

DOCUMENTO DE TRABAJO

Área Especial 6. Teledetección y Sensores Medioambientales



ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Edita: Fundación CONAMA

Año: 2024

AUTORES DEL DOCUMENTO

Raquel Bravo Rubio

Jefa del Departamento de Difusión y Cooperación Institucional. Ayuntamiento de Madrid.

Miguel de Blas Moncalvillo

Laboratorio de Hidráulica, Centro de Estudios Hidrográficos. (CEDEX).

María Díaz-Redondo

Área de Restauración Ambiental, Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA-CEDEX).

Victoriano Moreno Burgos

Colegio Oficial de Físicos (COFIS).

Carmelo Alonso Jiménez

Indra.

Adolfo Comerón Tejero

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Jorge Guerola Campos

Aemet-Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI).

Yuliy Moreno Sanoyan, Marta Ruiz Llata

Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad Carlos III de Madrid.

Alejandro Payán de Tejada

Consejo General de la Arquitectura Técnica.

José Luis Tomé Morán

Gerente de Agresta Soc. Coop.

Jordi Cross Herrero, Montserrat Batlle Ribas

Adasa. Departamento de Innovación.

Eduardo Martínez de Rioja del Nido

Universidad Rey Juan Carlos.

Daniel Martínez de Rioja del Nido

Universidad Politécnica de Madrid.

José Javier Martínez Vázquez

Coordinador AE – 6.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

INDICE DE CONTENIDO

RESEÑA PROFESIONAL DE LOS RELADORES DE LA AE-6	8
RESUMEN DE CONTENIDO	12
INTRODUCCIÓN	16
1. RECUPERACIÓN DEL ECOSISTEMA FLUVIAL MANZANARES-GAVIA-BULERA. INFRAESTRUCTURA VERDE Y AZUL BOSQUE METROPOLITANO DE MADRID	
1.1. Descripción básica del proyecto; situación actual, objetivos, acciones principales.	17
1.2. Caracterización ecológica del río a través de datos del Geoportal del Ayuntamiento de Madrid; seguimiento de indicadores e impactos a través de ortofotografías.	18
1.2.1. Caracterización ecológica inicial	19
1.2.2. Evaluación de Indicadores de Servicios Ecosistémicos en el Entorno Fluvial	19
1.3. Estudios hidráulicos del Manzanares sur y de varios aliviaderos. Uso de datos topográficos, ortofotos, Geoportal, etc. Simulaciones.	21
1.3.1. Ámbito de estudio	22
1.3.2. Datos de partida	22
1.3.3. Estudio hidráulico del tramo final del río Manzanares	23
1.3.4. Estudio de las obras de reincorporación al cauce de los aliviaderos de Abroñigales y La Gavia	25
1.4. Conclusiones	26
2. EL USO DE LOS SENSORES ACTIVOS EN LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL: EVALUACIÓN DE DAÑOS POR INCENDIOS CON DATOS SENTINEL-1	
2.1. Introducción	28
2.2. Misión Sentinel-1	29
2.2.1. Descripción general de la misión Sentinel-1	29
2.2.2. Cronología del lanzamiento	30
2.2.3. Descripción del satélite	30
2.2.4. Órbita	31
2.2.5. Cobertura geográfica	32
2.2.6. Instrumento SAR	33
2.2.6.1. Modos de adquisición	34
2.2.6.2. Los productos SAR de Sentinel-1	38
2.2.7. Sentinel-1 y sus aplicaciones ambientales	39
2.2.7.1. Polarimetría	40
2.2.7.2. Interferometría	41
2.2.7.3. Monitoreo del suelo	41
2.2.7.5. Gestión de emergencias	44
2.3. Metodología	45
2.3.1. Métodos de análisis: coherencia	45
2.3.2. Descripción de la metodología	48

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

2.4.	Resultados	50
2.5.	Conclusiones	52
2.6.	Referencias	53
3. INVENTARIOS FORESTALES CONTINUOS A ESCALA NACIONAL BASADOS EN SENSORES REMOTOS		
3.1.	Introducción	54
3.2.	Datos abiertos	55
3.3.	FORESTMAP, un sueño convertido en un proyecto a escala país	58
3.4.	Conclusiones	62
3.5.	Agradecimientos	63
3.6.	Bibliografía	64
4. CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA AL CONSORCIO EUROPEO DE INFRAESTRUCTURAS DE INVESTIGACIÓN ACTRIS ERIC		
4.1.	Introducción	65
4.2.	Organización de ACTRIS	66
4.3.	Contribución española a ACTRIS	68
4.4.	Conclusión	70
4.5.	Agradecimientos	70
4.6.	Referencias	71
5. COCCON-ESPAÑA: HACIA UN SISTEMA INTEGRADO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ESPAÑA		
5.1.	Cambio climático y monitorización de gases de efecto invernadero	72
5.2.	CCOCON – ESPAÑA	74
5.3.	Bibliografía	76
6. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SENSOR IN-SITU PARA MONITOREO ISOTÓPICO DE ¹³C EN CO₂ ATMOSFÉRICO		
6.1.	Introducción	77
6.2.	Solución propuesta-Esquema del sistema QEPAS	79
6.3.	Resultados	82
6.4.	Conclusiones	86
6.5.	Agradecimientos	86
6.6.	Bibliografía	86
7. ANÁLISIS AMBIENTAL DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA VIVIENDA		
7.1.	Introducción	88
7.2.	Metodología	90

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

7.3.	Resultados y discusión	92
7.3.1.	Confort higrotérmico – Índice térmico	92
7.3.2.	Tasas de ventilación	94
7.3.2.1.	Materia particulada 2,5	95
7.3.3.	Formaldehído	96
7.4.	Conclusiones	98
7.5.	Bibliografía	98
8. NUEVOS SISTEMAS DE MEDICIÓN DE NUTRIENTES (AMONIO, NITRATO, NITRITO Y FOSFATO) EN TIEMPO REAL PARA CONTROL DE EFLUENTES DE DEPURADORAS		
8.1.	Introducción	100
8.2.	Principio tecnológico	100
8.2.1.	Determinación de amonio	101
8.2.2.	Determinación de nitratos y nitritos	102
8.2.3.	Determinación de fosfatos	103
8.3.	Aplicaciones	104
8.4.	Ejemplos de aplicación	104
8.4.1.	Monitoreo de efluentes en una gran planta de tratamiento de aguas residuales (Wiesbaden, Alemania)	104
8.4.2.	Monitoreo ambiental del río Itchen (Southampton, Reino Unido)	106
8.4.3.	Monitorización de la escorrentía de nutrientes agrícolas para proteger el estuario del río Ebro (Ballobar, España)	107
8.5.	El proyecto SPORE-MED	109
8.6.	El proyecto INNO4H2O	109
8.7.	Conclusiones	110
9. SUPERFICIES REFLECTORAS INTELIGENTES PARA MEJORA EFICIENTE DE LA COBERTURA EN REDES 5G Y 6G DE ONDAS MILIMÉTRICAS		
9.1.	Redes 5G y 6G de ondas milimétricas	111
9.2.	Superficies reflectoras inteligentes (RIS)	112
9.2.1.	Clasificación de las RIS	113
9.2.2.	Principio de funcionamiento	114
9.2.3.	RIS basadas reflectarrays	114
9.3.	Resultados de los proyectos de investigación en curso	116
9.3.1.	RIS de haz conformado en campo próximo	116
9.3.2.	RIS de cobertura dual en polarización ortogonal	117
9.3.3.	RIS de doble banda y cobertura dual	118
9.3.4.	Evaluación de una RIS en escenario realista	119
9.4.	Conclusiones	120
9.5.	Bibliografía	121

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

10. LA FUTURA RED DE COMUNICACIONES MÓVILES 6G Y EL MEDIO AMBIENTE

10.1.	Sobre la futura red móvil 6G	123
10.2.	De la bobina de Bell al despliegue de LEOs	125
10.3.	La evolución de las redes de acceso radio hasta la 6G	130
10.3.1.	Network Function Virtualization (NFV) y Defined Network (SDN)	133
10.3.2.	Network Slicing	134
10.3.3.	Cloud-Native Computing	137
10.3.4.	Contenedores y virtualización de red	138
10.3.5.	Machine learning y orquestación del servicio	138
10.3.6.	Coordinación de nodos Edge	139
10.3.7.	Las redes orgánicas	139
10.3.9.	Una primera aproximación a los puntos de acceso	142
10.4.	Características de las futuras redes 6G	143
10.4.1.	Un cambio radical en la forma de enfocar las situaciones	145
10.4.2.	Las nuevas arquitecturas Open RAN (O-RAN)	153
10.4.3.	Procesado de señal en sistemas CF-mMIMO	154
10.5.	La propagación en las bandas de frecuencias 6G	156
10.5.1.	Tasa de error en transmisión (BER)	158
10.5.2.	Balance de potencias y umbral de sensibilidad	159
10.5.3.	Anchos de banda de utilización	160
10.6.	La 6G y el medio ambiente	163
10.6.1.	Sobre los límites de la reglamentación actual	163
10.6.2.	Análisis de impacto Ambiental: de la RAN 5G+ a la RAN 6G	164
10.6.2.1.	Nivel de referencia de un Punto de Acceso en espacios exteriores	165
10.6.2.2.	Cobertura de espacios interiores: viviendas, oficinas, etc. con sistemas MIMO masivos y distribuidos (D-mMIMO)	166
10.6.2.3.	MIMO masivo distribuido en naves industriales	169
10.6.2.4.	Superficies Inteligentes Reflectoras (RIS) para MIMO pasivo.	170
10.6.2.5.	Consideraciones sobre el campo radiado	173
10.6.3.	Plataforma conjunta de comunicaciones y teledetección ISAC	175
10.7.	Nuevas formas de acceso múltiple	179
10.7.1.	Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)	180
10.7.2.	Orthogonal Time Frequency Space – Delay Doppler domain (OTFS-DD)	184
10.7.3.	Rate Splitting Multiple Access (RSMA)	188
10.7.4.	Momento Angular Orbital (OAM)	202
10.8.	Detección de gases	208
10.8.1.	Detección en entornos agrícolas	209
10.8.2.	Detección en entornos industriales y urbanos	209
10.8.3.	La absorción molecular a frecuencias sub-THz	211
10.8.4.	La agricultura industrial	211

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

10.8.5. Industria y entornos urbanos	212
10.8.6. Técnicas de detección	212
10.8.7. Análisis de las pérdidas de propagación	212
10.8.8. Análisis de la densidad espectral de potencia	214
10.8.9. Retos	215
10.9. Descarbonización de las redes móviles	218
10.10. Conclusiones	220
10.11. Referencias bibliográficas	221

RESEÑA PROFESIONAL DE LOS RELADORES DE LA AE-6

María Díaz Redondo. Doctora en Gestión y Restauración Fluvial por la Universidad de Lisboa y lleva participando en planes y proyectos de restauración ecológica, a nivel nacional e internacional, desde el año 2005. En la actualidad, trabaja como Contratada I+D+i en el Área de Restauración Ambiental del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX. Su línea de investigación se centra en el desarrollo de nuevas metodologías (protocolos, índices y modelos ecológicos) para la mejora de la calidad eco-hidrogeomorfológica de los ecosistemas degradados, en la que aplica diversas técnicas de modelización y teledetección.

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.

Victoriano Moreno Burgos. Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Más de **40 años** de experiencia desarrollando actividades de Observación de la Tierra desde el Espacio. Ha trabajado en **INTA** y en **INDRA** donde ha desempeñado el cargo de **Director de la Unidad de Negocio de Sistemas de Observación de la Tierra**. Posteriormente, ha sido **Asesor Senior** en **HISDESAT** para temas de Observación de la Tierra dentro de la **Misión del Satélite Español PAZ** en la **Dirección de Desarrollo de Negocio** de dicha empresa.

Carmelo Alonso Jiménez. Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid, se ha doctorado recientemente por la Universidad Politécnica de Madrid con la Tesis "Técnicas multiescala en el seguimiento de la vegetación con imágenes de satélite" (DOI: 10.20868/UPM.thesis.70528). Trabaja desde hace más de 25 años en el sector geoespacial, en Indra Sistemas donde actualmente forma parte del Equipo Geoespacial en la Unidad de Digital Labs. En ese tiempo ha adquirido una amplia experiencia en el desarrollo de diversos proyectos de teledetección, tanto a nivel nacional como internacional. Su conocimiento técnico se extiende en el campo de la observación de la Tierra, desde sistemas aéreos y satelitales, tanto con sensores ópticos como radar, procesamiento de imágenes y tecnologías GIS. Dr. Alonso Jiménez participa en este Comité Técnico prácticamente desde su fundación.

Alejandro Payán de Tejada. Arquitecto Técnico por la Universidad Politécnica de Madrid, máster en Prevención de Riesgos Laborales y doctor en innovación tecnológica de la edificación también por la UPM. Durante su tesis doctoral diseñó a nivel de hardware y software un sistema de monitorización de variables ambientales basado en la plataforma de bajo coste Arduino. En el ámbito laboral, es miembro del gabinete técnico del Consejo General de la Arquitectura Técnica de España donde desempeña labores de representación de la profesión en diferentes ámbitos consultivos como Comités de normalización de AENOR o procesos de consulta para normativas nacionales como la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España. Ha colaborado asimismo en proyectos europeos centrados en la sostenibilidad del proceso edificatorio como BuildingLife o el Foro AUNA. Por último, ha participado en la coordinación y redacción de iniciativas sobre la vigilancia de la salud en espacios interiores como la Guía Salud y Edificios: 7 llaves para un edificio saludable, el libro Edificios y salud:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Reinventar el hábitat pensando en la salud de las personas o el Estudio sobre la Calidad del Aire Interior en viviendas.

Professor Dr. Marta Ruiz Llata obtained her PhD in Industrial Engineering from the University Carlos III of Madrid (UC3M) in May 2005 for her thesis "Design and Implementation of Optoelectronic Neural Networks. Application in Vision Systems", for which she obtained the extraordinary doctorate award in 2007. She was then hired as a postdoc teaching assistant and later as an assistant professor in the Department of Electronic Technology at UC3M, where she signed a permanent position in December 2010.

During her pre-doctoral stage, when she spent 7 months as visiting student with the Photonic Systems Laboratory at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), she gained great experience in the handling of optical components (lenses, diffraction networks, holography...) as well as in optoelectronic circuits and photonics devices. She also acquires a basic knowledge of neural networks and other machine learning algorithms. At the beginning of the postdoctoral period she also started to get involved in research topics related to optical sensors (fiber optic sensors and interferometry techniques) and large scale instrumentation systems (development of a diagnostic installed in Stellarator TJ-II at Ciemat for measuring electronic density in fusion plasma).

As she consolidated her research career, the research lines evolved towards instrumentation systems, focusing on the development of optical sensors for industrial, environmental and biomedical applications. All these applications include: activities related to the research of new technologies and measurement techniques, the development of demonstrators or prototypes and the use, and adaptation to each particular case, of machine learning techniques. Throughout her research career at the UC3M she has acquired experience in interferometry, near and mid-infrared absorption spectroscopy, photoacoustic spectroscopy and LiDAR systems. More recently she spent a sabbatical leave during the academic course 19/20 with the "Precision Laser Diagnostics for Energy and the Environment" research group at the University of Colorado Boulder (USA). During her time there she added experience on the analysis of spectroscopic data of environmental and combustion processes, acquired by means of dual optical frequency combs, for the identification of molecules characterized by broad and complex spectra.

Currently, within the Sensors and Instrumentation Techniques research group at UC3M, she leads the activities to promote technology transfer in optical sensors for transport infrastructures. These activities started in the project "Development of an onboard winter maintenance system with continuous monitoring of innovative road variables" under the Retos-Colaboración Program 2015, with the development of a residual salinity sensor based on fluorescence spectroscopy and a pavement condition sensor based on diffuse reflectance spectroscopy using laser diodes. This pavement sensor was patented in 2012 and in September 2020 has been licensed to the company Licensed to Asimob. Advanced services in mobility. SL. A second pavement sensor based on dual comb sources has been protected with a European patent in June 2021.

Her current basic research activities are focused on photoacoustic spectroscopy. The first contributions in this field were framed within the project PARAQUA (Photonic sensing Architectures for Rapid Assessment of fresh water QUALity) and consisted of the demonstration of different trace gas detection experiments in the near infrared region of the spectrum and in the mid-infrared, using gas cells fabricated using 3D printed techniques and the development of acoustic sensors for photoacoustic with interferometric readout. She has advised a doctoral thesis in this field, defended in June 2020, that has received the Extraordinary Prize Award by the UC3M and the best doctoral thesis Award by the IEEE Instrumentation & Measurement Society Spanish Chapter. Ongoing research targets isotopic ratio measurements of H₂O and CO₂ molecules.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Yuliy Moreno Sanoyan. Graduado en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones y Máster en Ingeniería de Sistemas Electrónicos y Aplicaciones, ambos obtenidos en la Universidad Carlos III de Madrid en los años 2018 y 2020, respectivamente. A día de hoy, trabaja como técnico de apoyo a la investigación en el grupo SITec del Dpto. de Tecnología Electrónica, donde realiza estudios de doctorado. Su actividad investigadora se centra en el estudio de las técnicas de espectroscopia para el desarrollo de instrumentos. Sus intereses son: la electrónica, la fotónica, la programación y su aplicación a la monitorización de gases para proteger la salud.

José Luis Tomé Morán. Tras graduarse como Ingeniero de Montes por la Universidad Politécnica de Madrid en el año 2000, participa como socio promotor en la creación de la cooperativa Agresta S. Coop experta en consultoría forestal. Director Gerente de Agresta desde 2010, actualmente compatibiliza su labor en la gestión y coordinación de equipos humanos con el desarrollo de proyectos técnicos y de investigación. Coordinador del Grupo de Cartografía y Lidar de la Asociación Española de Teledetección. Vocal de la Junta Directiva del Colegio de Ingenieros de Montes.

Jorge Guerola Campos. Graduado en Ciencias Ambientales con un máster en meteorología por la Universitat de Barcelona, actualmente trabaja en el centro de investigación atmosférica de Izaña (Aemet), donde se especializa en la monitorización de la composición atmosférica utilizando la técnica ftir (fourier transform infrared radiation) y la modelización climática.

Ha participado en investigaciones centradas en el intercambio de masa y energía y turbulencia en la capa límite planetaria tras las precipitaciones, específicamente en el Valle de la Cerdaña (Pirineos). También ha desarrollado estudios sobre la variabilidad climática natural en la región mediterránea, contribuyendo con estos resultados en congresos científicos de relevancia como MedCLIVAR. El trabajo abarca el diagnóstico de fenómenos meteorológicos extremos, como el análisis detallado del impacto de la tormenta Filomena en la Península Ibérica.

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.

En el ámbito de la ciencia de datos aplicada al clima, ha trabajado en la modelización de la dispersión atmosférica y la simulación de escenarios climáticos futuros, lo que ha sido esencial para la evaluación de riesgos hidrológicos y la gestión ambiental. He colaborado en proyectos que utilizan técnicas avanzadas de análisis estadístico para estudiar la interacción entre distintos factores climáticos y su impacto en la atmósfera. Además, ha participado en el diseño y evaluación de nuevas tecnologías para la observación atmosférica, presentado en el XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Este tipo de tecnologías son fundamentales para mejorar la precisión en la medición de gases de efecto invernadero y su integración en sistemas de monitorización a gran escala.

Tiene colaboraciones en proyectos internacionales como parte de la Reunión Anual NDACC-IRWG/TCCON/COCCON (Izaña site). Además, ha tenido la oportunidad de trabajar en proyectos de meteorología comercial, aportando análisis y previsiones meteorológicas para sectores energéticos en Europa. Estas contribuciones han sido fundamentales para avanzar en la comprensión de los fenómenos atmosféricos y su aplicación en la mitigación de los efectos del

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

cambio climático, lo que está alineado con los objetivos globales de sostenibilidad y protección ambiental.

Jordi Cros i Herrero. Ingeniero de Telecomunicación, cuenta con más de 35 años de experiencia en diseño y desarrollo de equipos electrónicos, sistemas de comunicaciones, y sistemas y software de control. Con más 25 años de experiencia en el ámbito del agua y medio ambiente, actualmente es el director de Innovación del Área de Water Sensors de Adasa, donde también ha sido Director de Área de Productos y Soluciones, responsable del Departamento de I+D+i, y Delegado en China. Ha participado y coordinado proyectos de los programas internacionales FP4, FP5, FP7, H2020, LIFE o CIP_Eco-innovation, así como proyectos en los programas nacionales de CDTI CENIT o regionales como FEDER-Innterconecta o RIS3CAT. Es autor de diversas patentes relacionadas con los sistemas automáticos de medida de calidad de las aguas. Actualmente es presidente del Catalan Water Partnership, y colíder del Grupo de Trabajo Water Sensors and Tools de Water Europe.

Eduardo Martínez de Rioja del Nido. Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid. Se licenció en 2014 con honores y se doctoró en 2018 con premio extraordinario. Es autor de publicaciones y comunicaciones a congresos sobre antenas reflectoras en tecnología impresa. En la actualidad es Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones en la Universidad Rey Juan Carlos (Campus de Fuenlabrada). Eduardo Martínez de Rioja del Nido *is member of the IEEE* y participa en el Congreso Nacional del Medio Ambiente desde el año 2014.

José Daniel Martínez de Rioja del Nido. Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid. Se graduó en *Tecnologías y Servicios de Telecomunicación* en 2016 y obtuvo el *Master Universitario en Ingeniería de Telecomunicación* en 2018. En junio de 2021, defendió su tesis doctoral que obtuvo la calificación de *Sobresaliente Cum Laude* y recibió el premio de *Innovación Tecnológica del Ayuntamiento de Madrid* de 2021. Es autor de diversas publicaciones y comunicaciones a congresos sobre reflectarrays y transmitarrays. Actualmente, es Profesor Ayudante Doctor del Grupo de Electromagnetismo Aplicado en la Escuela de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. José Daniel Martínez de Rioja del Nido *is member of the IEEE* y participa en el Congreso Nacional del Medio Ambiente desde el año 2016.

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

RESUMEN DE CONTENIDO

1. Recuperación del ecosistema fluvial Manzanares-Gavia-Bulera. Infraestructura verde y azul Bosque Metropolitano de Madrid

Raquel Bravo Rubio (Ayto de Madrid), Miguel de Blas Moncalvillo (CEDEX), María Díaz Redondo (CEDEX)

El proyecto de recuperación del ecosistema fluvial Manzanares-Gavia-Bulera en Madrid, financiado por la Unión Europea - Next Generation EU y presentado por la agrupación conformada por el Ayuntamiento de Madrid, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y la Fundación Conama, abarca la intervención sobre 10 km de cauces fluviales altamente antropizados. Este proyecto incorpora tecnologías avanzadas, incluyendo teledetección, para dos tipos de análisis: estudios hidráulicos y seguimiento de indicadores de servicios ecosistémicos.

Dentro de los estudios hidráulicos, la teledetección ha sido una herramienta fundamental y ha tenido una doble aplicación. En primer lugar, se ha utilizado para poder realizar el estudio hidráulico en un modelo bidimensional de un tramo del río Manzanares; y en segundo lugar, ha servido de base para realizar el análisis de dos estructuras hidráulicas mediante un modelo tridimensional, así como sus implementaciones y mejoras.

Dentro del Plan de medición y seguimiento de indicadores destaca la inclusión de indicadores de servicios ecosistémicos, ya que no es común emplear este tipo de indicadores para evaluar el grado de éxito de las actuaciones ejecutadas en el medio fluvial. En particular, se han propuesto más de 20 indicadores de servicios ecosistémicos que evalúan aspectos relacionados con las condiciones morfológicas del cauce, las condiciones físico-químicas de las aguas, la ocupación del suelo, el estado de la vegetación, la entomofauna o la ictiofauna. Las metodologías de evaluación de estos indicadores incluyen tanto muestreos en campo (hidromorfología, vegetación, insectos, peces) como análisis GIS basados en ortoimagen (usos del suelo, actividad sedimentaria, conectividad ecológica) y teledetección (índices de vegetación). Estos indicadores ya han sido evaluados en la fase pre-proyecto y se hará un seguimiento en la fase de ejecución y en la fase post-proyecto.

2. El uso de los sensores activos en la gestión medioambiental: evaluación de daños por incendios con datos Sentinel-1.

Victoriano Moreno Burgos (COFIS) y Carmelo Alonso Jiménez (INDRA)

En el verano de 2022, la provincia de Zamora sufrió uno de los incendios forestales más devastadores de los últimos años. Las altas temperaturas, combinadas con condiciones secas extremas, provocaron un incendio que arrasó vastas áreas de vegetación, causando daños ecológicos y económicos considerables. En este contexto, la capacidad de los sensores activos, como el radar Sentinel-1, puede resultar crucial para la evaluación rápida de los daños.

A diferencia de los sensores ópticos, que pueden verse afectados por el humo y la nubosidad, el radar puede penetrar estas barreras, proporcionando datos fiables y de alta resolución independientemente de las condiciones atmosféricas. Esta capacidad es especialmente útil en situaciones de emergencia, donde la temprana información relevante oportuna y precisa es vital.

La comparación entre la situación pre y post incendio con Sentinel-1 nos ayuda a cartografiar extensivamente el área afectada. La información obtenida puede contribuir a determinar la pérdida

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

de biomasa y a evaluar el impacto sobre la flora y fauna locales. Además, el análisis posterior con los datos SAR de Sentinel-1 permite el seguimiento de la recuperación del área afectada, pudiéndose observar la regeneración de la vegetación y la efectividad de las intervenciones de restauración implementadas. Esta información es esencial para planificar estrategias de recuperación a largo plazo, asignar recursos de manera eficiente y prevenir futuros incendios mediante la evaluación del riesgo y la identificación de áreas vulnerables.

Este caso de uso muestra cómo la integración de tecnologías avanzadas de teledetección puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante emergencias medioambientales.

La implantación de técnicas de detección de anomalías multivariantes en aerogeneradores no solo mejorará la fiabilidad y la eficiencia operativa, sino que también tendrá un impacto significativo en la reducción de costes y el aumento de la vida útil de los componentes del sistema.

3. FORESTMAP, Inventarios Forestales continuos a escala nacional basados en Sensores Remotos.

José Luis Tomé Morán. Agresta S. Coop.

FORESTMAP es una iniciativa europea que ha buscado expandir la tecnología española de monitorización de bosques mediante sensores remotos a varios países europeos. Esta tecnología aprovecha datos LiDAR, fotogramétricos y satelitales para realizar inventarios forestales dinámicos, ofreciendo una solución tecnológica avanzada para la gestión de bosques. A través de experiencias piloto en países como Alemania, Eslovenia, Finlandia, Francia, Italia y Portugal, el proyecto ha demostrado la viabilidad técnica y el potencial comercial de esta tecnología para el sector forestal europeo. Hoy en día aspiramos a ser la primera plataforma de inventario forestal basada en sensores remotos con cobertura nacional en España, para proporcionar un sistema interactivo y dinámico de gestión forestal.

4. Contribución española al Consorcio Europeo de Infraestructuras de Investigación ACTRIS ERIC.

Adolfo Comerón i Tejero (UPC)

El consorcio se ha constituido en abril de 2023 y España es socio fundador gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia en Innovación a través de la Subdirección general de Consorcios, Organismos e Infraestructuras Científicas Internacionales de la Secretaría General de Investigación.

5. COCCON-España: Hacia un Sistema Integrado de Gases de Efecto Invernadero en España.

Omaira E. García (CIAI, Aemet), Noémie Tarquet (Tragsatec, CIAI) y Eliezer Sepúlveda (Tragsatec, CIAI) y Jorge Guerola (CIAI, Aemet).

La disponibilidad de información sobre gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos es crucial para desarrollar políticas efectivas de mitigación, seguir el progreso hacia los objetivos de reducción de emisiones y respaldar las acciones de adaptación necesarias para abordar los crecientes efectos del calentamiento global. Los sistemas de observación integrados y multidisciplinarios son herramientas necesarias para mejorar el conocimiento de los ciclos de carbono a diferentes escalas temporales y espaciales. En este contexto, este trabajo proporciona una visión general de un

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

sistema integrado de observación de GEI en España, COCCON-España, que se encuentra actualmente en fase de implementación. El sistema de observación previsto tiene como principal objetivo cubrir la falta latente de observaciones atmosféricas de GEI en España, incluyendo estimaciones de emisiones de GEI en los principales puntos críticos urbano-industriales a nivel nacional (ciudades de Madrid y Barcelona).

COCCON-España será la primera infraestructura permanente a nivel nacional para monitorear concentraciones y emisiones atmosféricas de GEI mediante observaciones de teledetección terrestre. Colaborará estrechamente con otras iniciativas de GEI como ICOS-España, así como con redes regionales y locales de medida de GEI para construir un sistema integrado de observación de GEI en España. El sistema integrado resultante será una herramienta indispensable para la verificación de los inventarios de emisiones y las acciones de mitigación adoptadas a nivel nacional, así como para la validación de misiones actuales y futuras satelitales de GEI.

6. Diseño y desarrollo de un sensor in-situ para monitoreo isotópico de ^{13}C en CO_2 atmosférico.

Yuliy Moreno Sanoyan y Marta Ruiz Llata. Universidad Carlos III de Madrid.

