitarios, y provocando cuatro muertos y puso en peligro a los habitantes de la zona.



**Figura 5.** Imagen Landsat 8 OLI/TIRS de la Isla de Madeira (Portugal) en verdadero color RGB. El polígono rojo es el incendio de los municipios de Calheta y Ponta do Sol. El polígono azul es el incendio en el municipio de Funchal.

**Tabla 6.** Datos del incendio e imágenes pre/post incendio empleadas para el cartografiado del área quemada.

Satélite usado	Fecha Incendio	Imagen pre incendio	Imagen post incendio
Landsat 8 OLI/TIRS	8/08/2016 – 13/08/2016	26/07/2016	11/08/2016*

\*Las imágenes posteriores presentaban nubes y no podían utilizarse cuando se realizó la descarga de las mismas.



### 3.3 Metodología

Una vez obtenidas las imágenes con el valor de reflectancia en superficie, se calcula el ratio normalizado de zona quemada (*Normalized Burn Ratio*, NBR). Este índice utiliza las bandas de infrarrojo (NIR) e infrarrojo corto (SWIR) (Tabla 7), de acuerdo a la siguiente ecuación (Lopez & Caselles, 1991; Key & Benson, 1999):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

**Tabla 7.** Bandas utilizadas para el cálculo del índice NBR de acuerdo al satélite usado.

Satélite usado	Banda NIR	Banda SWIR
Landsat 8	B5	B7
OLI/TIRS		
Sentinel 2A	B8a	B12

Para obtener el área quemada, se ha calculado el índice NBR en la imagen anterior al incendio y en la posterior, y se obtiene la diferencia *dNBR*. Sobre esta imagen, se ha obtenido el área de interés aplicando umbrales.

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

Además, de acuerdo a Key & Benson (2006), se realiza una clasificación de la severidad del incendio, en función del valor *dNBR* anteriormente calculado.

### 3.4 Resultados

En la Isla de La Palma el área afectada por el incendio calculada mediante el índice *dNBR* (Figura 6) de la imagen Landsat 8 OLI/TIRS, fue de 4.343,31 ha, un 5,7% inferior a los datos oficiales cifrados en 4.606,67 ha. Por otro lado, el índice *dNBR* de la imagen Sentinel 2A ha dado una superficie afectada de 4.106.64 ha, 10,8% inferior.

En la Isla de Madeira, las cifras oficiales estiman en 6.200 ha el tamaño de la superficie afectada por los dos incendios ocurridos en agosto de 2016 (datos todavía oficiosos). De acuerdo a la imagen Landsat 8 OLI/TIRS los incendios han ocupado un área de 5.908,14 ha, un 4,7% inferior (Figura 7).

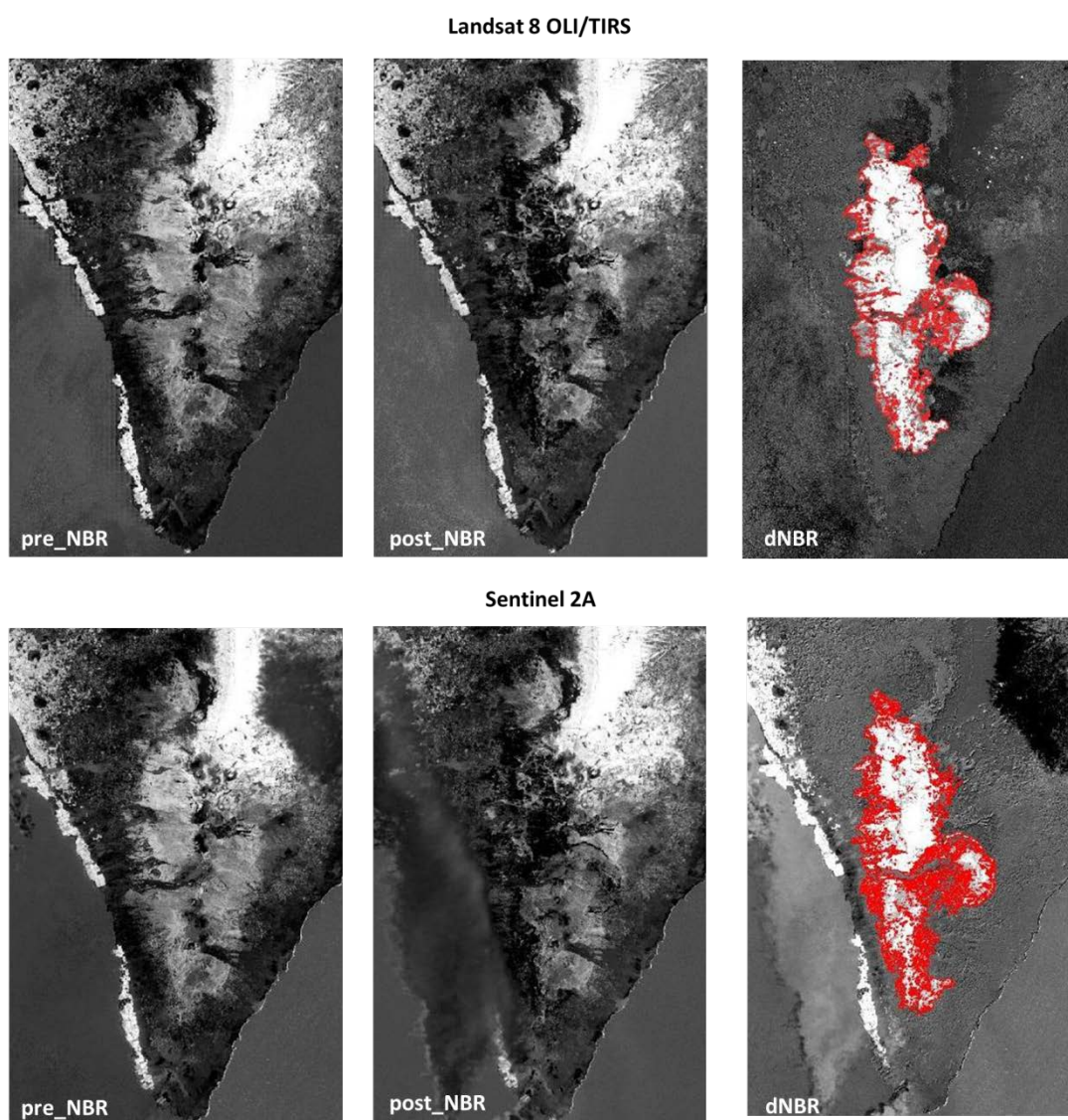
Es importante entender que área afectada no significa área quemada, así, de acuerdo a la clasificación de la severidad de un incendio, la Isla de La Palma (Figura 8) presenta en la imagen Landsat 8 OLI/TIRS el 7,9% (341,46 ha) clasificado con un grado de severidad



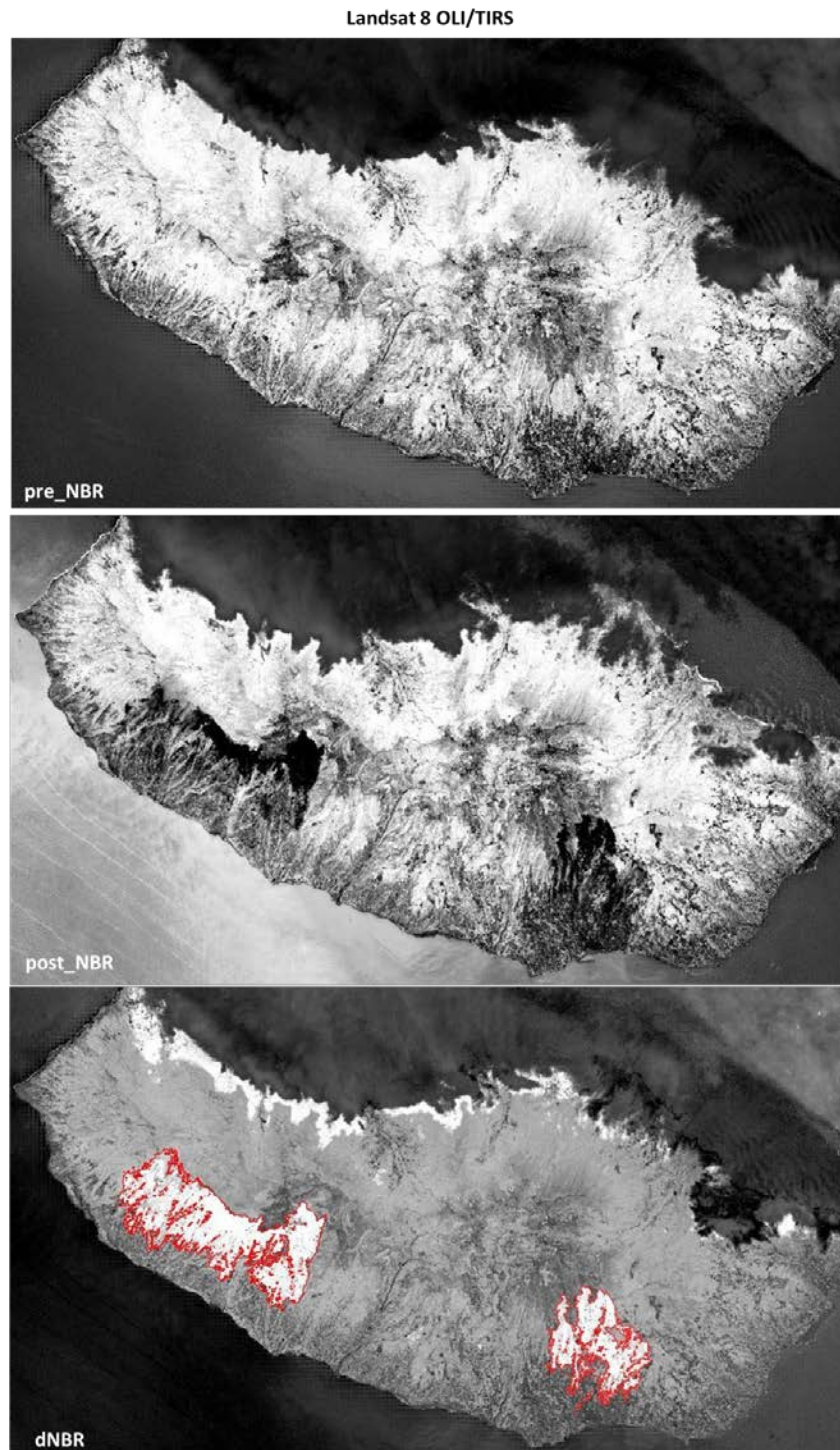


muy alto, mientras que este mismo grado en la imagen Sentinel 2A suponen un 7,4% (320,96 ha) de la superficie.

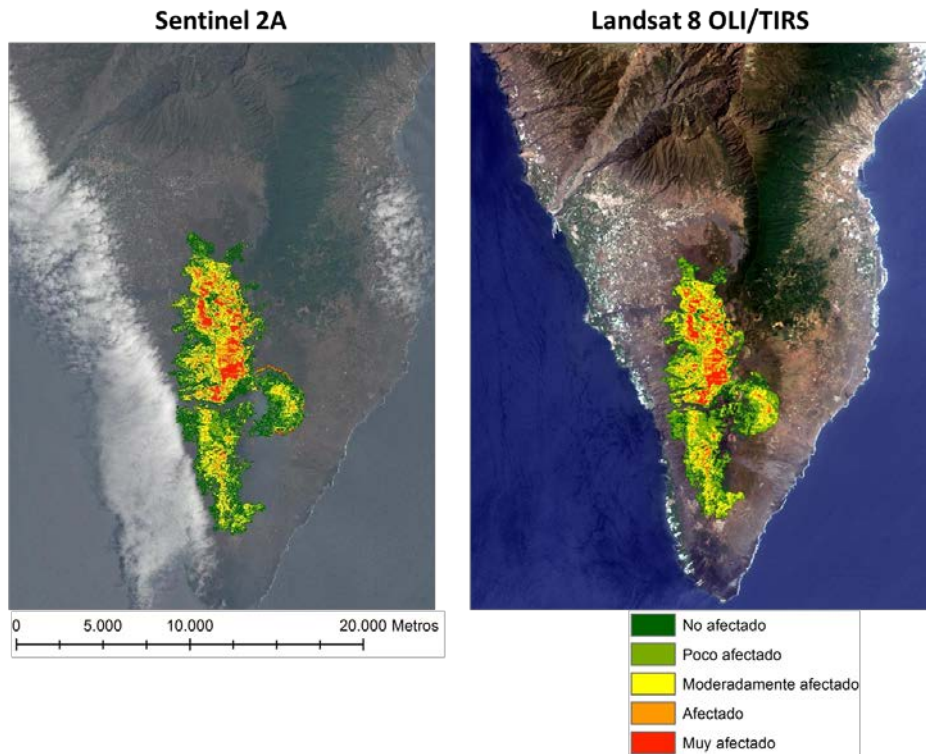
Para la Isla de Madeira, el incendio de la Calheta y Ponta do Sol, afectó a 4.077,72 ha, de los cuales un 0,9% (39,96 ha) presenta un grado de severidad muy alto. El incendio de Funchal ha presentado una superficie de 1.830,42 ha, de esta superficie, un 0,1% (2,07 ha) tiene un grado de severidad muy alto (Figura 9).



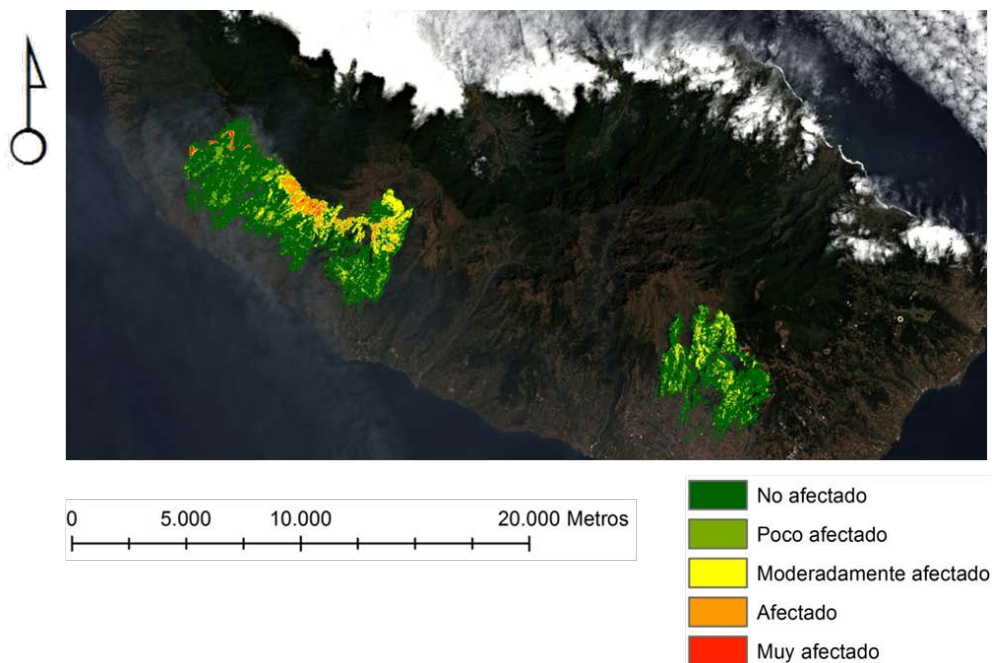
**Figura 6.** Valores obtenidos de NBR antes y después del incendio, en los satélites Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel 2A. El polígono rojo es el límite del incendio obtenido mediante dNBR.



**Figura 7.** Valores obtenidos de NBR antes y después del incendio, en el satélite Landsat 8 OLI/TIRS. Los polígonos rojos son los límites de los incendios obtenidos mediante dNBR.



**Figura 8.** Valores de severidad obtenidos a partir del índice dNBR.



**Figura 9.** Grado de severidad de los incendios de la Isla de Madeira ocurridos en agosto de 2016.



#### **4. Conclusiones**

Se ha verificado el potencial del satélite Landsat 8 OLI/TIRS para realizar un mapa de combustibles en la Isla de El Hierro, cuya actualización a nivel de grupos, podría ser realizada de forma automática y a bajo coste. Se ha comprobado, que a nivel de subgrupo, habría que estudiar otras alternativas que ofreciesen unos porcentajes de error menores a los obtenidos en este trabajo.

Se ha evaluado la buena capacidad tanto de los datos del satélite Landsat 8 OLI/TIRS como Sentinel 2A, para el cartografiado de áreas quemadas y una primera valoración de la severidad del incendio a nivel local, para las islas de La Palma y Madeira. Las diferencias de la superficie obtenida respecto a las cifras oficiales, no superan en ningún caso el 11%. Estos valores podrían mejorar, evaluando otras imágenes posteriores a la fecha final del incendio, y analizando otros índices.

#### **5. Agradecimientos**

Quiero dar las gracias a la Viceconsejería de Medioambiente del Gobierno de Canarias y al grupo GOTA de la Universidad de La Laguna, por permitirme, utilizar el mapa de combustibles de la Isla de El Hierro.

#### **6. Bibliografía**

GAO (2003). *Geospatial information technologies hold promise for wildland fire management, but challenges remain*. United States General Accounting Office. Report to Congressional Requesters GAO-03-1047.

Alonso-Benito, A.; Arroyo L.A.; Arbelo, M.; Hernández-Leal, P.; González-Calvo, A. (2013). *Pixel and object-based classification approaches for mapping forest fuel types in Tenerife Island from ASTER data*. International Journal of Wildland Fire, Volume 22 (Issue 3), pp 306-317. <http://dx.doi.org/10.1071/WF11068>.

Alonso-Benito, A.; Arroyo, L.A.; Arbelo, M.; Hernández-Leal, P. (2016). *Fusion of WorldView-2 and LiDAR data to Map Fuel Types in Canary Islands*. Remote Sensing, 2016, 8, 669, 18 pp. doi: 10.3390/rs8080669

Finney, M.A. (2004). *FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, pp. 47. Accesible online <http://goo.gl/WplQb7>, último acceso octubre 2015.

Andrews, Patricia L. (2009). *BehavePlus fire modeling system, version 5.0: variables*. General Technical Report RMRS-GTR-213WWW Revised. Fort Collins, CO: USDA Forest



Service, Rocky Mountain Research Station, pp. 111. Accesible online <http://goo.gl/hZUv4r>, último acceso octubre 2015. Merrill & Alexander, 1987

Arroyo, L.A., Pascual, C., Manzanera, J.A. (2008). *Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing*. Forest Ecology and Management 256(6), pp. 1239-1252.

V.V.A.A. (2013). *Cooperación y Sinergias en materia de aprovechamiento forestal sostenible en la Región Macaronésica* – FORESMAC con código MAC/2/C75. Programa de Cooperación Transnacional MAC 2007-2013.

Pontius, R.G.; Millones, M. (2011). *Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment*. International Journal of Remote Sensing 32(15), pp. 4407-4429.

Moreno-Ruiz, J.A.; Riaño, D.; Arbelo, M.; French, N.H.F.; Ustin, S.L.; Whiting, M.L. (2012). *Burned area mapping time series in Canada (1984-1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters*. Remote Sensing of Environment, Vol 117, pp. 407-414. Tansey et al., 2008

Alonso-Benito, A.; Hernández-Leal, P. A.; González-Calvo, A.; Arbelo, M.; Barreto, A. (2008): “*Analysis of different methods for burnt area estimation using remote sensing and ground truth data*”. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International. Volume 3. Pp. III - 828 - III – 831. Boston, MA. ISBN: 978-1-4244-2807-6. DOI: 10.1109/IGARSS.2008.4779477.

Lopez Garcia, M.J.; Caselles, V. (1991). *Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data*. Geocarto International, 1, pp. 31-37.

Key, C.H.; Benson, N.C. (1999). *A general field method for rating burn severity with extended application to remote sensing*. En revisión.