Como se señala en el informe verde de la Comisión Europea en el marco de la capacidad operativa de apoyo a la monitorización y verificación de las emisiones antropogénicas de CO_2 (MVS), las redes terrestres existentes no cumplen actualmente todos los requisitos operativos para la capacidad MVS de CO_2 de Copernicus debido a la falta de datos de medición in situ de las zonas urbanas y otros puntos calientes de emisión. Proponemos superar esta debilidad mediante el desarrollo de una nueva generación de instrumentos de coste competitivo que permitan una capacidad de monitorización de CO_2 sin precedentes basada en la técnica de Espectroscopía Fotacústica (PAS). Como principal diferencia con la instrumentación disponible comercialmente en la actualidad, esta técnica combina un tamaño reducido, una alta sensibilidad y una capacidad de despliegue de campo potencialmente sencilla. El sensor propuesto, proporciona información sobre las concentraciones totales de CO_2 , el gas de efecto invernadero (GEI) que más contribuye al calentamiento global de origen antropogénico, y la huella isotópica $\delta^{13}\text{C}$, que proporciona información para discernir entre las fuentes naturales y antropogénicas de CO_2 y sobre los flujos de intercambio de carbono biosfera-atmósfera para comprender mejor la contribución del CO_2 al cambio climático.

7. Análisis ambiental de la construcción y la vivienda.

Alejandro Payán de Tejada Alonso, Juan López-Asiain Martínez y José Fernández Castillo. Consejo General de la Arquitectura Técnica

El confort en el interior de las viviendas es un elemento clave para la sociedad actual. Si bien, la corriente de acción del sector residencial se está centrando en los principios de reducción del consumo de energía primaria no renovable, aumento de la eficiencia energética y el uso mayoritario de energías renovables; cada vez es más común encontrarse con usuarios interesados en que estas actuaciones de mejora energética incluyan parámetros de confort interior. Así, la transición verde se acompaña de otra paralelamente, azul o turquesa denominada por algunos expertos, que trata el bienestar de los usuarios de las viviendas y, en general, de todos los edificios sea cual sea su uso. Para poder hacer frente con garantías a este reto, la sensórica adquiere un papel vital para obtener datos de la vivienda y, así, acometer acciones adaptadas al usuario poniéndolo en el centro.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En este trabajo se presenta la monitorización de una vivienda de construcción reciente (2022) cuyo desempeño energético es de alta eficiencia, pero del que se ha vigilado su calidad ambiental interior con una campaña de mediciones de un mes en salón, habitación principal y cocina en parámetros como CO₂, PM_{2,5} o formaldehído, además de su confort higrotérmico.

8. Nuevos sistemas de medición de nutrientes (amonio, nitrato, nitrito y fosfato) en tiempo real para control de efluentes de depuradoras.

Jordi Cros Herrero y Montserrat Batlle Ribas. ADASA

La medición de nutrientes (nitratos, fosfatos y amonio) en continuo y en tiempo real sigue siendo un reto para el control de los procesos de depuración de aguas residuales, pero también para la gestión medioambiental. La aparición de nuevos sistemas de menor coste de adquisición, pero también de menor coste de operación al necesitar menos mantenimiento, puede representar un cambio importante en la implantación de estas medidas.

9. Superficies reflectoras inteligentes para mejora eficiente de la cobertura en redes 5G y 6G de ondas milimétricas

Eduardo Martínez de Rioja del Nido (URJC), Daniel Martínez de Rioja del Nido (UPM)

Las RIS están formadas por una agrupación de celdas reflectoras, que pueden diseñarse independientemente para controlar la fase y/o amplitud de la señal reflejada. Las RIS no realizan ningún procesado activo de la señal recibida antes de volver a transmitirla, por lo que pueden desplegarse masivamente con un coste reducido y bajo consumo energético (o incluso nulo, en el caso de RIS pasivas). Las RIS basadas en tecnología reflectarray representan una alternativa con gran potencial para mejorar la cobertura en las redes 5G y 6G debido a que: 1) Son capaces de redirigir el haz y aplicarle un conformado específico adaptable a la zona que se desea cubrir; 2) Permiten implementar capacidades avanzadas en un mismo panel (operación simultánea en varias bandas de frecuencia, conformado de haz diferente en cada polarización, etc.), 3) Son una tecnología de bajo coste y energéticamente eficiente, lo que contribuye a que puedan desplegarse masivamente; y 4) Su superficie plana y peso ligero facilitan su instalación en fachadas, paredes o techos, minimizando el impacto visual en el entorno.

10. La futura red móvil 6G y el medio ambiente.

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador, Eduardo Martínez de Rioja (URJC) y Daniel Martínez de Rioja (UPM)

El trabajo pretende destacar aquellos aspectos de la futura 6G que tienen una relación directa con el medio ambiente, la mayoría son específicos de esta generación y los que son comunes a generaciones anteriores presentan particularidades de interés. Los problemas de propagación, la creación de una plataforma, auspiciada por la ITU, para manejar de forma conjunta señales de comunicaciones y de teledetección, el cálculo de niveles de referencia con señales correladas temporal y espacialmente, o la aparición de los modos OAM como sustitutos de los sistemas MIMO convencionales, son algunos ejemplos de la vertiente medioambiental de la futura 6G.

Introducción:

Una vertiente medioambiental 6G tan amplia como compleja

José Javier Martínez Vázquez. Coordinador

La red de acceso radio 6G habrá de ocupar la banda superior de las milimétricas (100-300 GHz) y la banda sub-THz (300 GHz-2 THz). En la zona de las milimétricas, con distancias entre estaciones base de 100 m a 1 km, las pérdidas de propagación van de 100 a 150 dB, y crecen rápidamente hasta los 300 dB para distancias mayores. También, aumenta la absorción molecular de los gases traza y la atenuación producida por cualquier tipo de obstáculo situado entre el UE y los puntos de acceso.

En consecuencia, la penetración de los nuevos sistemas de telefonía móvil en las áreas urbanas exige que el tamaño de las celdas sea muy reducido para minimizar pérdidas y lograr una tasa de error aceptable en el enlace ascendente, tratando de evitar cualquier tipo de obstáculo. Nacen así las futuras redes *cell free*, actualmente en desarrollo.

Dentro de la banda de frecuencias correspondiente a las tecnologías 6G, se encuentra el pico de absorción del vapor de agua y de los gases producidos por la agricultura industrial. Esto, que inicialmente es un problema de transmisión, supondrá una gran reducción de costes en el control y la monitorización de la concentración de los citados compuestos químicos en la atmósfera, ya que se implementaría con una red de nano-bio-sensores, que transmitirían sus datos aprovechando los puntos de acceso de la red móvil. También, las comunicaciones V2X, por ejemplo, han de emplear datos radar para dar información de seguridad o de carácter meteorológico a los conductores. Aparece aquí la necesidad de utilización conjunta de las redes de comunicaciones y las de teledetección y sensores. La Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-R, ha planteado una iniciativa para integrar equipos de teledetección y comunicaciones en una única plataforma. Se abre, por tanto, un área de trabajo de gran calado con un marcado signo medioambiental, formatear las señales provenientes de "sensing" y "remote sensing" para ser manejadas por equipos de comunicaciones convencionales o buscar un formato conjunto de modulación y acceso múltiple que sirva tanto para comunicaciones como para detección y teledetección.

Para el caso 6G, las dimensiones de las antenas y las de los vanos entre puntos de acceso serán reducidas, por lo que los soportes tendrán poca envergadura. A esta última consideración debe añadirse la utilización de los modos OAM, que parecen encajar perfectamente dentro de los sistemas MIMO. La distancia entre puntos de acceso del orden del centenar de metros implica, por un lado, que se manejarán densidades de potencia radiada menores o como mucho iguales que las correspondientes a las estaciones base celulares y por otro, que el número de estaciones base se multiplicará por 5 ó 6, lo que aumentará el consumo de energía de las futuras redes en la misma proporción. En este punto, cabe señalar que las potencias disponibles, para los elementos comerciales de sistemas radio a frecuencia de utilización 6G, son del orden de 100 milivatios.

Cuando en un área determinada haya varias fuentes de radiación 6G, las señales de distintos puntos de acceso podrían estar correladas espacial y temporalmente. Esto se traduce en que la densidad de potencia radiada es mayor que la suma algebraica de las densidades correspondientes a los puntos de acceso considerados, lo que es de interés sobre todo en cobertura de espacios interiores. Además, la regulación nacional y la internacional tienen su límite en los 300 GHz. No obstante, los Niveles de Referencia van aumentando con la frecuencia entre 0 Hz y 300 GHz, alcanzándose cada vez más cerca de la fuente de campo y, por tanto, más lejos de las personas que se encuentren en las proximidades del sistema radiante. Durante el periodo de tiempo en que la tecnología vaya por delante de la normativa, parecería apropiado ampliar el Nivel de Referencia y el de Acción (incluidos los Valores Límite de Exposición) de los 300 GHz para toda la banda sub-THz, hasta que se determinen los nuevos niveles a aplicar, ya que equivaldría a realizar un análisis del caso peor.

En definitiva, se puede concluir que la futura red móvil 6G tendrá una vertiente medioambiental tan amplia como compleja.

1. Recuperación del ecosistema fluvial Manzanares-Gavia-Bulera. Infraestructura verde y azul Bosque Metropolitano de Madrid

Raquel Bravo Rubio⁽¹⁾, Miguel de Blas Moncalvillo⁽²⁾ y María Díaz-Redondo⁽³⁾

- (1) *Jefa del Departamento de Difusión y Cooperación Institucional, Dirección General de Planificación Estratégica. Ayuntamiento de Madrid*
- (2) *Laboratorio de Hidráulica, Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)*
- (3) *Área de Restauración Ambiental, Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CEDEX)*

1.1. Descripción básica del proyecto; situación actual, objetivos, acciones principales.

El río Manzanares es el principal corredor ecológico de la ciudad de Madrid, el cual conecta el Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares y el Parque Regional en torno a los ejes de los cursos bajos de los ríos Jarama y Manzanares, más conocido como Parque Regional del Sureste.

En el tramo del río Manzanares que va desde la presa nº 10 hasta el límite del término municipal de Madrid, el Ayuntamiento de Madrid, en colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y la Fundación Conama, está desarrollando el proyecto “Recuperación del ecosistema fluvial Manzanares-Gavia-Bulera. Infraestructura verde y azul Bosque Metropolitano de Madrid”, que se enmarca dentro de la Estrategia de Sostenibilidad Ambiental Madrid 360 y cuenta con financiación de la Unión Europea de Fondos NextGeneration, a través de la Fundación Biodiversidad, a través de la convocatoria de la Fundación Biodiversidad F.S.P. para el fomento de actuaciones dirigidas a la restauración de ecosistemas fluviales y a la reducción del riesgo de inundación en los entornos urbanos españoles a través de soluciones basadas en la naturaleza, correspondiente al año 2021, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, a la que el Ayuntamiento de Madrid concurre en colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y la Fundación Conama y cuyo plazo de ejecución comprende desde septiembre de 2022 hasta el 31 de diciembre de 2025.

La puesta en valor del río Manzanares como principal corredor ecológico estructurante a nivel regional, tiene los siguientes objetivos específicos: el diseño de la estrategia de restauración alineada con planes de referencia a nivel estatal y europeo para la restauración de ecosistemas fluviales, el fomento de infraestructuras verdes, la biodiversidad y adaptación al cambio climático y la intervención en una actuación pionera de carácter demostrador en la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de los aliviaderos de hormigón y la estabilización de taludes.

Como parte de las actuaciones a desarrollar se incluye la innovadora sustitución de un aliviadero convencional, por una propuesta con un enfoque integrador de los sistemas de saneamiento urbanos en un proyecto de restauración de paisaje, buscando su integración con soluciones basadas en la naturaleza que equilibren los beneficios ambientales y sociales. Se fomenta la

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

transferencia de resultados tanto en el caso otros aliviaderos existentes en el propio río Manzanares como en otros tramos urbanos de ríos de similares características.

Está previsto que se desmantelen los canales actuales que llegan hasta las orillas, retrasando los puntos de vertido, para garantizar la continuidad ambiental de las mismas y de los bosques de galería, y se construirá un colchón de transición, minimizando la afección al ecosistema ripario. Ello permitirá crear una zona con gran potencial para la implantación de nuevos hábitats, especialmente en la zona de las corrientes esporádicas, aprovechando la fertilidad de los suelos y el grado de humedad.

El ámbito concreto donde se efectuará esta sustitución será el aliviadero del tanque de tormentas de Abroñigales.

1.2. Caracterización ecológica del río a través de datos del Geoportal del Ayuntamiento de Madrid; seguimiento de indicadores e impactos a través de ortofotografías.

Dentro de este Proyecto, el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA-CEDEX) es responsable de ejecutar la “Caracterización ecológica inicial de los tramos de actuación de la Estrategia” (Acción A2) y el “Plan de medición y seguimiento de indicadores” (Acción C3).

Por un lado, la **Caracterización ecológica inicial** tiene por objetivo describir la situación actual del ámbito del Proyecto. Por otro lado, el **Plan de medición y seguimiento de indicadores** se ha diseñado con objeto de llevar a cabo un seguimiento del cumplimiento de los objetivos ambientales y sociales propuestos en el Proyecto de Recuperación del Ecosistema Fluvial Manzanares-Gavia-Bulera.

Para ambos trabajos, se han consultado y empleado numerosas fuentes de información, destacando:

- Ortofotografía anual desde 2022, de resolución espacial 10-20 cm, e imágenes aéreas históricas, de distinta resolución (Geoportal Ayuntamiento de Madrid).
- Índice de vegetación diferencial normalizado o NDVI, resolución espacial 30-50 cm (Geoportal Ayuntamiento de Madrid).
- Capas vectoriales y datos de muestreos de calidad del agua, hidromorfología, vegetación y fauna (MITERD, Confederación Hidrográfica del Tajo y Ayuntamiento de Madrid)

Asimismo, el personal del CETA-CEDEX ha realizado trabajos de campo y muestreos específicos con el fin de evaluar la hidromorfología, la vegetación y la entomofauna.

Se describen a continuación las metodologías de cada uno de los trabajos.

1.2.1. Caracterización ecológica inicial

Esta Caracterización ecológica inicial se ha basado en el estudio detallado de la hidrología superficial y subterránea, las condiciones morfológicas históricas y actuales, el análisis de la batimetría y topografía, la calidad de los hábitats acuáticos y ribereños y la calidad de las aguas (biológica, físico-química e hidromorfológica). Este trabajo de investigación y análisis ha permitido detectar las principales alteraciones de funcionamiento del ecosistema fluvial.

Cabe destacar el análisis de una serie de imágenes históricas desde el año 1956 hasta la actualidad con el fin de evaluar la evolución temporal de la morfología. Sobre estas imágenes, se digitalizaron las superficies ocupadas por la lámina de agua (río Manzanares) y por las islas con y sin vegetación, así como las áreas de las depuradoras (Figura 1.1).

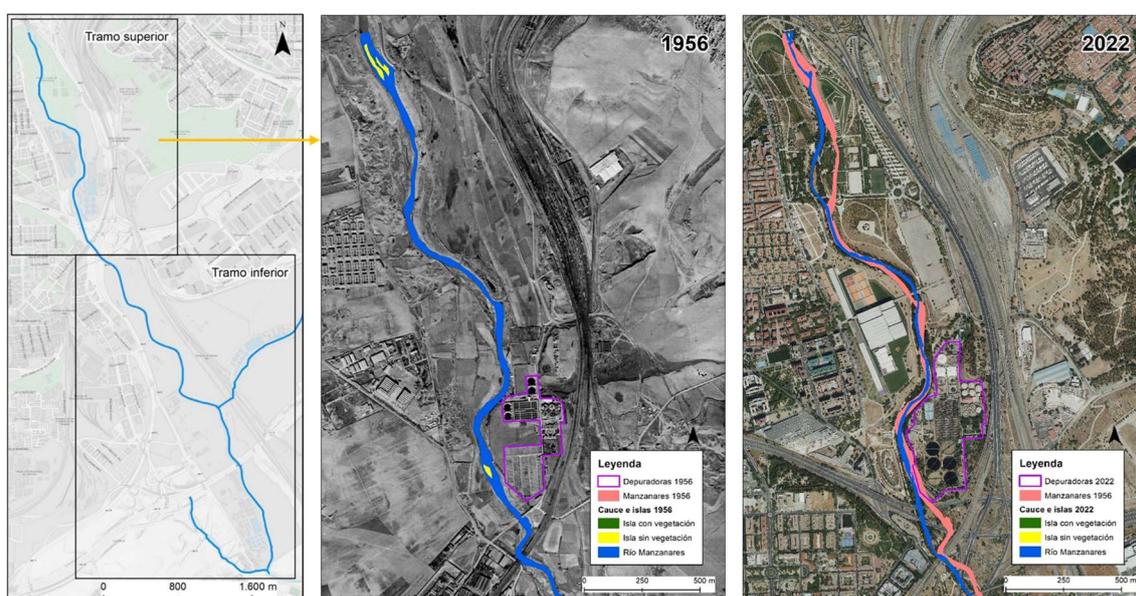


Figura 1.1. Evolución de la morfología del tramo superior del río Manzanares.

En la Figura 1.1 se observa el tramo superior del río Manzanares, de unos 2,5 km de longitud a la altura de la depuradora de La China y la Caja Mágica, donde se puede observar la gran expansión urbanística y el desarrollo de una densa infraestructura de transporte que ha tenido lugar en 66 años. Del análisis de los cambios temporales en los elementos digitalizados se puede concluir que, entre 1956 y 2022, el cauce del Manzanares ha sido desviado y acortado, que la superficie de la lámina de agua se ha reducido a la mitad y que la superficie de las islas representa sólo el 7 % en la actualidad con respecto a 1956.

1.2.2. Evaluación de Indicadores de Servicios Ecosistémicos en el Entorno Fluvial

En el denominado Plan de medición y seguimiento de indicadores se incluye un amplio rango de indicadores que se han estructurado en cuatro bloques: i) bloque de indicadores de obligado reporte según/de acuerdo con la convocatoria, ii) bloque de indicadores de elementos de calidad biológica, química y físico-química e hidromorfológica de la masa de agua, iii) bloque de indicadores de servicios ecosistémicos, y iv) bloque de indicadores de control ambiental de obra. Entre los bloques

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

de indicadores, destaca el de servicios ecosistémicos, ya que no es común emplear este tipo de indicadores para evaluar el grado de éxito de las actuaciones ejecutadas en el medio fluvial, y es donde el CETA-CEDEX ha centrado sus trabajos de investigación en la selección, diseño y medición.

La hipótesis de partida para la Evaluación de Indicadores de Servicios Ecosistémicos en el Entorno Fluvial es que la mejora de las funciones hidráulicas, ecológicas, culturales y/o paisajísticas, permitirá la recuperación o mejora de los servicios ecosistémicos del medio ribereño. En particular, se han propuesto más de 20 indicadores de servicios ecosistémicos que evalúan aspectos relacionados con las condiciones morfológicas del cauce, las condiciones físico-químicas de las aguas, la ocupación del suelo, el estado de la vegetación, la entomofauna o la ictiofauna. Entre las metodologías de evaluación de estos indicadores se incluyen análisis GIS basados en ortoimagen y teledetección, algunas de las cuáles se han descrito a continuación.

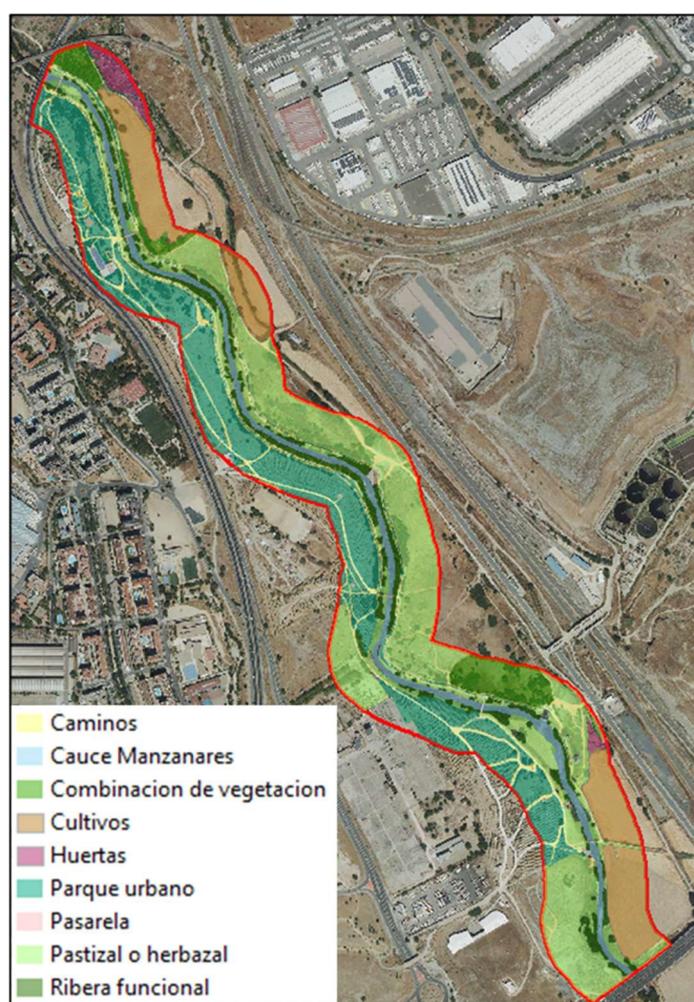


Figura 1.2. Digitalización de los usos del suelo sobre ortofotografía de 2022.

Por un lado, se utilizó la ortofotografía anual del Geoportal del Ayuntamiento de Madrid para la digitalización de los usos del suelo y el posterior cálculo de indicadores (p.ej. porcentajes de superficies permeables, áreas vegetadas, superficies agrícolas y de usos recreativos). Por ejemplo, el indicador de superficie ocupada por distintos tipos de vegetación se asociaría a servicios de regulación de la calidad del aire y del clima y a la formación del suelo. Las superficies agrícolas se

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

asocian con servicios de aprovisionamiento de alimentos y del ciclo de nutrientes. Y las áreas dedicadas a usos recreativos son un indicador de servicios culturales de recreación.

Por otro lado, se empleó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI, que posee un rango de 0 a 1, con valores próximos a 1 indicando el valor máximo de vigor de vegetación. Se realizó una clasificación de este índice en cinco categorías y se extrajeron las áreas correspondientes a la categoría superior (NDVI > 0,6), la correspondiente a la vegetación sana densa (Figura 1.3). A partir de estas áreas se pudieron calcular indicadores como el porcentaje de cobertura vegetal sana, que se relaciona con servicios de regulación del clima y de calidad del aire, entre otros, y el porcentaje de senderos con sombra proveniente de la vegetación densa sana circundante, que se asocia a servicios culturales de recreación y valores estéticos.

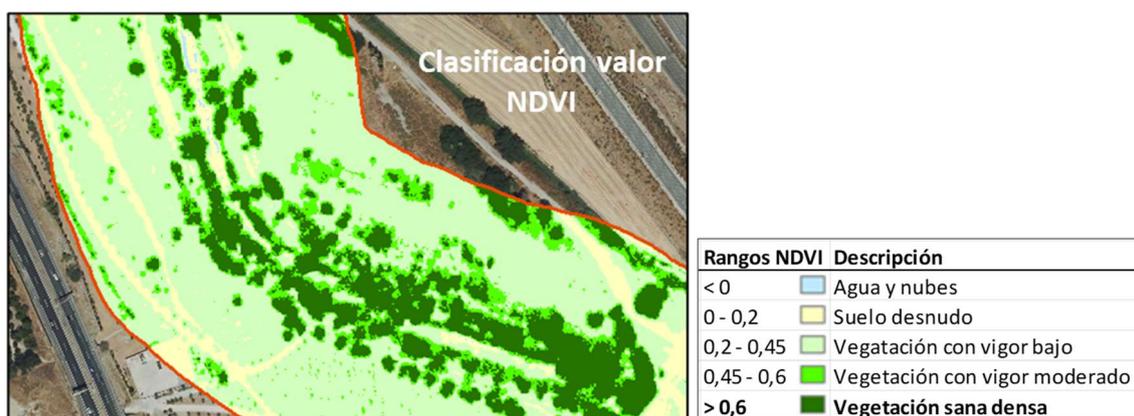


Figura 1.3. Clasificación del índice NDVI.

1.3. Estudios hidráulicos del Manzanares sur y de varios aliviaderos. Uso de datos topográficos, ortofotos, Geoportal, etc. Simulaciones.

Dentro de la colaboración con el Ayuntamiento de Madrid, en agrupación con la Fundación CONAMA y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), a través del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) y el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), el Centro de Estudios Hidrográficos, a través de su Laboratorio de Hidráulica se ha encargado de la realización de la Acción "Estudio Hidráulico", que consta de dos apartados:

- 1) Estudio hidráulico del tramo final del río Manzanares.
- 2) Estudio de las obras de reincorporación al cauce del aliviadero de Abroñigales, aliviadero de La Gavia y arroyo de La Gavia.

Para realizar estos trabajos, han sido muy importantes los datos de partida para poder caracterizar la zona de estudio, a menor y mayor escala, y analizar en profundidad toda la problemática hidrodinámica asociada a las diferentes estructuras hidráulicas.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La primera fase de los trabajos se ha basado, fundamentalmente, en la teledetección para poder obtener todos los datos necesarios para este estudio.

1.3.1. **Ámbito de estudio**

El estudio hidráulico de esta actuación se ha realizado en el tramo sur del río Manzanares, comprendido en el término municipal de Madrid, desde aguas abajo de la presa n.º 10 hasta aguas abajo de la ERAR Butarque, en el cruce del río Manzanares con las vías del tren, con una longitud aproximada de 8.000 m.



Figura 1.4. Localización del tramo de estudio.

1.3.2. **Datos de partida**

En esta primera fase, los datos procedentes de teledetección se han obtenido de dos fuentes:

- Geoportal del Ayuntamiento de Madrid (<https://geoportal.madrid.es/>), donde se han obtenido los siguientes productos:
 - Levantamiento topográfico "LT-194 Batimetría Manzanares".
 - Levantamiento topográfico "LT-092 Manzanares Sur Margen Izquierda".
 - Ortofoto
- Centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN, <https://www.ign.es/web/ign/portal>), donde se han obtenido los siguientes productos:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- Archivos LiDAR de la zona de estudio.
- Ortofoto

Además de todos estos datos, también se realizaron trabajos de campo documentando todas las estructuras presentes que pueden influir en el funcionamiento hidráulico.



Figura 1.5. Detalle del modelo digital del terreno (izquierda) y de varias infraestructuras (derecha).

Con toda esta información se ha generado un modelo digital del terreno (MDT) de gran precisión con celdas de 0,5 x 0,5 metros.

1.3.3. Estudio hidráulico del tramo final del río Manzanares

En esta segunda fase, se ha realizado el estudio de inundabilidad del tramo de estudio para diferentes periodos de retorno. Este análisis se ha realizado mediante modelización numérica bidimensional, con el modelo Iber.

Con toda la información del apartado anterior, se ha generado un modelo hidráulico bidimensional de todo el tramo de estudio. Se ha empleado una malla de elementos triangulares no estructurada de 1 metro de lado en el cauce, y 5 metros en la llanura de inundación, resultando una malla de 1.418.762 elementos.

Como condiciones internas, se han introducido todos los puentes y estructuras que atraviesan el cauce, y que pueden afectar al flujo hidráulico, con un total de 12 condiciones internas.

Se han empleado los usos del suelo del SIOSE para caracterizar la rugosidad del cauce y sus llanuras de inundación.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En el presente estudio, se ha empleado la siguiente hidrología que establece que en el tramo comprendido entre la presa n.º 10 y la ERAR Sur, los caudales en régimen alterado asociados a los diferentes períodos de retorno son: $T_{10} = 173 \text{ m}^3/\text{s}$; $T_{100} = 373 \text{ m}^3/\text{s}$; $T_{500} = 580 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como condición de contorno de salida se ha impuesto la condición de calado crítico. Las simulaciones se han realizado con caudal constante, prolongándolas hasta alcanzar el régimen permanente en todo el tramo de estudio. La siguiente figura muestra las manchas de inundación asociadas a cada período de retorno.

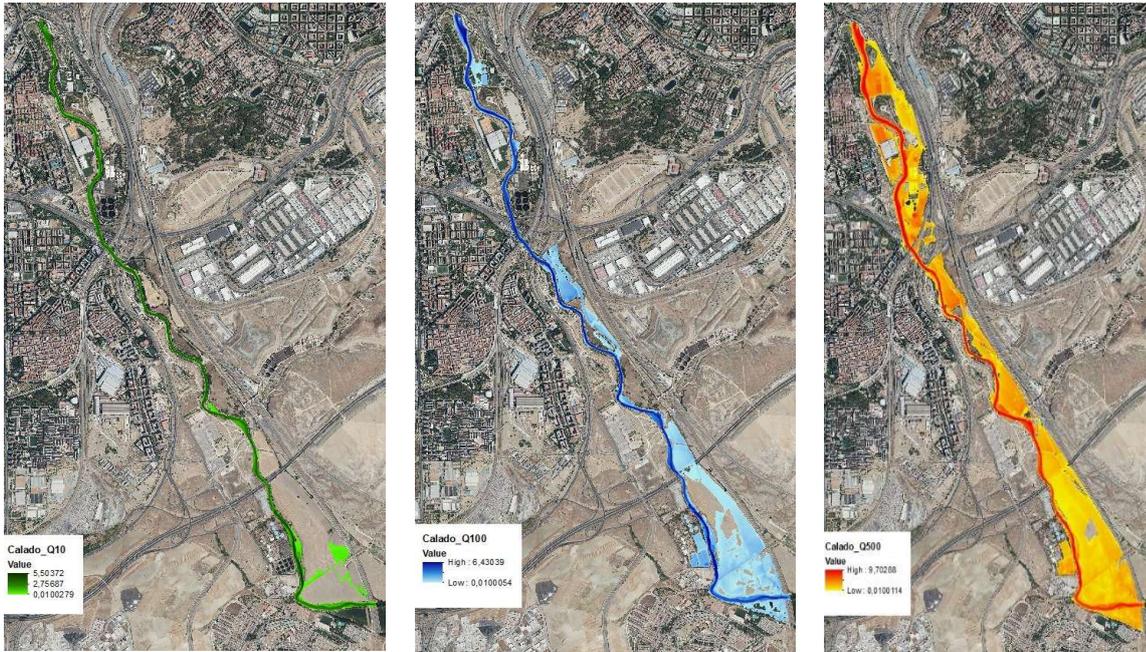


Figura 1.6. Calados para los diferentes periodos de retorno (T_{10} , T_{100} y T_{500}).