Key, C.H.; Benson, N.C. (2006). *Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio; and ground measure of severity, the Composite Burn Index*. In FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

## SUEZ Smart Agriculture

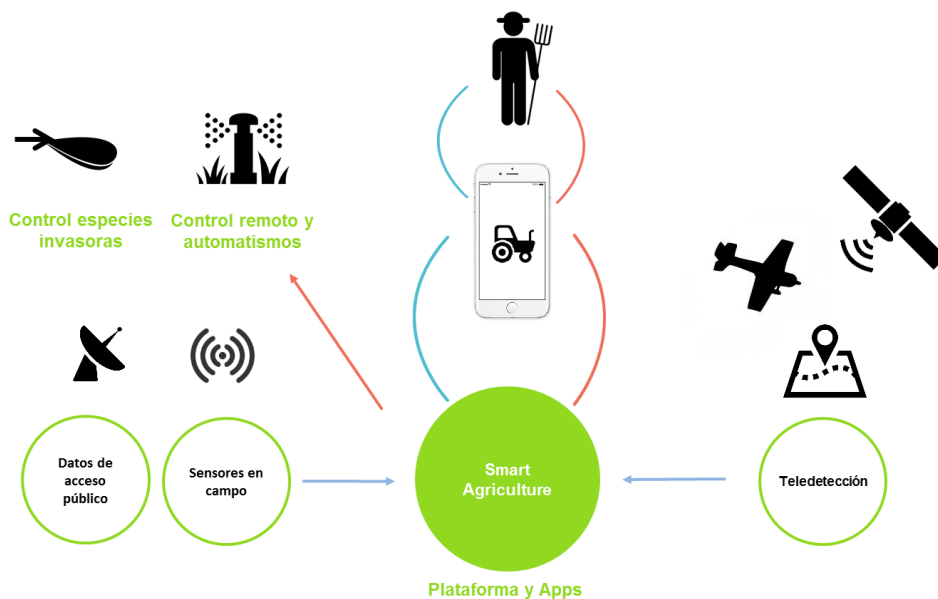
### Teledetección y sensores medioambientales

SUEZ, una de las principales empresas del ciclo integral del agua y servicios medioambientales a nivel mundial, tiene un objetivo claro de cara a los próximos años: el mercado agrícola. La agricultura es un sector en pleno desarrollo tecnológico que ha de satisfacer la necesidad de una población mundial en constante crecimiento, estimando llegar a los 9.000 millones de habitantes en 2050. El sector agrícola consume más del 70% del agua a nivel mundial, haciendo necesaria la optimización de los recursos y la mejora de los procesos productivos.

Aunque el sector agrícola se ha modernizado notablemente en los últimos años, destacando tecnologías de geo-posicionamiento (maquinaria de siembra, recolecta, fumigación,...), mejores redes de comunicaciones en entornos remotos o nuevos tipos de sensores capaces de medir con elevada precisión parámetros como la humedad, PH,... es cierto que todavía queda mucho camino por recorrer para que el concepto *smart agriculture* sea una realidad en todas sus vertientes.

SUEZ ya gestiona en España cerca de una veintena de Comunidades de Regantes, recogiendo necesidades del día a día y estando en contacto directo con el usuario. Por ello estamos totalmente convencidos de poder aportar al sector agrícola soluciones innovadoras que complementen las más tradicionales y el amplio conocimiento que los agricultores y comunidades de regantes tienen de sus parcelas.

SUEZ ofrece un nuevo ecosistema de soluciones que van a permitir la digitalización del campo, con servicios que van a ayudar a optimizar procesos, reducir consumos (hidráulicos y energéticos) y producir más barato, además de aportar un mayor control y monitorización sobre el cultivo que debe repercutir en una toma temprana de decisiones de cara a la prevención de problemas ( plagas, enfermedades, riego deficiente, productividad,... ).



En este ecosistema destacan:

## 1. SISTEMAS DE TELECONTROL

- a) Red de Alta / Distribución – Telecontrol
- b) Red de Baja – Hidrantes / Puntos de Consumo
- c) Centro de Control – SCADA



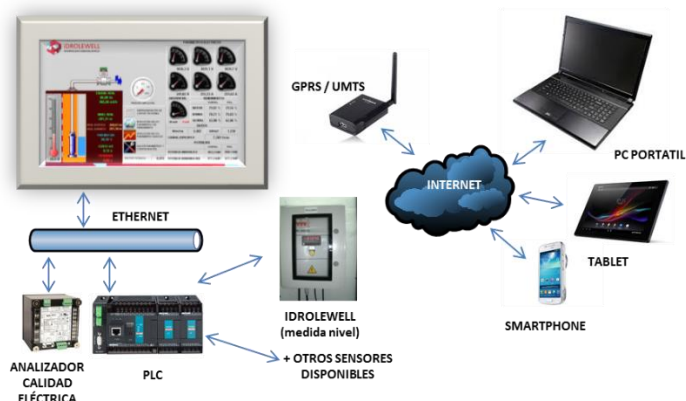
## 2. SENSORES

- a) Humedad
- b) Tensiómetros
- c) Conductividad
- d) PH
- e) ...

+ la capa necesaria de INTELIGENCIA, sin la cual los datos pierden gran parte de su valor



### 3. GESTIÓN HIDROGEOLÓGICA EN TIEMPO REAL (con instrumentación patentada)

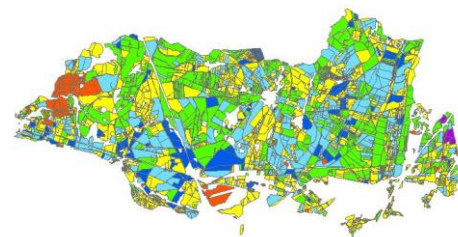


### 4. TELEDETECCIÓN

#### a) Interpretación de imágenes

**Teledetección**

- **Procesado de imágenes** realizadas por cámaras multispectrales ubicadas en satélites, aviones, drones u otros medios
- **Consulta del estado del vigor del cultivo para la toma de decisión** que permite la mejora en la gestión y producción de la parcela



**App móvil**

- Software para la **digitalización de las inspecciones en campo** (online/offline) que **concentra toda la información** en el cloud
- La consulta de información **puede ser realizada por el agricultor y por el cliente** permitiendo controlar a los proveedores

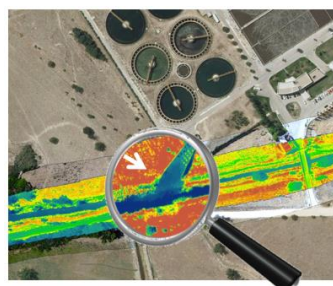
**Leyenda:**

**Selección cultivos**

■	Cultivo invierno
■	Cultivo verano
■	Forrajera permanente
■	Doble cosecha
■	Frutal
■	Olivar
■	Forestal
■	Huerta
■	Vinedo
■	Frutal de cascara

#### b) Drones

- HEXARROTOR
- GPS RTK
- CÁMARA TERMOGRÁFICA
- CÁMARA VISIBLE
- MOSAICOS GABINETE
- NUBE DE PUNTOS

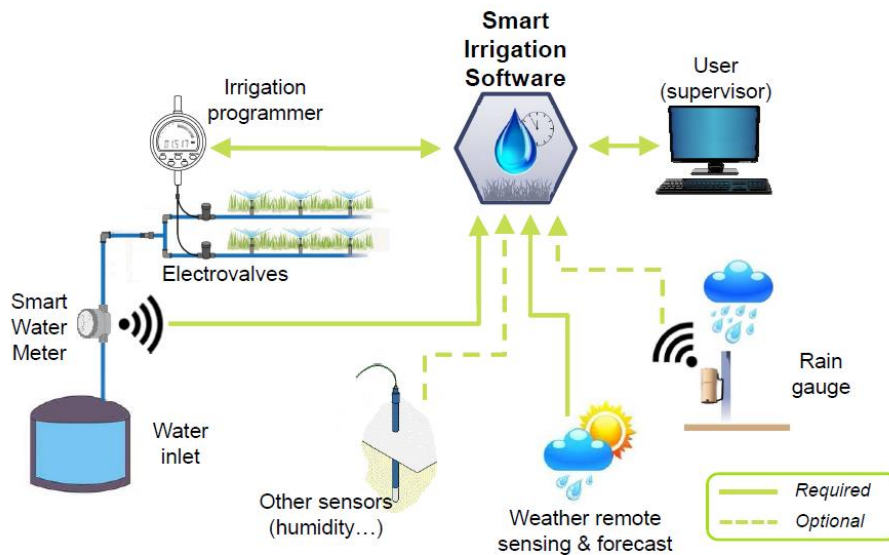




Adicionalmente, el concepto de ciudades inteligentes es una realidad que está evolucionando rápidamente en multitud de ámbitos, destacando, especialmente, los aspectos relacionados con la eficiencia energética y ahorro de consumo de recursos naturales ( agua entre ellos, lógicamente ). El consumo hidráulico de parques y jardines de una ciudad media puede suponer entre el 70% y el 80% de la factura total del agua, además de los correspondientes consumos energéticos para su bombeo y riego.

Dicho lo anterior, no es de extrañar que el concepto de *Smart irrigation* vaya ganando relevancia en la nueva conceptualización de las ciudades. Y aquí es donde, una buena parte de las soluciones aplicadas al campo tiene cabida, con más o menos modificaciones.

SUEZ ofrece ya un paquete de soluciones directamente enfocadas a la gestión eficiente del riego de parques y jardines que recoge información de diferentes fuentes, la interpreta y propone acciones o medidas a adoptar, así como la posibilidad de automatizar todo el proceso de riego en función de las condiciones de contexto.



## ANTENAS REFLECTORAS PLANAS EN TECNOLOGÍA IMPRESA PARA RADARES METEOROLÓGICOS

*Eduardo Martínez de Rioja y del Nido, José Daniel Martínez de Rioja y del Nido,  
José Antonio Encinar Garcinuño*

Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

**Resumen** – Las antenas de tipo reflectarray presentan unas características muy atractivas para su montaje a bordo tanto de aeronaves como de satélites. Aparte de tener un proceso de fabricación sencillo y de coste reducido, son ligeras de peso y fáciles de desplegar. Además, comparten muchas de las ventajas de los reflectores parabólicos y las agrupaciones de antenas, siendo su principal limitación el ancho de banda. En este trabajo, se estudia su posible utilización en los sistemas de radar meteorológico que operan en doble polarización, también denominados radares polarimétricos, desarrollados en los últimos años para mejorar las prestaciones de los radares Doppler tradicionales.

### 1. Los radares meteorológicos

Los radares meteorológicos son un tipo especial de dispositivos empleados para localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar su composición (agua, nieve, granizo). Su aparición se remonta al final de la Segunda Guerra Mundial, cuando los operadores de los radares de vigilancia aérea empezaron a detectar ruido asociado a los fenómenos meteorológicos en forma de ecos no deseados. Distintos grupos de científicos en Estados Unidos y Canadá comenzaron a estudiar estos ecos aislándolos del resto, y unos pocos años después se desarrollaron los primeros radares destinados al estudio del clima [1].

#### 1.1 Fundamentos

El principio de funcionamiento de un radar meteorológico es muy similar al de un radar de vigilancia primario encargado de la detección de blancos u objetivos potenciales. Las señales transmitidas son pulsos de corta duración, que se repiten periódicamente. Entre pulso y pulso, el radar recibe los ecos de las señales transmitidas para poder estimar la intensidad y consistencia de los objetos reflectores que se encuentran en su campo de visión (ver Fig. 1).

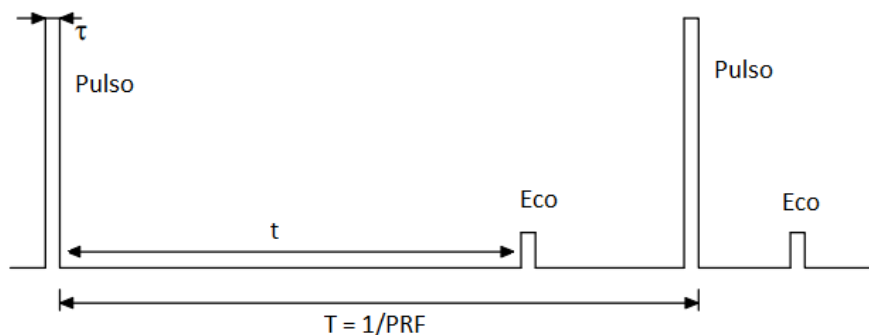


Fig. 1. Principio de funcionamiento de un radar pulsado.



La frecuencia portadora utilizada por este tipo de radares se escoge para poder “interactuar” con las partículas de precipitación: cada partícula intercepta la onda radiada y refleja una parte de su potencia en la dirección del radar, mientras que el resto se dispersa en otras direcciones del espacio. La cantidad exacta de potencia reflejada que se recibe en el radar es una función compleja que depende de la forma, el tamaño y la constante dieléctrica de las partículas. Al parámetro que mide la relación entre la potencia incidente y la reflejada se le denomina sección radar del blanco.

La distancia hasta el blanco puede obtenerse midiendo el tiempo ‘ $t$ ’ transcurrido entre la transmisión un pulso y la recepción de su eco, suponiendo que las ondas se propagan a la velocidad de la luz ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s), mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

La máxima distancia a la que pueden encontrarse los blancos para hacer una medida correcta de su posición, denominada rango máximo no ambiguo ( $R_{mna}$ ), es inversamente proporcional al valor de la frecuencia de repetición de pulsos implementada en el sistema ( $PRF$ ):

$$R_{mna} = \frac{c}{2 \cdot PRF}$$

Los ecos asociados a estos blancos se recibirán en el radar justo antes de iniciar la transmisión del siguiente pulso. Aquellos blancos que estén situados a una distancia mayor de  $R_{mna}$  generarán ecos que serán recibidos en la “ventana” del siguiente pulso transmitido. El radar asociará esos ecos al segundo pulso, dando lugar a una estimación errónea de la distancia a la que se encuentra el blanco. A este tipo de blancos se los denomina blancos de segunda vuelta.

Los radares con funcionalidad Doppler, además, son capaces de medir el desplazamiento en frecuencia que produce el movimiento de las partículas en la onda reflejada, y con ello, obtener la velocidad del viento. Un desplazamiento positivo en frecuencia se corresponde con un blanco acercándose al radar, mientras que si el valor medido es negativo el blanco se aleja. La relación entre la velocidad del blanco ( $V$ ) y la desviación en frecuencia de la señal recibida ( $f_d$ ) viene dada por la siguiente fórmula, donde  $\theta$  es el ángulo que forma la dirección de exploración del radar con la dirección del movimiento de las partículas:

$$f_d = \frac{2 \cdot V \cdot \cos \theta}{\lambda}$$

La  $PRF$  también influye en el valor máximo de velocidad que es posible medir en un blanco, puesto que representa el máximo desplazamiento Doppler que puede tener en frecuencia la señal recibida. Por tanto, vemos que para poder medir un amplio rango de velocidades nos interesa que la  $PRF$  sea alta. Esto choca con el requisito anterior para la  $R_{mna}$ , puesto que a mayor  $PRF$ , menor será el área de trabajo del radar. Para resolver este compromiso, los sistemas reales suelen presentar distintos valores de  $PRF$ , de forma que se pueda pasar de una a otra según interese medir velocidades o distancias.

Normalmente, las antenas utilizadas en este tipo de sistemas están basadas en reflectores parabólicos, alimentados en muchos casos por *phased-arrays*. La antena del radar suele estar situada en la parte superior de una torre o estructura elevada, cubierta por un radomo esférico que le sirve de protección. Los valores típicos de ganancia oscilan entre los 20 dB y los 45 dB. Para la medida de los ecos, la antena gira sobre su eje vertical realizando un barrido de 360° en

azimut. En cada vuelta, se varía el ángulo de elevación sobre el plano horizontal, típicamente entre  $0.5^\circ$  y  $25^\circ$ , para obtener también una medida de la distribución de los ecos en función de la altura atmosférica. En la Fig. 2 se puede observar una fotografía del radar situado en el Cerro de Batallones, en el municipio madrileño de Torrejón de Velasco.



**Fig. 2.** Radar meteorológico del Cerro de Batallones (Torrejón de Velasco, Madrid).

El coste y la complejidad de diseño son los principales inconvenientes a la hora de sustituir las antenas de reflector por otras basadas completamente en *arrays* (agrupaciones de antenas), a pesar de que con ellas se podría lograr una mayor funcionalidad. En este trabajo se propone como alternativa el uso de antenas reflectoras planas en tecnología microstrip, también conocidas como *reflectarrays*, que proporcionarían muchas de las ventajas de los *arrays*, solo que con un coste más reducido y una fabricación más sencilla.

## 1.2 Medidas

La interpretación de las señales recibidas por el radar resulta a menudo compleja, debido a la gran variedad de tipos de precipitación, formas y tamaños de las partículas. Por ejemplo, la relación entre el tamaño de una partícula y la cantidad de potencia reflejada es altamente no lineal. Si consideramos una gota de agua de forma esférica, aumentar su diámetro al doble produce un aumento de la potencia reflejada en un factor  $2^6$ . También puede ocurrir que las nubes se compongan de varios tipos de precipitación, como agua y nieve o hielo y nieve.

La magnitud medida por un radar meteorológico recibe el nombre de reflectividad ( $Z$ ) y se suele expresar en unidades logarítmicas (dBZ), a partir del valor en unidades lineales en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ . Se define como la suma de los diámetros a la sexta potencia ( $D^6$ ) de las gotas o partículas contenidas en una unidad de volumen, definiendo  $N(D)$  como la función de distribución de las gotas:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) \cdot D^6 dD$$

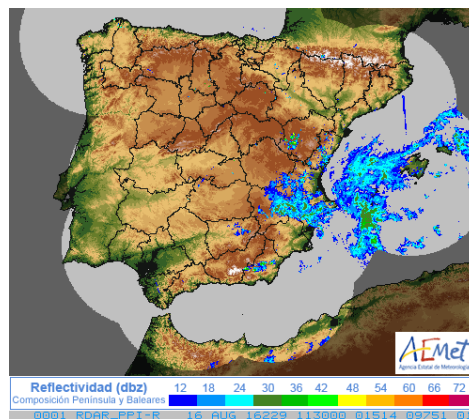
La reflectividad de un blanco puede obtenerse a partir de la potencia recibida ( $P_r$ ) mediante la denominada ecuación radar, que relaciona dichas variables con la potencia transmitida ( $P_t$ ), la duración de los pulsos ( $\tau$ ), la frecuencia portadora del sistema ( $f_p$ ), la ganancia de la antena del radar ( $G$ ) y la distancia al blanco ( $d$ ):

$$P_r = cte \cdot \frac{P_t \cdot \tau \cdot f_p^2 \cdot G^2}{d^2} \cdot Z$$

Por otro lado, la intensidad de lluvia se puede expresar de manera matemática como el flujo de agua a través de una superficie, empleando para ello la función de distribución  $N(D)$  y la velocidad de caída de las gotas  $V(D)$ :

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} V(D) \cdot N(D) \cdot D^3 dD$$

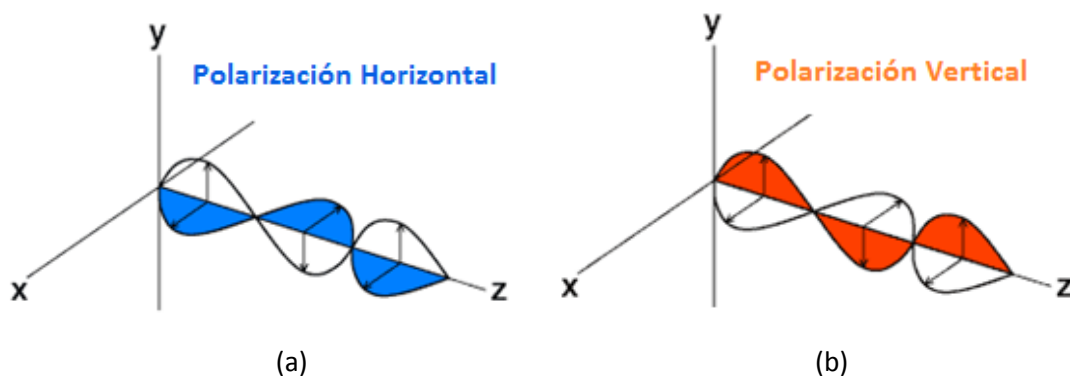
La fórmula de Marshall-Palmer relaciona el valor de la reflectividad con la intensidad de una precipitación a través de la sencilla ecuación:  $Z = a \cdot R^b$ , donde 'a' y 'b' son constantes que dependen del tipo de precipitación. Como cada precipitación cuenta con su propia distribución de tamaños e intensidad, resulta casi imposible conocer estos parámetros a priori, siendo frecuente su ajuste a partir de las medidas realizadas. Por ello, los radares meteorológicos suelen representar directamente los valores de reflectividad (ver Fig. 3).