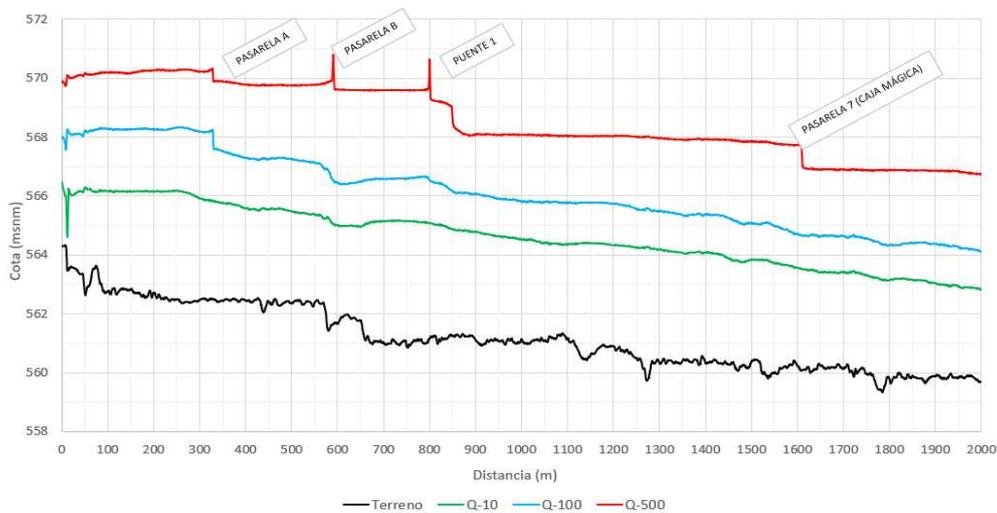


Figura 1.7. Comparativa del perfil de la lámina de agua para el eje del cauce en los tres escenarios. Primer tramo.

1.3.4. Estudio de las obras de reincorporación al cauce de los aliviaderos de Abroñigales y La Gavia

En esta tercera fase, se han analizado en profundidad dos estructuras de reincorporación al cauce, para mejorar su comportamiento hidrodinámico y su integración en el paisaje. Para ello, se han estudiado las dos estructuras mediante el modelo tridimensional denominado SPHERIMENTAL, de desarrollo propio del CEDEX.

Para ambas obras, se han realizado varios estudios previos en modelos bidimensionales y tridimensionales para caracterizarlo adecuadamente. Posteriormente, se han estudiado las dos obras para la situación actual, y después de varias modificaciones e implementaciones de los diseños de las estructuras, también se han modelizado y analizado las mejores condiciones para la solución final propuesta.

ALIVIADERO DE ABROÑIGALES

La geometría de este modelo se ha reproducido mediante una malla de 1.520.000 nodos, que materializan el contorno fijo, con un espaciamiento de 0,1 metros. El fluido se ha reproducido con partículas de 0,2 metros, por lo que para el caudal de estudio de 140 m³/s se han empleado en torno a 1.300.000 partículas.

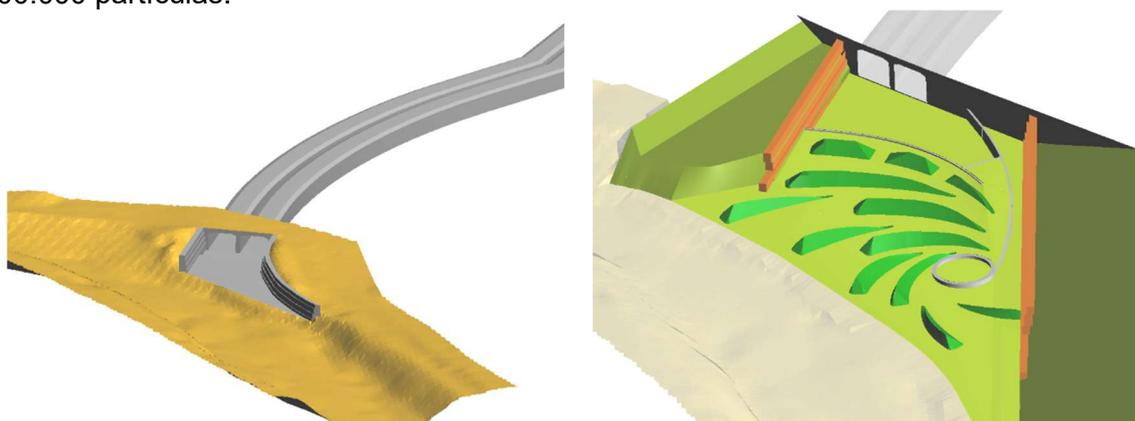


Figura 1.8. Geometría de la situación actual (izquierda), y de la solución propuesta (derecha).

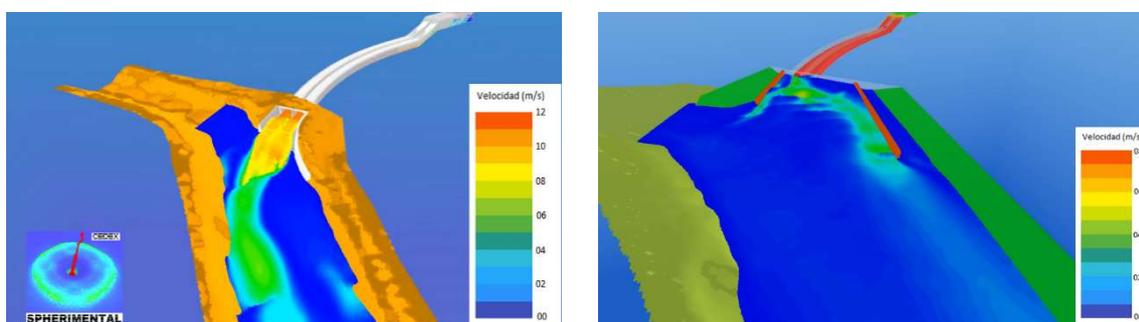


Figura 1.9. Modelización tridimensional de la situación actual (izquierda), y de la solución propuesta (derecha).

ALIVIADERO DE LA ERAR DE LA GAVIA Y EL ARROYO DE LA GAVIA

La geometría del modelo se ha reproducido mediante una malla de 3.070.822 nodos que materializan el contorno fijo, con un espaciamiento de 0,1 metros. El fluido se ha reproducido con partículas de 0,2 metros, por lo que para el caudal de diseño de 40 m³/s para el aliviadero, y de 20 m³/s para el arroyo se han empleado en torno a 1.050.000 partículas.

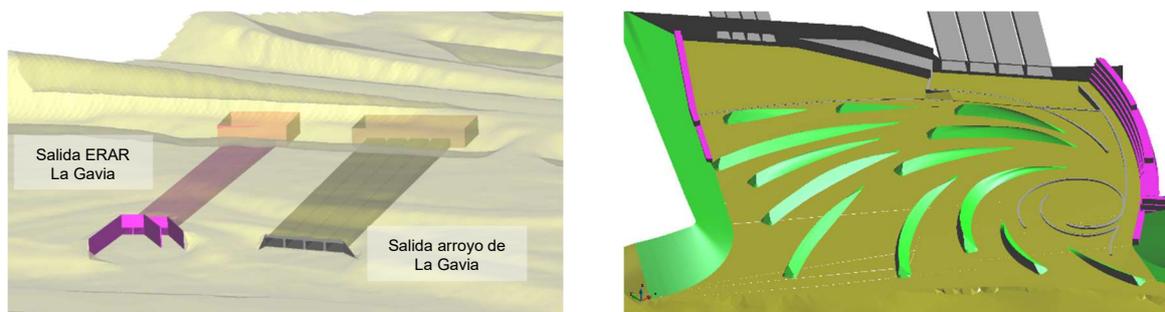


Figura 1.10. Geometría de la situación actual (izquierda), y de la solución propuesta (derecha).

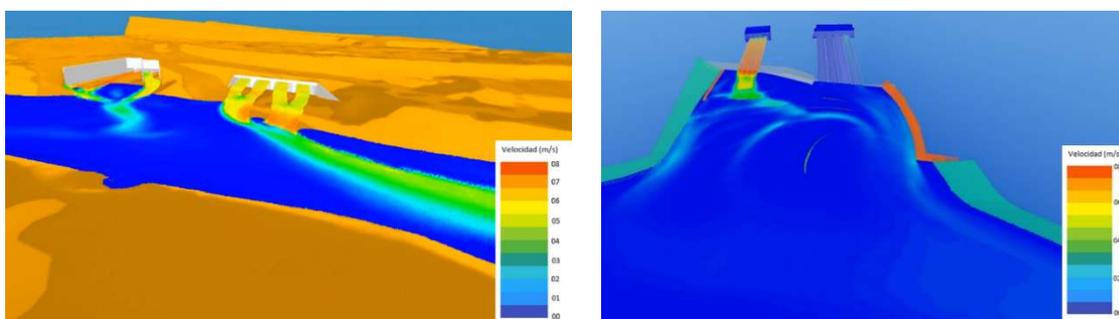


Figura 1.11. Modelización tridimensional de la situación actual (izquierda), y de la solución propuesta (derecha).

1.4. Conclusiones

Como ha quedado patente, el proyecto “Recuperación del ecosistema fluvial Manzanares-Gavia-Bulera” representa una iniciativa pionera e innovadora que combina aspectos técnicos, ecológicos y sociales para restaurar el corredor ecológico del río Manzanares. A continuación, se presentan las principales conclusiones:

Restauración Integral del Ecosistema Fluvial

La intervención permitirá la recuperación de la funcionalidad hidrológica y ecológica del río Manzanares mediante la eliminación de infraestructuras que limitaban su dinámica natural. La sustitución de un aliviadero convencional por una alternativa con soluciones basadas en la naturaleza es una alternativa pionera a nivel nacional que posibilita su función sin afectar a la continuidad del bosque de galería.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Innovación en la Gestión Hídrica Urbana

La integración de soluciones basadas en la naturaleza en la gestión de aguas pluviales y saneamiento se muestra como una alternativa viable y con gran potencial de replicabilidad. Estas nuevas soluciones, en combinación con otras soluciones que se están desarrollando en la actualidad, abren un campo de oportunidad para la sostenibilidad de los sistemas de gestión hídrica urbanos.

Efectividad de la Teledetección y Herramientas Geoespaciales

El uso de tecnologías avanzadas, como la ortofotografía, datos LiDAR y el NDVI, ha permitido un seguimiento detallado del impacto ecológico. Los indicadores de servicios ecosistémicos permitirán conocer las mejoras en la cobertura vegetal, la calidad del aire y el ciclo de nutrientes, mostrando una recuperación sostenible del entorno.

Perspectivas Futuras

Se recomienda continuar con el monitoreo de indicadores ecológicos y sociales más allá de 2025 para asegurar la consolidación de los beneficios obtenidos. Asimismo, la expansión de estas prácticas a otros ríos urbanos podría multiplicar los impactos positivos en la resiliencia climática y la biodiversidad urbana.

2. El uso de los sensores activos en la gestión medioambiental: evaluación de daños por incendios con datos Sentinel-1

Victoriano Moreno Burgos (COFIS) y Carmelo Alonso Jiménez (Indra)

2.1. Introducción

La teledetección mediante sensores activos, como el radar, ha revolucionado la gestión del medioambiente, proporcionando herramientas avanzadas para evaluar y mitigar los daños causados por desastres naturales. Un ejemplo significativo de esta tecnología es el uso del radar de apertura sintética (SAR) del satélite Sentinel-1, que ofrece capacidades superiores para el monitoreo de la superficie terrestre en diversas condiciones atmosféricas y de iluminación.

En el verano de 2022, la provincia de Zamora sufrió uno de los incendios forestales más devastadores de los últimos años. Las altas temperaturas, combinadas con condiciones secas extremas, provocaron un incendio que arrasó vastas áreas de vegetación, causando daños ecológicos y económicos considerables. En este contexto, la capacidad de los sensores activos, como el radar Sentinel-1, puede resultar crucial para la evaluación rápida de los daños.

A diferencia de los sensores ópticos, que pueden verse afectados por el humo y la nubosidad, el radar puede penetrar estas barreras, proporcionando datos fiables y de alta resolución independientemente de las condiciones atmosféricas. Esta capacidad es especialmente útil en situaciones de emergencia, donde la temprana información relevante oportuna y precisa es vital.

La comparación entre la situación pre y post incendio con Sentinel-1 nos ayuda a cartografiar extensivamente el área afectada. Utilizando técnicas de interferometría SAR (InSAR), se pueden identificar cambios en la superficie terrestre, medir la extensión del área quemada e, incluso, poder evaluar la severidad del daño en diferentes zonas. La información obtenida puede contribuir a determinar la pérdida de biomasa y a evaluar el impacto sobre la flora y fauna locales.

Además, el análisis posterior con los datos SAR de Sentinel-1 permite el seguimiento de la recuperación del área afectada, pudiéndose observar la regeneración de la vegetación y la efectividad de las intervenciones de restauración implementadas. Esta información es esencial para planificar estrategias de recuperación a largo plazo, asignar recursos de manera eficiente y prevenir futuros incendios mediante la evaluación del riesgo y la identificación de áreas vulnerables.

Este caso de uso muestra cómo la integración de tecnologías avanzadas de teledetección puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante emergencias medioambientales. En conclusión, los sensores activos como el radar del satélite Sentinel-1 son importantes herramientas para la gestión del medioambiente, especialmente en la evaluación y manejo de incendios forestales. Su capacidad para proporcionar datos precisos, independientemente de las condiciones atmosféricas y de iluminación, los convierte en aliados esenciales para la protección del entorno natural y la implementación de estrategias efectivas de recuperación y prevención.

2.2. Misión Sentinel-1

La flota de misiones de satélites “Sentinel” proporciona una gran cantidad de datos e imágenes que son fundamentales para el programa Copernicus de Europa. Al ofrecer un conjunto de servicios de información clave para una amplia gama de aplicaciones, este programa de monitoreo global supone un cambio radical en la forma en que gestionamos nuestro medio ambiente, entendemos y abordamos los efectos del cambio climático y salvaguardamos la vida cotidiana.

El primero de la serie, Sentinel-1, lleva un instrumento de radar avanzado para proporcionar un suministro de imágenes de la superficie de la Tierra en todo tipo de condiciones climáticas, día y noche. El radar de apertura sintética (SAR) de banda C se basa en los sistemas SAR heredados de la ESA y Canadá: ERS-1, ERS-2, Envisat y Radarsat.

La misión Sentinel-1 está diseñada como una constelación de dos satélites que orbitan a 180° de distancia y que pueden obtener imágenes de toda la Tierra cada seis días.

2.2.1. Descripción general de la misión Sentinel-1

La misión Sentinel-1 es el Observatorio Radar Europeo de la iniciativa conjunta, Copernicus, de la Comisión Europea (CE) y la Agencia Espacial Europea (ESA). Ésta es una iniciativa europea para la implementación de servicios de información relacionados con el medio ambiente y la seguridad. Se basa en datos de observación recibidos de satélites de observación de la Tierra e información terrestre.

La misión Sentinel-1 está formada por una constelación de dos satélites heliosincrónicos en órbita polar que comparten el mismo plano orbital con una diferencia de fase orbital de 180° y que operan día y noche y que toman imágenes con radar de apertura sintética de banda C, lo que les permite adquirir imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas. Opera en cuatro modos de obtención de imágenes exclusivos con diferente resolución (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km). Ofrece capacidad de polarización dual, tiempos de revisión muy breves y entrega rápida de los productos. Para cada observación, se dispone de mediciones precisas de la posición y actitud de la plataforma.

Sentinel-1 funciona en un modo de operación preprogramado para evitar conflictos y producir un archivo de datos consistente a largo plazo creado para aplicaciones basadas en series temporales largas. Es la primera de las cinco misiones que la ESA ha desarrollado para la iniciativa Copernicus. Su ámbito de medición abarca la topografía del paisaje, las imágenes multipropósito (tierra), las imágenes multipropósito (océano), los vientos de la superficie oceánica, la topografía y las corrientes oceánicas, la altura y el espectro de las olas oceánicas, la capa de hielo marino, sus bordes y su espesor, la capa de nieve, sus bordes y su profundidad, la humedad del suelo y la vegetación. Los principales objetivos y aplicaciones de la misión Sentinel-1 son:

- Monitoreo de masas terrestres globales,
- Vigilancia del hielo marino,
- Monitoreo del hielo terrestre,
- Monitoreo de océanos y mares,
- Vigilancia marítima,
- Respuesta de emergencia.

2.2.2. Cronología del lanzamiento

Sentinel-1A se lanzó el 3 de abril de 2014. Sentinel-1B se lanzó el 25 de abril de 2016. El satélite experimentó una anomalía relacionada con la fuente de alimentación de la electrónica del instrumento proporcionada por la plataforma satelital, lo que le impidió entregar datos de radar desde el 23 de diciembre de 2021. Como consecuencia, la ESA y la UE anunciaron el final de la misión Sentinel-1B el 3 de agosto de 2022. El Sentinel-1C se lanzó con éxito el 5 de diciembre de 2024.

2.2.3. Descripción del satélite

El satélite, carga útil CSAR y el subsistema de electrónica de radar central ha sido desarrollado por un consorcio industrial europeo.

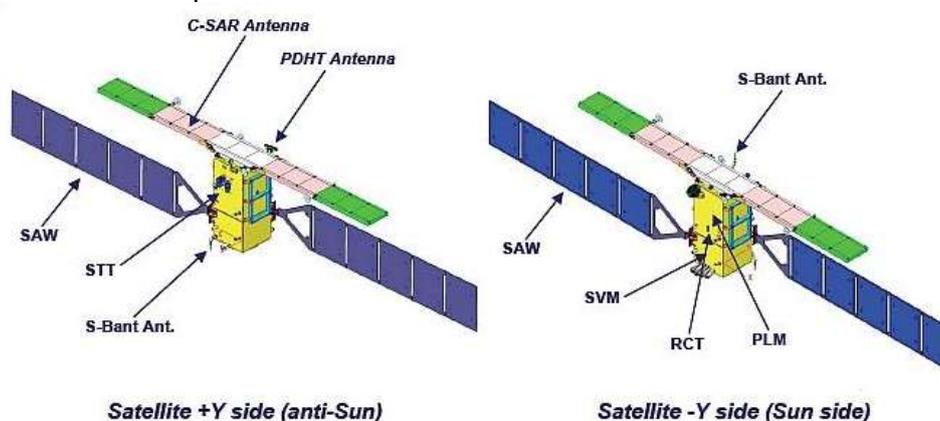


Figura 2.2. Vista esquemática de la nave espacial Sentinel-1 desplegada. Fuente: TAS-I.

El satélite es un satélite estabilizado de tres ejes, con dirección de cabeceo/guiñada/balaceo (efecto Doppler cero), que se caracteriza por sensores solares, estelares, giroscópicos y de campo magnético, un conjunto de cuatro ruedas de reacción dedicadas al control de la órbita y la actitud y tres barras de torsión como actuadores para proporcionar capacidades de dirección en cada eje. El satélite está equipado con dos alas de paneles solares capaces de producir 5.900 W (al final de su vida útil) que se almacenarán en una batería modular, la capacidad de la batería es de 324 Ah.

El satélite se basa en el bus PRIMA (*Piattaforma Italiana Multi Applicativa*), que aprovecha la experiencia adquirida con RADARSAT-2 y COSMO-SKYMED, que utilizan el mismo bus. El bus proporciona un conocimiento de apuntamiento de alta precisión (mejor que $0,004^\circ$) en cada eje, una alta precisión de actitud (aproximadamente $0,01^\circ$ en cada eje) y una determinación de la órbita en tiempo real junto con un sistema de propulsión dedicado para un control preciso de la órbita. La órbita de referencia se mantendrá dentro de un tubo orbital de un diámetro de 120 m (RMS) durante el funcionamiento normal.

La plataforma satelital proporciona funcionalidades para la gestión de los sistemas de control de actitud y órbita, manejo de datos científicos con capacidad de almacenamiento de 1.410 Gb, propulsión, potencia, control térmico, autonomía de la nave espacial e identificación y recuperación de detección de fallos, y comunicación con tierra vía enlace descendente de datos en banda X y enlace de datos ópticos a través de EDRS para datos de carga útil a 520 Mbit/s; enlace ascendente de banda S a 64 kbps y enlace descendente de 128 kbps / 2 Mbps para TM/TC. La masa total del satélite en el momento del lanzamiento es de aproximadamente 2.300 kg (incluidos 130 kg de combustible).

2.2.4. Órbita

Sentinel-1 se encuentra en una órbita heliosincrónica casi polar con un ciclo de repetición de 12 días y 175 órbitas por ciclo para un solo satélite. Tanto Sentinel-1A como Sentinel-1C comparten el mismo plano orbital con una diferencia de fase orbital de 180° . Con ambos satélites en funcionamiento, el ciclo de repetición es de seis días.

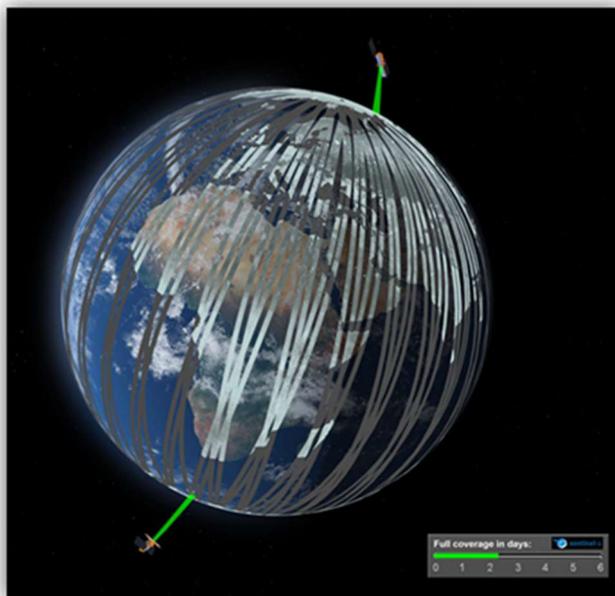


Figura 2.3. Constelación Sentinel-1. Fuente: ESA/ATG medialab.

En particular, para la interferometría, Sentinel-1 requiere un estricto control de la órbita. El posicionamiento del satélite a lo largo de la órbita debe ser preciso, con apuntamiento y sincronización entre pares interferométricos. El control de posicionamiento de la órbita para Sentinel-1 se define utilizando un "tubo" fijo en la órbita terrestre, de 60 m (RMS) de radio, alrededor de una trayectoria operativa nominal. El satélite se mantiene dentro de este "tubo" durante la mayor parte de su vida útil.

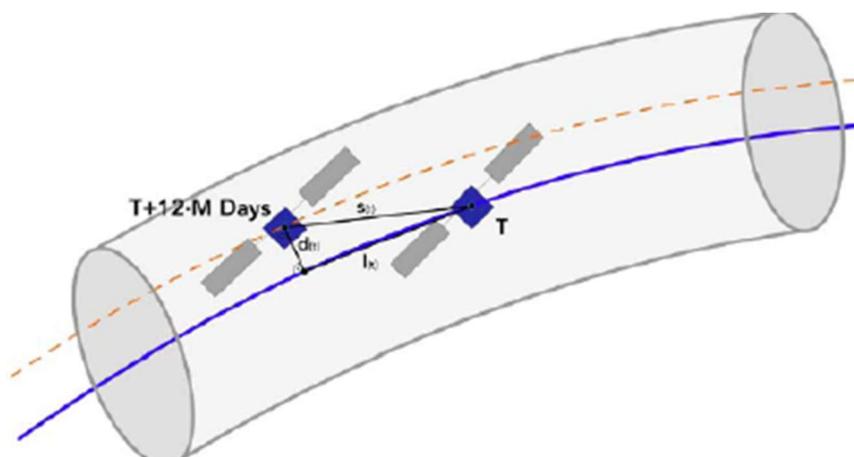


Figura 2.4. Tubo orbital Sentinel-1. Fuente: ESA, TAS.

2.2.5. Cobertura geográfica

La constelación Copernicus Sentinel-1 ofrece una mejora en el tiempo de revisita con respecto a ERS-1/2 y ENVISAT ASAR, y una continuidad de cobertura de área amplia con ENVISAT ASAR, pero logrando una mayor resolución y una cobertura de polarización dual potencialmente global sobre masas terrestres.

Un solo satélite Sentinel-1 tiene la capacidad de mapear todo el mundo en el modo de franja interferométrica amplia una vez cada 12 días, con 175 órbitas por ciclo. La constelación de dos satélites ofrece un ciclo de repetición exacta de 6 días.

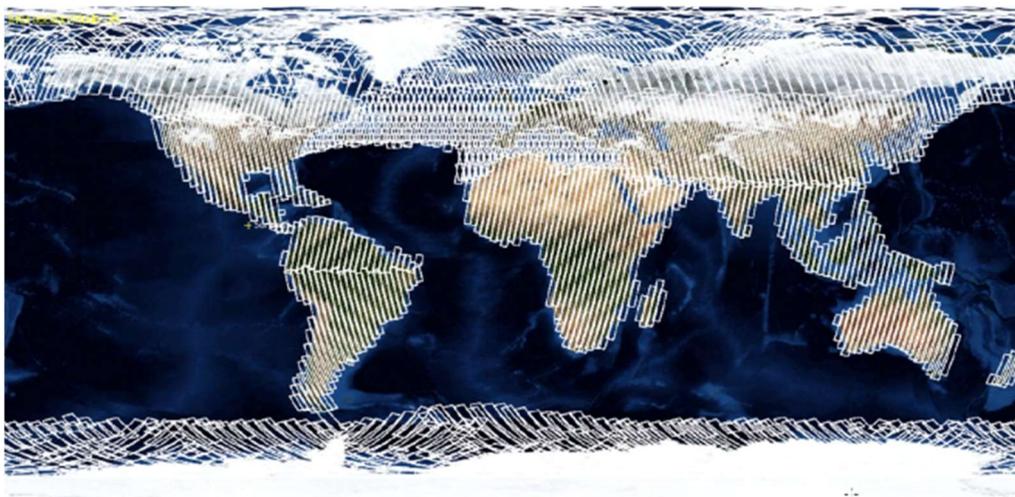
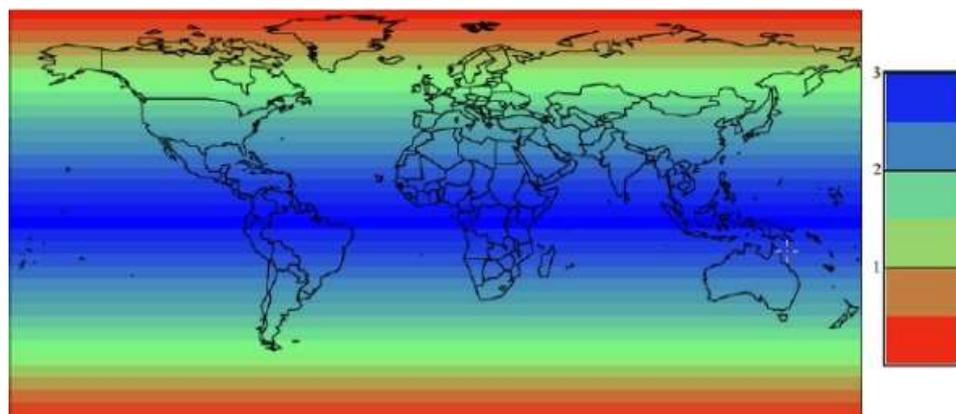


Figura 2.5. Cobertura mundial potencial del satélite Sentinel-1.

Dado que el espaciamiento de las trayectorias orbitales varía con la latitud, la tasa de revisita (ascendente/descendente) es significativamente mayor en latitudes más altas que en el ecuador: menos de un día en el Ártico y proporciona cobertura sobre Europa y Canadá, las principales rutas de navegación en 1-3 días y en 3 días en el ecuador. Los datos de radar se envían a los servicios de Copernicus en el plazo de una hora desde su adquisición.



- ✓ Two satellites in a 12 day orbit
- ✓ Repeat frequency: 6 days (important for coherence)
- ✓ Revisit frequency: (asc/desc & overlap): 3 days at the equator, <1 day at high latitudes (Europe ~ 2 days)

Figura 2.6. Tiempo de revisión para S-1A y S-1B/S-1C en días por revisión.

2.2.6. Instrumento SAR

El instrumento C-SAR ofrece la posibilidad de obtener imágenes en cualquier condición meteorológica, tanto de día como de noche, para capturar datos de medición en resoluciones altas y medias de observaciones terrestres, de zonas costeras y de hielo.

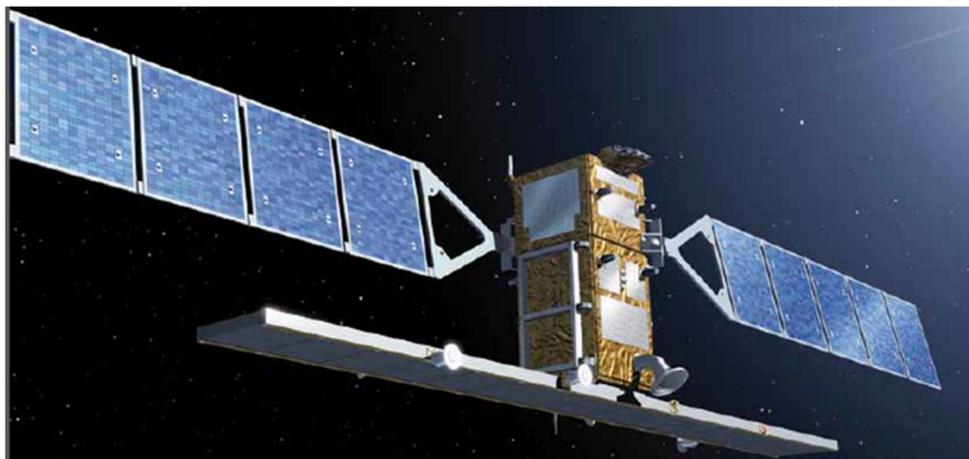


Figura 2.7. Satélite y sensor Sentinel-1.

El instrumento C-SAR es una antena de matriz en fase activa que proporciona un escaneo rápido en elevación (para cubrir el amplio rango de ángulos de incidencia y soportar la operación ScanSAR) y en acimut (para permitir el uso de la técnica TOPS para cumplir con el rendimiento de imagen requerido) con capacidad de doble polarización.

Tiene un esquema de calibración interna, donde las señales de transmisión se enrutan al receptor para permitir el monitoreo de la amplitud/fase para facilitar una alta estabilidad radiométrica.

Cuadro 2.1. Parámetros clave del instrumento C-SAR Sentinel-1.

Parámetro	Valor
Frecuencia central	5,405 GHz (correspondiente a una longitud de onda de ~5,55 cm)
Ancho de banda	0-100 MHz (programable)
Polarización	HH+HV, VV+VH, VV, HH
Tamaño de la antena	12,3 mx 0,821 m
Potencia pico de RF (suma de todos los TRM, en TRM o/p)	4.368 kW, - 4.075 kW (IW, polarizaciones duales)
Ancho de pulso	5-100 μ s (programable)
Ciclo de trabajo de transmisión	Máx. 12 %, SM 8,5 %, IW 9 %, EW 5 %, WV 0,8 %
Figura de ruido del receptor en la entrada del módulo	3,2 dB
PRF (Frecuencia de repetición de pulsos)	1 000 - 3 000 Hz (programable)
Frecuencia de muestreo del ADC	300 MHz (muestreo real) (muestreo descendente digital después de la conversión A/D)
Muestreo	10 bits

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Parámetro	Valor
Compresión de datos	FDBAQ (Cuantización adaptativa de bloques dinámicos flexibles)
Operación del instrumento	Hasta 25 min por órbita de forma continua en cualquiera de los modos de imagen y durante el resto de la órbita en modo Wave
Masa total del instrumento (incluida la antena)	945 kilos
Alimentación de CC CSAR	3870 W (modo interferométrico de franja ancha, dos polarizaciones)
Capacidad de almacenamiento de datos CSAR	1410 Gb (Fin de vida útil)
Tasa de bajada CSAR efectiva	Dos canales de 260 Mbps cada uno

El instrumento se compone de dos subsistemas principales: El subsistema electrónico SAR (SES) y el subsistema de antena SAR (SAS).

La señal de radar se genera en la banda base mediante el generador de pulsos y se convierte a banda C dentro del SES. Esta señal se distribuye a los amplificadores de alta potencia dentro de los módulos de transmisión/recepción (TRM) del frente electrónico (EFE) a través de la red de formación de haces del SAS. La radiación de la señal y la recepción del eco se realizan con la misma antena utilizando radiadores de guía de ondas ranuradas. Durante la recepción, la señal de eco se amplifica mediante los amplificadores de bajo ruido dentro de los TRM del EFE y se suma utilizando la misma red que para la distribución de la señal de transmisión. Después del filtrado y la conversión descendente a banda base dentro del SES, la señal de eco se digitaliza y formatea para su grabación.

2.2.6.1. Modos de adquisición

Sentinel-1 opera en cuatro modos de adquisición exclusivos: Mapa de franjas (SM), Franja ancha interferométrica (IW), Franja extra ancha (EW) y Onda (WV).

Los modos de obtención de imágenes SM, IW y EW pueden funcionar durante un ciclo de trabajo máximo de 30 minutos por órbita. El modo WV funciona durante un ciclo de trabajo máximo de 75 minutos por órbita.

Los instrumentos SAR de banda Sentinel-1C admiten el funcionamiento en polarización simple (HH o VV) y polarización dual (HH+HV o VV+VH), implementado a través de una cadena de transmisión (conmutable a H o V) y dos cadenas de recepción paralelas para polarización H y V.

Los productos SM, IW y EW están disponibles con polarización simple (HH o VV) o doble (HH+HV o VV+VH). WV solo tiene polarización simple (HH o VV).

El modo principal sobre tierra es IW, con polarización VV+VH: tener la franja ancha interferométrica como el único modo operativo principal satisface la mayoría de los requisitos de servicio actuales, evita conflictos y preserva el rendimiento de revisita, simplifica la planificación de la misión, disminuye los costos operativos y crea un archivo consistente a largo plazo.

En mar abierto, el modo WV, con polarización VV, es el principal modo de adquisición operativa, adquiriendo viñetas a intervalos regulares.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El modo EW se utiliza principalmente en mares europeos seleccionados, áreas del océano Ártico y del sur, principalmente para servicios de monitoreo del hielo marino y vigilancia marítima, con capacidad para cubrir un área de 400 km de ancho en cada toma de datos. El modo SM solo se utiliza para islas pequeñas y a pedido para eventos extraordinarios como la gestión de emergencias.

Para cada modo, es posible producir productos en el nivel SAR 0, nivel 1 SLC, nivel 1 GRD y nivel 2 OCN.

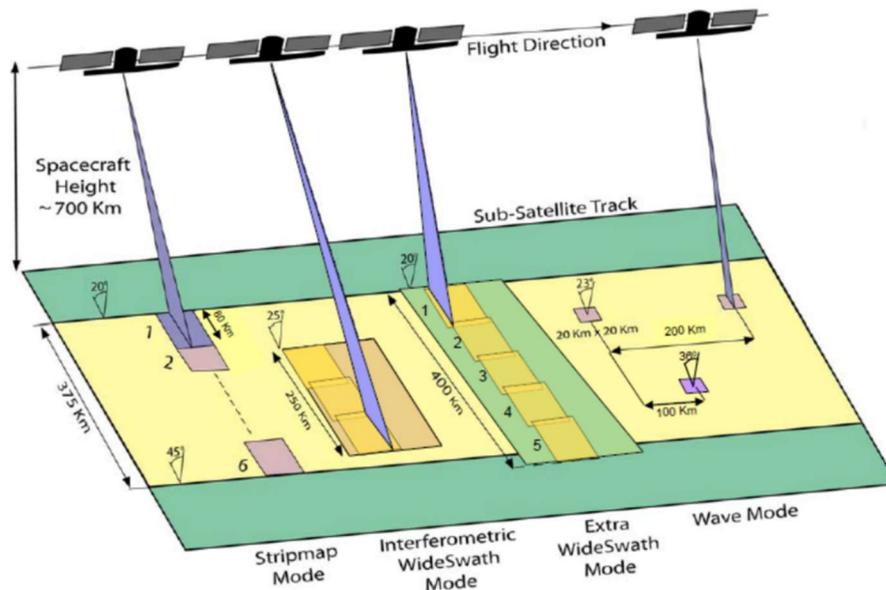


Figura 2.8. Modos de adquisición de Sentinel-1. Fuente: ESA.

El **modo Stripmap** (SM) adquiere datos con una franja de 80 km con una resolución espacial ligeramente mejor que 5 m por 5 m (vista única). Seis franjas superpuestas cubren un rango de 375 km. La franja terrestre se ilumina mediante una secuencia continua de pulsos mientras el haz de la antena apunta a un ángulo de acimut fijo y un ángulo fuera del nadir aproximadamente fijo (esto está sujeto a pequeñas variaciones debido a la dirección del balanceo). Las imágenes SM tienen una calidad de imagen continua a lo largo de la trayectoria con un ángulo de incidencia aproximadamente constante. El modo Stripmap se utiliza para obtener imágenes de islas pequeñas y, solo en casos excepcionales, para respaldar acciones de gestión de emergencias.

El **modo de franja interferométrica amplia** (IW) es el principal modo de adquisición sobre tierra y satisface la mayoría de los requisitos del servicio. Adquiere datos con una franja de 250 km a una resolución espacial de 5 m por 20 m (vista única). El modo IW captura tres subfranjas utilizando *Terrain Observation with Progressive Scans SAR* (TOPSAR). Con la técnica TOPSAR, además de dirigir el haz en el rango como en ScanSAR, el haz también se dirige electrónicamente de atrás hacia adelante en la dirección azimutal para cada ráfaga, evitando el festoneado y dando como resultado una calidad de imagen homogénea en toda la franja.

El modo TOPSAR reemplaza al modo ScanSAR convencional, logrando la misma cobertura y resolución que ScanSAR, pero con una relación señal-ruido y una relación de ambigüedad del objetivo distribuida casi uniformes.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

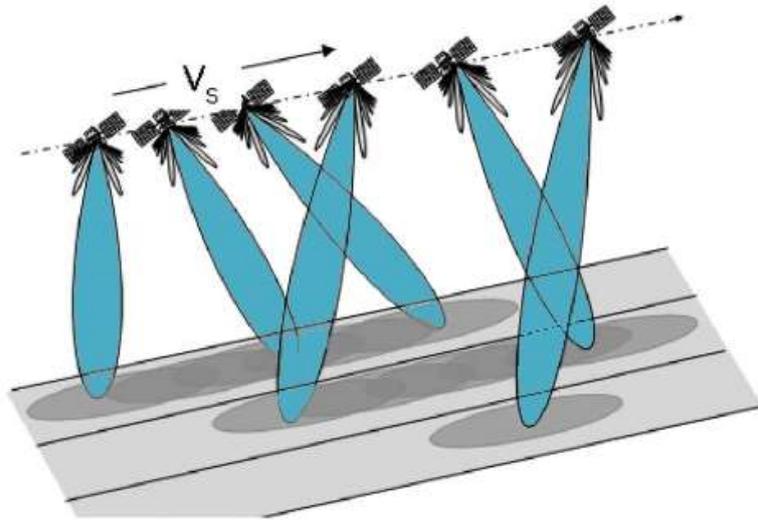


Figura 2.9. Adquisición de subfranjas de TOPSAR. Fuente: ESA.

La resolución azimutal se reduce en comparación con la SM debido al menor tiempo de iluminación del objetivo de la ráfaga. Al utilizar el patrón azimutal de barrido, cada objetivo se ve bajo el mismo patrón de antena, independientemente de su posición azimutal en la imagen de la ráfaga. Al reducir el patrón azimutal de la antena, como lo ve un objetivo en el suelo, se pueden reducir los efectos de festoneado en la imagen.

El sistema Sentinel-1 C-SAR está diseñado para permitir la sincronización de ráfagas TOP de tomas de datos de pases repetidos que respaldan la generación de interferogramas TOPS y mapas de coherencia. Específicamente, para los modos IW y EW, la duración de la ráfaga TOPS es de 0,82 s y 0,54 s (en el peor de los casos) respectivamente, con un requisito para lograr una sincronización de menos de 5 ms entre las ráfagas correspondientes. TOPSAR requiere alta precisión para el registro conjunto de imágenes. Un pequeño error de registro conjunto en acimut puede introducir una rampa de fase de acimut debido al barrido del haz de acimut de la antena SAR que causa variaciones de frecuencia del centroide Doppler de 5,5 kHz.

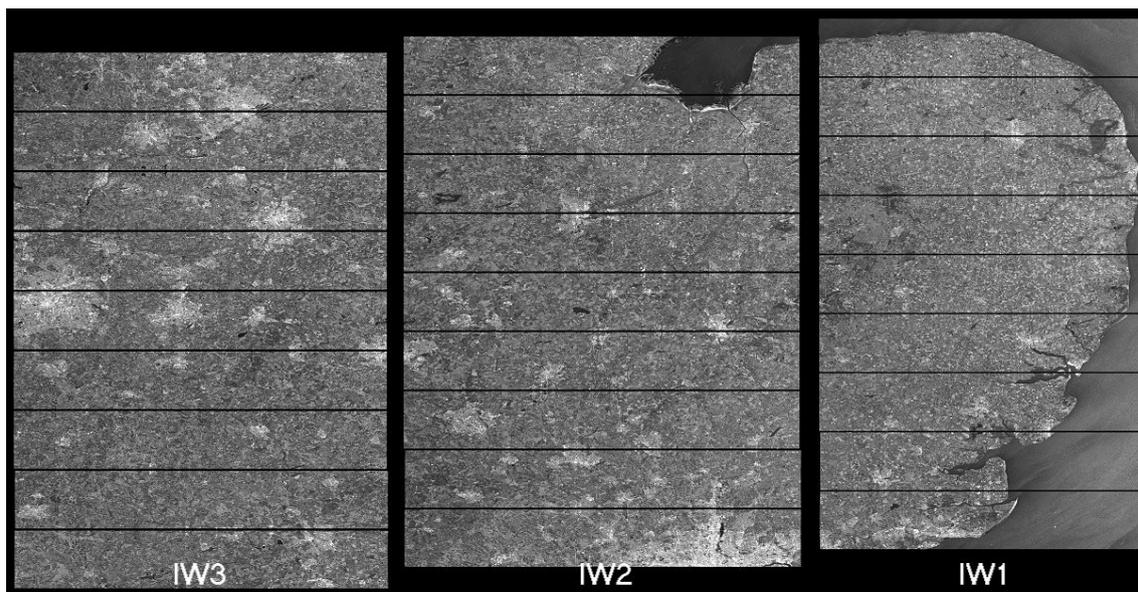


Figura 2.10. Ráfagas y subfranjas de SLC de IW.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Los productos IW SLC contienen una imagen por subfranja y una por canal de polarización, para un total de tres (polarización simple) o seis (polarización dual) imágenes en un producto IW.

Cada imagen de subfranja consta de una serie de ráfagas, donde cada ráfaga se ha procesado como una imagen SLC independiente. Las imágenes de ráfagas complejas enfocadas individualmente se incluyen, en orden azimut-tiempo, en una única imagen de subfranja con una demarcación de relleno negro entre ellas. Existe una superposición suficiente entre ráfagas adyacentes y entre subfranjas para garantizar una cobertura continua del terreno, como se proporciona en los productos GRD. Las imágenes de todas las ráfagas en todas las subfranjas se remuestran en una cuadrícula de espaciado de píxeles común en rango y azimut, al tiempo que se conserva la información de fase.

Después de la fusión de ráfagas y subfranjas, se puede crear el producto completo, como es el caso de los productos GRDH que se muestran en la Figura 2.10. La técnica TOPSAR reduce en gran medida los efectos de festoneado en comparación con el ScanSAR convencional.

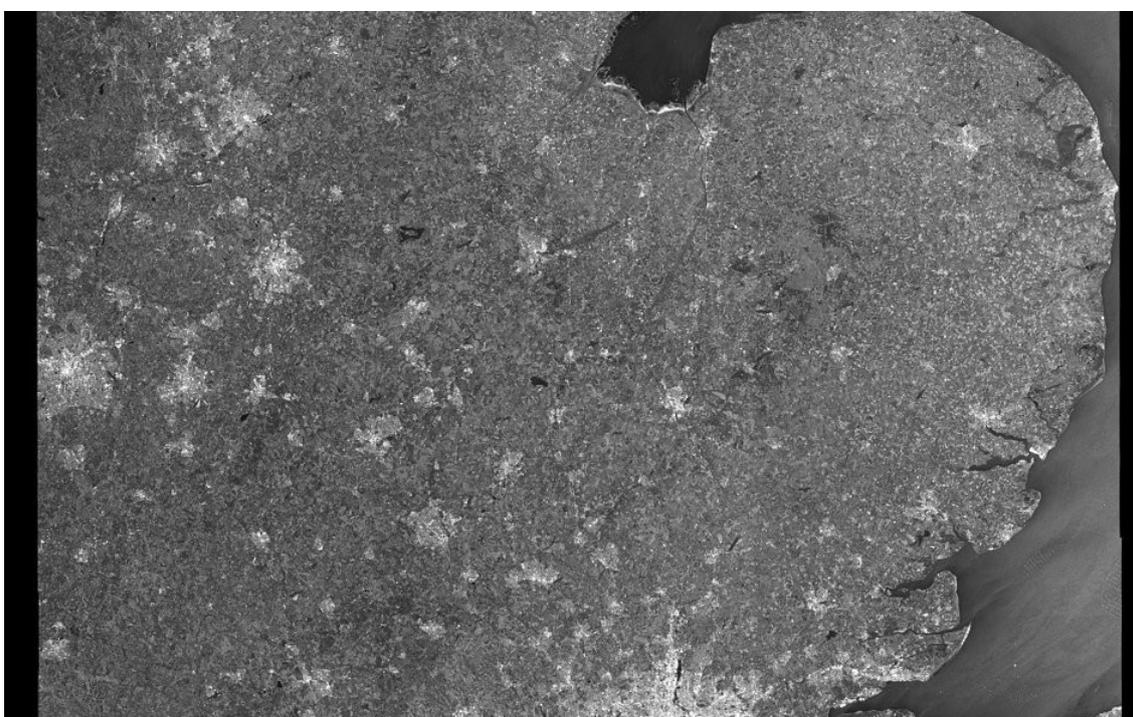


Figura 2.11. Producto IW GRDH.

De manera similar al modo IW, el **modo de franja extra ancha (EW)** emplea la técnica TOPSAR para adquirir datos sobre un área más amplia que en el modo IW, utilizando cinco subfranjas. El modo EW adquiere datos sobre una franja de 400 km con una resolución espacial de 20 m por 40 m.

Los productos EW SLC contienen una imagen por subfranja y una por canal de polarización, para un total de cinco (polarización simple) o 10 (polarización dual) imágenes en un producto EW.

El modo EW está destinado principalmente a utilizarse sobre hielo marino, zonas polares y ciertas áreas marítimas, en particular para la vigilancia del hielo, de derrames de petróleo y servicios de seguridad. Al igual que IW, el modo EW también se puede utilizar para interferometría, ya que comparte las mismas características de sincronización de ráfagas, línea base y estabilidad Doppler.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El **modo de onda** de Sentinel-1 es similar a las imágenes en modo de onda de ERS y Envisat, pero con una resolución espacial mejorada, viñetas más grandes y un patrón de adquisición de "salto de rana", como se ilustra en la figura siguiente. Las adquisiciones en modo WV consisten en varias viñetas exclusivamente en polarización VV o HH, y cada viñeta se procesa como una imagen independiente. Los productos en modo WV pueden contener cualquier cantidad de viñetas, lo que potencialmente equivale a una toma de datos completa. Cada viñeta está contenida en una imagen independiente dentro del producto.

El modo de onda adquiere datos en viñetas de 20 km por 20 km, con una resolución espacial de 5 m por 5 m, cada 100 km a lo largo de la órbita, adquiridos alternativamente en dos ángulos de incidencia diferentes. Las viñetas en el mismo ángulo de incidencia están separadas por 200 km. Las franjas alternan ángulos de incidencia entre el rango cercano y el rango lejano (aproximadamente 23° y 36° respectivamente).

El modo Wave con polarización VV es el modo predeterminado para adquirir datos en mar abierto. El modo WV se adquiere a la misma velocidad de bits que el modo SM; sin embargo, debido a las pequeñas viñetas, la polarización simple y la detección a intervalos de 100 km, el volumen de datos es mucho menor.

2.2.6.2. Los productos SAR de Sentinel-1

Los productos de datos de Copernicus Sentinel-1 se distribuyen en tres niveles de procesamiento:

- Nivel 0
- Nivel 1
 - ETAD - nivel de procesamiento auxiliar
- Nivel 2

Actualmente, todos los productos, con excepción del conjunto de datos de anotación de tiempo extendido (ETAD), se procesan directamente desde el producto de nivel 0.

Cada modo puede generar potencialmente productos SLC de nivel 1, GRD de nivel 1 y Ocean de nivel 2. En el caso del modo WV, los productos de nivel 0 no se difunden actualmente a la comunidad. Los productos se designan en función de su modo de adquisición, tipo de producto y, en el caso del GRD de nivel 1, también de su resolución. La siguiente figura muestra la familia de productos por modo de adquisición.

Los productos de nivel 1 pueden ser de dos tipos: el "*Single Look Complex*" (SLC) o el "*Ground Range Detected*" (GRD), estos últimos disponibles en diferentes niveles de resolución para diferentes modos de adquisición. Si bien la instalación de procesamiento de instrumentos (IPF) tiene la capacidad de generar varios GRD por modo, la producción actual se limita a:

- SM: Alta resolución (IPF puede generar productos de resolución completa, alta y media)
- IW: Alta resolución (IPF puede generar productos de alta y media resolución)
- EW: Resolución media (con IPF capaz de generar productos de resolución alta y media)
- WV: No se produce GRD (IPF puede generar productos de resolución alta y media)

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

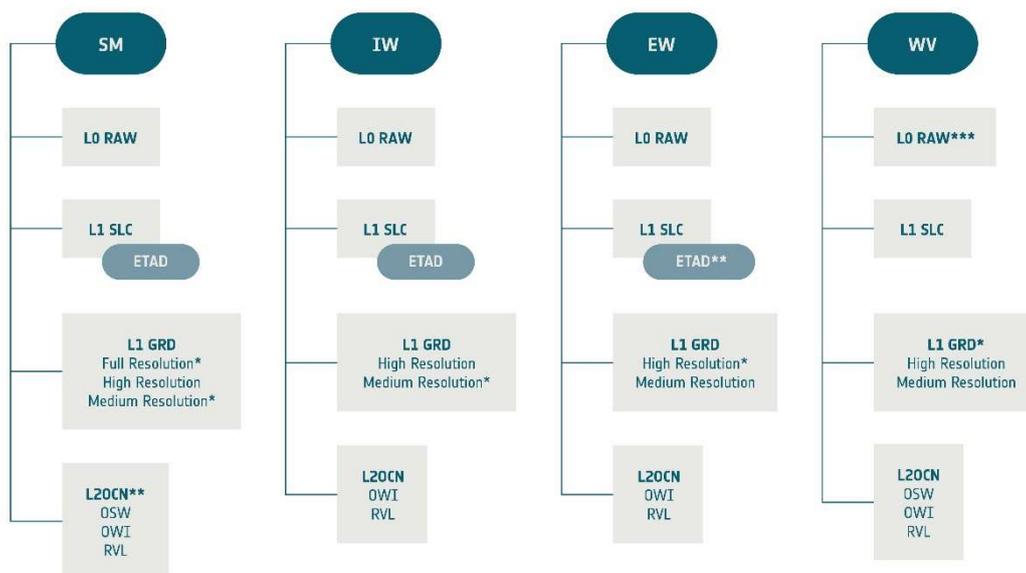


Figura 2.12. Niveles de procesamiento de los productos por modo de adquisición.

El conjunto de datos de anotación de tiempo extendido (ETAD) es un producto auxiliar en capas que proporciona a los usuarios correcciones para mejorar la precisión geométrica de las imágenes SLC Sentinel-1 a niveles de centímetros.

2.2.7. Sentinel-1 y sus aplicaciones ambientales

Como ya se ha dicho, el sensor SAR activo de banda C Sentinel-1 de Copernicus puede observar la superficie de la Tierra en cualquier momento del día o de la noche, independientemente de las condiciones meteorológicas y ambientales. El SAR tiene la ventaja de funcionar en longitudes de onda que no se ven obstaculizadas por la nubosidad o la falta de iluminación.

A diferencia de los sensores ópticos pasivos que requieren la iluminación del sol, un instrumento SAR activo transmite su propia señal de microondas para iluminar la superficie de la Tierra en un ángulo. El SAR transmite activamente señales de microondas hacia la Tierra y recibe una parte de la energía transmitida como retrodispersión desde el suelo. El eco de retrodispersión devuelto de la escena es recibido por la antena del instrumento poco tiempo después en una ubicación ligeramente diferente, mientras el satélite viaja a lo largo de su órbita. La amplitud de brillo de la señal devuelta, junto con su información de fase, se registra para construir una imagen de la escena.

El instrumento SAR proporciona mediciones de retrodispersión de radar influenciadas por la estructura del terreno y la rugosidad de la superficie. Generalmente, cuanto mayor sea la rugosidad o la estructura del terreno, mayor será la retrodispersión. Las superficies rugosas dispersarán la energía y devolverán una cantidad significativa a la antena, lo que dará como resultado una característica brillante. Las superficies planas reflejan la señal, lo que da como resultado una característica oscura. Del mismo modo, los objetivos estructuralmente más complejos, como los bosques, aparecerán más brillantes, ya que la interacción de la señal con las hojas, las ramas y los troncos dará como resultado una mayor proporción de la señal que se transmite de vuelta al sensor.

La constante dieléctrica de los materiales del suelo también influye en las mediciones. En la región de microondas del espectro, la mayoría de los materiales naturales tienen una constante dieléctrica

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

en el rango de 3 a 8 cuando están secos, mientras que el agua tiene una constante dieléctrica de aproximadamente 80. La constante dieléctrica indica la reflectividad y conductividad de los materiales. Por lo tanto, la presencia de humedad en el suelo y la vegetación da como resultado una reflectividad significativa.

Estas propiedades hacen que el SAR sea muy adecuado para diversas aplicaciones, incluidas la geología y la geomorfología, la humedad del suelo, la cobertura terrestre, la oceanografía y las aplicaciones marítimas y, en particular, para aplicaciones que explotan las propiedades polarimétricas e interferométricas del SAR.

2.2.7.1. Polarimetría

Sentinel-1 puede recopilar varias imágenes diferentes de la misma serie de pulsos utilizando su antena para recibir polarizaciones específicas simultáneamente. Sentinel-1 es un sistema SAR de polarización dual con conservación de fase. Puede transmitir una señal en polarización horizontal (H) o vertical (V) y luego recibir en polarizaciones H y V. Los productos de polarización dual de nivel 1 de aspecto único (SLC) contienen valores complejos. Además de la intensidad de retrodispersión que se puede medir a partir de cada polarización individual, la información de fase entre canales permite realizar un análisis mejorado de las propiedades de retrodispersión.

Los objetivos sobre el terreno tienen características de polarización distintivas que reflejan diferentes polarizaciones con diferentes intensidades y convierten una polarización en otra. Por ejemplo, los dispersores de volumen (por ejemplo, el dosel forestal) tienen propiedades de polarización diferentes a las de los dispersores de superficie (por ejemplo, la superficie del mar). Las técnicas polarimétricas, como la descomposición polarimétrica de objetivos (basada en vectores propios, basada en modelos, etc.), permiten la separación de diferentes contribuciones de dispersión y se pueden utilizar para extraer información sobre el proceso de dispersión. Las técnicas de clasificación SAR de doble polarización dedicadas permiten una mejor clasificación de objetivos puntuales y áreas de objetivos distribuidos.

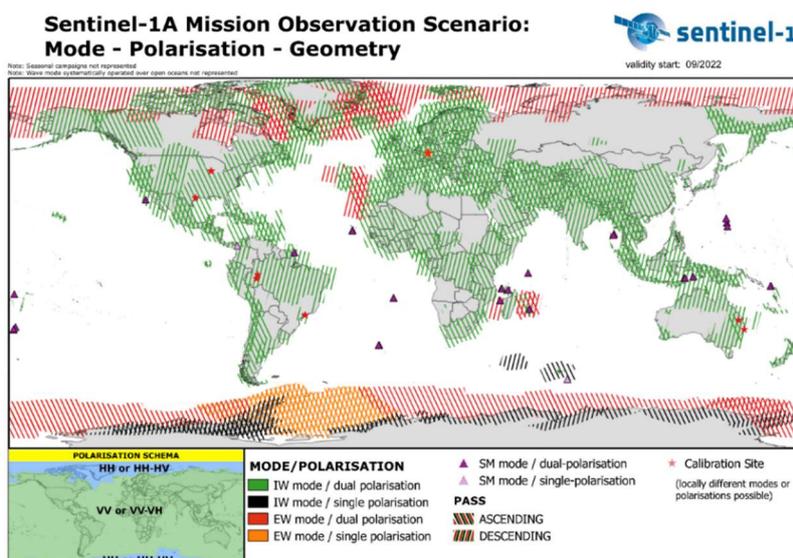


Figura 2.13. Escenario de observación de la misión Sentinel-1A (Modo/Polarización/Geometría). Fuente: ESA.

Con Sentinel-1, se recopilan datos de doble polarización sobre la tierra en todo el mundo, así como sobre zonas costeras prioritarias (Figura 2.12). La ESA pone a disposición el escenario de

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

observación de Sentinel-1. Este escenario proporciona mapas de revisita y cobertura en cada modo de adquisición, incluidos los de doble polarización. La disponibilidad de datos de doble polarización de Sentinel-1 permite configurar aplicaciones globales y rutinarias mediante análisis polarimétrico.

2.2.7.2. Interferometría

Una señal SAR contiene información de amplitud y fase. La amplitud es la fuerza de la respuesta del radar y la fase es la fracción de un ciclo completo de onda sinusoidal (una sola longitud de onda SAR). La fase de la imagen SAR está determinada principalmente por la distancia entre la antena satelital y los objetivos terrestres.

El SAR interferométrico (InSAR) aprovecha la diferencia de fase entre dos observaciones de radar SAR complejas de la misma área, tomadas desde posiciones de sensores ligeramente diferentes, y extrae información de distancia sobre el terreno de la Tierra.