**Fig. 3.** Imagen de una medida de reflectividad para la Península Ibérica [2].

### 1.3 Radares polarimétricos o de doble polarización

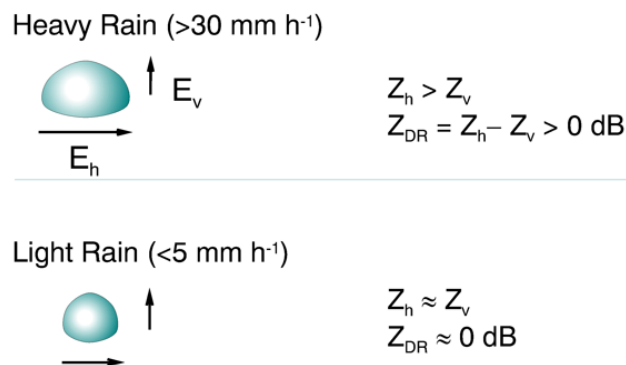
La polarización de una onda hace referencia a la dirección de variación del vector de campo eléctrico con el tiempo. En una onda plana con polarización lineal, el vector de campo eléctrico está contenido en un único plano en el que presenta una variación sinusoidal, siendo perpendicular a la dirección de propagación de la onda y al vector de campo magnético (que a su vez también presenta una variación sinusoidal en un plano ortogonal). Podemos observar una sencilla representación de este concepto en la Fig. 4.



**Fig. 4.** Representación de ondas planas con polarización lineal: (a) horizontal y (b) vertical.

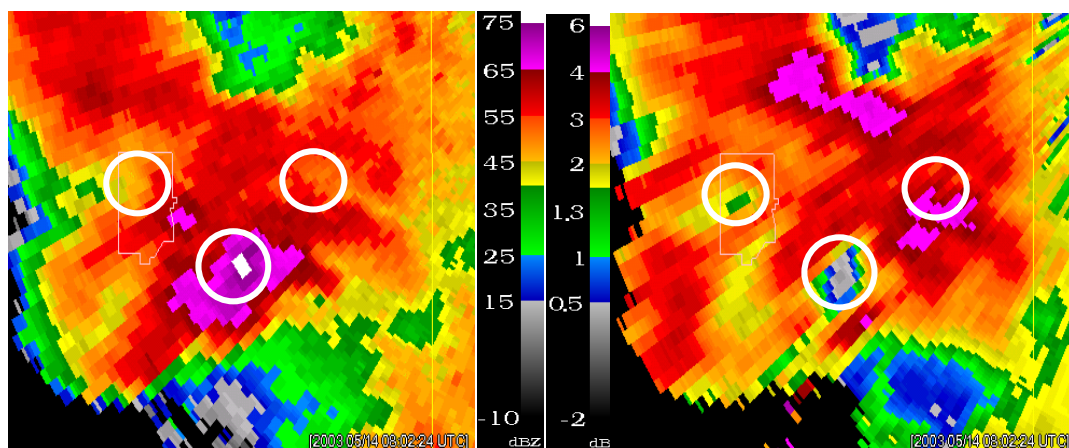
Los radares meteorológicos tradicionales utilizan ondas con polarización lineal horizontal para poder medir la reflectividad de las precipitaciones. Esta técnica, aunque sencilla, carece de precisión suficiente y no permite clasificar correctamente los tipos de hidrometeoros. Para poder llevar esto a cabo, se requiere de un sistema que opere en doble polarización lineal, al transmitir y recibir simultáneamente ondas con polarización horizontal y vertical. A este tipo de radares meteorológicos se los denomina polarimétricos o de doble polarización.

Los radares polarimétricos permiten una mejor estimación de las precipitaciones. Los resultados de sus medidas son los valores de reflectividad horizontal y vertical,  $Z_h$  y  $Z_v$ , de los que se deriva la reflectividad diferencial,  $Z_{dr}$ , obtenida como el cociente de ambas reflectividades (o su diferencia, si se trabaja en unidades logarítmicas). La reflectividad diferencial es un buen indicador de la forma de las partículas, y a partir de la forma es posible estimar su tamaño. Por ejemplo, en el caso de una lluvia pesada, las gotas de agua son de gran tamaño, por lo que al caer tienden a aplanarse, tomando forma oblonga. Esto se traduce en un mayor valor de  $Z_h$  con respecto a  $Z_v$ . Por el contrario, las gotas de agua de una lluvia ligera presentan un tamaño mucho más pequeño, conservando una forma más esférica, lo que arroja medidas similares de  $Z_h$  y  $Z_v$ .



**Fig. 5.** Comparativa entre lluvia pesada y ligera para las medidas de reflectividad.

Otro ejemplo de utilidad de los radares polarimétricos relacionado con  $Z_{dr}$  es la detección del granizo. La constante dieléctrica del hielo es un 20% de la del agua, por lo que la forma de las partículas tiene un efecto menor en el granizo que en la lluvia. Además, las partículas de hielo giran sobre sí mismas al caer, de forma que el valor de  $Z_{dr}$  obtenido suele ser muy pequeño. Por todo ello, el granizo puede detectarse cuando se produce un alto valor de  $Z_h$  acompañado de  $Z_{dr}$  muy pequeño (en ocasiones pueden llegar a medirse valores negativos en dB, ver Fig. 6).



**Fig. 6.** Comparativa entre las medidas de  $Z_h$  y  $Z_{dr}$  para un mismo territorio.



Además de las ya citadas reflectividades, el empleo de la doble polarización permite definir una serie de parámetros adicionales que sirven de ayuda a la hora de clasificar el tipo de precipitación. Uno de ellos es el coeficiente de correlación estadística entre las potencias reflejadas en polarización horizontal y vertical,  $\rho_{HV}$ , que representa una medida de cómo de parecido se comportan las ondas transmitidas en cada polarización entre un pulso y el siguiente. Este estadístico constituye un buen indicador de las regiones en las que hay una mezcla de tipos de precipitación: un valor próximo a 1 hace referencia a una precipitación homogénea, mientras que valores más bajos indican lo contrario.

La fase diferencial específica,  $\theta_{dp}$ , es otro parámetro utilizado para estimar las tasas de lluvia. Mide la diferencia entre la fase de la onda recibida en polarización horizontal y la de la onda en polarización vertical, debida a los efectos de propagación. Dado que las ondas radio viajan a menor velocidad por el agua que por el aire (a causa de su mayor constante dieléctrica), este parámetro puede usarse para estimar la cantidad de líquido que hay en un volumen determinado. Por ejemplo, resulta muy útil para detectar zonas con lluvia pesada.

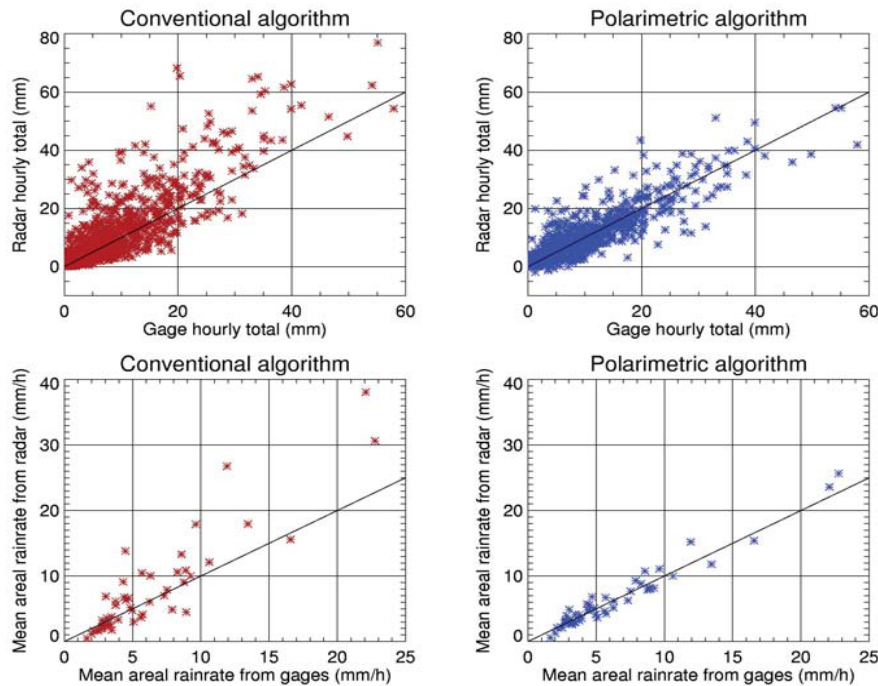
Gracias a todos los parámetros anteriores, los radares polarimétricos permiten una serie de mejoras respecto a los radares meteorológicos convencionales. Los denominados algoritmos de clasificación de hidrometeoros (HCA, *Hydrometeor Classification Algorithms*) hacen uso de ellos para poder realizar una estimación más precisa del tipo de precipitación, la intensidad de la misma y su trayectoria, como se demostró en los estudios realizados en Estados Unidos a principios de siglo, que veremos a continuación.

#### **1.4 El Experimento de Polarización Conjunta**

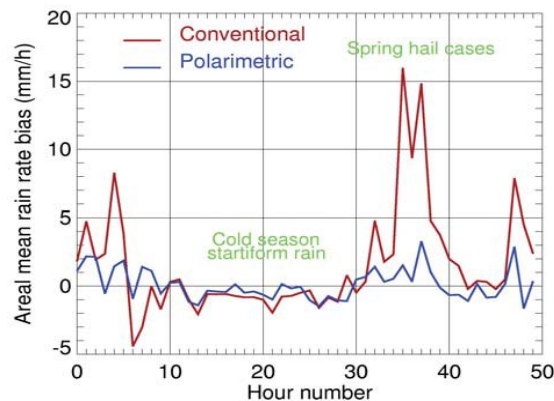
El radar empleado por el Servicio Nacional de Meteorología americano recibe el nombre de WSR-88D (*Weather Surveillance Radar 1988* -el año del primer prototipo- Doppler) o NEXRAD (*NEXT generation RADar*). El sistema de medida cuenta con una antena reflectora de 8.5 m de diámetro que proporciona 45.5 dB de ganancia a 3 GHz. La máxima frecuencia de repetición de pulsos implementada en el sistema es 1.3 kHz y el ancho de los pulsos varía entre 1.5 y 4.5  $\mu$ s. Puede realizar un escaneo volumétrico en 6 minutos, considerando 15 ángulos distintos en elevación [3].

Entre los años 2002 y 2003, los científicos del *National Severe Storms Laboratory* de Oklahoma llevaron a cabo el denominado “Experimento de Polarización Conjunta” (*Joint Polarization Experiment*), en el que se implementó el funcionamiento en doble polarización en uno de los radares WSR-88D del servicio de meteorología para estudiar la mejora operativa debida a la polarimetría y asegurar además su compatibilidad con los equipos existentes.

Una de las primeras investigaciones realizadas fue la comparativa entre la fórmula tradicional de Marshall-Palmer para estimar la intensidad de lluvia a partir de la reflectividad, que denotaremos  $R(Z)$ , y un nuevo algoritmo que incorporaba algunos de los nuevos parámetros proporcionados por el radar polarimétrico,  $R(Z, Z_{dr}, \theta_{dp})$ . El resultado fue que esta segunda técnica mejoraba claramente a la primera en cuanto a media, desviación típica y error cuadrático medio de las estimaciones, como puede observarse en las gráficas de la Fig. 7, donde el algoritmo polarimétrico se aproxima bastante más a las medidas tomadas sobre el terreno. En la Fig. 8 se representa la sobreestimación o subestimación que hace cada algoritmo de las tasas de lluvia para distintas estaciones y tipos de lluvia, que como se puede comprobar es considerablemente menor en el caso del radar polarimétrico.



**Fig. 7.** Comparativa entre la tasa de lluvia medida y la estimada, para un radar meteorológico convencional (rojo) y uno polarimétrico (azul) [4].



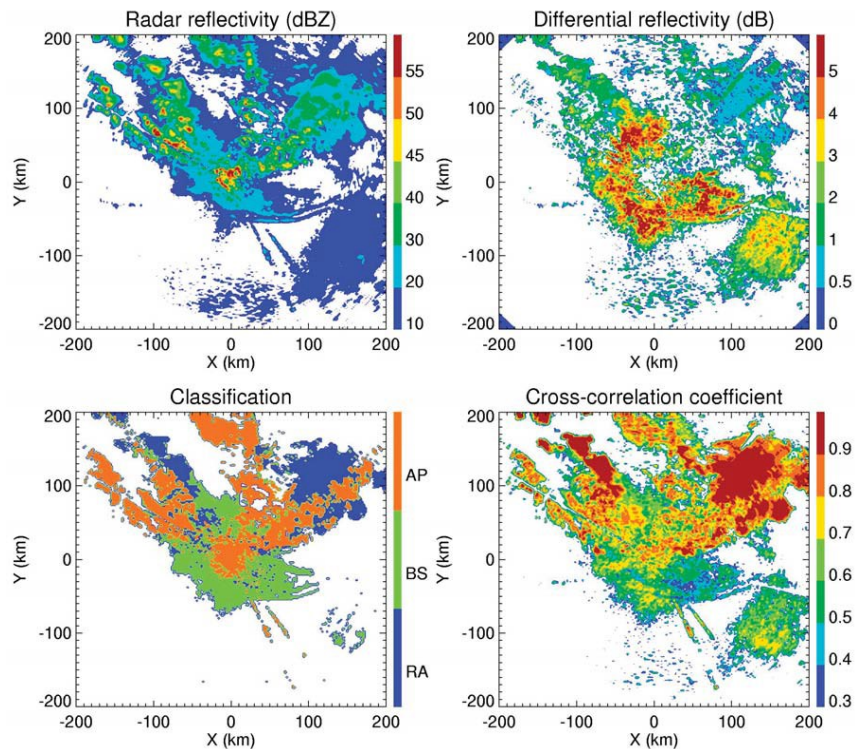
**Fig. 8.** Error en la estimación de los algoritmos convencional y polarimétrico [4].

A continuación, se estudiaron tres algoritmos distintos de clasificación de hidrometeoros: uno más sencillo que sólo distinguía entre ecos meteorológicos y ecos debidos a reflexiones en la superficie terrestre o a agentes biológicos, y otros dos más complejos pensados para ser utilizados en las épocas de verano e invierno. Estos algoritmos, en su versión más avanzada, pueden diferenciar hasta diez tipos de ecos: reflexiones del suelo, agentes biológicos, nieve seca, nieve húmeda, cristales, granizo, lluvia ligera, lluvia moderada, lluvia pesada y mezcla de lluvia y granizo. Los algoritmos hacen uso de los parámetros proporcionados por los radares polarimétricos ( $Z_h$ ,  $Z_v$ ,  $Z_{dr}$ ,  $\rho_{HV}$  y  $\theta_{dp}$ ) y de otros que se derivan de estos. Una descripción más detallada de su funcionamiento puede encontrarse en [5].

En la Fig. 9 podemos ver un ejemplo de funcionamiento del primer algoritmo: las zonas con altos valores de  $\rho_{HV}$ , próximos a 1, se corresponden con precipitaciones homogéneas (RA); en aquellos sitios donde coinciden valores bajos de  $\rho_{HV}$  y altos de  $Z_{dr}$  es debido a agentes biológicos, como pájaros, insectos, etc. (BS); y las zonas con precipitación anómala o reflexiones



del suelo (AP) se detectan debido a valores pequeños de  $Z_{dr}$  (que en algunos casos puede ser incluso negativa) y a valores relativamente altos de  $\rho_{HV}$ .

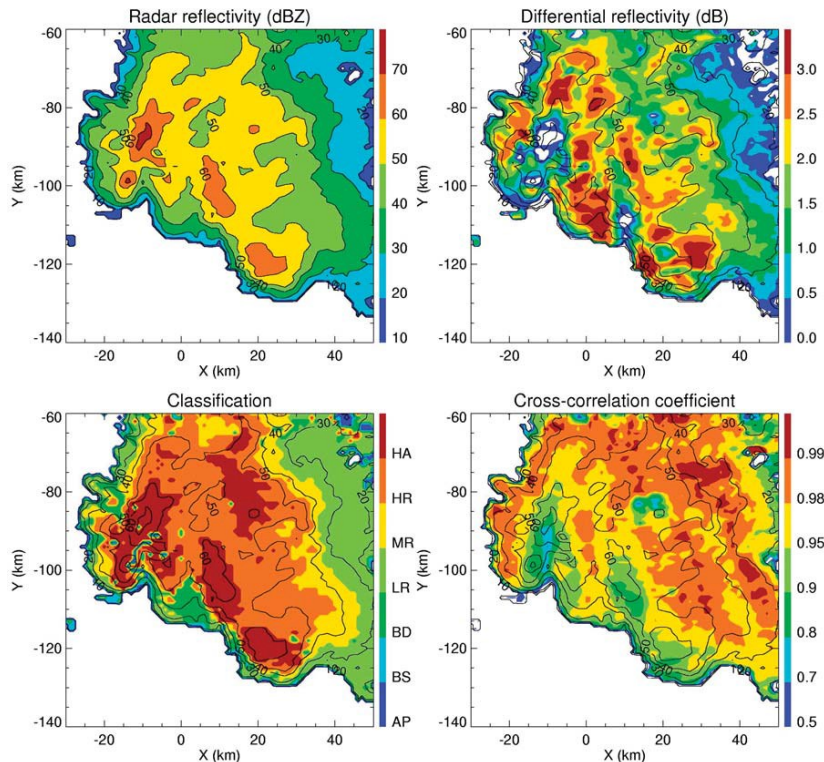


**Fig. 9.** Ejemplo de funcionamiento de un algoritmo de clasificación básico, a partir de las medidas de reflectividad, reflectividad diferencial y el coeficiente de correlación [4].

En lo que respecta a la detección del granizo, el algoritmo polarimétrico consiguió mejores valores de probabilidad de detección y probabilidad de falsa alarma que el algoritmo convencional. Como ya se ha indicado antes, el granizo presenta un alto valor de  $Z_h$  combinado con bajos  $Z_{dr}$  y  $\rho_{HV}$ , aunque las zonas con reflexiones en el suelo o precipitación anómala también pueden llegar a presentar estas características. Por ello, para poder identificar correctamente el granizo se hace uso de otros tres indicadores: la velocidad Doppler ( $V$ ) y dos parámetros derivados de  $Z$  y  $\theta_{dp}$ . Las zonas de precipitación anómala se detectan debido a valores muy altos de estos dos últimos parámetros y muy bajos de  $V$ . En la Fig. 10 se muestra un ejemplo de análisis con el algoritmo de clasificación empleado para la detección del granizo (indicado como HA).

Como conclusión del Experimento de Polarización Conjunta, entre las ventajas ofrecidas por los radares polarimétricos o de doble polarización respecto a los radares tradicionales, se pueden destacar las siguientes:

- Estimación más precisa de la intensidad de lluvia.
- Identificación de los tipos de precipitación en los pronósticos invernales.
- Distinción entre lluvia pesada y granizo.
- Predicción fiable de riadas, inundaciones, tornados y otros peligros climáticos.
- Reducción del efecto de los ecos no debidos a partículas meteorológicas (ruido).
- Detección de riesgos para la aviación, como las bandadas de pájaros y las condiciones de congelación.
- Un ahorro anual estimado en 700 millones de dólares.



**Fig. 10.** Ejemplo de funcionamiento de un algoritmo de clasificación empleado para la detección del granizo (indicado como HA) [4].

A finales de Abril de 2013, Estados Unidos completó la actualización de su red de radares meteorológicos a tecnología de doble polarización. En total, se actualizaron 161 estaciones de observación del clima, lo que supuso el mayor avance en el campo de la meteorología desde la instalación de los radares Doppler a principios de la década de los 90.

Una de las líneas de investigación que se encuentran abiertas actualmente se centra en el diseño de antenas *phased array* para sustituir a las antenas de reflector tradicionales. Los nuevos dispositivos serían capaces de realizar el barrido electrónico del haz, trabajar con varios haces y frecuencias simultáneamente, y reducir hasta cuatro veces el tiempo de escaneo volumétrico del radar. Los principales inconvenientes, como en la mayoría de las antenas de *array*, son su coste elevado y la complejidad del diseño, aunque lo primero podría compensarse gracias al ahorro estimado en los próximos años, derivado del uso de una nueva y más avanzada tecnología.

### 1.5 Radares polarimétricos en España

En el caso de España, existen sólo dos radares meteorológicos que operen con tecnología de doble polarización: uno se encuentra en Galicia, en la cima del monte Xesteiras (municipio de Cuntis, Pontevedra), y el otro en el País Vasco, en el monte Kapildui (Bernedo, Álava). Ninguna de estas instalaciones pertenece a la red de la Agencia Estatal de Meteorología, sino que son gestionadas por las agencias gallega (MeteoGal [6]) y vasca (EuskalMet [7]). El radar vasco fue el primero de los dos en ser instalado, en el año 2005, mientras que el radar gallego entró en funcionamiento en 2011. Ambos territorios cuentan con unas condiciones meteorológicas

difíciles dada su proximidad al océano Atlántico, por lo que los modernos radares polarimétricos ayudan a predecir con mayor anticipación las posibles tormentas.

En cuanto a sus especificaciones técnicas, el radar de Cuntis opera en banda C (4-8 GHz) y es capaz de realizar un escaneo completo del plano horizontal en un radio de más de 250 km, con una altura en el plano vertical de hasta 9 km (ángulo de elevación variable entre 0.15° y 15°). La torre sobre la que se encuentra el radar tiene 60 m de altura. Por su parte, el radar de Bernedo opera también en banda C, con un alcance máximo de 400 km. La antena parabólica del radar tiene un diámetro de 6 m, y el radomo que la protege de 9 m. La estructura de la torre se ha diseñado para soportar vientos de hasta 250 km/h.



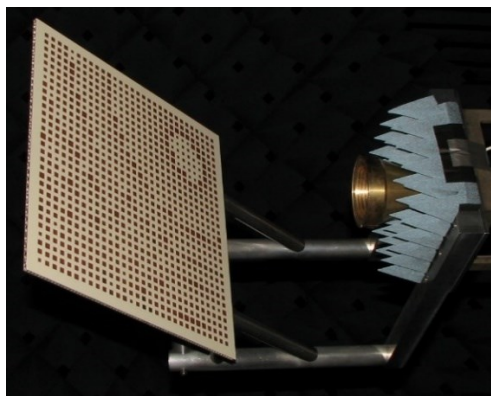
**Fig. 11.** Estación meteorológica de Cuntis (Pontevedra), dotada de radar polarimétrico.



**Fig. 12.** Estación meteorológica de Bernedo (Álava), dotada de radar polarimétrico.

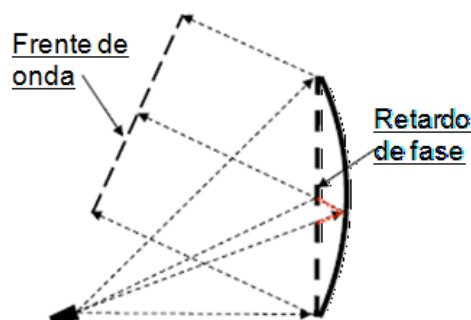
## 2. Antenas reflectoras planas en tecnología impresa

Una antena de tipo reflectarray se compone de una agrupación plana de elementos radiantes que proporcionan un determinado ajuste en la fase del campo eléctrico para generar un haz enfocado o conformado cuando la antena es iluminada por un alimentador [8]. Aunque en la superficie reflectora puede haber distintos tipos de elementos, como guías de onda terminadas en circuito abierto o cortocircuito (de hecho, así fue como se diseñaron los primeros reflectarrays a principios de los años 60), hoy en día lo más habitual es emplear elementos impresos en tecnología microstrip [9], que pueden presentar diversas formas geométricas (parches rectangulares, dipolos, anillos, etc.). En estos casos, basta con ajustar las dimensiones de los elementos impresos para conseguir el desplazamiento de fase necesario, siendo posible diseñar antenas de tamaño reducido y bajo coste con las mismas técnicas de fabricación de los circuitos impresos.



**Fig. 13.** Antena reflectarray de parches rectangulares.

En la Fig. 13 se muestra una imagen de una antena reflectarray formada por parches rectangulares. El campo electromagnético que incide en cada elemento procedente del alimentador (en este caso, una bocina cónica) puede ser considerado localmente como una onda plana, con una fase proporcional a la distancia entre el centro de fases del alimentador y dicho elemento. Para poder convertir la onda esférica radiada por el alimentador en un frente de onda plano, cada elemento debe reflejar el campo incidente con un cierto ajuste de fase que compense las diferencias de caminos recorridos desde el alimentador. Esta operación es similar en concepto a la de un reflector parabólico, que utiliza su curvatura para generar un frente de onda plano cuando es iluminado por un alimentador situado en su foco (ver Fig. 14).

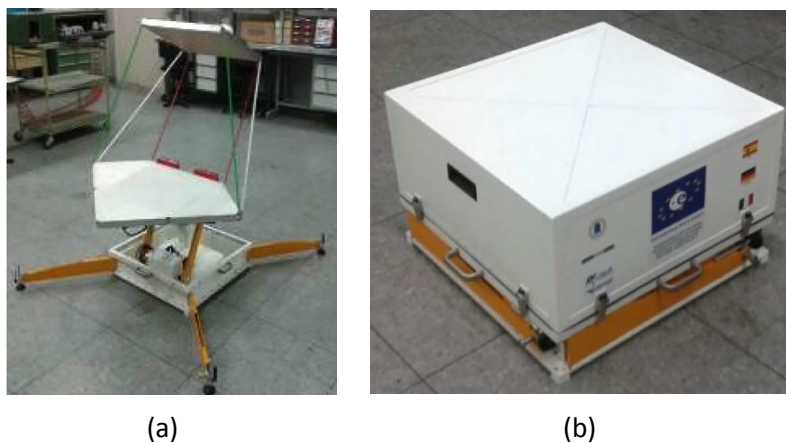


**Fig. 14.** Compensación del retardo de fase en un reflectarray [8].

## 2.1 Ventajas e inconvenientes de los reflectarrays

Al igual que un reflector parabólico, el reflectarray puede alcanzar muy buenas eficiencias (>50%) para aperturas grandes, debido a que no se necesita ninguna red de alimentación como en el caso de los *arrays* de antenas, y sólo presenta unas pequeñas pérdidas de inserción de carácter resistivo. Por otra parte, al igual que los *arrays* convencionales, el reflectarray puede diseñarse para que su haz de radiación presente ángulos de inclinación elevados, del orden de 50º respecto a la dirección perpendicular a su superficie. Para obtener grandes ángulos de barrido del haz, pueden incorporarse a los elementos del reflectarray desfasadores electrónicos de bajas pérdidas. Con esta capacidad para efectuar un barrido amplio del haz, no hacen falta las complejas redes de conformación ni los módulos amplificadores para transmisión y recepción de los *arrays* convencionales.

Una ventaja significativa de los reflectarrays cuando se trabaja con grandes aperturas (por ejemplo, para antenas de espacio), es que permiten mecanismos de despliegue mucho más sencillos y fiables que los empleados por un receptor parabólico, que cuenta con una superficie doblemente curvada. La superficie plana del reflectarray asegura un montaje fácil en el satélite, sin causar un incremento significativo de peso o volumen en la estructura final. Esta característica de los reflectarrays, aunque a menor escala, puede observarse en la Fig. 15, donde se muestra una antena plegable de doble reflectarray diseñada para comunicaciones de emergencia por satélite.



**Fig. 15.** Antena reflectarray transportable: (a) desplegada, (b) recogida [10].

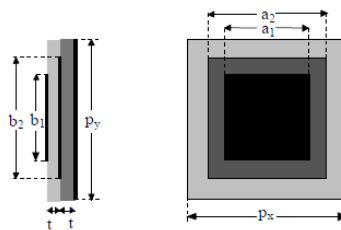
Al igual que un reflector parabólico, los reflectarrays pueden generar haces múltiples cuando son iluminados por varios alimentadores situados en el área focal de la antena. Por otro lado, la capacidad para implementar desfases diferentes en cada polarización, o a distintas frecuencias, permite que una única superficie reflectarray pueda producir varios haces en distintas direcciones, aun estando iluminada por un único alimentador. Esta capacidad para discriminar en polarización o en frecuencia supone una ventaja con respecto a los reflectores parabólicos, con los que es necesario utilizar varios alimentadores situados en posiciones distintas para generar haces en diferentes direcciones.

Otra característica importante de este tipo de antenas es que, teniendo un elevado número de elementos y capacidad para ajustar la fase en cada uno de ellos, puede conformar formas de haz muy precisas utilizando técnicas de síntesis de fase. Esto permite que pueda ser empleado para proporcionar cobertura a una cierta área geográfica (por ejemplo, el continente europeo), sin más que realizar un ajuste en las dimensiones de los elementos, de manera que el

proceso de fabricación sigue siendo el mismo que para un reflectarray de haz enfocado. Esto supone una importante reducción en los costes para este tipo de antenas, por lo general reflectores conformados cuya fabricación requiere de costosos moldes metálicos.

Frente a las ventajas enunciadas, los reflectarrays tienen como principal inconveniente un reducido ancho de banda de funcionamiento, que normalmente se encuentra en torno a un 10% de la frecuencia central del diseño. Para un reflectarray impreso en tecnología microstrip, el ancho de banda está fundamentalmente limitado por dos factores: el ancho de banda de los elementos impresos (que suele ser entre un 3% y un 5%), y la variación con la frecuencia de los retardos de fase asociados al trayecto recorrido por los rayos desde el alimentador (factor que afecta más gravemente cuanto mayor es el tamaño de la antena).

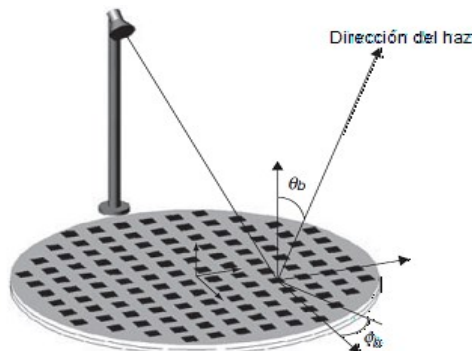
En los últimos años se han propuesto distintas soluciones para mejorar el ancho de banda, como las estructuras formadas por varias capas apiladas (ver Fig. 16), el empleo de nuevos elementos reflectarray con funcionamiento en banda ancha, el diseño con compensación del retardo real de fase (*true-time delay*) y las técnicas de optimización en frecuencia. Además, en el caso de antenas de gran tamaño, se han presentado algunos diseños de reflectarrays curvados de forma cóncava, realizados con áreas planas más pequeñas. Empleando estas técnicas, se han alcanzado anchos de banda de hasta un 30%.



**Fig. 16.** Elemento reflectarray con dos niveles de parches apilados.

## 2.2 Obtención de la distribución de fases

Para que un reflectarray pueda generar un haz enfocado en una cierta dirección, cada elemento debe introducir un determinado desplazamiento en la fase del campo incidente. El cálculo de los desplazamientos de fase necesarios en cada elemento constituye siempre el primer paso para el diseño de una antena reflectarray. Después, ese desfase puede lograrse mediante distintos tipos de celdas periódicas (parches, dipolos, anillos, etc), generalmente ajustando las dimensiones de los elementos impresos hasta fijar la fase del coeficiente de reflexión de cada celda al valor deseado.



**Fig. 17.** Representación de una antena reflectarray [8].

Considerando el sistema de coordenadas representado en la Fig. 17, la distribución de fase progresiva en la superficie de un reflectarray para producir un haz colimado en la dirección  $(\theta_b, \phi_b)$ , conocida por la teoría de *arrays*, puede expresarse como:

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 x_i \sin\theta_b \cos\phi_b - k_0 y_i \sin\theta_b \sin\phi_b$$

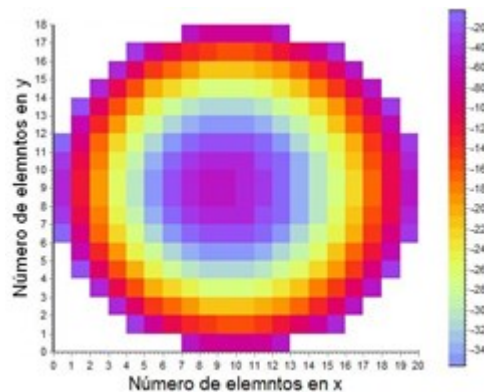
donde  $k_0$  es la constante de propagación en el espacio libre y el par  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas del elemento 'i' del reflectarray. Por otro lado, la fase del campo reflejado en cada elemento es igual a la fase del campo incidente (como resultado de la propagación desde el alimentador) más el desplazamiento de fase introducido por el elemento:

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 d_i + \phi_R(x_i, y_i)$$

donde  $\phi_R$  es la fase del coeficiente de reflexión, o desplazamiento de fase, del elemento 'i', y  $d_i$  es la distancia desde el centro de fases del alimentador hasta la celda considerada. Igualando las dos expresiones anteriores, se obtiene que el desplazamiento de fase introducido en cada elemento debe ser igual a:

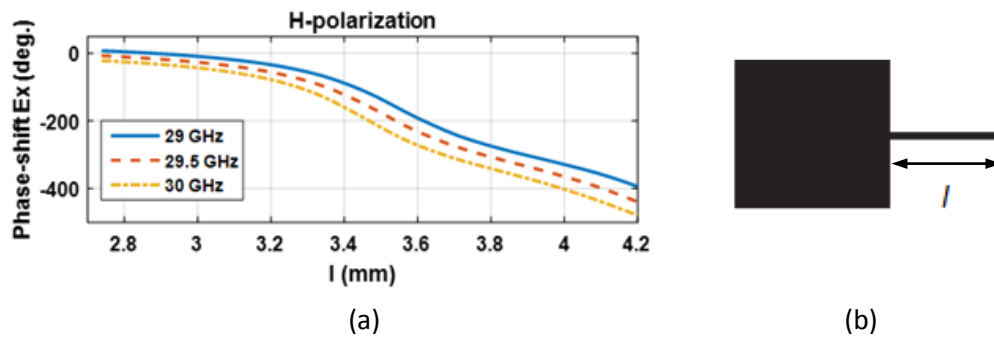
$$\phi_R = k_0 (d_i - (x_i \cos\phi_b + y_i \sin\phi_b) \sin\theta_b)$$

En la Fig. 18 se puede observar la distribución de fase requerida por un reflectarray circular de 20 x 18 elementos, con un alimentador situado sobre la perpendicular que pasa por su centro, para producir un haz enfocado en la dirección normal a su superficie ( $\theta_b = 0^\circ$ ,  $\phi_b = 0^\circ$ ). Como se ve en la figura, la variación de la fase se produce en forma de círculos concéntricos, cambiando de valor de manera progresiva desde el centro hasta los bordes de la antenna, de manera que aquellos elementos que se encuentran a la misma distancia del alimentador deben introducir el mismo desplazamiento de fase. Estas distribuciones son típicas de los reflectarrays diseñados para generar haces enfocados.



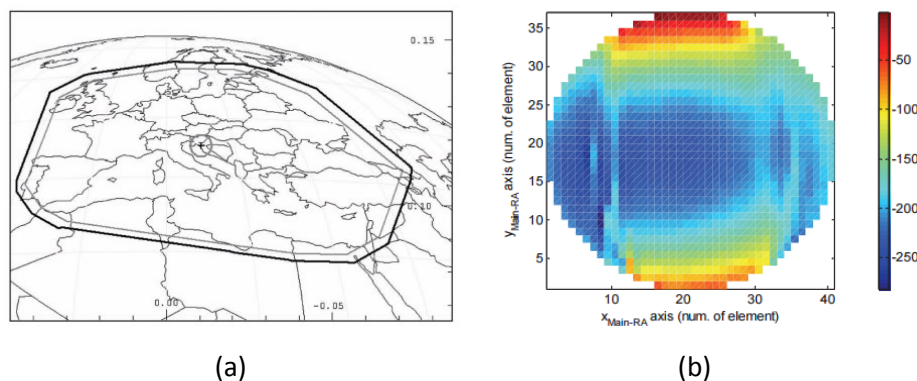
**Fig. 18.** Distribución de fase requerida para colimar el haz.

El siguiente paso del diseño de un reflectarray consistiría en ajustar la fase del coeficiente de reflexión de cada elemento para hacerla coincidir con el desplazamiento de fase objetivo. Normalmente, se busca conseguir una variación lo más lineal posible de la fase del coeficiente de reflexión con respecto a una de las variables geométricas del elemento empleado. Por ejemplo, una implementación clásica con parches microstrip rectangulares consistiría en conectar segmentos de línea de transmisión de diferentes longitudes a los elementos impresos. La longitud de la línea determinaría el valor de la fase del coeficiente de reflexión, con una variación similar a la mostrada en la Fig. 19.



**Fig. 19.** Curvas de variación de la fase del coeficiente de reflexión (a) con respecto a la longitud de la línea de transmisión del elemento (b).

Por último, cabe destacar que existe también la posibilidad de llevar a cabo un ajuste de fase independiente para cada elemento impreso, generando así un haz conformado. Mediante un método de diseño denominado síntesis de sólo fase (*phase-only synthesis*), puesto que la amplitud ya viene fijada por la distancia del alimentador a la superficie del reflectarray, se calcula el desfase necesario que debe introducir cada elemento de forma que el diagrama de radiación cumpla con las especificaciones de una cierta máscara. En este caso, las distribuciones de fase no presentan el mismo patrón circular que en el caso de los haces enfocados, como puede observarse en la Fig. 20.



**Fig. 20.** Haz conformado para proporcionar cobertura europea (a) y distribución de fase necesaria obtenida mediante el método de sólo fase (b) [11].

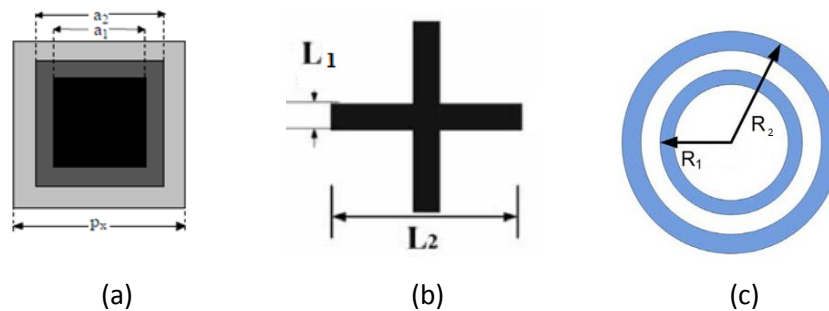
### 2.3 Tipos de elementos impresos

En cuanto al tipo de elemento reflectarray a utilizar, existe una gran variedad de formas y configuraciones posibles, en función de si se diseña para polarización lineal o circular, a una o a varias frecuencias, buscando un mayor ancho de banda, etc. La respuesta en fase del elemento debe ser analizada en detalle para comprobar si cumple con los requisitos necesarios para el diseño de la antena.