Al combinar la fase de estas dos imágenes después del registro conjunto, se puede generar un interferograma en el que la fase está altamente correlacionada con la topografía del terreno y se pueden mapear los patrones de deformación. Si se elimina de los interferogramas el cambio de fase relacionado con la topografía, la diferencia entre los productos resultantes mostrará los patrones de deformación de la superficie que se produjeron entre las dos fechas de adquisición. Esta metodología se denomina interferometría diferencial (DInSAR).

La interferometría por dispersores persistentes (PSI) es una rama de la interferometría que aprovecha los dispersores puntuales, con una fuerte retrodispersión de radar, durante un largo período de tiempo (años) para proporcionar un historial de fase del objetivo puntual a lo largo del tiempo. Los dispersores persistentes pueden ser pequeñas características, generalmente artificiales, que permanecen muy correlacionadas a lo largo del tiempo.

El DInSAR convencional puede tener limitaciones con respecto a la discriminación entre los efectos del desplazamiento y la firma atmosférica. Las técnicas PSI pueden superar dichas limitaciones relajando las restricciones temporales y de línea base habituales y maximizando el número de interferogramas utilizables, que luego pueden utilizarse para calcular tendencias medias a lo largo del tiempo a partir de un amplio historial de interferogramas. Solo se consideran los objetivos con una coherencia suficientemente alta, lo que da como resultado una densidad de píxeles reducida.

2.2.7.3. Monitoreo del suelo

Silvicultura:

Sentinel-1 desempeña un papel importante en la gestión forestal sostenible, ya que permite detectar talas parciales y totales, clasificar los tipos de bosque, estimar la biomasa y detectar perturbaciones. En el caso del cambio climático, el mapeo de las cicatrices de los incendios forestales puede ser una parte importante del mapeo del historial de carbono de un bosque y desempeña un papel fundamental en la estimación de las emisiones de carbono. Los mapas de cobertura terrestre se pueden utilizar para respaldar la gestión forestal y el monitoreo de la tala ilegal de madera en todo el mundo.

Para esta aplicación, el producto más adecuado es el Interferometric Wide con polarización dual. De hecho, la polarización cruzada VH es más sensible a los cambios en la densidad y la estructura de la vegetación, mientras que la relación de polarización VH/VV es un índice importante para la fenología de la vegetación o el contenido de agua.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Agricultura:

El seguimiento de las condiciones de los cultivos y las propiedades del suelo, así como el mapeo de las actividades agrícolas, ayudan a evaluar el uso de la tierra, predecir las cosechas, monitorear los cambios estacionales y ayudar a implementar políticas para el desarrollo sostenible. Sentinel-1 también se puede utilizar para monitorear los cambios en la producción agrícola y la productividad de los pastos causados por la sequía y para monitorear la disminución de la productividad de la tierra y la degradación del suelo debido al cultivo y pastoreo excesivos y al riego inadecuado.

Los mapas agrícolas permiten proporcionar estimaciones independientes y objetivas de la extensión del cultivo en un país determinado o una temporada de crecimiento, que pueden utilizarse para apoyar los esfuerzos encaminados a garantizar la seguridad alimentaria en zonas vulnerables.

Tanto los productos SLC como GRD se pueden utilizar para el seguimiento de cultivos, según el parámetro de interés. Normalmente, si se prefiere la intensidad del SAR, entonces el GRD es el único producto necesario. Sin embargo, si se necesita más información, se solicitan parámetros polarimétricos, por lo que se debe seleccionar el producto SLC.

Para ambos tipos de productos, se seleccionará la doble polarización, ya que la retrodispersión VH con polarización cruzada es muy sensible a los cambios en la densidad y la estructura de la vegetación, y la relación de polarización VH/VV es sensible a la fenología de la vegetación o al contenido de agua.

Cartografía de la deformación urbana:

El SAR interferométrico puede detectar movimientos de superficie con una precisión de unos pocos milímetros por año y puede proporcionar una herramienta precisa para monitorear el hundimiento del terreno, el daño estructural y la construcción subterránea para mejorar la seguridad y reducir las pérdidas económicas.

2.2.7.4. Vigilancia marítima

Monitoreo del hielo:

Los servicios de cartografía de hielo de alta resolución proporcionan datos sobre la clasificación del hielo y los icebergs a los guardacostas, las armadas y las compañías navieras nacionales, para ayudar a garantizar una navegación segura durante todo el año en las zonas árticas y subárticas cubiertas de hielo. En el caso del hielo marino, se puede determinar información sobre la concentración, extensión, tipo, espesor, albedo y velocidad de deriva del hielo, así como la ubicación, el tamaño y la deriva de los icebergs. Los datos de polarización dual de Sentinel-1 de Copernicus pueden mejorar significativamente la clasificación y discriminación del hielo.

La interacción del SAR con el hielo marino es un fenómeno complejo que depende de

- Parámetros del radar (frecuencia, polarización, ángulo de incidencia)
- Características del hielo (salinidad, rugosidad, espesor, densidad, orientación, inclusiones).
- Propiedades de la capa de nieve suprayacente (contenido de humedad, tamaño del grano, densidad, espesor)

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La retrodispersión del hielo marino no es independiente del ángulo de incidencia y la dependencia cambia para cada tipo de hielo.

La polarización dual (HH y HV) es un estándar para la clasificación operativa del hielo: la polarización cruzada (por ejemplo, HV) es más sensible que la copolarización (por ejemplo, HH).

Seguimiento de barcos:

La vigilancia marítima se puede realizar mediante diferentes metodologías. Una primera opción consiste en sistemas cooperativos en los que los propios buques informan de su identidad y posición. Las tres opciones más habituales son el Sistema de Identificación Automática (AIS), el Sistema de Identificación y Seguimiento de Largo Alcance (LRIT) y el Sistema de Monitoreo de Buques (VMS). Si bien el primero está disponible de forma continua y global, los otros dos no lo están. Otra opción son los sistemas no cooperativos que no requieren la cooperación por parte del buque. Estos sistemas suelen utilizar cámaras y radares ubicados en diversas plataformas (buques, aviones, satélites, etc.).

El sistema de detección de buques de los satélites Sentinel-1 de Copernicus entra en la categoría de no cooperativo y permite detectar buques que no llevan AIS u otro sistema de seguimiento a bordo, como pequeños pesqueros o barcos que se encuentran en la zona de estudio de forma ilegal (pesca ilegal, piratería, etc.). Con Sentinel-1C se introduce una mejora, ya que el nuevo satélite está equipado con la antena de señal AIS a bordo, lo que permite rastrear e identificar los barcos.

Los datos relevantes para la detección de barcos son transmitidos por satélite en tiempo real para su recepción por estaciones terrestres colaborativas locales que apoyan los servicios europeos y nacionales.

Los tipos de productos útiles para la detección de barcos suelen ser EW e IW en L1 GRD, con polarización dual.

Monitoreo de la contaminación por petróleo:

Las aplicaciones de detección de petróleo se utilizan para reunir pruebas de vertidos ilegales, analizar la propagación de los vertidos de petróleo y buscar reservas de petróleo destacando las filtraciones naturales. Las manchas de petróleo son claramente visibles en las imágenes SAR como características oscuras. La mayoría de las manchas de petróleo son causadas por los barcos que vacían la sentina antes de entrar en el puerto. Las detecciones se pueden correlacionar con las transmisiones de información del Sistema de Identificación Automática (AIS) (solo Sentinel-1C) desde los barcos para determinar las fuentes y procesar a los infractores. Los datos relevantes para el monitoreo de vertidos de petróleo son transmitidos por satélite en tiempo real para su recepción por estaciones terrestres colaborativas locales que respaldan los servicios europeos y nacionales.

Asimismo, la detección de filtraciones naturales de petróleo desde el fondo del océano puede proporcionar pistas para la prospección de petróleo.

En este caso es útil utilizar productos IW, EW GRD en polarización dual.

Olas y vientos marinos:

El sistema SAR es sensible a los patrones de rugosidad de la superficie que varían espacialmente y que son causados por los vientos en la superficie del océano. Los productos oceánicos Sentinel-1 de Copernicus, junto con los modelos globales de olas oceánicas, ayudan a determinar la dirección, la longitud de onda y la altura de las olas en los océanos abiertos y ayudan en la

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

predicción meteorológica, el transporte marítimo y las aplicaciones de energía de las olas. Esto es útil para comprender las interacciones entre las olas y las corrientes y para visualizar corrientes oceánicas a gran escala, masas de agua fría/caliente, corrientes de agua costeras y olas internas, mejorando la eficiencia de las aplicaciones de energía de las olas y el transporte marítimo, lo que puede generar beneficios económicos.

El viento superficial del mar (SSW), es decir, la velocidad y la dirección, es una variable climática esencial (ECV) física que contribuye de manera crucial a la caracterización del sistema climático de la Tierra y sus cambios. Las mediciones de SSW pueden ser proporcionadas por varias fuentes diferentes, como estaciones in situ, sensores de microondas activos a bordo del espacio (es decir, dispersómetros y altímetros de radar) y modelos de predicción numérica del tiempo (NWP).

Lamentablemente, las estaciones in situ son costosas y escasas, y no se pueden instalar en zonas de difícil acceso. Se suelen utilizar para la validación in situ de estimaciones de viento derivadas de otras técnicas, como la modelización y otras fuentes. Los dispersómetros satelitales y los altímetros de radar, por otra parte, son adecuados para las observaciones sinópticas y de mesoescala del viento oceánico.

Sin embargo, las principales debilidades de los dispersómetros y altímetros son la falta de datos precisos cerca de la costa y el muestreo temporal. Como consecuencia, las estimaciones del viento a partir de estos sistemas espaciales no son útiles para estudios centrados en procesos cercanos a la costa. Además, los modelos de predicción numérica del tiempo (principalmente globales o a escala de una cuenca marina de la UE) pueden sufrir problemas de precisión y exactitud en áreas costeras marinas, por lo que no serían adecuados para dinámicas costeras de menor escala.

Los sistemas de radar de apertura sintética (SAR), como los de los satélites Sentinel-1, pueden proporcionar mediciones de la velocidad y la dirección del viento en el océano, especialmente en las zonas costeras marinas. En particular, la estimación se deriva de los productos oceánicos de nivel 2 de los componentes Campo de viento oceánico (OWI) y Velocidad radial oceánica (RVL).

La importancia de las recuperaciones de SSW derivadas de SAR se reconoce, tanto a escala global como local, en una amplia gama de aplicaciones como la meteorología marina, la oceanografía, el monitoreo de derrames de petróleo y en vista de la evaluación de recursos eólicos para operaciones de plantas de energía renovable y modelado de dinámica costera.

Las estimaciones del campo eólico también juegan un papel importante en el monitoreo de derrames de petróleo para ayudar a diferenciar derrames reales de aquellos que parecen similares.

2.2.7.5. Gestión de emergencias

Monitoreo de inundaciones:

Más del 75% de los desastres naturales que ocurren en todo el mundo implican inundaciones. La capacidad inherente del SAR para observar durante la nubosidad y las frecuentes visitas de Sentinel-1 lo hacen ideal para el monitoreo de inundaciones. Se puede utilizar para evaluar la extensión de las áreas inundadas y el impacto en pérdidas humanas, económicas y ambientales. Además, los modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución generados a través de los modos interferométricos de Sentinel-1 se pueden utilizar para realizar análisis de escorrentía e inundación en áreas que anteriormente carecían de datos de elevación.

Las superficies de aguas abiertas en calma aparecen planas cuando reciben la radiación SAR de banda C, y la radiación se dispersa lejos del sensor del satélite. En consecuencia, la energía recibida

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

(medida como retrodispersión) es baja y muestra un alto contraste con las superficies terrestres generales. En general, el principio subyacente de los métodos de mapeo de inundaciones basados en SAR es identificar mediciones de baja retrodispersión donde se espera tierra en condiciones normales. Se requieren dos polarizaciones SAR (VV y VH) para permitir la detección de vegetación inundada.

Análisis de terremotos:

InSAR ofrece la capacidad única de producir mapas de deformaciones sísmicas de resolución media y alta. Mediante el monitoreo constante de áreas propensas a terremotos, se pueden descubrir fallas activas y estudiar riesgos potenciales. El modo de franja ancha interferométrica facilitará el monitoreo de terremotos de escala muy grande. Dado que la información de fase es necesaria para las imágenes interferométricas, el tipo de producto SLC es el que se debe considerar.

Monitoreo de deslizamientos de tierra y volcanes:

La interferometría SAR puede localizar áreas propensas a deslizamientos de tierra y monitorear la deformación de la superficie para proporcionar una alerta temprana de posibles desastres y monitorear la infraestructura crítica. La elevación previa a la erupción y la contracción volcánica posterior a la erupción se pueden monitorear con técnicas interferométricas similares y pueden complementar las redes in situ de los observatorios de volcanes. El monitoreo InSAR puede ayudar a detectar los primeros signos de niveles crecientes de actividad volcánica, terremotos previos y otros precursores que pueden indicar erupciones.

2.3. Metodología

2.3.1. Métodos de análisis: coherencia

En el presente trabajo hemos utilizado **imágenes de coherencia**. Se trata de un producto derivado de las técnicas de interferometría SAR, en las que se utilizan dos imágenes radar SLC de la misma zona (bien tomadas simultáneamente desde la misma plataforma o desde distintos satélites o en dos pasadas diferentes del mismo), que no son adquiridas desde el mismo punto del espacio, pues las repetidas órbitas no llegan a coincidir exactamente, como se muestra en la siguiente figura.

La distancia determinada por la separación que existe entre las órbitas puede variar desde varios metros hasta centenares o miles y se denomina **línea de base**, Bp. Este parámetro no debe ser superior a 300 m para que estas técnicas puedan aplicarse.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

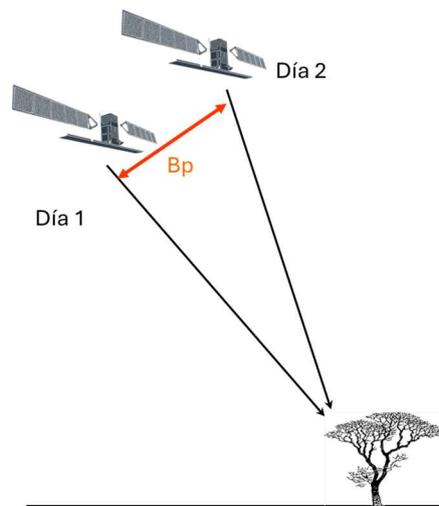


Figura 2.14. Esquema de la adquisición de un par de imágenes. SAR SLC para aplicaciones interferométricas. Fuente: Elaboración propia.

Cuando la línea de base se aproxima a cero, no se produce ninguna diferencia de reflectividad por variación de ángulo de incidencia. En este caso, la retrodispersión del primer día es idéntica a la del segundo día y, por tanto, el valor de la coherencia es 1.

A partir de la línea de base crítica la fase interferométrica es puro ruido y, en este caso, para líneas de base superiores a la crítica, el valor de la coherencia es 0.

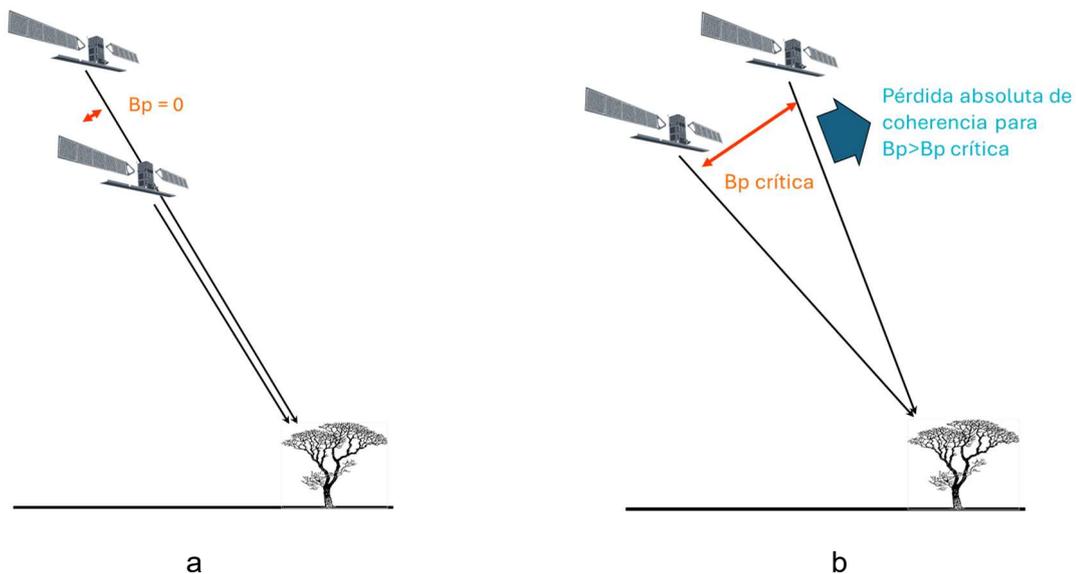


Figura 2.15. Los valores de la coherencia se sitúan entre 1, cuando la retrodispersión de ambas imágenes es idéntica, (a) y 0, cuando la fase interferométrica de ambas imágenes es puro ruido, (b). Fuente: Elaboración propia.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La imagen de coherencia resultado de un par de imágenes Sentinel-1 SLC, P_1 y P_2 , se define con la siguiente expresión:

$$Coh = \frac{E[P_1 \cdot P_2^*]}{\sqrt{E[|P_1|^2] \cdot E[|P_2|^2]}}$$

Donde P_1 es un píxel de la imagen SAR tomada en t_1 y P_2 es el mismo píxel, pero en la imagen tomada en t_2 . E es el operador **esperanza matemática**, que en la práctica corresponde al cálculo de la media sobre un área alrededor del píxel de interés, quedándose con el valor absoluto del resultado final.

Los valores obtenidos de coherencia son traducidos a imagen, cuyos píxeles varían entre 0 (mala coherencia, color negro) y 1 (buena coherencia, color blanco).

Esta es la propiedad que permite detectar cambios. Si el valor de coherencia es cercano a 1 aparece en blanco en la imagen (núcleos urbanos, trenes y áreas estables iguales en ambas imágenes). Sin embargo, si es cercano a 0, se habrán producido algunos cambios y aparecerán como áreas negras en la imagen (cultivos, bosques, cambios en el uso del suelo, áreas quemadas por un incendio, ...). Esto se muestra en la Figura 2.16.

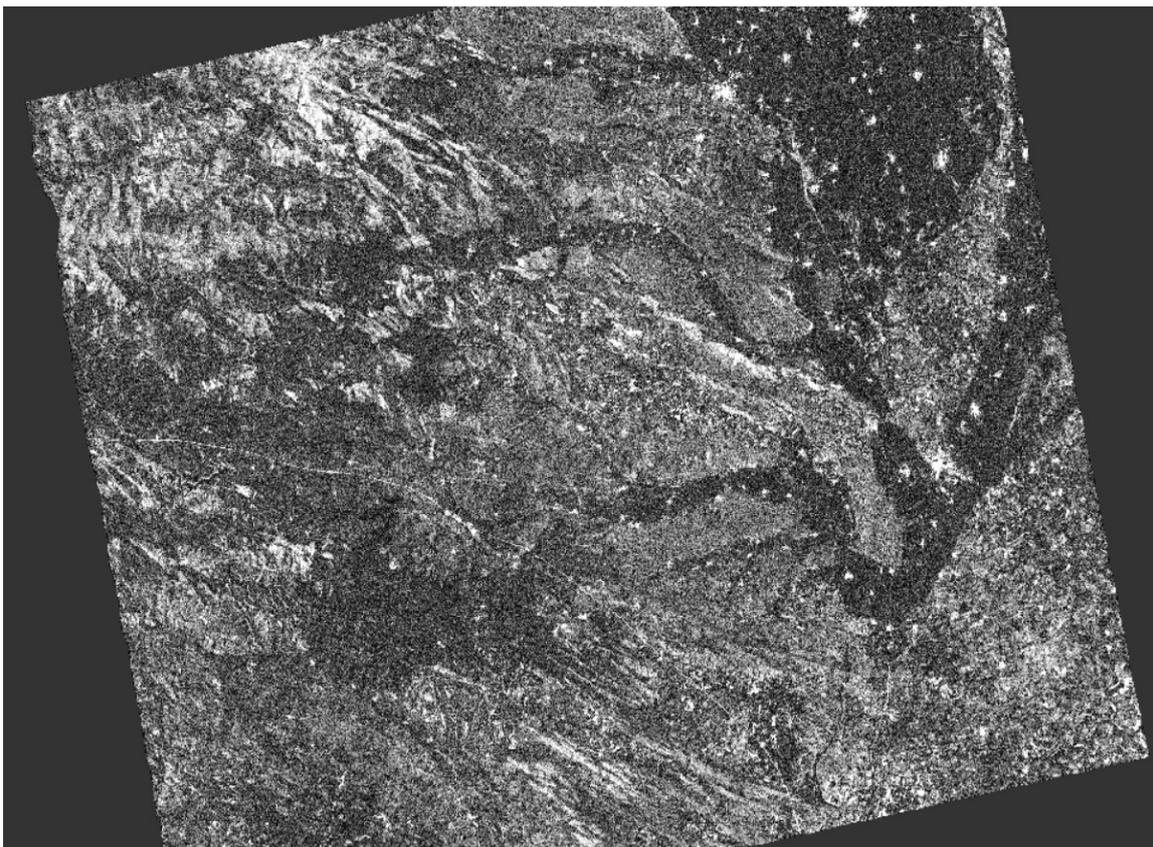


Figura 2.16. Imagen de coherencia entre las fechas 25 de mayo y el 12 de julio de 2022, usadas en el estudio. Fuente: Imagen procesada con SNAP.

2.3.2. Descripción de la metodología

Como ya se ha mencionado, el estudio se ha centrado en los incendios que se desarrollaron en la Sierra de la Culebra, en el noroeste de la provincia de Zamora, durante el verano de 2022. Entre junio y agosto tuvieron lugar dos grandes incendios. El primero de los incendios, se inició el 15 de junio entre los términos de Ferreras de Arriba y Sarracín de Aliste, siendo controlado hacia el 24 de junio. El segundo, se inició el 17 de julio en el término de Losacio, siendo finalmente controlado el 14 de agosto. La siguiente figura muestra la cronología de ambos incendios, así como las fechas de las 3 imágenes utilizadas en el estudio.

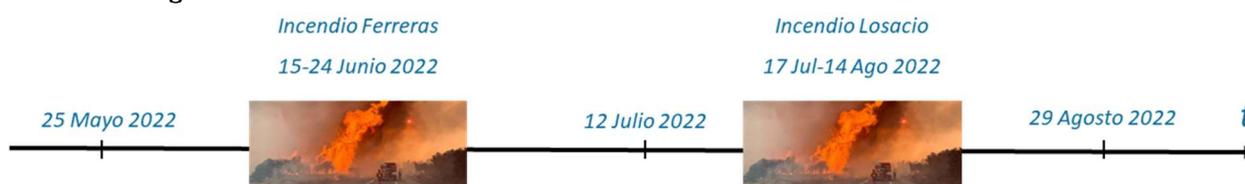


Figura 2.17. Cronología de los incendios de la Sierra de la Culebra (Zamora) de 2022 y fechas de las 3 imágenes utilizadas.

La causa de ambos incendios fue un fenómeno de tormenta seca. Las llamas se propagaron a lo largo de los términos de 52 localidades de las comarcas de Aliste, La Carballeda, Tábara, Tierra de Alba y Benavente y los Valles.

En el incendio de Ferreras, 29 670 hectáreas se vieron afectadas. En el incendio de Losacio, la superficie afectada ascendió a 35 960 hectáreas. Se trata de los dos mayores incendios de la historia de Castilla y León, y dos de los más devastadores en España desde que se tienen registros.

Hemos utilizado 3 imágenes SLC de Sentinel-1A, adquiridas en diferentes fechas y todas ellas pertenecientes al mismo “track”. En el siguiente cuadro se muestran las principales características de estas imágenes.

Cuadro 2.2. Características de las imágenes utilizadas en el estudio.

Nombre	Tipo	Fecha	Track	Órbita
S1A_IW_SLC__1SDV_20220525T182001_20220525T182028_043371_052DE0_1F8C	SLC	25/05/2022	74	43371
S1A_IW_SLC__1SDV_20220712T182005_20220712T182032_044071_0542B4_6AB4	SLC	12/07/2022	74	44071
S1A_IW_SLC__1SDV_20220829T182008_20220829T182034_044771_0558A5_356C	SLC	29/08/2022	74	44771

El procesado realizado con estas imágenes se ha realizado con el software gratuito de la ESA: SNAP. La metodología seguida para la cadena de procesado de las imágenes se resume en el siguiente diagrama.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

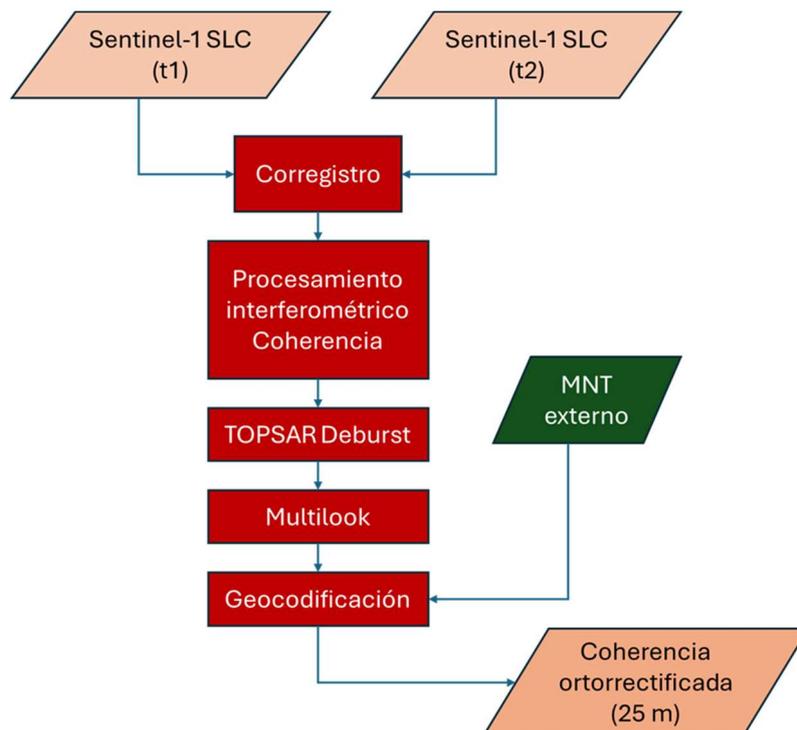


Figura 2.18. Cadena de procesado interferométrico para cada par de imágenes Sentinel-1.

El primer elemento de la cadena es el **corregistro de las imágenes**. Éste consiste en la alineación entre los píxeles de las imágenes, una considerada maestra y la otra esclava. Así, los píxeles de las imágenes esclavas se hacen coincidir exactamente con los de la maestra, representando un área idéntica.

Una vez realizado el corregistro, el siguiente paso es el cálculo de la **coherencia** entre ambas imágenes mediante la ecuación matemática que se dio en el apartado anterior. Se han generado 3 productos de coherencia según se muestran en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Pares de imágenes Sentinel-1 para generar los productos de coherencia y su correspondiente línea base perpendicular.

Producto	Fechas	Línea base perpendicular, Bp (m)
Coh1	25/05/2022 y 12/07/2022	61.7
Coh2	12/07/2022 y 29/08/2022	5.95
Coh3	25/05/2022 y 29/08/2022	66.4

A continuación, es necesario corregir defectos propios del modo de adquisición de las imágenes por parte del satélite Sentinel-1, en ráfagas o “bursts”.

Al aplicar el operador “**multilook**”, en el siguiente paso, reducimos el ruido de moteado inherente que aparece originalmente en las imágenes SAR y obtenemos píxeles cuadrados. Como resultado de la aplicación de este operador, la resolución de la imagen se modifica desde los 10 m originales a 25 m, que será la resolución final de la imagen de coherencia.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Finalmente, con la **geocodificación** transformamos las coordenadas imagen de los píxeles en coordenadas geográficas generando una ortoimagen de coherencia como producto de salida. En este proceso utilizamos como modelo del terreno el SRTM de 30 m.

2.4. Resultados

Como ya se dijo en los apartados anteriores, el incendio de Ferreras se desarrolló entre el 15 y el 24 de junio y el de Losacio entre el 17 de julio y el 14 de agosto, por ello generamos los siguientes productos de coherencia (ver cuadro 3) con el fin de detectar cambios:

- Coherencia 1 (Coh1): combinación de las imágenes SLC del 25 de mayo y del 12 de julio.
- Coherencia 2 (Coh2): combinación de las imágenes SLC del 12 de julio y del 29 de agosto.
- Coherencia 3 (Coh3): combinación de las imágenes SLC del 25 de mayo y del 29 de agosto.

Los productos de coherencia obtenidos se muestran en la figura 18. El análisis visual preliminar de cada uno de estos productos nos muestra aquellas zonas donde la coherencia está más degradada pudiendo evaluar qué par de imágenes aporta la máxima información.

Las imágenes SAR presentan una fuerte componente textural, debido al ruido propio de este tipo de sensor, el denominado ruido speckle. Como resultado, la detección automática de los bordes del incendio es limitada y la interpretación visual es muy difícil con muchos valores que presentan la misma respuesta radiométrica dentro y fuera del área quemada.

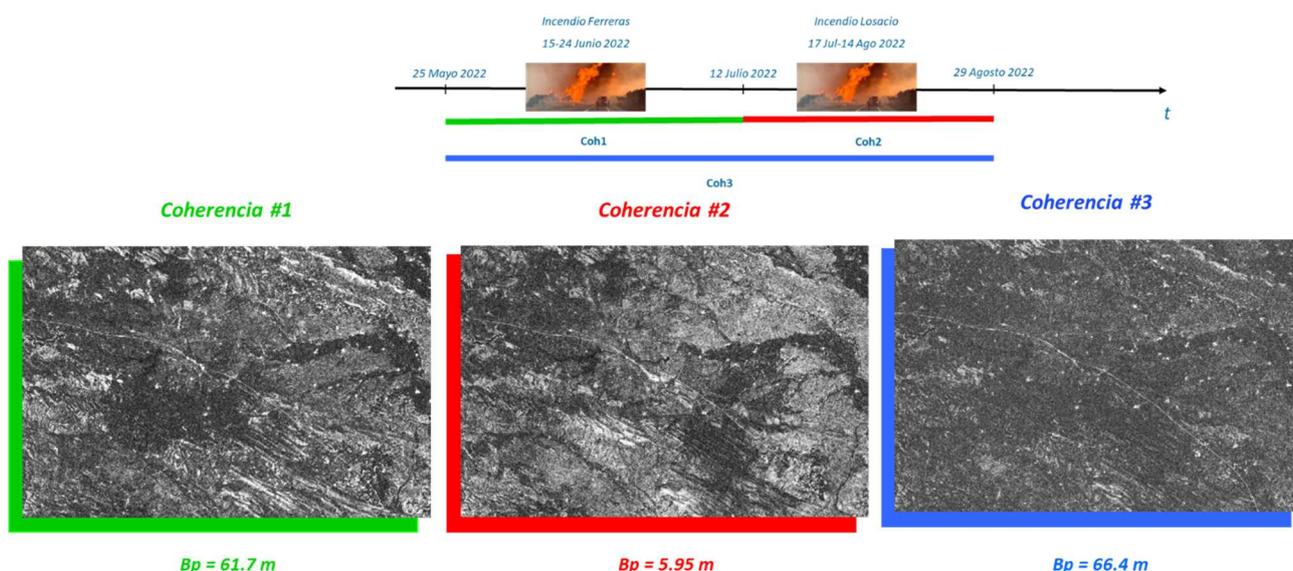


Figura 2.19. Productos de coherencia obtenidos a partir de las imágenes Sentinel-1.

La figura siguiente muestra una combinación multitemporal en RGB realizada a partir de las tres imágenes de coherencia (Coh2 al canal rojo, Coh1 al canal verde y Coh3 al canal azul). Esta combinación es la que permite un mejor análisis visual con el fin de fijar los límites exteriores del área quemada. En esta imagen, los colores rojos se deben a la alta coherencia presente en el área quemada por el incendio de Ferreras, en la imagen Coh2. La línea amarilla muestra el perímetro del

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

área quemada en el incendio de Ferreras obtenida a partir de la imagen óptica correspondiente al satélite Sentinel-2.

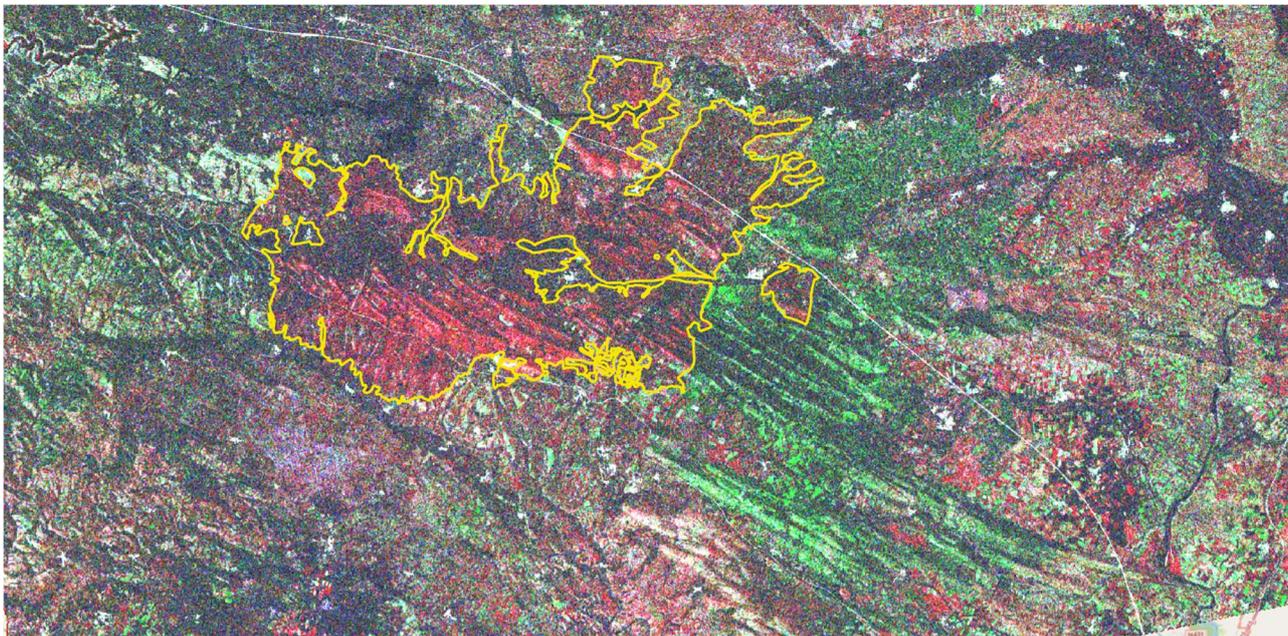


Figura 2.20. Composición multitemporal en RGB. La línea amarilla muestra el perímetro del área quemada en el primer incendio del mes de junio.

El color verde intenso se debe a la alta coherencia presente en el área quemada por el incendio de Losacio, en la imagen Coh1. En la otra imagen de coherencia, Coh 3, obtenida a partir de las imágenes antes y después de ambos incendios forestales, la coherencia es baja en el área quemada total. En la figura siguiente se muestra el perímetro del área quemada (línea amarilla) en el incendio de Losacio obtenido a partir de la imagen óptica correspondiente al satélite Sentinel-2.

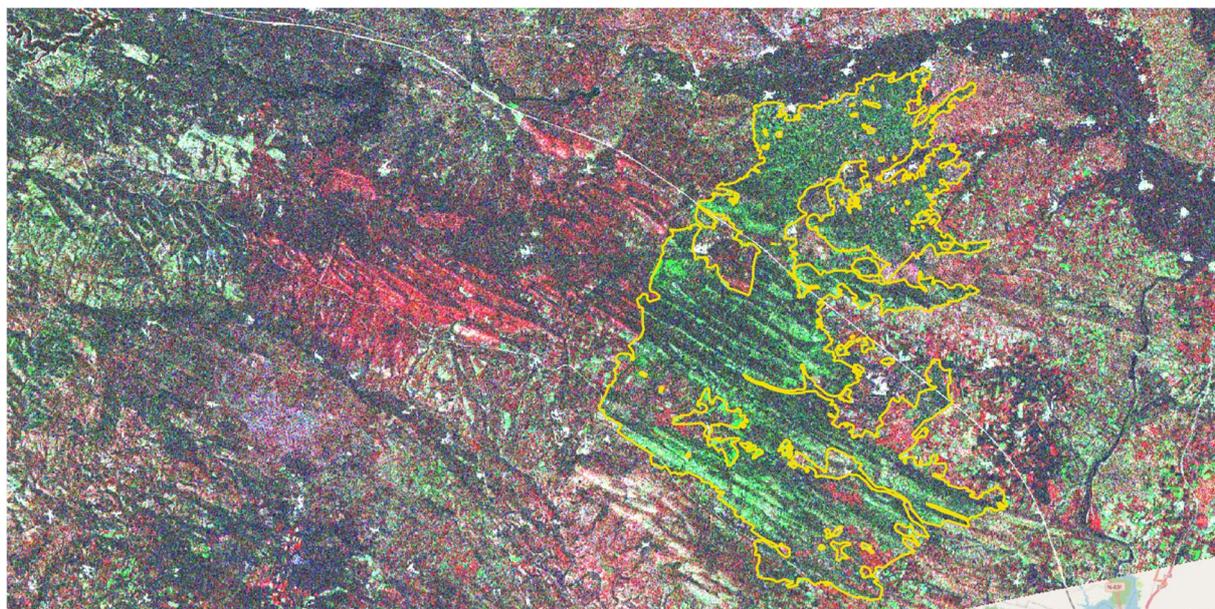


Figura 2.21. Composición multitemporal en RGB. La línea amarilla muestra el perímetro del área quemada en el segundo incendio de julio y agosto.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En el caso del incendio de Ferreras, el número de hectáreas afectadas, según los datos proporcionados por Sentinel-2 (imagen de 28 de junio de 2022), dentro del Programa Copernicus, fue de 27242 ha con algún grado de severidad y un perímetro que englobaría 29670 ha. En el caso del incendio de Losacio, las primeras estimaciones arrojaron una superficie afectada de entre 32000 y 34000 ha. De acuerdo con los datos proporcionados por Sentinel-2 (19 de agosto de 2022), dentro del Programa Copernicus, el área afectada es de 31473,1 ha, con un perímetro que englobaría 35960 ha.

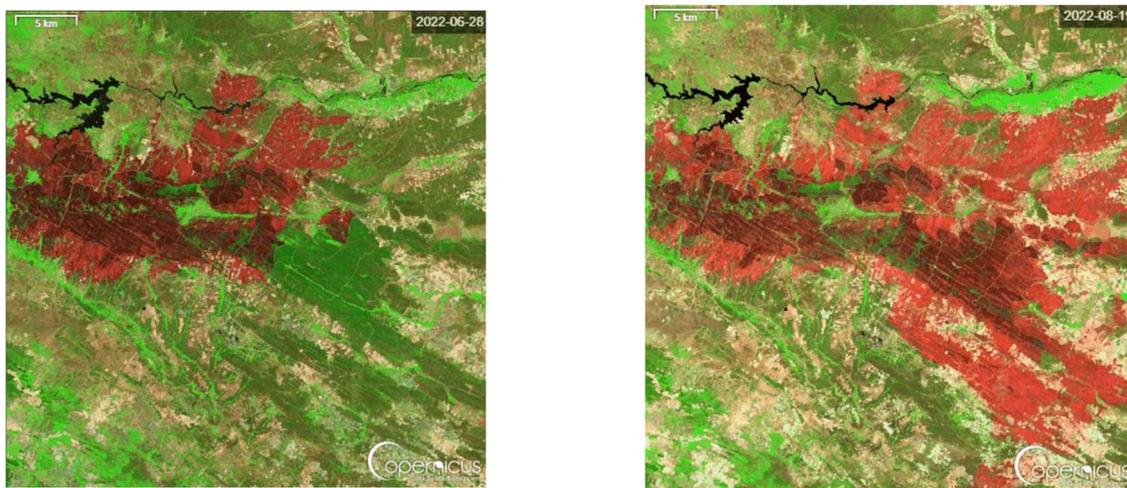


Figura 2.22. Imágenes Sentinel-2 en las que se observa el área afectada por ambos incendios, Ferreras (izquierda) y Losacio (derecha). Fuente: Copernicus.

2.5. Conclusiones

- Con una imagen de coherencia multitemporal se detectan los cambios ocurridos en una escena, respecto de las distintas fechas, y es posible conocer la causa principal con cierta fidelidad.
- Con este tipo de metodología, se requiere un mapa de usos del suelo reciente para conocer el número y tipo de clases afectadas.
- La clasificación automática no delimita eficientemente el perímetro del área quemada, aunque ayuda a conocer los lugares donde se han podido producir cambios naturales o no naturales.
- La disponibilidad de imágenes, especialmente en lo que respecta a la línea base perpendicular, es una limitación.
- El mejor análisis con las imágenes de coherencia multitemporal es el visual.
- Este tipo de metodología no puede funcionar sola, sino como complemento de otra. Sin embargo, si no se dispone de datos ópticos, puede funcionar como una buena primera aproximación.

2.6. Referencias

- [2.1] Copernicus EMS - Mapping. (2022). EMSR580: Forest Fire in Sierra Culebra, Spain. [online] Disponible en: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR580> [Acceso 13/11/2024].
- [2.2] Copernicus EMS - Mapping. (2022). EMSR602: Wildfires in Castilla y Leon, Spain. [online] Disponible en: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR602> [Acceso 13/11/2024].
- [2.3] Moreno, V.; García, F.; Alonso-Jiménez, C.; Carrasco, D.; Mediavilla, F.; González-Alonso, F.; Vázquez, A.; Cuevas, J.M.; Casanova, J.L.; Calle, A. *Application of ERS-2 imagery and interferometric techniques to assess forest fires in the North East of Spain*, in A decade of trans-European remote sensing cooperation: proceedings of the 20th EARSeL Symposium, Dresden, Germany, 14-16 June, 2000 ", Buchroithner, Manfred Ed.

3. Inventarios Forestales continuos a escala nacional basados en Sensores Remotos

José Luís Tomé, Jose Antonio Navarro, Jorge Olivar,
Stefano Arellano y Santiago Martín-Alcón
Agresta Sociedad Cooperativa. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º. 28012 Madrid*

** jltome@agresta.org*

Resumen

FORESTMAP es una iniciativa europea liderada por Agresta, que ha buscado expandir la tecnología española de monitorización de bosques mediante sensores remotos a varios países europeos. Esta tecnología aprovecha datos LiDAR, fotogramétricos y satelitales para realizar inventarios forestales dinámicos, ofreciendo una solución tecnológica avanzada para la gestión de los bosques. A través de experiencias piloto en países como Alemania, Eslovenia, Finlandia, Francia, Italia y Portugal, el proyecto ha demostrado la viabilidad técnica y el potencial comercial de esta tecnología para el sector forestal europeo. Hoy en día aspiramos a ser la primera plataforma de inventario forestal basada en sensores remotos con cobertura nacional en España, para proporcionar un sistema interactivo y dinámico de gestión forestal.

3.1. Introducción

España es un país privilegiado en cuanto a la disponibilidad de datos abiertos para la monitorización de ecosistemas forestales. Tanto es así, que según el informe publicado por la unión europea en cuanto a madurez de datos abiertos de 2022 ocupaba el séptimo puesto de entre los 35 países europeos analizados.

Esta disponibilidad ha revolucionado en los últimos quince años la tecnología de monitoreo forestal. El acceso universal a imágenes satelitales, LiDAR y datos geoespaciales ha posibilitado la democratización de la citada tecnología pasando de ser algo reservado a grandes empresas e investigadores a un campo donde las empresas con base tecnológica como Agresta hemos podido desarrollar tecnologías propias para poner en valor la información capturada con medios públicos y devolver a la sociedad un valor añadido a través de productos de monitorización forestal que están destinados a responder a algunos de los principales retos actuales de la sociedad.

Este acceso facilita la detección temprana de deforestación, seguimiento de cambios en la cobertura vegetal y evaluación de biomasa, cuestiones esenciales para la gestión sostenible y la conservación de los bosques. Además, empodera a las comunidades y gobiernos locales con herramientas para planificar mejor las actividades de uso del suelo, combatir el cambio climático y proteger la biodiversidad, mejorando así la toma de decisiones basada en evidencias y fomentando la innovación en tecnologías de monitoreo ambiental.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La presente comunicación pretende ejemplificar, a través de la historia de FORESTMAP, cómo ha ido evolucionando la utilización de datos abiertos para inventario forestal en España a través de los últimos quince años, y cómo las empresas forestales españolas hemos pasado de desconocer la tecnología a estar compitiendo de igual a igual con los sectores forestales más avanzados de Europa, gracias a una política que ha permitido el desarrollo de un tejido empresarial muy tecnificado vinculado a la utilización de datos abiertos.

España cuenta con una amplia disponibilidad de datos LiDAR de acceso libre, lo que facilita el estudio de nuestros ecosistemas forestales. A fecha del presente congreso estará prácticamente completa la tercera cobertura de nuestro país, lo que supone que contamos con LiDAR multitemporal a través de los últimos quince años con un enorme potencial a la hora de estudiar los ecosistemas forestales. Sin embargo, si bien tenemos disponibles varias coberturas, estas no han sido obtenidas exactamente en las mismas condiciones (fase fenológica, modelo de sensor, entre otros), habiendo diferencia no solo entre distintos vuelos, sino también dentro de un mismo vuelo cuando se prolongan en el tiempo. Trabajar con datos en grandes superficies o LiDAR multitemporal requiere conocer cuáles sus principales limitaciones, así como los procedimientos para poder comparar los resultados analizados de una manera coherente. El presente artículo pretende dar unas pautas generales orientadas a que los usuarios de los datos puedan tomar las adecuadas precauciones de uso de los mismos, así como poner sobre la mesa la necesidad de que la ciencia forestal española siga estudiando la transferibilidad espacial y temporal de los modelos LiDAR de cara que se pueda exprimir todo el potencial de los mismos.

3.2. Datos abiertos

Cuando hablamos de inventario forestal basado en sensores remotos, hay tres fuentes de datos básicas que nos van a permitir monitorizar las masas forestales: los datos de campo, los datos LiDAR y los datos satelitales.

En primer lugar, y aunque parezca poco intuitivo cuando hablamos del uso de sensores remotos, lo más importante es el dato de verdad terreno, es decir, el dato de campo. En ese sentido, España de nuevo es un país privilegiado ya que contamos con el Inventario Nacional Forestal (INF). El INF es una herramienta esencial para la evaluación de los recursos forestales del país, que ahora mismo está bajo la tutela del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Este inventario se lleva a cabo aproximadamente cada 10 años en toda la geografía española, utilizando una malla sistemática de 1 km cuadrado, asegurando así una cobertura representativa y detallada del territorio. Actualmente se están completando los trabajos de campo del cuarto ciclo del inventario forestal en la comunidad autónoma de Andalucía, con lo que se cierra este cuarto ciclo que permite analizar cómo han evolucionado los bosques españoles en los últimos 50 años. Las parcelas del inventario forestal nacional incluyen información respecto a la composición, la estructura y salud de los bosques, incluyendo información sobre biomasa, biodiversidad y capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales. Esto supone una enorme base de datos forestales que podemos utilizar como datos verdad terreno para combinarlos con datos de sensores remotos y desarrollar algoritmos que nos permitan monitorizar estos parámetros forestales en continuo en todo

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

el territorio. Hasta aproximadamente la mitad del IFN4, el posicionamiento de estas parcelas se realizaba con GPS de baja precisión, lo que suponía un limitante para poder combinar de manera exacta los datos de campo con los datos de sensores remotos. Es a partir de la irrupción de este tipo de tecnologías cuando los responsables del IFN deciden mejorar el posicionamiento de las parcelas incorporando GPS de mayor precisión a partir del inventario de Extremadura y Canarias, lo que acaba de poner en valor el potencial de esta enorme base de datos abierta para su uso en inventario forestal.

En segundo lugar, tendríamos que hablar de los datos [LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea](#) (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La tecnología LiDAR, acrónimo de "*Light Detecting and Ranging*", implica la utilización de un sensor laser escáner para hacer mediciones del terreno. En el 2008 el PNOA empieza a hacer las primeras pruebas de lo que finalmente sería una primera cobertura LiDAR Nacional (2008-2015) volada con una densidad de 0,5 pulsos/m² cuyo objeto principal era generar unos modelos digitales del terreno de gran precisión destinados a la generación de cartografías de zonas inundables. La decisión del IGN de poner estos datos en abiertos a través del [centro de descargas de información geográfica](#) (CNIG), supone un antes y un después para la puesta en valor de los datos que hoy día tienen múltiples utilidades en los sectores de ingeniería, comunicaciones, cartográficas, medio ambientales, aeronáuticas, hidrográficas, catastrales en zonas rústicas y urbanas, arqueológicas y por su puesto agrícolas y forestales. Tanto es así que el PNOA ha pasado de la idea de una única cobertura nacional a la ejecución de un programa cíclico con una periodicidad aproximada de 6 años. Hoy día ya se ha finalizado la segunda cobertura (2015-2021) con un promedio de 1 pulso/m² y estamos en plena ejecución de la tercera cobertura nacional prevista para el periodo (2022-2025) en la que se aumentado la densidad de vuelo hasta 5 pulsos/m². Pronto dispondremos de 3 coberturas LiDAR, lo que abre la posibilidad a trabajar con LIDAR Multitemporal permitiendo analizar las masas forestales desde un punto de vista dinámico.

La tercera pieza fundamental para entender los avances tecnológicos del inventario forestal basado en sensores remotos es la disponibilidad de datos satelitales abiertos de media resolución. En este sentido, hay dos constelaciones de satélite que tienen una importancia trascendental, Landsat y Copernicus.

Los satélites Landsat, contruidos y operados por Estados unidos para la observación de la tierra, llevan operando desde 1972 equipados con sensores de teledetección multispectral. La apertura del archivo Landsat en 2008 fue in hito trascendental que ha permitido a los investigadores de todo el mundo trabajar colaborativamente con una serie histórica de imágenes satelitales que hoy tiene más de 50 años. La puesta a disposición de la comunidad científica de esta enorme serie temporal ha permitido multiplicar las sinergias de estos usuarios y sus aplicaciones en la monitorización de todo tipo de ecosistemas, suponiendo una transición entre el trabajo con imágenes individuales y los actuales trabajos basados en compuestos y series de imágenes satelitales, capaces de generar productos sobre grandes áreas (Wulder et al, 2022). El lanzamiento de Landsat 9 en el 2021 y la planificación de su misión sucesora Landsat-Next prevista para finales de 2030 o principios de 2031 ponen de relieve el apoyo sostenido al programa, garantizando la continuidad de la serie de datos más larga de la que disponemos para el estudio de los bosques con una resolución de 30x30 m y una revisita de 16 días hasta entre Landsat 5 y Landsat 8 que se ha incrementado a 8 días en Landsat 9.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Por su parte, la constelación europea **Copernicus**, gestionada por la Comisión Europea en colaboración con la ESA, es un ambicioso programa de observación de la Tierra que proporciona datos precisos y oportunos para monitorear el medio ambiente y garantizar la seguridad civil. Está compuesta por una serie de satélites Sentinel, que contienen todo tipo de sensores, diseñados para diferentes aspectos del monitoreo ambiental y terrestre. Copernicus ha sido concebida desde el principio con una política de datos abiertos, lo que está impulsando la investigación, la política ambiental y la innovación, haciendo de Copernicus una piedra angular en la observación global y la respuesta climática. A nivel de inventario forestal se está trabajando fundamentalmente con dos constelaciones de satélites. Sentinel 2, que integra dos satélites multispectrales de resolución espacial máxima de 10 m y resolución temporal de 5 días, que llevan operando de manera conjunta desde 2017. Por otro lado, para ciertas aplicaciones, especialmente en situaciones donde la cobertura de nubes puede ser un problema, Copernicus dispone de la constelación Sentinel 1 que consta de dos satélites que embarcan un radar en banda C con revisita cada 6 días cuando están operativos los dos. La continuidad de ambas constelaciones está garantizada dentro del programa Copernicus, por lo que Sentinel 2 es hoy día la herramienta en abierto que tenemos con mayor resolución espacial y temporal para analizar nuestros ecosistemas a presente y futuro.

Para sacarle el máximo potencial a cada una de estas fuentes de datos, las últimas metodologías de inventario forestal trabajan combinándolas de manera de que cada una de ellas aporte al resultado final sus mayores virtudes, tal como se puede apreciar en la Figura 3.1.

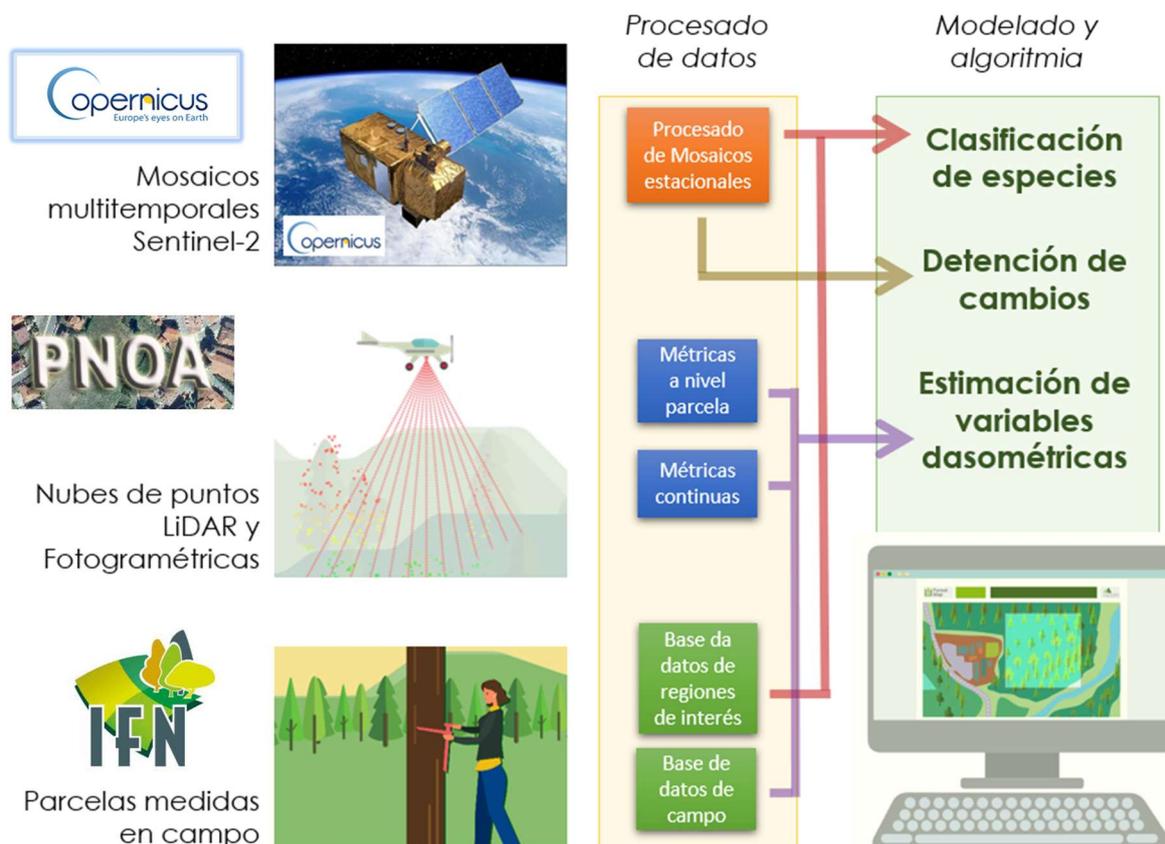


Figura 3.1. Combinación de datos abiertos para la obtención de sensores remotos.

Fuente: Agresta S. COOP.

3.3. FORESTMAP, un sueño convertido en un proyecto a escala país

La tecnología LIDAR llega a España a finales de la primera década de los 2000 importada por Blom, una empresa noruega especializada en adquisición, procesado y modelado de información geomática. Por aquella época el equipo de I+D de Agresta apostaba por incorporar estas nuevas tecnologías al mercado y se embarcó en un proyecto financiado por el [Centro para el desarrollo tecnológico industrial](#) (CDTI), con objeto de desarrollar una metodología para la individualización de árboles a partir de nubes de puntos LIDAR en vuelos específicos (2009-2011).

El proyecto fue un éxito para Agresta tecnológicamente hablando, pero sin embargo fue un fracaso a nivel de negocio, ya que las previsiones de la empresa pasaban porque los inventarios de gran parte de las ordenaciones forestales previstas para la segunda década del siglo XXI se abordarían con vuelos específicos LIDAR, chocaron con un riesgo imprevisto. A partir de 2010 el impacto de la crisis de Lehman Brothers en la economía del sector público español supuso un enorme recorte del gasto público, rompiendo de raíz las oportunidades que habíamos vislumbrado para esta tecnología.

Sin embargo, el conocimiento que habíamos atesorado durante la ejecución del proyecto nos lleva a estudiar la posibilidad de usar los datos LiDAR de baja resolución (0,5 pulsos/m²) de primera cobertura para analizar las masas forestales españolas. Por aquel entonces el estado de arte establecía que densidades de menos de 2 pulsos/m² eran insuficientes para abordar inventarios forestales con LiDAR, por lo que iniciamos una serie de experimentos para comprobar su verdadero potencial en este sentido. Paralelamente, investigadores como Eduardo Gonzalez Ferreira publican los primeros artículos contrastando nuestras observaciones (Gonzalez Ferreira et al, 2012) contribuyendo a refrendar nuestras hipótesis y transferir la tecnología a las empresas pioneras.

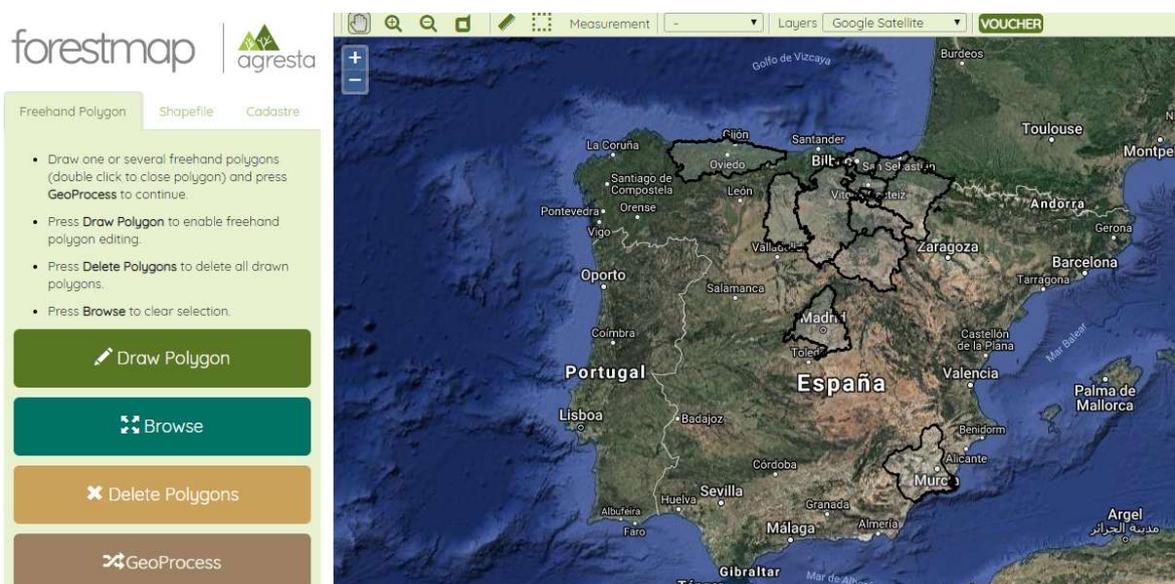


Figura 3.2. Interfaz gráfica de la primera versión de ForestMAP.