Los parches rectangulares, por ejemplo, permiten el control de fase independiente en dos polarizaciones lineales ortogonales sin más que ajustar sus dimensiones horizontal y vertical, aunque el ancho de banda resultante es pequeño. Otra opción para trabajar en polarización lineal pueden ser los dipolos en cruz o las agrupaciones de dipolos paralelos. Los elementos compuestos por anillos se suelen emplear para controlar la respuesta de fase en polarización

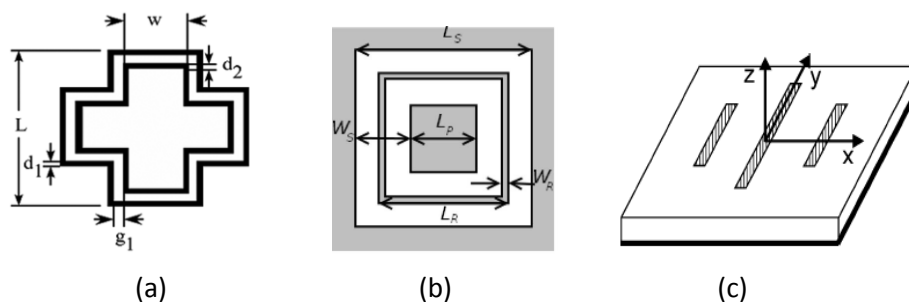


circular, aunque el desfasaje introducido afecta por igual a la polarización circular a derechas (RHCP) y a izquierdas (LHCP). Una estrategia muy empleada para lograr una respuesta selectiva en una de las dos polarizaciones circulares consiste en dejar una serie de intervalos, dispuestos de manera apropiada, en el trazado del anillo. En la Fig. 21 se representan algunos de los elementos citados.



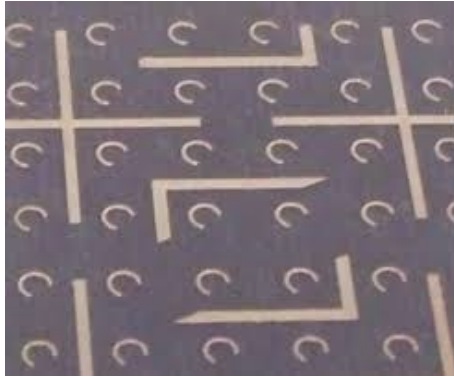
**Fig. 21.** Elementos reflectarray basados en parches rectangulares (a), dipolos en cruz (b) y anillos concéntricos (c).

Para resolver el problema del limitado ancho de banda de los reflectarrays, se han propuesto diversas configuraciones con elementos multi-resonantes impresos en una única capa de dieléctrico, como los anillos concéntricos cuadrados o en cruz, la denominada celda de Phoenix o los ya mencionados dipolos paralelos (ver Fig. 22). También se han empleado estructuras de varias capas, como por ejemplo las formadas por parches rectangulares apilados, aunque éstas tienen los inconvenientes de un mayor volumen, peso y coste de fabricación. Como prueba de ello, se ha demostrado que el elemento compuesto por tres dipolos paralelos que se muestra en la Fig. 22 proporciona el mismo ancho de banda y margen de fases que el formado por tres capas de parches apilados, siendo considerablemente más barato y sencillo de fabricar [12].



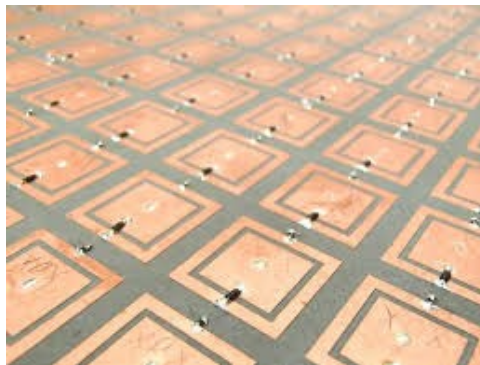
**Fig. 22.** Elementos reflectarray basados en anillos concéntricos (a), celda de Phoenix (b) y dipolos paralelos (c).

En el caso de reflectarrays que operen a varias frecuencias, se suele optar por configuraciones de una sola capa con diferentes elementos reflectarray que controlen la respuesta en fase a cada una de las frecuencias, o bien por estructuras de varias capas reflectarray apiladas, una para cada frecuencia. Un ejemplo de la primera técnica de diseño puede verse en la Fig. 23, donde se utilizan tres tipos de elementos basados en anillos, dipolos en cruz y bucles cuadrados para poder generar un haz colimado a tres frecuencias distintas (7, 8.5 y 32 GHz). En cuanto a la segunda técnica, se han llegado a proponer estructuras multicapa formadas por varios niveles de parches rectangulares, bucles cuadrados, dipolos paralelos y anillos.



**Fig. 23.** Reflectarray multi-frecuencia de una sola capa [13].

Por último, también se han realizado avances significativos en el desarrollo de reflectarrays reconfigurables, mediante el empleo de conmutadores (interruptores con tecnología MEM, diodos PIN, etc.) que pueden modificar las propiedades de radiación de la antena, como su dirección de apuntamiento. Un buen ejemplo de ello son las celdas reflectarray con diodos varactores controlados por tensión (ver Fig. 24), y para aplicaciones en la banda de 100 a 300 GHz, las celdas de cristal líquido. Estas antenas pueden ser utilizadas en aplicaciones que requieran de barrido o conmutación del haz, puesto que son fácilmente reconfigurables a través de un cambio en la tensión aplicada a la celda.



**Fig. 24.** Reflectarray reconfigurable usando diodos varactores [14].

### **3. Aplicación de los reflectarrays a los radares polarimétricos**

Las antenas reflectarray cuentan con una serie de características que las vuelven muy interesantes para su utilización en sistemas de comunicaciones por satélite, punto a multipunto, o radar. A pesar de ello, la tecnología reflectarray se encuentra todavía en fase de desarrollo y consolidación: si bien en los últimos años se han logrado avances importantes en cuanto a funcionalidad y prestaciones ofrecidas, todavía no han conseguido desplazar a los reflectores parabólicos, empleados actualmente en la mayoría de potenciales aplicaciones de los reflectarrays y que constituyen una tecnología ya madura y asentada.

En el caso de los radares meteorológicos, ciertas propiedades de los reflectarrays hacen que estos puedan llegar a ser considerados como una opción a tener en cuenta para su implementación en este tipo de sistemas. De hecho, el empleo de los reflectarrays como antenas de radar meteorológico ya ha sido planteado en algunas publicaciones en congresos científicos



internacionales durante los últimos años [15] [16], teniendo especial interés en el caso de los radares polarimétricos, en los que se requiere de una antena capaz de transmitir y recibir en doble polarización lineal. Concretamente, las principales características de los reflectarrays que pueden ser de utilidad para el diseño de antenas de radar polarimétrico son las siguientes:

- Altos valores de ganancia y eficiencia de radiación, pero con una solución de bajo coste. Los reflectarrays, a diferencia de los *arrays* convencionales, no requieren de complejas redes de alimentación o de conformación del haz. Además, el empleo de la tecnología de circuito impreso facilita y reduce los costes de su fabricación.
- Control independiente de cada polarización: algunos elementos reflectarray, como los parches rectangulares [17] o las agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos [18], permiten ajustar la fase de manera independiente en cada una de las dos polarizaciones lineales (horizontal y vertical). Esto permite generar haces diferentes en cada polarización, ya sean de tipo conformado para proporcionar cobertura a una cierta área geográfica, o haces enfocados para enlaces punto a punto por satélite.
- Bajo nivel de polarización cruzada: el aislamiento entre las dos polarizaciones del campo eléctrico debe ser muy alto para evitar problemas en el procesamiento de las medidas de reflectividad de un radar polarimétrico. Las antenas reflectarray permiten aplicar técnicas de reducción de polarización cruzada para que el efecto de la señal radiada en una polarización sea pequeño en la componente ortogonal [19].
- Antenas reconfigurables con capacidad de escaneo del haz: las antenas reflectarray permiten trabajar con grandes ángulos de escaneo del haz, lo que unido al empleo de diodos varactores, MEMs y otros conmutadores puede dar lugar a antenas de haz reconfigurable [20]. Esta propiedad, por ejemplo, permitiría al radar realizar el escaneo en el plano de elevación de manera electrónica.

Además de su instalación en estaciones terrenas, también es posible incorporar este tipo de radares a bordo de aeronaves y vehículos espaciales, con objeto de estudiar la meteorología de la Tierra y de otros planetas. De hecho, existe el precedente de un caso real en el que se valoró seriamente la posibilidad de desarrollar una antena reflectarray como parte de un radar meteorológico para una aplicación de este tipo.

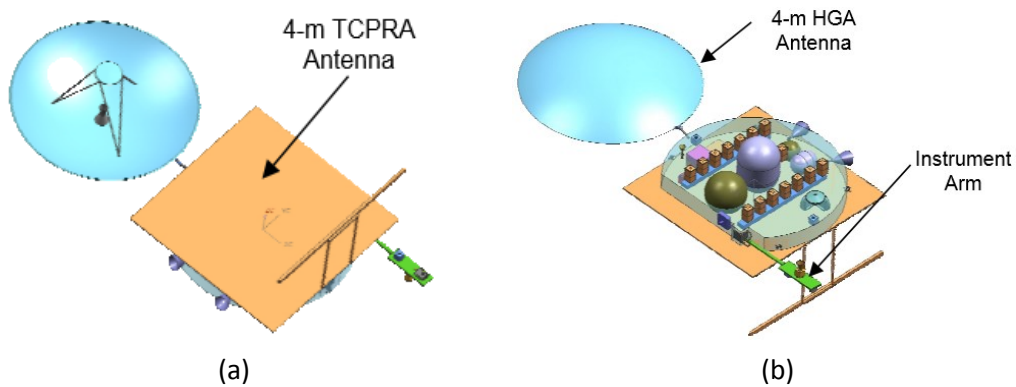
### **3.1 El proyecto “Titan Cloud/Precipitation Radar and Altimeter”**

El proyecto “Titan Cloud/Precipitation Radar and Altimeter” (TCPRA) fue impulsado por la NASA como parte de la misión “Titan Orbiter” con el fin de desarrollar un radar meteorológico con el que explorar la atmósfera y la topografía de Titán, el principal satélite de Saturno y el segundo más grande del Sistema Solar. Se planteó como una continuación natural a la misión “Cassini-Huygens” [21], que ya había permitido recabar los primeros datos acerca de dicho satélite mediante el envío de una sonda, *Huygens*, que aterrizó en su superficie y transmitió información a la Tierra durante un tiempo aproximado de una hora y media.

Las especificaciones del proyecto TCPRA incluían diseñar una antena de 4 m de diámetro para operar a dos frecuencias, 14 y 35 GHz, con una anchura de haz a -3 dB menor de 0.15° y capacidad de escaneo del haz hasta  $\pm 20^\circ$ . Por otro lado, el sistema de radar meteorológico a implementar contaría con una longitud de los pulsos transmitidos de entre 10 y 40  $\mu$ s, frecuencia de repetición de pulsos de 3 kHz, potencia media de 1.2 kW (con una potencia de pico de 3 kW),

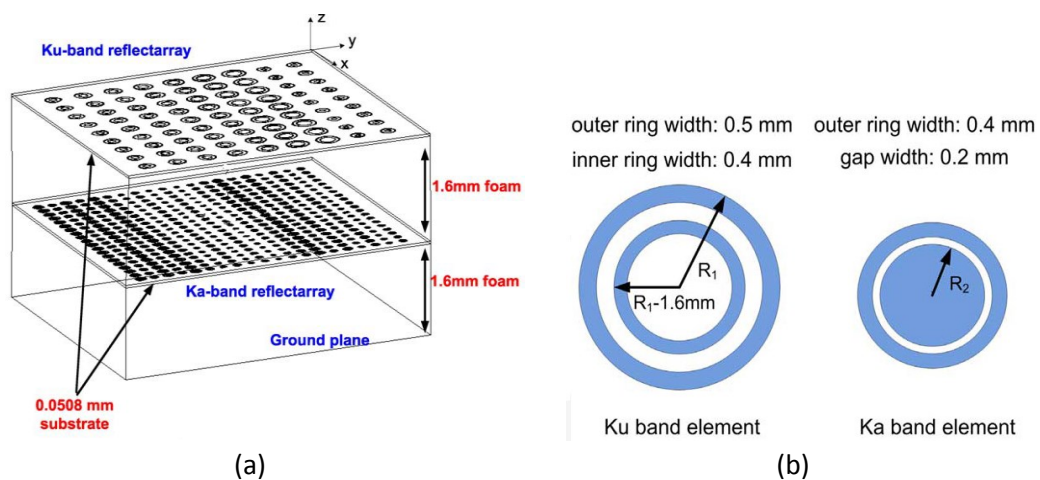
ancho de banda de 3 MHz, precisión de 0.7 m/s en las medidas Doppler de velocidad, resolución horizontal de 3.4 km, resolución vertical de 250 m y un enlace de datos a 10 Mbps para enviar la información de las medidas. La masa total del módulo TCPRA sería de unos 400 kg.

Una de las principales propuestas para llevar a cabo la antena del radar consistió en un reflectarray capaz de operar en las bandas Ku (14 GHz) y Ka (35 GHz), alimentado por dos *arrays* lineales en configuración descentrada, con un funcionamiento equivalente al de un reflector cilíndrico [22]. La antena se encargaría de conformar el haz en el plano vertical (plano H), funcionando como un espejo en el plano horizontal (plano E), siendo en este caso el *array* lineal utilizado como alimentador el encargado de conformar el haz y proporcionar el escaneo del mismo. Una reproducción del aspecto del módulo TCPRA, incluyendo la antena reflectarray, puede verse en la Fig. 25.



**Fig. 25.** Vistas del módulo TCPRA con antena reflectarray: (a) superior, (b) inferior.

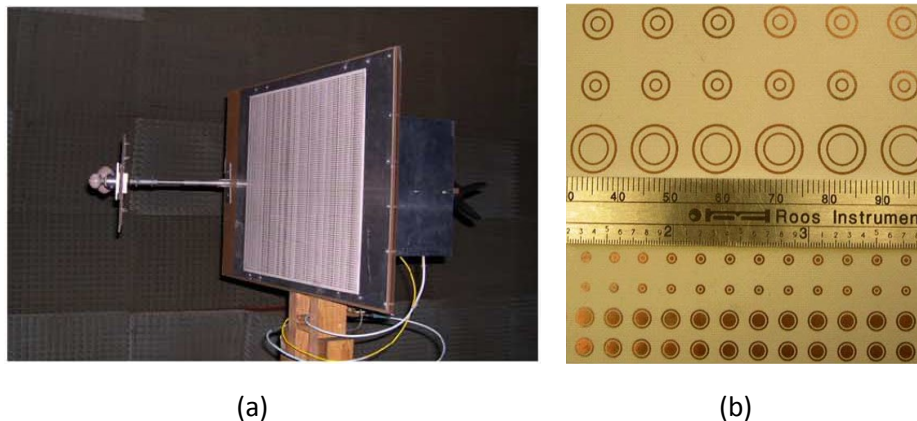
El reflectarray diseñado para formar parte del radar presentaba una configuración de dos capas: la superior contenía los elementos encargados de controlar la respuesta de la antena a 14 GHz, mientras que los elementos de la capa inferior hacían lo propio con la respuesta a 35 GHz. Se emplearon dos tipos de elementos basados en anillos circulares de radio variable, dispuestos en una rejilla rectangular con un periodo de 12 mm en la capa superior y de 5.5 mm en la capa inferior. En la Fig. 26 se muestra una representación de la estructura del reflectarray, así como la geometría y las dimensiones de los elementos impresos.



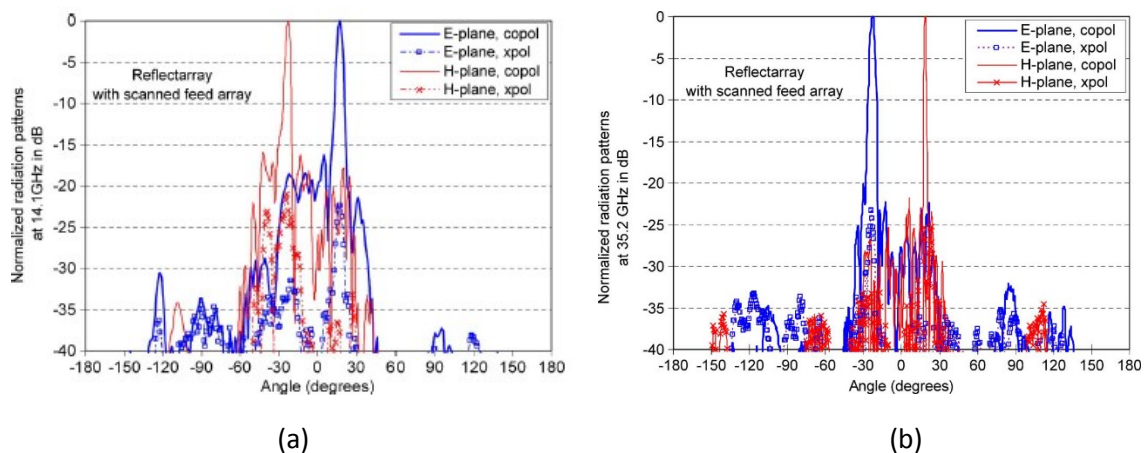
**Fig. 26.** Antena reflectarray para el módulo TCPRA: (a) estructura del reflectarray, (b) geometría de los elementos [22].

La idea que se perseguía con esta configuración era que los elementos superiores fueran casi transparentes para la onda incidente a la frecuencia de diseño de la capa inferior (35 GHz), mientras que a la otra frecuencia de operación (14 GHz) la señal sería reflejada directamente por los elementos superiores. De esta forma se lograba el funcionamiento simultáneo a dos frecuencias, aunque en este caso la simetría de los elementos impresos da lugar a que la antena genere el mismo diagrama de radiación en las dos polarizaciones.

En el año 2007 se construyó y midió un prototipo a pequeña escala (50 cm de lado) de la antena reflectarray de dos capas del proyecto TCPRA. Las medidas se llevaron a cabo en la cámara anecoica de la Universidad de Texas. En la Fig. 27 pueden observarse algunas fotografías del demostrador en la cámara anecoica y el detalle de los elementos impresos. En la Fig. 28 se muestran los diagramas de radiación normalizados obtenidos para un haz radiado con un ángulo de  $20^\circ$  respecto a la normal en los planos E y H. Los diagramas muestran las componentes co-polar y contra-polar a 14 y 35 GHz, que son las dos frecuencias de operación de la antena.



**Fig. 27.** Fotografías del prototipo fabricado: (a) en la cámara anecoica, (b) detalle de los elementos impresos [22].



**Fig. 28.** Superposición de los diagramas de radiación normalizados medidos en los planos E y H: (a) a 14 GHz, y (b) a 35 GHz [22].

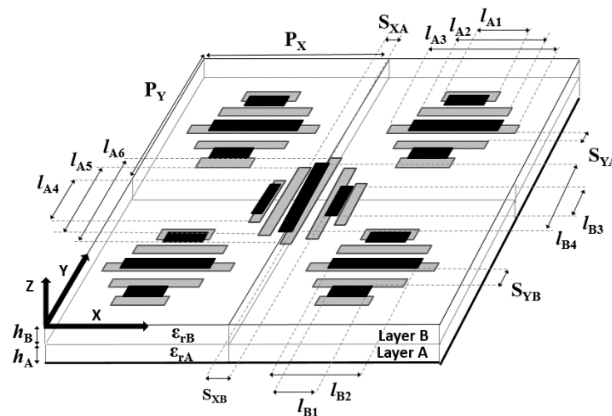
Por aquel entonces, se estimaba que el vehículo espacial con el módulo TCPRA sería lanzado en el año 2015, viajaría hasta Titán y pasaría un mínimo de dos años allí, realizando un estudio detallado de su atmósfera, nubes, precipitaciones, topografía, etc. Sin embargo, en el año 2009 el proyecto fue dejado de lado por motivos económicos para dar prioridad a otra

misión de exploración sobre el planeta Júpiter, por lo que la antena reflectarray propuesta para el radar nunca llegó a fabricarse.

El principal mérito de este trabajo radica en el hecho de diseñar un reflectarray capaz de operar a dos frecuencias distintas con una estructura relativamente sencilla, empleando únicamente dos capas de dieléctrico con elementos impresos. El único inconveniente es que no permite un control independiente de las dos polarizaciones lineales, debido a la simetría de los elementos. Pese a ello, el trabajo constituye una aportación significativa al diseño de reflectarrays multi-frecuencia para aplicaciones de radar meteorológico.