Fuente: Agresta S. COOP.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La futura disponibilidad de una cobertura LIDAR completa, que en aquel entonces estaba en curso, junto con la evolución del conocimiento científico en cuanto al potencial de los datos LIDAR de baja densidad, son el germen del primer FORESTMAP, una herramienta online, destinada a hacer inventario forestal continuo en tiempo real.

De cara al desarrollo de la citada idea, desde Agresta empezamos a trabajar en el desarrollo de una tecnología para inventario online con apoyo de una convocatoria europea de [EEA-GRANTS](#) financiada por el CDTI, trabajando del 2014 al 2015, para lanzar a finales de 2016 la [primera versión de FORESTMAP](#), una plataforma de venta de inventario forestal online basada en datos abiertos (1ª cobertura LiDAR, más de 1.000 parcelas de inventario forestal propias medidas por Agresta y parcelas del IFN4) con cobertura en 10 provincias españolas. Esta primera plataforma utilizaba modelos de regresión paramétricos no lineales e incorporaba informes de validación independiente de los modelos utilizados a través del sesgo y el error cuadrático medio.

Más allá de su capacidad como herramienta de inventario Forestal, esta aplicación fue la primera plataforma e-commerce que permitía realizar inventarios forestales LiDAR de forma completamente automatizada. El usuario podría definir el producto deseado y la plataforma calcula en tiempo real el precio del producto definido, y si finalmente el usuario decidía comprar y realizar el pago, la plataforma genera el producto y facilita su descarga, suponiendo un cambio de paradigma sobre el modelo de venta de producto de inventario tradicional, que venía siendo a través de un servicio concreto a cliente final.



Figura 3.3. Esquema de arquitectura y funcionamiento de la aplicación desarrollada.

Fuente: Agresta S. COOP.

Toda la plataforma estaba basada en tecnologías de código abierto, los datos cartográficos eran almacenados en el sistema gestor de base de datos Postgres gracias al uso de PostGIS (extensión para añadir soporte de objetos geográficos) y como motor de mapas para el frontend y se utiliza la librería Javascript de Open Layers (Tomé et al, 2017).

Entre 2017 y 2019 aparecieron los primeros productos de inventario a escala regional en Castilla la Mancha (Blanco et al, 2017), Extremadura y La Rioja, promovidos por las comunidades autónomas y desarrollados por empresas tecnológicas como Tecnosylva, Föra Forest Technologies o la propia Agresta liderando el [Grupo Operativo Forest LIDARIOJA](#) (Tomé et al, 2020). Estos desarrollos son la prueba de como una política de datos abiertos fomenta el avance de la ciencia y de las empresas contribuyendo a un avance exponencial de la tecnología aplicada.

Por nuestra parte, desde Agresta éramos conscientes de nuestras capacidades a nivel nacional. El siguiente paso lógico era dar un salto de calidad y analizar si teníamos la capacidad de poner en

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

valor esta tecnología a escala europea. Por otro lado, la tecnología había avanzado mucho, siendo necesario actualizar tanto nuestro sistema de modelado incorporando técnicas de inteligencia artificial, más concretamente machine learnig, como nuestro software de venta, ofreciendo servicios dinámicos de análisis de datos a través de dashboard más atractivos y acordes al momento tecnológico actual.

Con objeto de abordar estos retos, de 2019 a 2022 Agresta emprende el proyecto: "[Quick and cost-effective integrated web platform for forest Inventories](#)", financiado por la Unión Europea en el marco del instrumento Pyme (H2020) con el Grant agreement ID: 858664. Este proyecto nos enfrenta directamente a actualizar tecnológicamente nuestro sistema, exportándolo a zonas piloto en 7 países europeos con distintos grados de tecnificación: Alemania, Eslovenia, España, Francia, Finlandia, Italia y Portugal. Durante el desarrollo del proyecto, desde Agresta tenemos la oportunidad de conocer de primera mano la situación de los sectores forestales otros seis países con distintos grados de tecnificación en cuanto a tecnología de inventario LiDAR, desde países como Portugal o Francia donde apenas había en ese momento conocimiento a nivel empresas, hasta Finlandia que sin duda es uno de los líderes a nivel mundial en cuanto a innovación tecnológica aplicada a monitorización forestal.

Esta [segunda versión de ForestMAP](#) (Tomé et al, 2022) a nivel europeo combina ya datos satelitales aplicados a la detección de perturbaciones y la clasificación de especies con datos LiDAR o Fotogramétricos de cara a caracterizar las existencias forestales del bosque. A nivel técnico los resultados resultan muy exitosos, pudiendo competir a nivel de precisión con los resultados de inventarios similares en la propia Finlandia. Pero además ForesMAP supone un avance cualitativo a una mera plataforma de inventario Forestal incorporando módulos de gestión forestal combustible forestal y flujos de carbono, que complementan la información de inventario y serán el embrión de futuros módulos destinados a la evaluación de beneficios ecosistémicos de los bosques, dando un paso en pro de un sistema de monitorización más holístico para entender los ecosistemas forestales.

Hoy día el sistema permite que cualquier usuario seleccione una parcela dada y lance una petición al servidor de cara a realizar el pedido. El citado pedido se ejecuta de forma inmediata y ejecuta una rodalización en virtud de los distintos estratos de inventario y las tipologías de bosque presentes en la zona de estudio. También incluye un análisis de los posibles cambios usando datos de Sentinel 2, un cálculo de las existencias forestales, una propuesta de gestión forestal detectando si son necesarias claras o cortas en función de los itinerarios selvícolas recomendados en la zona de estudio, una recomendación en cuanto a la posibilidad de mecanización de los trabajos selvícolas recomendados, un análisis de los combustibles forestales presentes en el área de estudio y su peligrosidad asociada y por ultimo una evaluación de las existencias de carbono incluida la detección de perdidas recientes.

Además, el usuario puede calibrar los resultados obtenidos a nivel de la zona de estudio para aquellos casos en los que el valor de la madera recomiende una mayor precisión, incorporando información de parcelas de campo medidas en la zona de manera automática, dando así respuesta incluso a aquellos usuarios que necesitan las mejores precisiones como pueden ser los casos de tasaciones de madera.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

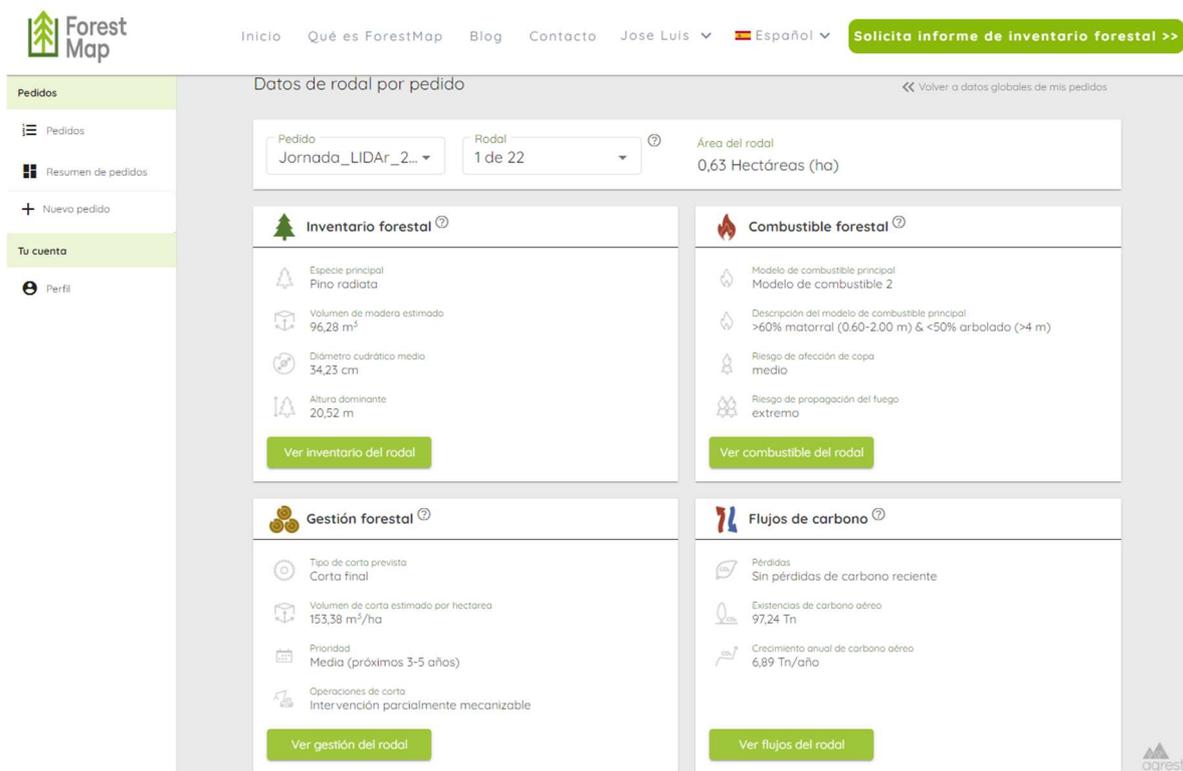


Figura 3.4. Dashboard con los 4 módulos de información que proporciona ForestMAP.

Fuente: Agresta S. COOP

Con la plataforma notablemente mejorada gracias al impulso del proyecto europeo, desde Agresta nos hemos propuesto poner en valor toda esta tecnología, en primer lugar, para nuestros propios técnicos en consultoría forestal, que trabajan de la mano con propietarios privados de terrenos forestales, para en un segundo paso sacar el mercado una plataforma que opere a nivel nacional que ofrecer a cualquier usuario potencial de la misma.

Para ello, se hizo un primer impulso desarrollando el proyecto [ForEStoolbox](#), junto con la cooperativa Errez, financiado por el Plan de Impulso a la Economía Social para la Generación de un Tejido Económico, Inclusivo y Sostenible, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, en concreto por el Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) Economía Social y de los Cuidados. ForEStoolbox es una plataforma multiherramienta con módulos interoperables para afrontar los principales retos de la consultoría forestal, desde el trabajo de campo hasta la gestión para propietarios forestales. La plataforma persigue facilitar la evaluación y cuantificación de los recursos forestales a través de un sistema integral, desde la toma de datos en campo hasta la producción de informes, incluido un módulo de gestión orientado a los propietarios privados. Gracias a la financiación hemos podido ampliar la cobertura de ForestMAP a las provincias de Álava, Gipuzkoa, Bizkaia, Soria, Burgos, Segovia, Palencia, Madrid y Jaén, como un primer paso hacia una cobertura nacional.

Hoy en día Agresta se encuentra en el proceso de dar un nuevo salto cualitativo a la plataforma que todavía hoy nos ofrece una visión relativamente estática de las masas forestales analizadas. Para ello estamos desarrollando una importante mejora de la plataforma que va a pasar a llamarse

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

FORESTMAP-IA. El objetivo principal de esta actualización es realizar un avance sustancial en la monitorización y gestión de las masas forestales españolas. FORESTMAP-IA aspira a ser la primera plataforma de inventario forestal basada en sensores remotos con cobertura nacional en España, integrando la inteligencia artificial y modelos de lenguaje para proporcionar un sistema interactivo y dinámico de gestión forestal. Una vez finalizado el proyecto en 2025, esta plataforma permitirá no solo el monitoreo continuo de los bosques, sino también la detección y actualización en tiempo real de los cambios y perturbaciones en las masas forestales, ofreciendo una herramienta valiosa para la planificación y gestión forestal sostenible.

La experiencia adquirida y los resultados previos serán fundamentales para el desarrollo de FORESTMAP-IA. La capacidad de combinar datos de diversas fuentes y tecnologías para monitorizar de manera efectiva las masas forestales en diferentes contextos europeos demuestra la versatilidad y potencial de esta tecnología para ser aplicada a escala nacional en España. Además, la integración de modelos de lenguaje de inteligencia artificial facilitará la interacción de los usuarios menos tecnológicos con la plataforma, mejorando la accesibilidad y comprensión de los datos forestales, y permitiendo un análisis más detallado y personalizado de las necesidades específicas de cada usuario.

En definitiva, FORESTMAP-IA pretende ser un proyecto transformador, que demuestra la madurez tecnológica de las empresas españolas demostrando como las políticas de datos abiertos pueden llegar a redundar en herramientas que contribuyen a mejorar el bienestar de la ciudadanía, generando un desarrollo económico sostenible y mejorando la calidad de vida en las comunidades rurales dependientes de los bosques. A fecha de redacción del presente artículo, desde Agresta estamos embarcados en la implementación de este proyecto y confiados en que sea seleccionados entre los financiables por el PERTE-2024.

3.4. Conclusiones

- La implementación de políticas de datos abiertos a nivel europeo y particularmente en España ha facilitado el desarrollo de tecnologías avanzadas de monitorización forestal, permitiendo a empresas nacionales competir a nivel europeo y generar soluciones efectivas para la gestión sostenible de los recursos forestales.
- La disponibilidad de coberturas LiDAR multitemporales en España permite empezar a trabajar con un análisis dinámico de los ecosistemas forestales, facilitando la planificación y ejecución de prácticas forestales sostenibles a nivel nacional.
- En los próximos años empezarán a surgir herramientas dinámicas de evaluación de ecosistemas forestales. FORESTMAP-IA demuestra cómo la integración de datos satelitales, LiDAR y datos de campo pueden conformar una herramienta avanzada de inventario forestal con capacidad para monitorizar, en tiempo real, cambios y perturbaciones en los ecosistemas forestales.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- La incorporación de modelos de lenguaje e inteligencia artificial en FORESTMAP-IA promete una mejora en la accesibilidad y precisión de los datos forestales, permitiendo una interacción más intuitiva y una personalización de los resultados de acuerdo con las necesidades específicas de cada usuario.
- El verdadero reto que tenemos por delante es que estas tecnologías de inventario forestal como FORESTMAP-IA, contribuyan realmente al desarrollo económico y la sostenibilidad de las comunidades rurales, mejorando la toma de decisiones y la gestión del territorio en áreas dependientes de los recursos forestales.
- Herramientas como FORESTMAP-IA suponen una democratización del acceso a la tecnología forestal, pudiendo empoderar a pequeñas empresas, administraciones locales y usuarios en general, democratizando el acceso a tecnologías de gestión forestal avanzada.
- Las experiencias piloto en otros países europeos demuestran la capacidad de las empresas españolas para liderar proyectos internacionales de tecnología forestal, consolidando su papel como referentes en el sector.
- Herramientas de monitorización como FORESTMAP-IA pueden desempeñar un papel clave en la identificación de estrategias de conservación de la biodiversidad y de captura de carbono, ofreciendo soluciones que pongan el valor la cuantificación de servicios ecosistémicos de las masas forestales.

3.5. Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen la política de datos abiertos del Inventario Nacional Forestal, el Plan de Ortofotografía Aérea PNOA, Copernicus y Landsat,

El artículo se ha redactado en el marco del proyecto: Inteligencia artificial al servicio del usuario en la primera plataforma de inventario forestal a escala nacional. FORESTMAP-IA, presentado al Plan Integral de Impulso de la Economía Social 2024.



La participación en el artículo de Stéfano Arellano Pérez ha sido financiada por la ayuda PTQ2021-012150 otorgada por el MCIN/AEI / 10.13039/501100011033

3.6. Bibliografía

- [3.1] Blanco, J.; Rodríguez, F.; Martínez, S., Martínez, A.A.; Roldán A., Díez, F.J.; Lizarralde, I.; Cabrera, M. 2017. Generación de un inventario forestal regional y una cartografía de modelos de combustible para Castilla- La Mancha. 7º Congreso Forestal Español. Plasencia. [7CFE01-113](#).
- [3.2] González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., & Miranda, D. (2012). Estimation of stand variables in Pinus radiata D. Don plantations using different LiDAR pulse densities. Forestry, 85, 281-292.
- [3.3] Publications Office of the European Union, Assen, M., Cecconi, G., Carsaniga, G., Lincklaen Arriëns, E. et al., Open data maturity report 2022, Publications Office of the European Union, 2022, <https://data.europa.eu/doi/10.2830/70973>.
- [3.4] Tomé Morán, J.L.; García Castillo, D; Escamochero Osa, I.; Esteban Cava, J. Fernandez Landa A. (2017). Forestmap: cómo generar un servicio de inventario forestal en internet a partir de un prototipo de I+D. Foresta 67: 40-47.
- [3.5] Tomé Morán, J.L.; Soto Rey, M.; Crespo Pinillos, O; García Castillo, D. (2020). Forest LidaRioja, actualización y puesta en valor de la información forestal obtenida a partir de sensores remotos. Montes. Nº 140: 29-34.
- [3.6] Tomé Morán, J.L.; García Castillo, D.; Olivar, J.; Ranz Vega, P., Martín Alcón, S. (2022). FMAP tecnología española monitorizando los bosques europeos. 8º Congreso Forestal Español. Lleida. [8CFE-1057](#).
- [3.7] Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., ... Hansen, M.C., ..., Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. Remote Sensing of Environment, 280, 113195

4. Contribución española al Consorcio Europeo de Infraestructuras de Investigación ACTRIS ERIC

Adolfo Comerón*, en nombre de ACTRIS-España**

* CommSensLab, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord UPC, edif. D3, c/. Jordi Girona 1-3. 08034 Barcelona. Email: comeron@tsc.upc.edu

** ACTRIS-España está formada por grupos de investigación de las siguientes instituciones: AEMET, BSC – CNS, CEAM, CIEMAT, IDAEA-CSIC, IISTA-Universidad de Granada, INTA, Universidad de Valladolid, Universidad Miguel Hernández, Universitat de València, Universitat Politècnica de Catalunya, Universidade da Coruña

4.1. Introducción

ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace gases Research InfraStructure, <https://www.actris.eu/>) es una infraestructura distribuida de investigación paneuropea que produce datos de alta calidad e información sobre constituyentes atmosféricos de vida corta (aerosoles, nubes y gases traza reactivos), así como sobre sus interacciones mutuas y sobre los procesos que originan su variabilidad, a partir de observaciones en atmósferas naturales y controladas.

ACTRIS complementa el conjunto de infraestructuras de investigación atmosféricas europeas, estudiando constituyentes no abordados por otras (ICOS ERIC, dedicada a gases de efecto invernadero, EISCAT-3D, que explora la dinámica de las capas altas de la atmósfera) o abordados parcialmente por otros métodos (IAGOS estudia aerosoles y gases traza mediante sensores in situ, instalados en aviones comerciales, a lo largo de sus rutas de navegación) (Fig. 4.1, [4.1]). ACTRIS estudia aerosoles, nubes y gases traza desde el nivel de tierra hasta la baja estratosfera mediante una combinación de instrumentos in situ y de teledetección. ACTRIS contribuye al conocimiento de la influencia de estos constituyentes atmosféricos en todas las escalas temporales, abarcando desde episodios de corta duración que afectan a la calidad ambiental o a la seguridad aérea (contaminación, irrupciones de polvo sahariano, cenizas volcánicas...), pasando por los efectos en la meteorología (formación de aerosoles e influencia e interacción de éstos con las nubes), hasta la evolución del clima, gracias a las largas series temporales de medidas de los constituyentes observados.

ACTRIS une infraestructuras y experiencia desarrolladas a lo largo de muchos años, promovidas por una combinación de proyectos nacionales y europeos. Tras una etapa de preparación en aspectos administrativos, científicos y operativos, respaldada por proyectos europeos de preparación e implementación, ACTRIS se estableció bajo la figura legal de un Consorcio de

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Infraestructuras de Investigación Europeas (ERIC por sus siglas en inglés) en abril de 2023 (Diario Oficial de la Unión Europea de 3 de mayo de 2023, BOE de 16 de mayo de 2023) en el que participan como fundadores 17 estados miembro de la Unión Europea, entre ellos España.

4.2. Organización de ACTRIS

ACTRIS se vertebra alrededor de unas llamadas instalaciones centrales, constituidas por una Oficina Central (Head Office), encargada de la dirección general de la infraestructura, un Centro de Datos (Data Centre), responsable de almacenar y poner a disposición de los usuarios los datos recogidos por las plataformas de observación y exploratorias de ACTRIS, así como de proporcionar servicios digitales para un fácil acceso y análisis de los datos, y Centros Temáticos (Topical Centres) con la misión de asegurar la armonización de los procedimientos de medida y el control de calidad de la instrumentación y de los datos obtenidos.

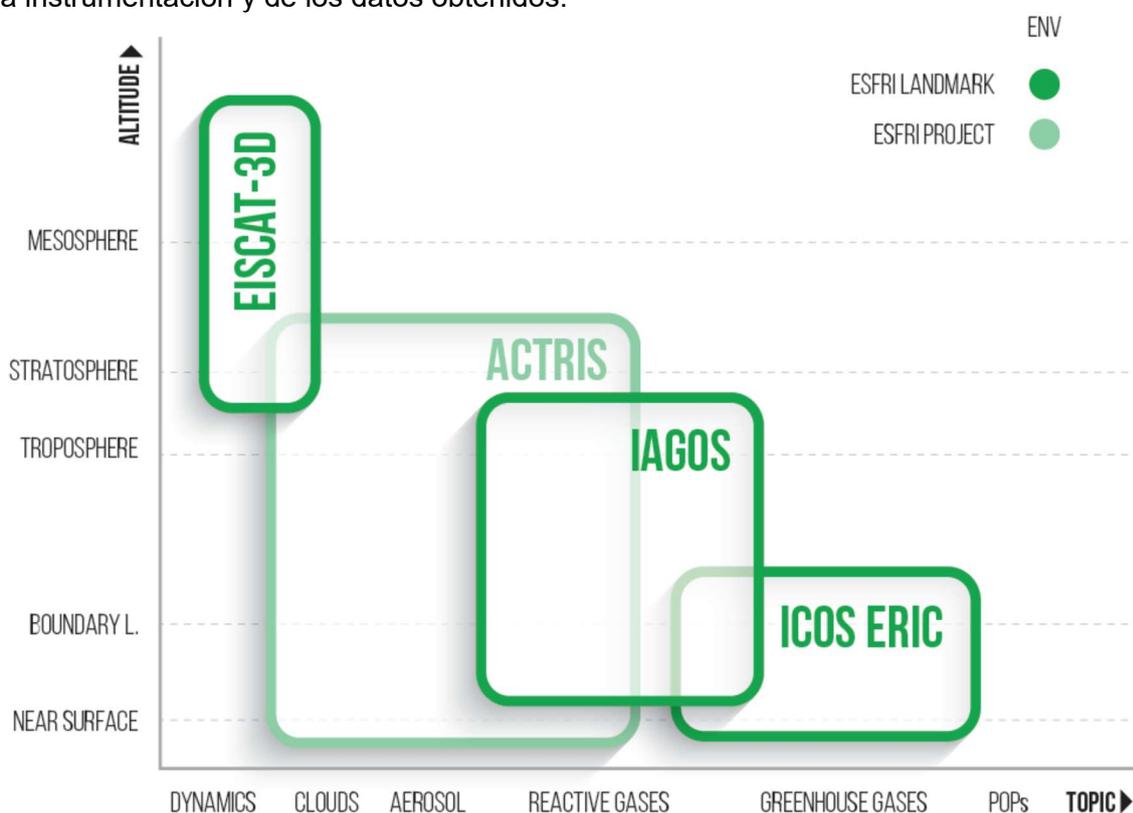


Figura 4.1. Vista esquemática del dominio que ocupa ACTRIS en el contexto de las infraestructuras de investigación atmosféricas europeas.

Como todos los constituyentes atmosféricos objeto de ACTRIS se pueden medir mediante técnicas in situ o mediante teledetección, existen seis Centros Temáticos, dedicados a cada una de las combinaciones constituyente/técnica de medida.

Las llamadas instalaciones nacionales, desplegadas en los países miembros de ACTRIS, y algunas fuera de las fronteras de éstos, son las encargadas de recoger los datos de las variables respectivas

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

según los requisitos instrumentales establecidos durante los proyectos previos al establecimiento del ERIC y de acuerdo con los procedimientos de control de calidad fijados por los Centros Temáticos.

En las instalaciones nacionales se distinguen a su vez plataformas de observación, dedicadas a la obtención de datos continuos o casi continuos de las variables relacionadas con los distintos constituyentes objeto de ACTRIS en atmósfera libre, y plataformas exploratorias. Los datos obtenidos por las primeras permiten detectar tendencias en las distribuciones de los constituyentes observados sobre largos períodos de tiempo y, además, por la casi continuidad de sus medidas, capturan también episodios de corta duración y potencial alto impacto en la calidad del aire o la seguridad del tráfico aéreo. Las plataformas exploratorias pueden ser laboratorios o cámaras de simulación atmosférica donde se diseñan experimentos en atmósferas controladas, o plataformas móviles, dotadas en general de instrumentación para varios componentes atmosféricos, que pueden desplazarse para realizar campañas de medidas específicas en entornos o zonas climáticas de interés. Algunas plataformas de observación, y prácticamente todas las exploratorias, ofrecen acceso físico o remoto a equipos científicos que lo soliciten. En todos los casos, los datos, tanto de medidas regulares como de resultados de experimentos o campañas, son transmitidos al Centro de Datos (<https://data.actris.eu/>) para su conservación y puesta a disposición de la comunidad científica en general, siguiendo los principios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) promovidos por la Comisión Europea.

Para garantizar la calidad y utilidad de los datos, las estaciones ACTRIS deben satisfacer unos requisitos instrumentales y unas capacidades técnicas mínimas para cada tipo de observación (aerosoles, nubes o gases traza por técnicas in situ o teledetección). El Cuadro 4.1 presenta de manera muy esquemática y sucinta dichos requisitos para las plataformas de observación. Puede encontrarse información más detallada, justificación y requisitos óptimos en la referencia [4.2].

	Teledetección	In situ
Aerosol	<ul style="list-style-type: none"> • Lidar con capacidad de medir coeficientes de extinción y retrodispersión independientemente y despolarización • Fotómetro solar/lunar 	<ul style="list-style-type: none"> • MPSS (espectrómetro de tamaño de partículas por movilidad) • Nefelómetro integrador multilongitud de onda • Fotómetro de absorción • +....
Nubes	<ul style="list-style-type: none"> • Radar de nubes con capacidad de efecto Doppler • Ceilómetro (lidar de baja potencia) • Radiómetro de microondas de frecuencia dual 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitor de volumen de partículas,... • + ...
Gases traza	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) • Instrumento de espectroscopía óptica de absorción multieje (MAXDOAS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Detección de quimiolumiscencia (CLD), cavity-enhanced phase shift (CAPS), Quantum cascade laser system (QCLAS)(NOx) • Cromatografía de gases (compuestos orgánicos volátiles)

Cuadro 4.1. Requisitos instrumentales y técnicos mínimos para que instalación nacional pueda ser admitida como estación ACTRIS de un tipo (constituyente/técnica de medida) dado.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La distribución geográfica de las distintas instalaciones nacionales puede encontrarse en <https://www.actris.eu/facilities/national-facilities>.

4.3. Contribución española a ACTRIS

Los organismos españoles relacionados con ACTRIS se encuentran organizadas, desde abril de 2021, en una Unidad Mixta de Investigación (Joint Research Unit en inglés; BOE de 27 de abril de 2021).

España contribuye a ACTRIS mediante unidades de instalaciones centrales e instalaciones nacionales. En cuanto a las instalaciones centrales, AEMET, a través de su Centro de Investigaciones Atmosféricas de Izaña, y el Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid constituyen sendas unidades, CARS-ASP-AEMET y CARS-ASP-UVA respectivamente, del Centro para Teledetección de Aerosoles (CARS por sus siglas en inglés), dedicadas a la calibración de los fotómetros solares de la parte europea de la red AERONET (establecida por la NASA y la Universidad de Lille); dichos fotómetros son un requisito para las instalaciones nacionales de teledetección de aerosoles de ACTRIS (ver Cuadro 4.1).

El Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), es parte de la unidad de Detección de Datos, Acceso Virtual y Servicios (Data Discovery, Virtual Access and Services, DVAS) del Centro de Datos de ACTRIS, con la tarea específica de generar productos, llamados de nivel 3, que combinen datos generados por ACTRIS con datos de calidad procedentes de otras organizaciones e infraestructuras atmosféricas europeas y mundiales.

Entidad	Tipo de instalación nacional	Estación
AEMET – Centro de Investigaciones Atmosféricas de Izaña	Aerosol in situ	Izaña
CSIC-Instituto de Diagnóstico ambiental y Estudios del Agua	Aerosol in situ	Montsec
	Aerosol in situ	Montseny
	Aerosol in situ	Barcelona
Teledetección de aerosol		
CIEMAT – Departamento de Medio Ambiente	Aerosol in situ	Madrid
	Teledetección de aerosol	
INTA – Area de Investigación e Instrumentación Atmosférica	Aerosol in situ	Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo
Instituto de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía – Universidad de Granada	Aerosol in situ	Granada
	Teledetección de aerosol	
	Teledetección de nubes	

Cuadro 4.2. Instalaciones nacionales españolas de ACTRIS

En cuanto a instalaciones nacionales, España aporta actualmente las siguientes plataformas de observación: 7 instalaciones de medidas de aerosoles in situ, 3 de medidas de aerosoles por

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

teledetección (lidar), y una de teledetección de nubes (radar), agrupadas en 7 estaciones, según se detalla en el Cuadro 4.2. Asimismo, mediante la Fundación de la Comunitat Valenciana Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), España aporta la plataforma exploratoria constituida por la cámara de simulación atmosférica EUPHORE, ubicada en Paterna y equipada para caracterizar aerosoles y gases traza mediante técnicas in situ en condiciones atmosféricas controladas.