### 3.2 Reflectarrays con control de fase independiente en cada polarización

En los últimos años, el desarrollo de la tecnología reflectarray ha posibilitado la aparición de nuevos elementos que sí permiten un control independiente de cada polarización, incluso operando simultáneamente a distintas frecuencias. En la Fig. 29 puede verse una representación del elemento propuesto en [23] para operar a 20 y 30 GHz en doble polarización lineal, horizontal y vertical. Si bien en este caso las frecuencias utilizadas se corresponden con los enlaces ascendente y descendente en la banda Ka de un satélite de comunicaciones, las dimensiones del elemento podrían modificarse para que las frecuencias de funcionamiento fueran otras distintas. El principal inconveniente de esta estructura es su reducido ancho de banda, pero para este tipo de aplicaciones meteorológicas no supondría un gran problema.



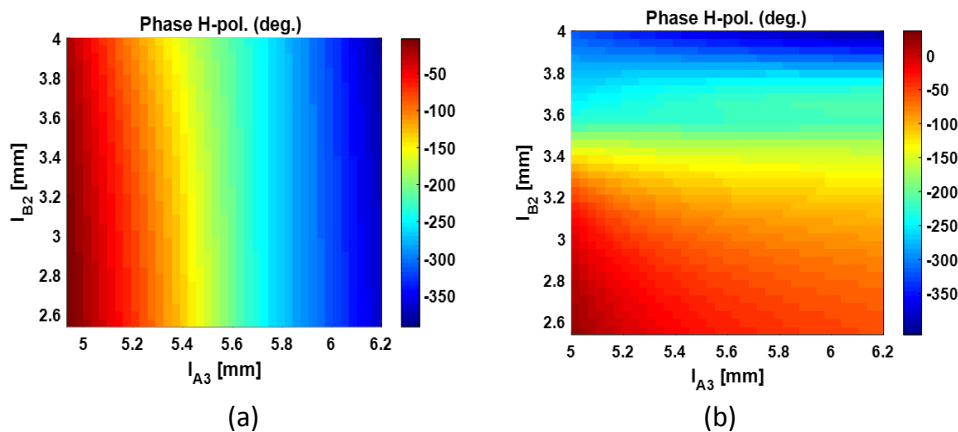
**Fig. 29.** Elemento reflectarray de dos capas compuesto por agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos [23].

El elemento propuesto se compone de dos agrupaciones ortogonales de cinco dipolos paralelos, impresos sobre una lámina de material dieléctrico (a la que denominaremos capa A), sobre los que se sitúan otros dos conjuntos ortogonales de tres dipolos paralelos, impresos en la cara superior de una segunda lámina de dieléctrico (capa B). Los dipolos laterales de cada agrupación son simétricos con respecto al dipolo central, para mantener un bajo nivel de radiación contra-polar.

El periodo de la celda se escoge como  $0.66 \cdot \lambda$  a la frecuencia más alta (30 GHz), por lo que  $P_X = P_Y = 6.5$  mm. La anchura de los dipolos es  $w = 0.25$  mm, la separación lateral entre dipolos acoplados en la capa inferior es  $S_{XA} = S_{YA} = 0.5$  mm, y en la superior  $S_{XB} = S_{YB} = 1$  mm. Las longitudes relativas de los dipolos laterales respecto al dipolo central de cada agrupación son:  $l_{A1} = 0.65 \cdot l_{A3}$ ,  $l_{A2} = 0.8 \cdot l_{A3}$ ,  $l_{A4} = 0.65 \cdot l_{A6}$ ,  $l_{A5} = 0.8 \cdot l_{A6}$  en la capa inferior (donde  $l_{A6}$  y  $l_{A3}$  representan las longitudes de los dipolos centrales en dirección X e Y, respectivamente) y  $l_{B1} = 0.8 \cdot l_{B2}$ ,  $l_{B3} =$

$0.8 \cdot l_{B4}$  en la capa superior (donde  $l_{B4}$  y  $l_{B2}$  se corresponden con las longitudes de los dipolos centrales en dirección X e Y, respectivamente). Todos estos parámetros han sido escogidos para lograr una variación suave de la respuesta en fase del elemento en un rango mayor de  $360^\circ$ , tanto a 20 GHz como a 30 GHz, tal como se explicó en el apartado 2.2.

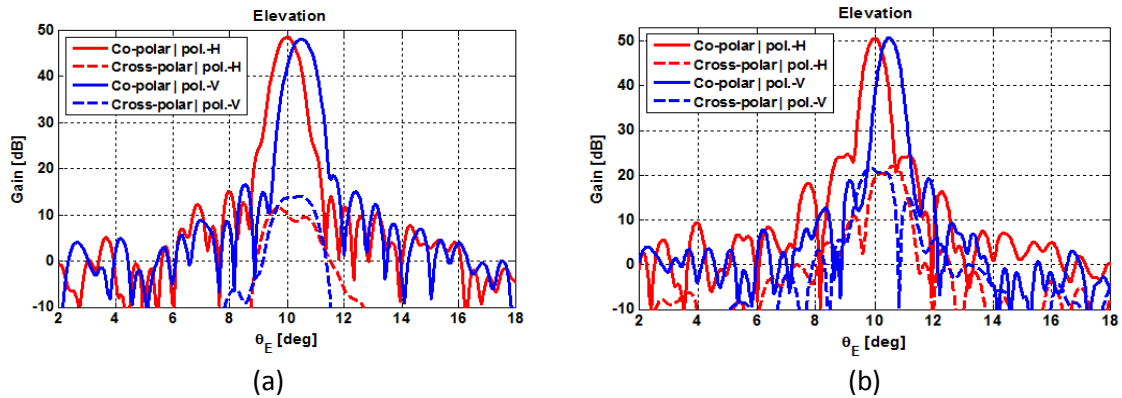
En cuanto al principio de funcionamiento del elemento, los dipolos de la capa inferior presentarán una longitud mayor que la de los dipolos superiores, de forma que estos no perturbarán la respuesta en fase del reflectarray a 20 GHz, mientras que los dipolos inferiores se comportarán como un plano de masa para los dipolos de la capa superior a 30 GHz. Esta propiedad permite lograr un control de fase prácticamente independiente en cada una de las bandas de frecuencia basado en las longitudes de los dipolos superiores e inferiores, como puede observarse en la Fig. 30, que muestra la variación en la fase del coeficiente de reflexión a 20 y a 30 GHz para polarización horizontal e incidencia normal, en función de la longitud del dipolo central de cada capa en la dirección del eje X (nótese que para polarización V se obtiene la misma respuesta considerando los dipolos en la dirección del eje Y).



**Fig. 30.** Variación de la fase del coeficiente de reflexión para polarización H en función de las longitudes de los dipolos en la dirección del eje X: (a) a 20 GHz, (b) a 30 GHz [23].

Por otro lado, los dipolos en la dirección del eje X controlarán la respuesta en fase de la antena en polarización horizontal, mientras que los dipolos en la dirección del eje Y harán lo mismo con la respuesta en fase en polarización vertical. El control independiente de fase en las dos polarizaciones lineales mediante agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos ya fue demostrado en [18], presentando un comportamiento muy similar al mostrado en los gráficos de la Fig. 30, solo que esta vez comparando las variaciones de fase debidas a las longitudes de los dipolos centrales en X y en Y de cada capa.

Una vez caracterizado el elemento, es posible utilizarlo para el diseño de reflectarrays a dos frecuencias con haces independientes en cada polarización. Las longitudes de los dipolos pueden ajustarse de manera separada para cada agrupación de dipolos paralelos situada en una misma capa, simplificando el proceso de diseño y ahorrando bastante tiempo de computación. Los resultados obtenidos mediante esta técnica a las dos frecuencias de diseño son razonablemente buenos, siendo posible incluso utilizarlos como punto de partida para ejecutar rutinas de optimización que incrementen el ancho de banda de la antena. Como ejemplo, en la Fig. 31 se muestran los diagramas de radiación en el plano de elevación para un reflectarray circular de 1.6 m de diámetro con haces independientes a 20 y 30 GHz, separados  $0.5^\circ$ , en las polarizaciones horizontal y vertical.



**Fig. 31.** Diagramas de radiación simulados en el plano de elevación para un reflectarray circular de 1.6 m de diámetro: (a) a 20 GHz, (b) a 30 GHz [23].

#### 4. Conclusiones

Los radares meteorológicos son un tipo de dispositivos que permiten localizar precipitaciones, clasificarlas según su composición y estimar sus trayectorias. En los últimos tiempos, cada vez es más frecuente la instalación de radares polarimétricos o de doble polarización, que ofrecen mejores prestaciones que los radares tradicionales de una sola polarización: mayor número de variables medidas, estimaciones más precisas de la intensidad de lluvia, algoritmos de clasificación más complejos, detección del granizo, prevención de tornados, inundaciones, etc. Este tipo de radares requieren de antenas capaces de operar en doble polarización lineal, horizontal y vertical.

Por otro lado, en paralelo a la implantación de los radares polarimétricos, se ha venido produciendo un importante desarrollo de las antenas reflectoras planas en tecnología impresa, también denominadas reflectarrays, que combinan muchas de las ventajas de los reflectores parabólicos y los *arrays*. Un reflectarray se compone de una agrupación plana de elementos impresos que al ser iluminados por un alimentador introducen el desplazamiento de fase necesario en la onda incidente para generar un haz enfocado o conformado.

En este trabajo se ha propuesto la utilización de los reflectarrays como antenas de radares polarimétricos, aprovechando algunas de las características que pueden ser de más interés en este tipo de sistemas: generación de haces independientes en las polarizaciones horizontal y vertical, alta eficiencia de radiación, bajos costes de fabricación, reconfigurabilidad, etc. Aunque existen algunos precedentes al respecto, el empleo de reflectarrays en los sistemas de radar polarimétricos es todavía un campo por explorar.

#### 5. Bibliografía

- [1] David Atlas, "Radar in Meteorology", American Meteorological Society, Boston, 1990.
- [2] Página web de la Agencia Estatal de Meteorología: [www.aemet.es](http://www.aemet.es)
- [3] NEXRAD Technical Information (Radar Operation Centre, NOAA's National Weather Service): <https://www.roc.noaa.gov/wsr88d/Engineering/NEXRADTechInfo.aspx>
- [4] A. V. Ryzhkov, T. J. Schuur, D. W. Burgess, P. L. Heinselman, S. E. Giangrande and D. S. Zrnic, "The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, no. 6, pp. 809-824, June 2005.





- [5] H. Park, A. V. Ryzhkov, D. S. Zrnica, K. E. Kim, "The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS", *Wheater and Forecasting*, vol. 24, no. 3, pp. 730-748, June 2009.
- [6] Página web de la Agencia Gallega de Meteorología: [www.meteogalicia.gal](http://www.meteogalicia.gal)
- [7] Página web de la Agencia Vasca de Meteorología: [www.euskalmet.euskadi.net](http://www.euskalmet.euskadi.net)
- [8] John Huang and José A. Encinar, "Reflectarray antennas", *IEEE Press/Wiley*, Piscataway, NJ/New York, 2008.
- [9] David M. Pozar and Daniel H. Schaubert, "Microstrip antennas", *IEEE Press/Wiley*, Piscataway, NJ/New York, 1995.
- [10] S. Montori, F. Cacciamani, R. V. Gatti, R. Sorrentino, G. Arista, C. Tienda, J. A. Encinar, G. Tosso, "A Transportable Reflectarray Antenna for Satellite Ku-band Emergency Communications", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 63, no. 4, pp. 1393-1407, April 2015.
- [11] C. Tienda, J. A. Encinar, M. Arrebola, "Contoured beam dual reflectarray antenna for DBS applications", *IEEE International Symposium on Antennas & Propagation*, Washington, USA, July 2011.
- [12] R. Florencio, R. R. Boix, J. A. Encinar, "Comparative study of reflectarrays based on cells with three coplanar dipoles and reflectarrays based on cells with three stacked patches," *6th European Conference on Antennas & Propagation*, Prague, Czech Republic, March 2012.
- [13] A. Yu, F. Yang, Elsherbeni, J. Huang, "Experimental demonstration of a single layer tri-band circularly polarized reflectarray", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Toronto, Canada, July 2010.
- [14] A. Tayebi, J. Tang, P. R. Paladhi, L. Udpa, S. S. Upda, E. J. Rothwell, "Dynamic Beam Shaping Using a Dual-Band Electronically Tunable Reflectarray Antenna", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 63, no. 10, pp. 4534-4539, Oct. 2015.
- [15] Y. Pan and Y. Zhang, "A Reflectarray Design with Gapped Ring Elements and Reduced Cross-Polarization for Polarimetric Radar", *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, October 2013.
- [16] R. Romanofsky, C. Mueller, C. V. Chandrasekar, "Concept for a Low Cost, High Efficiency Precipitation Radar System Based on Ferroelectric Reflectarray Antenna", *IEEE Radar Conference*, May 2009.
- [17] J. A. Encinar, L. S. Datashvili, J. A. Zornoza, M. Arrebola, M. Sierra-Castaner, J. L. Besada-Sanmartin, H. Baier, H. Legay, "Dual-Polarization Dual-Coverage Reflectarray for Space Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 10, pp. 2827-2837, April 2006.
- [18] R. Florencio, J. A. Encinar, R. R. Boix, V. Losada, G. Toso, "Reflectarray Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, pp. 1234-1246, April 2015.
- [19] J. A. Encinar, M. Arrebola, "Reduction of Cross-Polarization in Contoured Beam Reflectarrays Using a Three-Layer Configuration", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Honolulu, Hawaii (USA), July 2007.
- [20] E. Carrasco, J. A. Encinar, J. Perruisseau-Carrier, "Evaluation of a Reflectarray with Independent Scanning of Two Linearly Polarized Beams", *6th European Conference on Antennas & Propagation*, Prague, Czech Republic, March 2012.
- [21] Cassini: Mission to Saturn (Jet Propulsion Laboratory, NASA): <https://saturn.jpl.nasa.gov>
- [22] S. H. Hsu, C. Han, J. Huang and K. Chang, "An Offset Linear-Array-Fed Ku/Ka Dual-Band Reflectarray for Planet/Cloud Precipitation Radar", *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 55, no. 11, pp. 3114-3122, Nov. 2007.
- [23] E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio, R.R. Boix, "Reflectarray in K and Ka bands with independent beams in each polarization *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Fajardo, Puerto Rico, June 2016.



## **EVALUACIÓN AMBIENTAL DE TERMINALES DE USUARIO MULTIANTENA EN REDES LTE-A**

**José Javier Martínez Vázquez<sup>(1)</sup>, Eduardo Martínez de Rioja y del Nido<sup>(2)</sup> y José Daniel  
Martínez de Rioja y del Nido<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Coordinador del Grupo de Trabajo, <sup>(2)</sup>Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones (UPM)

**Resumen.** Este trabajo tiene como objetivos el análisis medioambiental de los terminales de usuario (**UE**) en redes **LTE-A** que incorporen estructuras **MIMO** y su posible influencia sobre el abonado. Inicialmente se describen los principios de funcionamiento así como las características y ventajas de los sistemas **MIMO**. A continuación se estudian los escenarios más probables para la explotación comercial de estos equipos, entre las que cabe destacar el control y la gestión de cultivos en invernaderos, y se analizan desde un punto de vista ambiental. Por último, se obtienen conclusiones sobre su posible repercusión en la salud del usuario.

### **1. INTRODUCCIÓN.**

La tecnología **MIMO** permite establecer entre dos sistemas de comunicaciones, uno con  $M_t$  antenas transmisoras y otro con  $M_r$  antenas receptoras,  $r$  canales de transmisión incorrelados, siendo  $r$ :

$$r \leq L = \min (M_t, M_r)$$

Para las estructuras con una sola antena en emisión y una sola en transmisión (**SISO**), se tiene:

$$y(t) = h_{i,j}(\tau, t) * s(t)$$

Nótese como la respuesta impulsional:  $h_{i,j}(\tau, t)$ , es la de un sistema lineal variante en el tiempo, y dada la naturaleza indeterminada y variable del escenario móvil, la respuesta impulsional es también una señal aleatoria. Con lo que puede expresarse la ecuación del sistema **MIMO** como:

$$y(t) = H(\tau, t) * s(t)$$

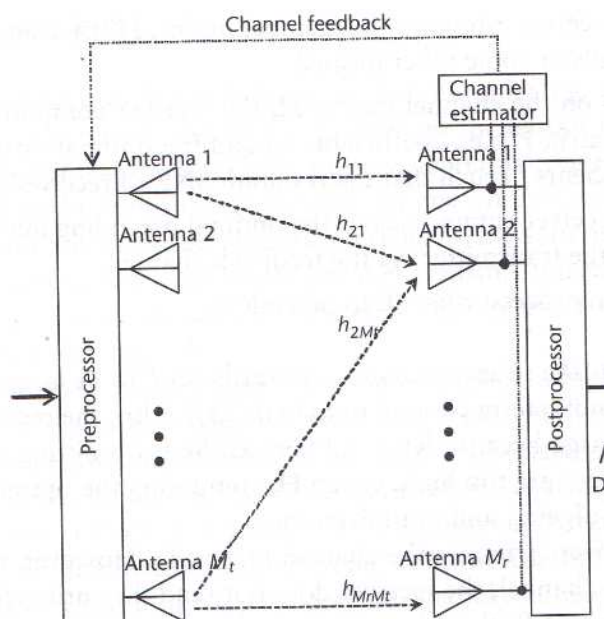
Donde  $H(\tau, t)$  es la matriz de propagación o de respuesta del canal, de dimensiones  $M_t \times M_r$ :

$$H(\tau, t) = \begin{pmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \dots & h_{1, M_t}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \dots & h_{2, M_t}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r,1}(\tau, t) & h_{M_r,2}(\tau, t) & \dots & h_{M_r, M_t}(\tau, t) \end{pmatrix}$$

Siendo  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_{M_t}(t)]^T$  un vector de dimensión  $M_t \times 1$  que contiene las señales de entrada  $S_j(t)$  ( $j=1, 2, \dots, M_t$ ) a cada una de las  $M_t$  antenas transmisoras.

Al igual que  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_{M_r}(t)]^T$  es un vector de dimensión  $M_r \times 1$  conteniendo las  $M_r$  salidas de las  $M_r$  antenas receptoras.

La matriz  $H(\tau, t)$  representa todas las posibles relaciones entre una antena  $i$  en transmisión y todas las antenas en recepción desde la 1 hasta la  $M_r$ , dicho de otro modo, corresponde a un sistema con diversidad tanto en transmisión como en recepción, tal y como se describe en la figura siguiente:



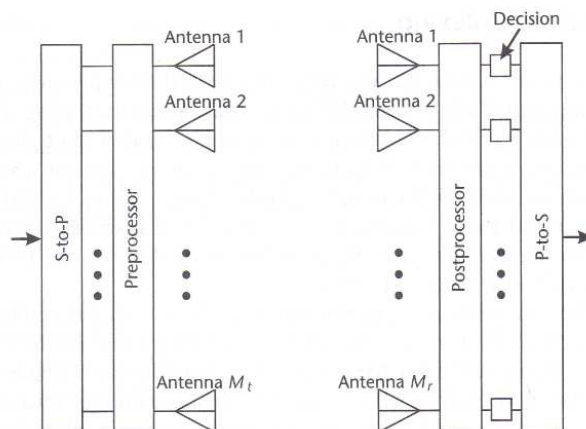
**Fig. 1. Canal resultante de un sistema con diversidad en transmisión y en recepción.**

Sin embargo, lo que se pretende en un sistema **MIMO** es relacionar cada señal de salida de la antena transmisora  $i$  con la señal de entrada de la antena receptora  $i$ ,

estableciendo  $r$  canales independientes. La respuesta podría aproximarse por la de un canal lineal e invariante en el tiempo representado por una matriz:

$$h(\tau) = \begin{pmatrix} h_{1,1}(\tau) & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_{2,2}(\tau) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{rr}(\tau) & 0 \end{pmatrix}$$

De esta forma, tendríamos un sistema de multiplexado espacial denominado **MIMO**, tal y como se muestra en la figura:



**Fig. 2. Canal resultante de un sistema con multiplexado espacial.**

Para simplificar la nomenclatura, definimos:

$$y(t) = y, H(\tau, t) = H, s(t) = s$$

En tal caso resulta:

$$y = H * s$$

Con una potencia de señal de salida en cada antena transmisora de  $P/M_t$ , se tiene:

$$y = \sqrt{P/M_t} H * s$$

Donde  $H$  es una matriz cuyas entradas son  $h_{k,l}$ .

Con el objeto de visualizar cómo una estructura **MIMO** puede proporcionar  $r \leq L = \min(M_t, M_r)$  caminos paralelos de propagación y el correspondiente multiplexado espacial, que es la esencia de las estructuras **MIMO**, hacemos uso de la descomposición en valores singulares **SVD** (Singular Value Decomposition) de la matriz de propagación  $H$ , de modo que:

$$H = U \Sigma V^H$$

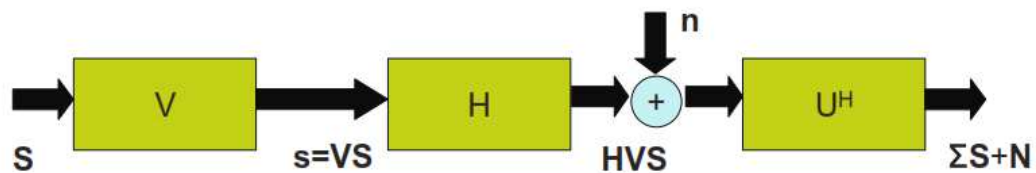
El superíndice  $H$  indica en la matriz correspondiente que es transpuesta y conjugada. Las matrices resultantes  $U$  y  $V$  son matrices de dimensiones  $(M_r \times r)$  y  $(M_t \times r)$  respectivamente y satisfacen:

$$U^H U = V^H V = I_r$$

Donde  $I_r$  es la matriz identidad de dimensión  $(r \times r)$ ,  $\Sigma$  es una matriz diagonal que presenta los valores  $\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r\}$  en la diagonal principal y cero en el resto de las posiciones, lo que denotaremos como:

$$\Sigma = \text{diagonal} \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r\} = \text{diagonal} \{\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_r}\}$$

Siendo  $\sigma_i$  ( $i=1, \dots, r$ ) los valores singulares de la matriz  $H$ .



**Fig. 3. Descomposición SVD**

El rango de la matriz  $H$  (definido como el número de ecuaciones linealmente independientes en el sistema de ecuaciones) nos establece el número de caminos paralelos de propagación que se pueden utilizar, cumpliéndose siempre que  $r \leq L$



=  $\min (M_t, M_r)$ . Al valor de  $r$  también se le conoce como ganancia de multiplexado. Con objeto de ver la aplicabilidad de la descomposición **SVD**, introducimos un vector de entradas de señal de usuario:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_r)^T$$

De dimensión  $r \times 1$  que aplicamos a la matriz  $\mathbf{V}$  mediante la operación  $\mathbf{VS}$ , que se denomina precodificación, tal como se esquematiza en la figura 3. A la salida del precodificador aparece el vector:

$$\mathbf{s} = \mathbf{VS} = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{M_t})^T$$

De dimensión  $M_t \times 1$ , cuyos  $M_t$  valores constituyen las entradas a las  $M_t$  antenas transmisoras. De modo similar en recepción, y a resultados de la matriz de propagación  $\mathbf{H}$ , las  $M_r$  señales recibidas en las correspondientes  $M_r$  antenas receptoras coinciden con las componentes del vector  $\mathbf{HVS}$  de dimensión  $M_r \times 1$ . Finalmente, tal y como se esquematiza en la figura 3, aplicando este vector de salida a un decodificador caracterizado por  $\mathbf{U}^H$  resulta la ecuación:

$$\mathbf{Y} = \sqrt{P/M_t} (\mathbf{U}^H \mathbf{H} \mathbf{V}) \mathbf{S} + \mathbf{U}^H \mathbf{n}$$

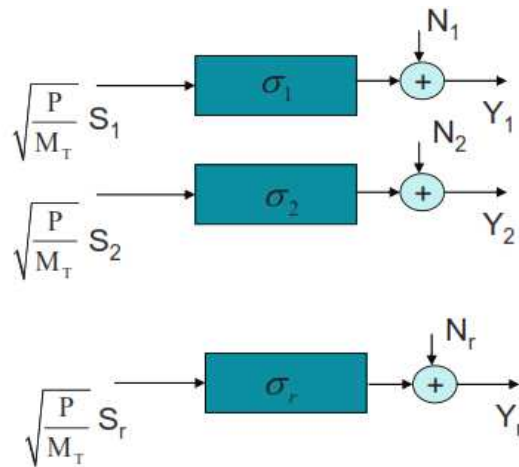
Sustituyendo  $\mathbf{H}$  por su descomposición **SVD**,  $\mathbf{H} = \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^H$ , resulta:

$$\mathbf{Y} = \sqrt{P/M_t} (\mathbf{U}^H \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^H \mathbf{V}) \mathbf{S} + \mathbf{U}^H \mathbf{n} = \sqrt{P/M_t} \Sigma \mathbf{S} + \mathbf{N}$$

Donde  $\mathbf{N} = \mathbf{U}^H \mathbf{n}$  es un vector columna de  $r$  filas correspondiente al ruido resultante e  $\mathbf{Y}$  es el vector de salida. Es decir, a la salida de la operación de descodificación que determina el operador  $\mathbf{U}^H$ , tenemos  $r$  canales paralelos desacoplados:

$$Y_i = \sqrt{P/M_t} \sigma_i S_i + N_i \quad (i = 1, 2, \dots, r)$$

Tal y como se representa en la figura 4, que ilustra cómo a todos los efectos podemos imaginar que el esquema **MIMO** ha transportado las  $r$  señales a transmitir desde el extremo emisor al extremo receptor a través de  $r$  canales en paralelo desacoplados de ganancia  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$  respectivamente.



**Fig. 4. Esquema de una estructura MIMO**

Cada columna de  $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{I}_r$ , introduce un significado geométrico que permite una interpretación intuitiva del problema. En efecto, se puede considerar que las columnas de la matriz  $\mathbf{V}$  son como los  $r$  vectores unitarios de dimensión:

$$M_t (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_r)$$

Que definen una base en un sub-espacio  $r$ -dimensional. La señal transmitida  $\mathbf{V}\mathbf{S}$  se puede representar a partir de la base de este espacio vectorial según:

$$\mathbf{V}\mathbf{S} = S_1 \mathbf{e}_1 + S_2 \mathbf{e}_2 + \dots + S_r \mathbf{e}_r$$

Los  $r$  vectores  $\mathbf{e}_i$  ( $i=1, 2, \dots, r$ ) definen los  $r$  canales de transmisión ortogonales ( $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j = \delta_{i,j}$ ) y por lo tanto desacoplados en los que cada emisor transporta las  $r$  señales de usuario recibidas, dando de esta forma sentido amplio al concepto de multiplexado espacial en contraposición al multiplexado temporal o en frecuencia convencional usado en caso de tener canales ortogonales en el tiempo (**TDM**) o en la frecuencia (**FDM**), respectivamente.

Como se ha comentado, se cumple que  $r \leq L = \min (M_t, M_r)$ , de modo que  $L$  constituye el máximo número de caminos en paralelo que se pueden extraer del canal móvil. Valores más pequeños que  $L$  son factibles, e incluso valores degradados de  $r=1$  que indican que la estructura dispersiva de los canales móviles correspondientes no permite ninguna paralelización. Por otra parte, el vector  $\mathbf{S}$  debe ser tal que el valor medio de  $\mathbf{S}^H \mathbf{S}$  es  $E[\mathbf{S}^H \mathbf{S}] = M_t$ , si se pretende mantener que la potencia total transmitida es  $P$ .



### 1.1. ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS MIMO.

Tanto con la diversidad espacial en recepción, como con la diversidad espacial en transmisión, se puede aumentar la capacidad del canal resultante con el número de antenas  $M$ , al mejorar la relación señal ruido a la entrada del receptor  $SNR = \gamma$ .

$$C = B \log_2 (1 + \gamma) \text{ bits / s}$$

La relación de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido  $E_b/N_0$  puede hacerse muy elevada para valores de la velocidad de transmisión superiores al ancho de banda de funcionamiento  $B$ , como es el caso de los sistemas que requieren una alta eficiencia espectral (medida como  $R/B$  b/s/Hz, donde  $R$  es la tasa de transmisión) como **LTE**. En tales sistemas, utilizar diversidad espacial en recepción podría resultar insuficiente, aún contando con esquemas de transmisión avanzados que introduzcan codificación de canal y modulaciones adaptativas con distintos niveles, tal como **QAM**.

Con la aparición del concepto **MIMO** (Multiple Input Multiple Output), se presenta una nueva estrategia derivada de aprovechar la presencia de  $M_t$  antenas en transmisión y  $M_r$  antenas en recepción. La diferencia, relevante en relación a la diversidad **SIMO** y **MISO**, es que la estrategia **MIMO** pretende explotar la variación espacial del canal móvil creando de hecho  $L$  caminos de transmisión paralelos desacoplados entre el emisor y el receptor. La capacidad del canal en estas condiciones puede llegar a valer:

$$C = L B \log_2 (1 + \gamma) \text{ bits / s}$$

La capacidad de un sistema **MIMO** sin información del canal en el transmisor se comporta como la capacidad de  $r$  canales en paralelo cada uno con una ganancia de canal  $\lambda_i$  y potencia transmitida igual a la potencia total dividida por  $M$ .

$$C = B \sum_{i=1}^r \log_2 (1 + \gamma \lambda_i / M)$$

Observemos que en tales circunstancias, la capacidad del canal aumenta linealmente con el número de antenas, o lo que es equivalente la relación de energía de bit a densidad espectral de potencia de ruido  $E_b/N_0$  necesaria para conseguir una velocidad de transmisión  $R = C$  es:

$$E_b/N_0 \geq \frac{2^{(R/BL)} - 1}{R/B}$$





A diferencia de los sistemas basados sólo en diversidad, la  $E_b/N_0$  recibida necesaria para conseguir sistemas de alta eficiencia espectral, tales como los previstos en **LTE**, queda sustancialmente reducida al usar multiplexado espacial.

En conclusión, las estructuras de antenas **MIMO** representan un salto cualitativo respecto a los sistemas en diversidad **SIMO** y **MISO**, y abren la puerta a conseguir sistemas de velocidad de transmisión elevada, pero con potencia recibidas y por tanto coberturas y distancias entre emplazamientos abordables.

$$E_b/N_0 \geq \frac{1}{M} \frac{2^{(R/B)} - 1}{R/B}$$

La naturaleza exponencial de la expresión anterior nos indica que la relación  $E_b/N_0$  puede hacerse muy elevada para valores de la velocidad de transmisión superiores a **B**, como es el caso de los sistemas que requieren una alta eficiencia espectral (medida como **R/B** b/s/Hz) como **LTE**. En tales sistemas, utilizar diversidad espacial en recepción podría resultar insuficiente, aún contando con esquemas de transmisión avanzados que introduzcan codificación de canal y modulaciones adaptativas con distintos niveles, tal como **QAM**.

## 2. SISTEMAS MIMO PRÁCTICOS PARA EL ANÁLISIS.

Los sistemas de multiplexado espacial, están actualmente orientados a un funcionamiento en interiores en lugar de hacerlo en celdas de tipo metropolitano, urbano o rural. En estos últimos casos, las potencias utilizadas por las estaciones base son relativamente altas, pudiendo alcanzar niveles del orden de los 50 vatios, con áreas de cobertura también muy extensas. La implantación de capas físicas de multiplexado espacial para poner en servicio **MIMO** en el enlace descendente, disminuiría notablemente las áreas de cobertura y limitaría el número de abonados. Por otra parte, dado que el número de usuarios en celdas **LTE** es muy elevado, unos 100 aproximadamente, parece poco práctico hacer una instalación para dar servicio **MIMO** a una pequeña parte de aquellos, ya sea **MIMO** multiusuario o **MIMO** con usuario único.

Tampoco sería muy habitual que un abonado de telefonía móvil detuviera su vehículo en la carretera o aparcara en plena calle para solicitar de su operador un servicio de datos asociado con tasas de transmisión elevadas.

Lo más lógico es imaginar un escenario de interiores, donde el abonado puede disponer de manera práctica y eficaz de las ventajas de varias capas físicas de **MIMO**. Esta situación presenta un corto recorrido entre estación base (**e Nodo B**) y terminal de abonado (**UE**), lo que implica la necesidad de bajos niveles de potencia, tanto en transmisión como en recepción, es decir en el enlace



ascendente y en el descendente. El conocimiento del canal también constituye otra ventaja, no sólo por las bajas pérdidas de propagación sino también por la facilidad para el conocimiento de la matriz de precodificación, ahorrando almacenamiento de datos a ambos lados de la interfaz aire. Por otra parte, sería la situación idónea para establecer una red de datos en una nave de tipo invernadero, con la ventaja añadida de que el propio operador de telefonía móvil podría implantar el sistema a petición del usuario.

De hecho, la normativa **3GPP** actual contempla sólo la instalación de equipos **MIMO** en las estaciones base denominadas "**HOME**", sin precisar ningún dato en el resto de **eNB** incluidas en la citada normativa: macro, micro y área local.

En este escenario, las antenas de la estación base o **eNB** y las de los terminales de usuario deberán tener ganancias bajas y próximas a los cero dBi, para evitar dependencia de la orientación del terminal de usuario (**UE**) en el funcionamiento del sistema.

Un hecho de interés a reseñar, es que la potencia máxima de una estación base doméstica (**HOME eNB**) es menor que la potencia máxima de un terminal de abonado (**UE**). La explicación consistiría en que un terminal de usuario debe funcionar con cualquier tipo de cobertura, ya sea de interiores o de exteriores. De esta forma se asegura su funcionamiento para el caso más desfavorable, el límite del área de cobertura de una macrocelda. A pesar de ello, los terminales de usuario **LTE** funcionan con potencias mucho más bajas que los de sus predecesores **GSM**, **UMTS** y **HSPA**.

Dentro de este mismo punto, conviene constatar también que la potencia máxima de un terminal de abonado está definida en la normativa **3GPP** para un mismo ancho de banda de transmisión. Dicho de otro modo, la potencia máxima total de un terminal **UE** es independiente del número de capas, lo que redundaría en un escenario **MIMO** de interiores, ya que al aumentar el número de capas la potencia por capa va disminuyendo y por tanto también se reduce el alcance del terminal.

Por último, señalar que este estudio está enfocado al posible impacto ambiental de los equipos de radio al margen de otras consideraciones sobre coeficientes de correlación espacial, aislamiento entre señales, etc.

## **2.1. FRECUENCIAS DE FUNCIONAMIENTO.**

A nivel experimental, las pruebas realizadas hasta la fecha utilizan las bandas de frecuencias de 750 MHz y de 2700 MHz.

La banda de frecuencias más baja, 700/800 MHz, presenta unas pérdidas de propagación menores por lo que es la más apropiada a efectos de despliegue de red. Sin embargo, en términos de longitud de onda, representa un terminal más



pequeño y unos mayores niveles de interferencia entre las señales de las diferentes antenas.

Por el contrario, la banda de frecuencias más alta, 2.700 MHz, tiene unas pérdidas de propagación mayores pero al disminuir la longitud de onda, la interferencia entre las señales de las diferentes antenas es menor, ya que las dimensiones de los terminales en términos eléctricos son mayores.

Desde el punto de vista ambiental, los niveles de referencia de las señales de mayor frecuencia son más elevados, por lo que las señales en la banda más alta alcanzan el nivel inocuo más cerca del sistema radiante que las señales de frecuencia más baja. Así pues el análisis en el caso peor correspondería a la banda de los 750 MHz.

### **3. NIVELES DE REFERENCIA Y DENSIDAD DE POTENCIA RADIADA.**

La Recomendación del Consejo de Europa 1999/519/CE, de 12 de julio de 1999, y el Real Decreto Legislativo 1066/2001, de 28 de septiembre, establecen las restricciones básicas como las restricciones de la exposición a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de tiempo variable, basadas en los efectos conocidos sobre la salud y en consideraciones biológicas. Además, señalan que el cumplimiento del nivel de referencia garantizará el respeto de la restricción básica pertinente.

El Decreto 148/200, de 29 de mayo, de la Generalitat de Catalunya, define los niveles de referencia como los niveles eficaces máximos de exposición a los campos electromagnéticos permitidos para las personas (público en general) en las zonas de uso continuado.

Por lo tanto, se van a tener en cuenta la regulación europea, la española y un ejemplo de regulación autonómica. Se incluye la reglamentación catalana en este estudio dado que es la más restrictiva del conjunto de las Comunidades Autónomas. Los niveles de referencia para la densidad de potencia radiada establecidos por la legislación que se acaba de mencionar son:

<b>BANDA DE FRECUENCIAS</b>	<b>RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001</b>	<b>DECRETO 148/2001</b>
<b>700 - 800 MHz</b>	<b>f /200 (3,5 – 4 vatios/m2)</b>	<b>f /450 (1,55 – 1,77 vatios/m2)</b>
<b>2.600 - 2.700 MHz</b>	<b>10 vatios/m2</b>	<b>4,5 vatios/m2</b>

Las distancias respecto de los sistemas radiantes a las que se alcanza el nivel de referencia se calculan de acuerdo a la expresión:

$$4 \pi r^2 W = \sum_{i=1}^n P_i G_i, \quad i = 2, 4, 8$$

En donde  $W$  es el nivel de referencia de la densidad de potencia radiada,  $n$  es el número de capas **MIMO** instaladas,  $P_i$  es la potencia máxima radiada por la antena  $i$ , y  $G_i$  es la ganancia asociada a la misma antena. Finalmente,  $r$  es la distancia de la antena a la que se cumple el nivel de referencia.

#### 4. ENLACE DESCENDENTE. DL-MIMO DOMÉSTICO.

Se describen a continuación los sistemas radiantes más usuales en este tipo de instalaciones, así como las distancias a los mismos para asegurar el nivel de referencia. El estudio considera, para los cálculos de la distancia, no sólo la potencia total de la estación base sino que también se analiza la potencia por capa para obtener la distancia a cada antena que debe guardar el usuario.

##### 4.1. SISTEMAS RADIANTES.

Ya se ha indicado que las antenas de la estación base deberán tener ganancias bajas y próximas a los cero dBi, para evitar una excesiva dependencia de la orientación del terminal de usuario (**UE**) en el funcionamiento del sistema.

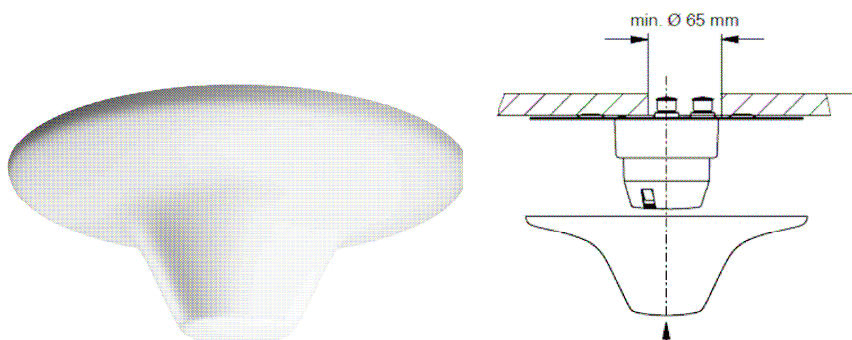


Fig. 5. Antena de fijación al techo para estaciones base domésticas



Algunos estudios, de **MIMO 8x8** utilizan en los **e-Nodo B** domésticos, 8 antenas tipo Kathrein 80010709, con ganancias próximas a 2 dBi, trabajando a 2.700 MHz, como la mostrada en la Figura 5.

En principio, estos elementos radiantes suelen ir fijados al techo del local donde se realizan las pruebas de campo, de forma que la potencia total se radiaría dentro del mencionado local.

#### 4.2. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.

De acuerdo con las normas establecidas por el 3GPP, las potencias de emisión de una instalación de este tipo son las que figuran en la tabla siguiente:

Potencia máxima de salida	20 dBm
Con 2 capas MIMO	17 dBm por capa
Con 4 capas MIMO	14 dBm por capa
Con 8 capas MIMO	11 dBm por capa

Podrán diferenciarse, por un lado el nivel de referencia respecto al total de los elementos radiantes y por otro, el nivel de referencia respecto a una sola antena.

Independientemente del número de capas **MIMO**, el caso más desfavorable sería aquél que contemplara la potencia máxima y la ganancia máxima:

$$4 \pi r^2 W = P_{max} G_{max}$$

La potencia máxima para un e-Nodo B reseñada en la normativa es de 100 mW, si se considera una ganancia máxima de 3 dBi, se obtienen las siguientes distancias de seguridad:

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	6.5 cm	10 cm
2.600 - 2.700 MHz	4 cm	6 cm

Por antena o por capa física, en el caso de potencias máximas de emisión, se tienen las siguientes distancias de seguridad:



## MIMO 2 X 2.

$$P_i = 50 \text{ mW}, G_i = 3 \text{ dBi}$$

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	4.5 cm	7 cm
2.600 - 2.700 MHz	3 cm	4 cm

## MIMO 4 X 4.

$$P_i = 25 \text{ mW}, G_i = 3 \text{ dBi}$$

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	3.5 cm	5 cm
2.600 - 2.700 MHz	2 cm	3 cm

## MIMO 8 X 8.

$$P_i = 12.5 \text{ mW}, G_i = 3 \text{ dBi}$$

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	2.5 cm	3.5 cm
2.600 - 2.700 MHz	1.5 cm	2 cm

Por lo tanto, los niveles de referencia para el caso de estaciones base o eNB doméstico, se alcanzan a 10 centímetros de las antenas. Esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde al cálculo en el caso más restrictivo, la legislación catalana. Considerando el caso de una sola antena, para **MIMO** de dos capas, las distancias de seguridad para guardar el nivel de referencia son de 7 centímetros.

## 5. ENLACE ASCENDENTE. UL-MIMO DOMÉSTICO.

Este apartado está dedicado a la disposición de las antenas dentro de los diferentes tipos de terminales de usuario existentes en las redes LTE-A. También, se calcula la distancia del terminal a la que se tiene un nivel de señal igual al nivel de referencia.

## 5.1. DISPOSICIÓN Y TIPO DE SISTEMAS RADIANTES.

Como ya se ha indicado, la directividad de los elementos radiantes integrados en el UE debe ser baja, para evitar dependencia de la orientación del terminal en la conexión entre el terminal móvil y la estación base. Así pues se utilizan antenas tipo dipolo elemental ya sea eléctrico o magnético y antenas impresas tipo PIFA, de endidura, etc. En general, se trata de elementos con ganancias entre 0 y 3 dBi's.

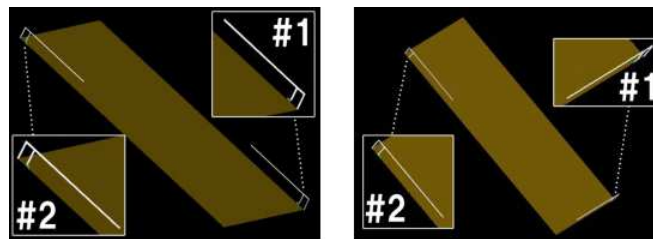


Fig. 6. Posible ubicación de antenas PIFA en un equipo de abonado

La figura 6 representa de forma esquemática la posible disposición de dos antenas impresas tipo F invertida sobre una placa de circuito impreso a ubicar dentro del terminal de abonado.

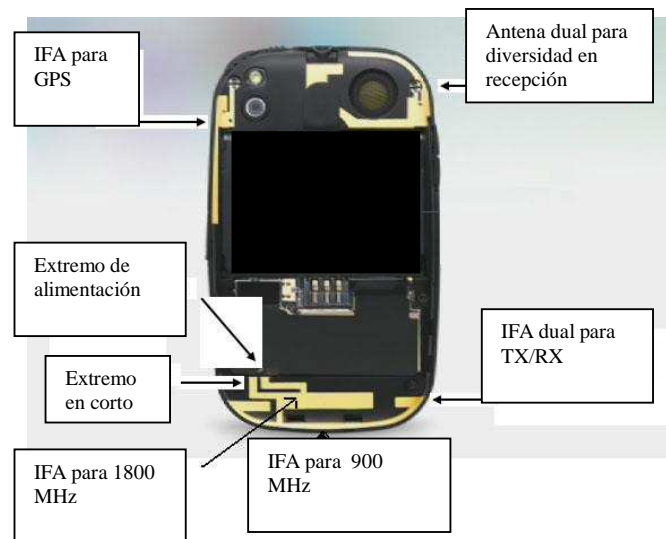


Fig. 7. Antenas PIFA en un dispositivo comercial.

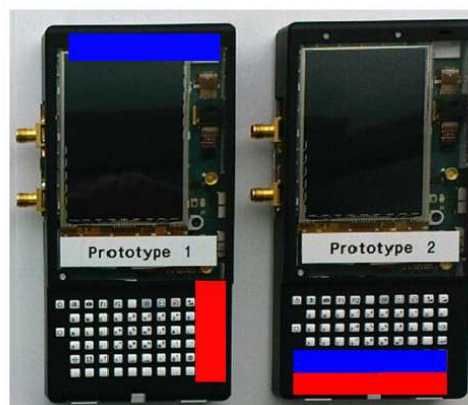
En la Figura 7 puede verse un montaje práctico de antenas impresas sobre un terminal de mano de abonado. El uso de antenas impresas, facilita el montaje y reduce el coste de los sistemas radiantes. La figura 8 muestra dos terminales de de mano de abonado con un tamaño medio, con los que se llevaron a cabo pruebas de campo a 750/800 MHz. Como antena principal se utilizó una de tipo monopolo situada en la parte inferior de cada uno de los dispositivos A y B.



**Fig. 8. Terminales de tamaño medio para pruebas de campo.**

La segunda antena es también un monopolo para el terminal A y una de tipo endidura en el prototipo B. Para el equipo de abonado A, la polarización es la misma en las dos antenas y el caso del prototipo B las antenas tienen polarización ortogonal. Se intenta analizar la influencia en la correlación espacial de las señales de dos antenas separadas con la misma polarización y dos antenas próximas con polarización ortogonal.

La figura 9 muestra dos terminales de mano de abonado con un tamaño mayor que el del caso anterior, con los que se realizaron igualmente pruebas de campo a 750/800 MHz. Los terminales van equipados con una antena principal de tipo monopolo, señalada como azul en la figura, y otra antena PIFA señalada como roja en los terminales.



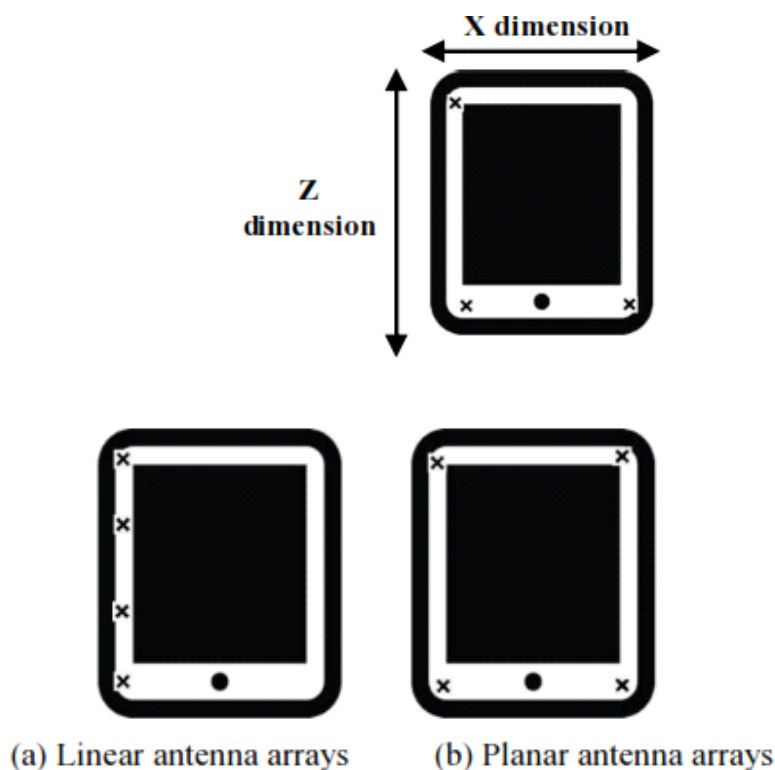
**Fig. 9. Terminales de tamaño grande para pruebas de campo.**

El prototipo 1 presenta polarizaciones ortogonales y máxima separación entre las antenas, mientras que en el prototipo 2 se han montado las dos antenas muy



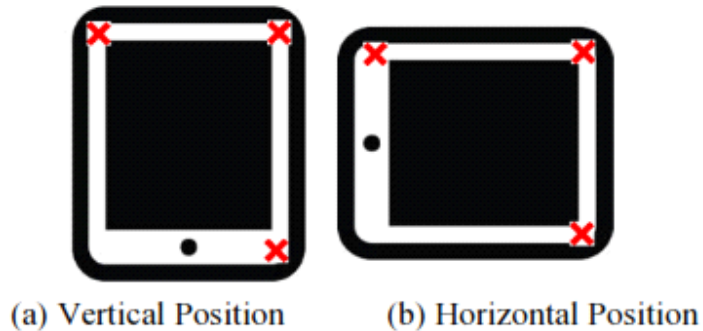
próximas y con la misma polarización con el objeto de estudiar un caso con baja correlación espacial y otro con una correlación espacial elevada.

Con carácter general, la disposición hasta cuatro capas físicas, puede describirse de acuerdo con la Figura 10. Sobre un terminal de usuario, ya sea tipo tablet o tipo smart phone, las antenas pueden disponerse como un array lineal, figura 10a, o como un array plano, figura 10b. El array lineal tiene sus antenas ubicadas sobre un lado del dispositivo mientras que en el array plano están situadas en los vértices del terminal. Las dimensiones aproximadas de los equipos de usuario son:  $1 \times 0.5$  longitudes de onda para el smart phone y  $2 \times 1.6$  longitudes de onda para el tablet, para frecuencias de trabajo de 2.700 MHz.



**Fig. 10. Disposiciones posibles de antenas para terminales tipo smartphone y tablet**

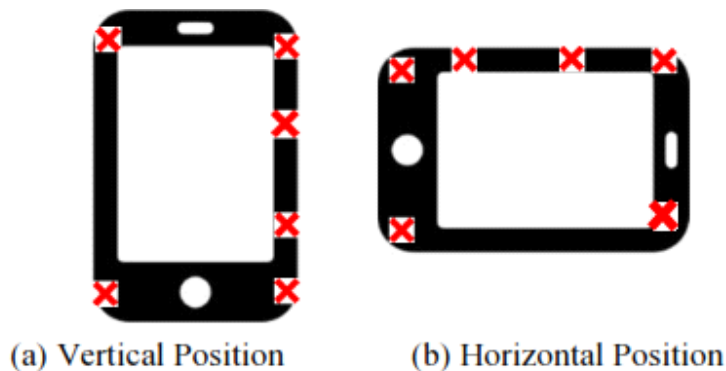
En el caso MIMO 2x2, la instalación de los elementos radiantes puede hacerse bien en el lado corto del equipo de usuario o bien en el lado más largo, como se muestra en la figura 11. Las pruebas realizadas con antenas omnidireccionales, indican que tanto a nivel de correlación, capacidad y sensibilidad a la orientación del aparato, la disposición de las antenas sobre el lado más largo es mejor que la ubicación de las mismas en el lado corto.



**Fig. 11. MIMO de 2 capas físicas sobre terminal tipo tablet**

La Figura 11 indica la posible ubicación de las antenas para dos capas físicas de MIMO y un dispositivo tipo tablet.

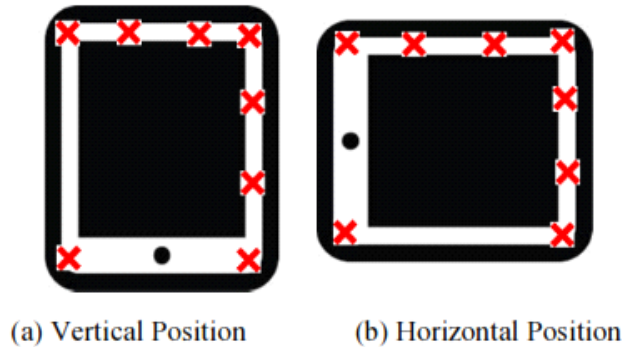
Para sistemas MIMO de cuatro capas, empleando terminales de tipo smart phone, se observa un mejor comportamiento de la disposición en array plano que del array lineal. En este último caso, existe una gran dependencia de la relación señal ruido en la entrada del terminal. Para coeficientes S/N altos, el funcionamiento es correcto pero para relaciones S/N bajas presenta una capacidad y correlación espacial que son función de la orientación del terminal.



**Fig. 12. MIMO de 4 capas físicas en terminales tipo smartphone**

La Figura 12 indica la posible ubicación de las antenas para cuatro capas físicas de MIMO y un dispositivo tipo smart phone.

Para terminales de tipo tablet, la situación de las antenas con cuatro capas físicas, presenta otras alternativas. Los arrays lineales pueden instalarse en cualquiera de los laterales, como se indica en la figura 13.



**Fig. 13. MIMO de 4 capas físicas en terminales tipo tablet**

Con array plano, el terminal es independiente de la orientación y no se observa variación de la capacidad o de la correlación espacial entre canales y presentando siempre mejores resultados que el array lineal. Con array lineal, si bien no hay dependencia con el giro del terminal de la capacidad o la correlación, es decir el fabricante puede elegir cualquiera de los lados del terminal para la instalación, quedando la capacidad del sistema en función de la relación señal ruido existente.

También, se han realizado pruebas de un sistema **MIMO 8X8** con portadora de 2.700 MHz y un ancho de banda de 20 MHz, alcanzándose una tasa de transmisión en el enlace descendente de 335 Mbps. En la estación base se utilizaron antenas omnidireccionales tipo Kathrein 80010709, conectadas a los ocho puertos del **eNB**. Las antenas fueron fijadas al techo del local de pruebas dispuestas según un cuadrado, con dos configuraciones. Una configuración tendría los lados del cuadrado de 2,6 longitudes de onda y otra más grande, de 9. La potencia total transmitida fue limitada a 10 mW, que es un valor típico en los sistemas distribuidos de antenas (**DAS**).



**Fig. 14. Pruebas de campo con terminales tipo tablet de MIMO con 8 capas físicas.**

Con el objeto de estudiar el funcionamiento con baja correlación se utilizó un conjunto de dipolos eléctricos y magnéticos, separados 20 centímetros (1,8 longitudes de onda). Un segundo conjunto de antenas fue montado sobre un tablet, empleando antenas impresas de tipo parche y polarización dual. El conjunto



fue instalado como array lineal con una separación de media longitud de onda, unos 5.5 centímetros.

## 5.2. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.

De acuerdo con la normativa **3GPP**, la potencia de los terminales está limitada a 23 dBm, además la teoría de sistemas **MIMO** también señala que la potencia total ha de ser la misma en el caso multiantena que en el caso **SISO**.

Potencia máxima de salida	23 dBm
Con 2 capas MIMO	20 dBm por capa
Con 4 capas MIMO	17 dBm por capa
Con 8 capas MIMO	14 dBm por capa

En consecuencia, la potencia máxima son 200 mW, si se supone una ganancia máxima de 3 dBi y de acuerdo con la expresión:

$$4 \pi r^2 W = P_{max} G_{max}$$

se obtiene:

BANDA DE FRECUENCIAS	RECOMENDACIÓN 1999/519/CE Y RD 1066/2001	DECRETO 148/2001
700 - 800 MHz	10 cm	14 cm
2.600 - 2.700 MHz	5,6 cm	9 cm

En conclusión, los niveles de referencia para el caso de equipos de usuario (**UE**) ya sean de tipo tablet o smart phone, se alcanzan a 14 centímetros de los terminales. Al igual que con las estaciones base domésticas, esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde con el cálculo en el caso más restrictivo, la legislación catalana.

En este punto, habría que considerar que el equipo de abonado (**UE**) está siendo utilizado como terminal de datos, lo que implica que su manejo se realiza con las manos, por lo que, aunque no se guarde la distancia de seguridad, no se ve afectado ningún órgano vital. Desde que los terminales de bolsillo se utilizan como terminales de datos, el impacto ambiental de estos equipos puede considerarse mucho menor que cuando eran fundamentalmente terminales de voz y su funcionamiento se llevaba a cabo cerca del cerebro del usuario.



## 6. CONCLUSIONES

Las estructuras de comunicaciones móviles con multiplexado espacial parecen idóneas para un funcionamiento en naves industriales de tipo invernadero, como redes de datos orientadas a la gestión y el control de la producción en los cultivos.

Los sistemas **MIMO** en la actualidad estarían restringidos a un tipo de funcionamiento en interiores, que es el que parece más lógico desde un punto de vista práctico y funcional.

La potencia máxima de transmisión de una estación base doméstica (100 mW) es la mitad que la de un terminal de usuario (200 mW). Hay que tener en cuenta que los terminales de abonado deben funcionar en entornos muy diferentes al de una estructura **MIMO**.

Las potencias máximas de transmisión del terminal de abonado y de la estación base doméstica son independientes del número de capas **MIMO**.

Las ganancias de las antenas tanto del **UE** como del **e-NB**, han de ser pequeñas, para evitar que el nivel de señal a la entrada del terminal de abonado dependa de la posición del abonado y de la posición del propio terminal.

Los niveles de referencia para el caso de estaciones base o eNB doméstico, se alcanzan a 10 centímetros de las antenas. Esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde con el cálculo del caso más restrictivo, la legislación catalana.

Para **MIMO** de dos capas, las distancias de seguridad para guardar el nivel de referencia son de 7 centímetros a cada una de las antenas.

Los niveles de referencia para el caso de equipos de usuario (**UE**) ya sean de tipo tablet o smart phone, se alcanzan a 14 centímetros de los terminales. Al igual que con las estaciones base domésticas, esta distancia aseguraría el cumplimiento del nivel de referencia para todas las regulaciones consideradas, ya que se corresponde con el cálculo del caso más restrictivo, la legislación catalana.

Habría que considerar que el equipo de abonado (**UE**) está siendo utilizado como terminal de datos, lo que implica que su manejo se realiza con las manos, por lo que, aunque no se guarde la distancia de seguridad que impone el nivel de referencia, no se ve afectado ningún órgano vital. Desde que los terminales de bolsillo se utilizan como terminales de datos, el impacto ambiental de estos equipos puede considerarse mucho menor que cuando eran fundamentalmente terminales de voz y su funcionamiento se llevaba a cabo muy cerca de la cabeza del usuario.



## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception. Release 14. Junio de 2016.
- [2] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception. Release 13. Marzo de 2016.
- [3] LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Ramón Agustí Comes y otros. Fundación Vodafone España. 2010.
- [4] Exploiting the Elevation Dimension of MIMO System For Boosting Handset Capacity. Almesaeed, Ameen, Doufexi y Nix. Universidad de Bristol. UK. IEEE International Conference on Communications 2015. London (UK).
- [5] LTE-Advanced 8X8 MIMO Measurements in an Indoor Scenario. Werner, Asplund, Figueiredo, Jalden, Halvarsson. Eriksson AB. Suecia. ISAP 2012. Nagoya (Japón).
- [6] LTE-A Field Measurements: 8X8 MIMO and Carrier Aggregation. Werner, Asplund, Figueiredo, Jalden, Halvarsson. Eriksson AB. Suecia. IEEE Vehicular Technology Conference 2013. Dresden (Alemania).
- [7] Radiated Two-Stage Method for LTE MIMO User Equipment Performance Evaluación. Yu, Qi, Liu, Xu y Fan. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Diciembre de 2014.
- [8] OFDMA SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN. Samuel c. Yang. Artech House 2010.