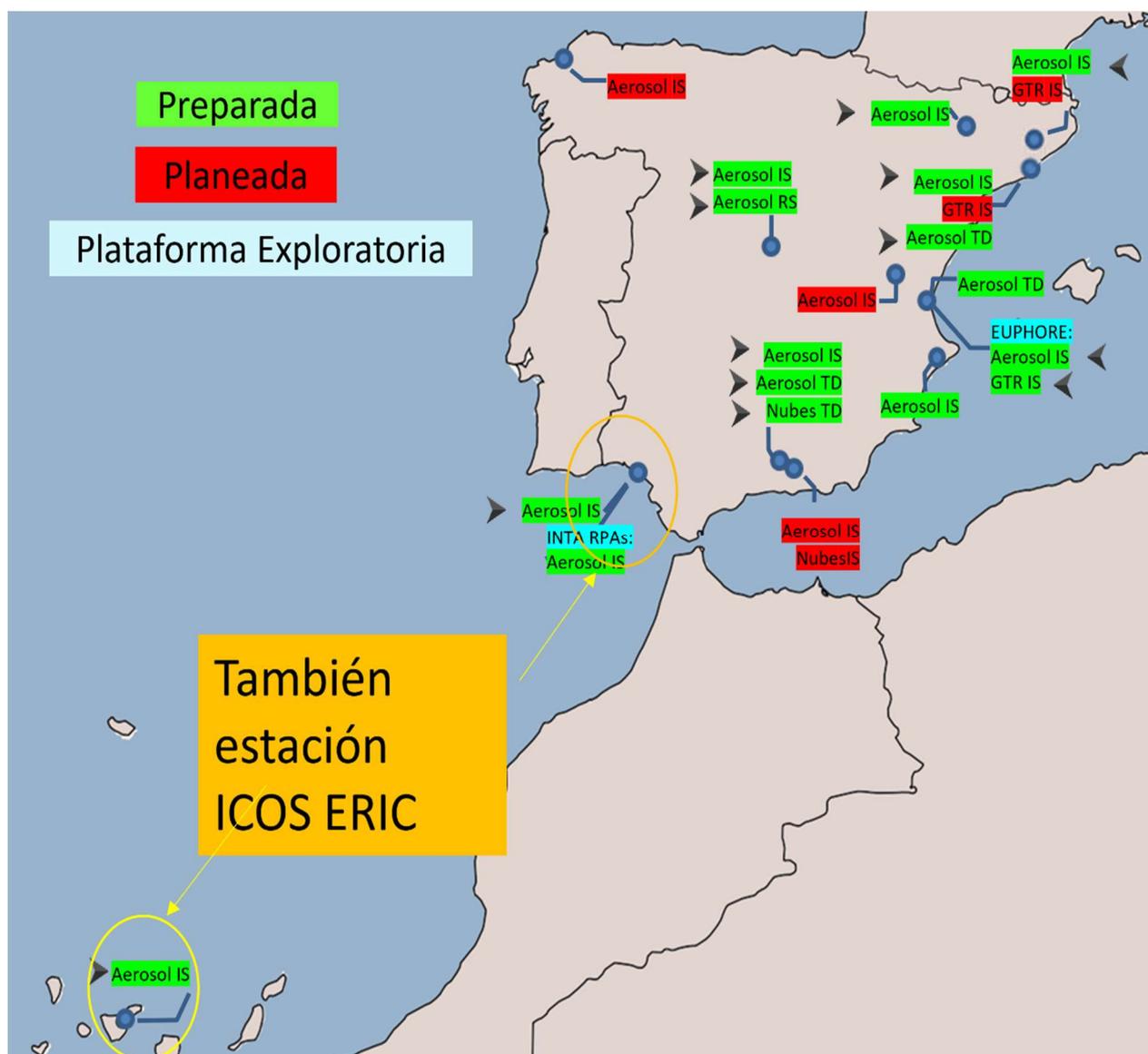


Figura 4.2. Distribución geográfica de las instalaciones nacionales de ACTRIS-España. Aerosol IS: aerosol in situ; Aerosol TD: teledetección de aerosoles; Nubes IS: nubes in situ; Nubes TD: teledetección de nubes; GTR IS: gas traza reactivo in situ; INTA RPA: aeronave pilotada a distancia del INTA. El símbolo ► indica las instalaciones que forman parte actualmente de ACTRIS ERIC. Se indican también las estaciones que forman parte simultáneamente de ACTRIS ERIC y de ICOS ERIC.

La Figura 4.2 muestra la distribución geográfica de las instalaciones nacionales españolas inicialmente incluidas en ACTRIS ERIC (indicadas con el símbolo ►), así como capacidades adicionales, algunas ya implementadas y otras previstas en el futuro, de los miembros de ACTRIS

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

– España. Según se muestra en dicha figura, dos de las estaciones (la Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo y la estación de AEMET – Centro de Investigaciones Atmosféricas de Izaña, son también estaciones de ICOS ERIC, contribuyendo así a la sinergia de infraestructuras de investigación atmosférica europeas.

4.4. Conclusión

En el ámbito europeo, el establecimiento de ACTRIS ERIC representa la culminación de un largo proceso en que distintas infraestructuras de investigación atmosférica (EARLINET, CloudNET, EUSAAR, EUROCHAMP), impulsadas por distintos proyectos europeos a lo largo de más de 20 años, se han unificado para dar lugar a una infraestructura permanente de nivel mundial.

Distintos grupos españoles han participado en esos proyectos y han sido acompañados y apoyados durante más de 7 años en el proceso de consolidación de ACTRIS ERIC por la Subdirección General de Internacionalización de la Ciencia y la Innovación (actualmente Subdirección General de Consorcios, Organismos e Infraestructuras) del actual Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, que ha hecho posible que España sea socio fundador de ACTRIS ERIC.

Desde el punto de vista español, la participación en ACTRIS ERIC significa llevar a la primera línea mundial el conocimiento creado y las instalaciones científicas constituidas mediante la inversión que, a lo largo de muchos años, han facilitado muchos proyectos con financiación nacional, autonómica y europea.

4.5. Agradecimientos

ACTRIS – España agradece el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades en su contribución al establecimiento y funcionamiento de ACTRIS ERIC.

Actualmente ACTRIS-España está soportada por la Red Estratégica de Investigación “Red española de entidades participantes en ACTRIS”, ref. RED2022-134824-E, financiada por la Agencia Estatal de Investigación (<https://actris.es/>).

El proyecto Europeo ATMO-ACCESS (ref. 101008004) de H2020, ha financiado accesos a algunas instalaciones de ACTRIS-España.

La participación española en ACTRIS ERIC ha sido posible gracias a la financiación en muchos proyectos de investigación nacionales, autonómicos y europeos que sería demasiado largo detallar.

4.6. Referencias

- [4.1] European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI), Strategy Report on Research Infrastructures. Roadmap 2018. 2018. [Online]. Disponible en: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/bc70e229-8add-4c9f-83b6-ac4748e386f8_en?filename=esfri-roadmap-2018.pdf. Última consulta: 17 de enero de 2025
- [4.2] U. Wandinger, A. Apituley, T. Blumenstock, N. Bukowiecki, J.-P. Cammas, and P. Connolly, "ACTRIS-PPP Deliverable 5.1: Documentation on technical concepts and requirements for ACTRIS Observational Platforms", https://www.actris.eu/sites/default/files/Documents/ACTRIS%20PPP/Deliverables/ACTRIS%20PPP_WP5_D5%201_Documentation%20on%20technical%20concepts%20and%20requirements%20for%20ACTRIS%20observational%20platforms.pdf. Última consulta: 17 de enero de 2025.

5. COCCON-España: Hacia un Sistema Integrado de Gases de Efecto Invernadero en España

Omaira E. García ⁽¹⁾, Noémie Tarquet ⁽²⁾, Eliezer Sepúlveda ⁽²⁾ y Jorge Guerola ⁽¹⁾,

(1) Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), Aemet, (2) Tragsatec, CIAI.

Resumen

La disponibilidad de información sobre gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos es crucial para desarrollar políticas efectivas de mitigación, seguir el progreso hacia los objetivos de reducción de emisiones y respaldar las acciones de adaptación necesarias para abordar los crecientes efectos del calentamiento global. Los sistemas de observación integrados y multidisciplinarios son herramientas necesarias para mejorar el conocimiento de los ciclos de carbono a diferentes escalas temporales y espaciales. En este contexto, este trabajo proporciona una visión general de un sistema integrado de observación de GEI en España, COCCON-España, que se encuentra actualmente en fase de implementación. El sistema de observación previsto tiene como principal objetivo cubrir la falta latente de observaciones atmosféricas de GEI en España, incluyendo estimaciones de emisiones de GEI en los principales puntos críticos urbano-industriales a nivel nacional (ciudades de Madrid y Barcelona).

COCCON-España será la primera infraestructura permanente a nivel nacional para monitorear concentraciones y emisiones atmosféricas de GEI mediante observaciones de teledetección terrestre. Colaborará estrechamente con otras iniciativas de GEI como ICOS-España, así como con redes regionales y locales de medida de GEI para construir un sistema integrado de observación de GEI en España. El sistema integrado resultante será una herramienta indispensable para la verificación de los inventarios de emisiones y las acciones de mitigación adoptadas a nivel nacional, así como para la validación de misiones actuales y futuras satelitales de GEI.

5.1. Cambio climático y monitorización de gases de efecto invernadero

Las diferentes observaciones y registros meteorológicos a nivel global indican, unívocamente, que la temperatura media del planeta ha aumentado 1°C en el último siglo, produciéndose una rápida aceleración a partir de la década de 1980. Este calentamiento no es uniforme ni espacial ni temporalmente, existiendo zonas especialmente vulnerables como las de alta montaña o las cercanas al Ártico, las cuales duplican la media global llegando a superar los 3°C en los meses de invierno. El consenso a nivel científico es prácticamente unánime, como recogen los diferentes informes científico-técnicos que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (en adelante IPCC) ha elaborado desde su creación en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (en adelante OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Estos informes reconocen, por una parte, que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, siendo inducido principalmente por las actividades humanas y, por otra parte, establece la necesidad de reducir las emisiones atmosféricas de Gases de Efecto Invernadero (en

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

adelante GEI) sustancial y sostenidamente, como principales causantes del calentamiento observado [IPCC, 2022].

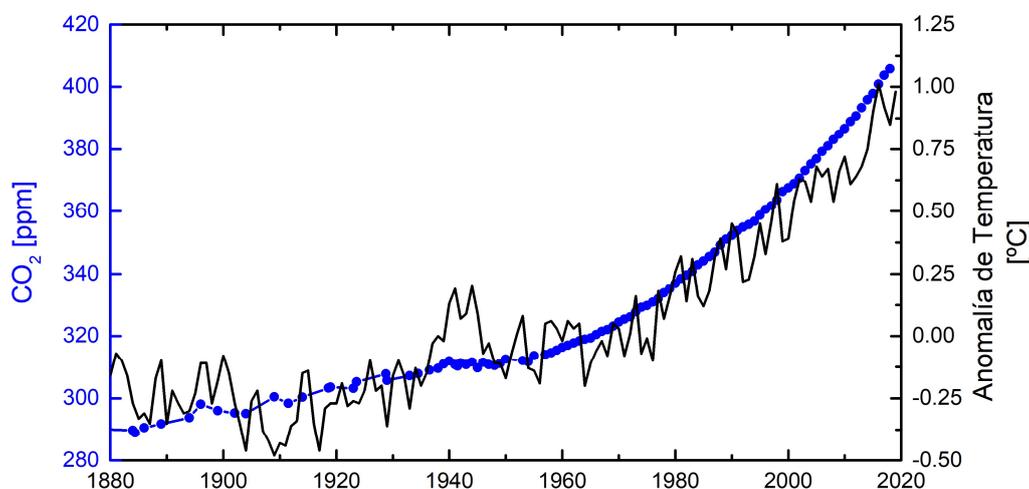


Figura 5.1: Serie temporal (1880-2020) de la media global de la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) y de la anomalía de temperatura atmosférica.

La relación prácticamente lineal que se ha observado desde la era preindustrial hasta la actualidad entre el incremento de la temperatura global y las emisiones acumuladas en la atmósfera de dióxido de carbono (CO₂), principal GEI, no deja lugar a dudas (Figura 5.1). A la misma velocidad que ha aumentado la temperatura, la concentración atmosférica de CO₂ ha pasado de algo menos de 300 partes por millón (ppm) en la era preindustrial a superar actualmente los 400 ppm a nivel global, aunque los valores regionales son mayores. Los registros continuos de estaciones de fondo (en condiciones muy limpias de la atmósfera) del Programa de Vigilancia Global de la OMM, como el Observatorio de Izaña en Tenerife (España) o el de Mauna Loa en Hawái (EE.UU.), muestran de forma simultánea que ya se han superado los 423 ppm en la primavera de 2023. Estos récords sin precedentes en los últimos 3 millones de años se batirán primavera tras primavera en los próximos años, conduciendo a un aumento cada vez más rápido de la temperatura de nuestro planeta. Según el último informe del IPCC [IPCC, 2022], 450 ppm es el umbral al que tendríamos que restringir la concentración de CO₂ en la atmósfera para limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C en el presente siglo respecto a la era preindustrial. Así lo recoge el Acuerdo de París, aprobado en 2015, que supuso un compromiso mundial sin precedentes para mantener el aumento global de la temperatura durante este siglo por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales.

En este contexto, es crítico establecer redes para la monitorización de los distintos componentes del sistema climático, y específicamente de GEI, identificando las fuentes de emisión y su magnitud, así como determinando la respuesta del sistema a estos aportes extras. Además, estas medidas son indispensables para disponer de estimaciones más precisas de las proyecciones de cambio climático, constituyendo, por tanto, la base del desarrollo de políticas efectivas y eficientes de mitigación y adaptación al cambio climático.

Actualmente, a nivel mundial, existen varios programas y redes con base en tierra que recopilan y archivan diversas observaciones atmosféricas de los principales GEI: concentraciones puntuales,

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

isótopos y flujos turbulentos (GAW-Global Atmospheric Watch Programme-, ESRL/NOAA- Earth System Research Laboratories, e ICOS/ERIC -Integrated Carbon Observation System-), cantidades totales en la columna atmosférica (TCCON-Total Carbon Column Observing Network-, NDACC-Network for the Detection of Atmospheric Composition Change-, y COCCON- COLlaborative Carbon Column Observing Network-); y perfiles verticales basados en globos (Air-Core). Sin embargo, tal y como recoge el último informe de la Comisión Europea en el contexto del sistema Monitoring&Verification Support (MVS) para la monitorización de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂), que está siendo diseñado y desarrollado por Copernicus y conocido como Green Report [Pinty et al., 2019], estas redes no cumplen con todos los requisitos operativos para el sistema Copernicus CO₂MVS debido a la falta de observaciones en áreas urbanas/industriales y otras fuentes importantes de emisión. En particular, el sistema CO₂MVS establece como prioritario disponer de medidas desde tierra a nivel europeo de la columna de CO₂, además de otros gases traza, para validar las observaciones satelitales del futuro componente espacial de Copernicus (Copernicus Sentinels CO₂ Monitoring Constellation). Estas medidas son fundamentales asimismo para diferentes misiones satelitales ya en marcha focalizadas en GEI (EUMETSAT/IASI, ESA/Tropomi, NASA/OCO-II, NASA/OCO-III, JAXA/GOSAT).

A nivel nacional, existe un vacío observacional de concentraciones atmosféricas de los principales GEI. La única estación que actualmente contribuye de forma continua a programas y redes de monitorización, internacionalmente reconocidas, es el Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO), gestionado por el Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI, <https://izana.aemet.es>) dependiente de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, <https://www.aemet.es>). IZO cuenta con un complejo programa de observación de GEI, perteneciendo al programa de GAW de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) desde 1982, al ESRL/NOAA desde 1991, a las redes NDACC, TCCON y COCCON desde 1999, 2007 y 2018, respectivamente, y a ICOS-ERIC desde mayo de 2023. Desde 2021 AEMET coordina las actividades y la contribución española a ICOS/ERIC, cuyo objetivo es la monitorización en todo el continente europeo y los océanos adyacentes de GEI y gases asociados al ciclo del carbono. Dentro del nodo español de ICOS/ERIC (ICOS-España, <https://icos-spain.aemet.es/es>), la estación de sondeos atmosféricos El Arenosillo, dependiente del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), es la única estación que actualmente está en proceso de acreditación, como estación atmosférica.

5.2. COCCON – ESPAÑA

La red nacional COCCON-España pretende cubrir la falta latente de observaciones atmosféricas de GEI en España a través de la implantación de una red de estaciones para su medida a escala nacional. Esta actividad, coordinada por AEMET, se enmarca en el proyecto de modernización de las redes de observación y digitalización de los procesos de producción para el desarrollo de servicios meteorológicos inteligentes en un contexto de cambio climático (C05.I03.P51), que se integra en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) del Gobierno de España,

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

a financiar con los fondos aprobados por el Consejo Europeo del 21 de julio de 2020, para hacer frente a las consecuencias de la pandemia internacional provocada por la COVID-19.

La red COCCON-España estará conformada inicialmente por doce estaciones para la medida de los principales GEI, cuyas localizaciones potenciales se muestran en la Figura 5.2. Estos emplazamientos han sido seleccionados atendiendo a su ubicación en las principales zonas fuentes de emisión de GEI urbano/industriales (i.e., Madrid y Barcelona), así como en ambientes de fondo, bajo diferentes condiciones de reflectancia superficial para su posible aplicación en la validación de medidas satelitales (i.e., El Arenosillo-INTA, la Plataforma Solar de Almería, el CIBA, IZO o el Observatorio de Santa Cruz de Tenerife). Además, se ha perseguido que cubran una distribución geográfica homogénea, representativa de los máximos gradientes latitudinales en España.

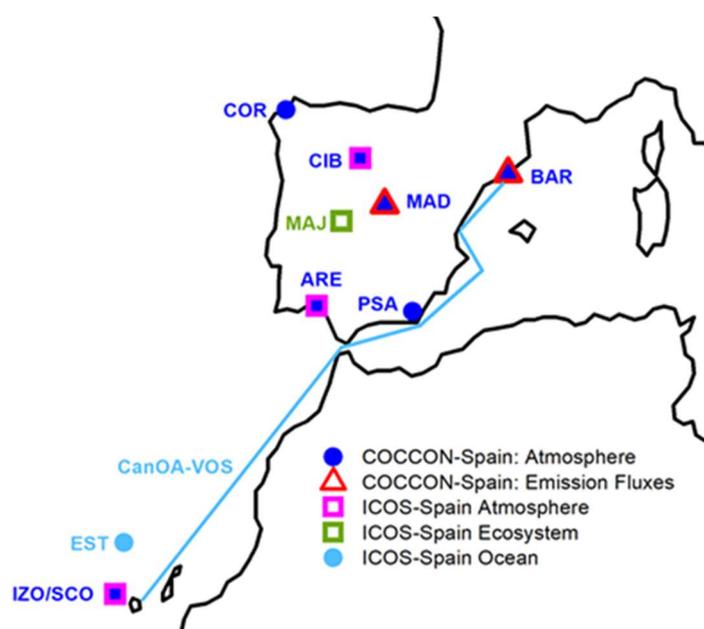


Figura 5.2: Distribución de las estaciones potenciales de la red COCCON-España (en azul y rojo): IZO (Observatorio Atmosférico de Izaña), SCO (Observatorio de Santa Cruz de Tenerife), ARE (El Arenosillo), PSA (Plataforma Solar de Almería), CIB (Centro de Investigación de la Baja Atmósfera), MAD (Madrid), BAR (Barcelona), y A Coruña (COR). En magenta, verde y celeste se muestran aquellas estaciones que forman parte de ICOS-España en los segmentos atmosféricos, de ecosistemas y oceánicos, respectivamente.

Tal y como recoge el informe científico del Grupo de Expertos In Situ de EIONET de la Agencia Europea del Medioambiente [Matthews et al., 2020], la monitorización de zonas urbanas es crítica ya que, por una parte, son particularmente vulnerables a la contaminación del aire, los fenómenos meteorológicos extremos y los efectos del cambio climático, pero, por otra parte, las áreas urbanas son actualmente los grandes focos de emisión de GEI (concentran aproximadamente el 70% de las emisiones de CO₂ y hasta un 50% de las emisiones globales de GEI). Este informe repasa, además, las diferentes técnicas de medida disponibles en la actualidad para la monitorización de GEI, destacando el papel clave de la técnica de espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier, que empleará COCCON-España. Por ello, como se mencionó anteriormente, COCCON-España también contempla la monitorización de los flujos de emisión de GEI (no solo concentraciones

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

atmosféricas) en zonas clave, como son las áreas metropolitanas de Madrid y Barcelona. Se prevé así la instalación de instrumentación adicional en estas ciudades, perimetrando las zonas metropolitanas para la estimación de sus correspondientes emisiones [Tu et al., 2022].

COCCON-España dispondrá de estaciones híbridas combinadas con el nodo nacional de la infraestructura de investigación ICOS/ERIC y proyectos asociados (Figura 5.2), con el objetivo de establecer la base para un sistema de observación de GEI permanente y consolidado a escala nacional. El sistema integrado resultante será una herramienta indispensable para la verificación de los inventarios de emisiones y las acciones de mitigación adoptadas a nivel nacional, así como para la validación de misiones actuales y futuras satelitales de GEI. Por tanto, COCCON-España supondrá una mejora sustancial de los sistemas nacionales de observación de la composición química atmosférica, incorporando variables climáticas esenciales para la vigilancia y el estudio del sistema climático y la prevención de riesgos climáticos. Mejorar nuestro conocimiento actual de las fuentes y sumideros de GEI en España tiene implicaciones directas en el desarrollo y establecimiento de las estrategias nacionales de mitigación y adaptación frente al cambio climático.

5.3. Bibliografía

- [5.1.] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844, 2022. Brasier *et al.* (2103): Brasier, K.J., D.K. McLaughlin, D. Rhubart, R.C. Stedman, M.R. Filteau y J. Jacquet (2013): "Risk Perceptions of Natural Gas Development in the Marcellus Shale", *Environmental Practice*, 15 (2): 108-122.
- [5.2] Matthews, B., O. E. García, E. Cuevas, W. Spangl, and P. Castro: Report on how EIONET and EEA can contribute to the urban in situ requirements of a future Copernicus anthropogenic CO₂ observing system, European Environment Agency (EEA) – Negotiated procedure No EEA/IDM/R0/17/008, 2020. Texto
- [5.3] Pinty B., P. Ciais, D. Dee, H. Dolman, M. Dowell, R. Engelen, K. Holmlund, G. Janssens-Maenhout, Y. Meijer, P. Palmer, M. Scholze, H. Denier van der Gon, M. Heimann, O. Juvyns, A. Kentarchos and H. Zunker, An Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring & Verification Support Capacity – Needs and high level requirements for in situ measurements, doi: 10.2760/182790, European Commission Joint Research Centre, EUR 29817 EN, 2019.
- [5.4] Tu, Q., Hase, F., Schneider, M., García, O., Blumenstock, T., Borsdorff, T., Frey, M., Khosrawi, F., Lorente, A., Alberti, C., Bustos, J. J., Butz, A., Carreño, V., Cuevas, E., Curcoll, R., Diekmann, C. J., Dubravica, D., Ertl, B., Estruch, C., León-Luis, S. F., Marrero, C., Morgui, J.-A., Ramos, R., Scharun, C., Schneider, C., Sepúlveda, E., Toledano, C., and Torres, C.: Quantification of CH₄ emissions from waste disposal sites near the city of Madrid using ground- and space-based observations of COCCON, TROPOMI and IASI, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 295–317, <https://doi.org/10.5194/acp-22-295-2022>, 2022.

6. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SENSOR IN-SITU PARA MONITOREO ISOTÓPICO DE ^{13}C EN CO_2 ATMOSFÉRICO

*Yuliy Moreno Sanoyan y Marta Ruiz Llata
Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad Carlos III de Madrid*

Resumen

Este documento describe el diseño, implementación y primeros resultados de un sensor de CO_2 atmosférico basado en la técnica de espectroscopia fotoacústica mejorada por cuarzo (QEPAS, de las siglas en inglés de Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy). Esta técnica combina las características de alta sensibilidad y especificidad de otras técnicas de espectroscopía con la ventaja de requerir un volumen de aire muestreado reducido, lo que le dota de gran un gran potencial para su despliegue de campo sencillo. El sensor desarrollado opera en una zona del espectro en el infrarrojo medio en la que se distinguen picos de absorción de los dos principales isótopos del CO_2 , lo que permite obtener el ratio isotópico $\delta^{13}\text{C}$, que se relaciona con el origen del CO_2 en la atmósfera.

6.1. Introducción

La relación isotópica del dióxido de carbono atmosférico se determina habitualmente a través de espectrometría de masas de relación isotópica (IRMS) a partir de muestras de aire [1]. Para expresar esta relación, se compara la proporción de los isótopos de ^{13}C y ^{12}C de este gas ($^{13}\text{CO}_2$ y $^{12}\text{CO}_2$) en la muestra con la de un gas de referencia, obteniendo un valor denominado $\delta^{13}\text{C}$. Este valor, expresado en tanto por mil, indica las pequeñas variaciones en la composición isotópica del carbono con respecto a un estándar reconocido, cuyo valor de referencia es de 0.011237. Acorde a los datos actuales, el ratio isotópico del CO_2 atmosférico muestra un valor aproximado de -8.1‰ , con variaciones anuales del orden de $0.1 - 0.2\text{‰}$, en tanto que la concentración media de este gas se sitúa actualmente próximo a las 430 ppm [2,3].

El análisis de esta relación isotópica resulta fundamental para identificar las distintas fuentes de carbono, estudiar su distribución en la atmósfera y analizar los procesos naturales que regulan su presencia. No obstante, en la actualidad, estas mediciones sólo pueden realizarse en laboratorios altamente especializados, lo que requiere el uso de muestras puntuales en lugar de mediciones continuas [1]. Como alternativa a la espectrometría de masas, actualmente se están desarrollando técnicas de espectroscopia de ratio isotópico por infrarrojo (*Infrared Isotope Ratio Spectroscopy*, IRIS) para realizar mediciones *in-situ*. El desarrollo de nuevas tecnologías de detección busca agilizar significativamente la obtención del valor de $\delta^{13}\text{C}$ sin comprometer su precisión. Sin embargo, este proceso conlleva un desafío técnico importante, ya que las señales espectrales del

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$^{13}\text{CO}_2$ y $^{12}\text{CO}_2$ son muy similares. Detectar y cuantificar diferencias tan pequeñas exige instrumentación de alta sensibilidad capaz de realizar mediciones con gran exactitud y fiabilidad.

Estos métodos incluyen la espectroscopia CRDS (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*), una técnica de medida directa de absorción de muy alta sensibilidad que mide la tasa de absorción de luz en una cavidad resonante para determinar la concentración de gases con gran precisión [4]. También se emplea la espectroscopia directa mediante fuentes láser sintonizables en la región del infrarrojo medio (MIR), donde se encuentran las principales bandas de absorción del CO_2 [5] Estas técnicas han demostrado ser altamente precisas, con márgenes de error por debajo de una parte por mil. Sin embargo, para lograr esta precisión, es necesario aplicar un procedimiento de calibración que elimine la influencia de la concentración total del gas en los resultados [6].

Además de estas técnicas, la espectroscopia fotoacústica (*Photoacoustic Spectroscopy*, PAS) ha surgido como una herramienta clave dentro del enfoque IRIS, destacando en particular la variante conocida como espectroscopia fotoacústica mejorada con cuarzo (*Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy*, QEPAS) [7]. Esta técnica se basa en lo que se denomina efecto fotoacústico, que ocurre cuando un haz láser sintonizado en un pico de absorción y modulado con una señal periódica ilumina una muestra de gas dentro de una cavidad. La absorción del gas provoca un calentamiento periódico y en consecuencia genera una onda de presión que se puede detectar con un sensor acústico. En el caso de QEPAS dichas ondas son detectadas mediante un diapasón de cuarzo (*Quartz Tuning Fork*, QTF), que es un sensor extremadamente sensible a las vibraciones mecánicas producidas a su frecuencia de resonancia y permite detectar gases en concentraciones muy bajas, del orden de partes por mil millones (ppb) [8].

Estudios recientes han demostrado la efectividad de los sistemas QEPAS en distintas áreas, como el monitoreo ambiental y el diagnóstico médico. Por ejemplo, investigaciones recientes han destacado su alta sensibilidad en la detección de concentraciones extremadamente bajas de gases, consolidándolo como una herramienta prometedora dentro del campo de la espectroscopia de ratio isotópico por infrarrojo (IRIS) [8]. El diseño más común de los módulos de detección utilizados en QEPAS incluye un diapasón de cuarzo acoplado a dos pequeños tubos resonadores. Estos tubos amplifican las ondas acústicas en la zona donde se encuentran las puntas del diapasón, lo que mejora significativamente la sensibilidad del sistema. Desde la primera implementación de la técnica en 2002 [7], se han realizado mejoras en la geometría del diapasón, en particular en la distancia entre sus puntas y en sus características de resonancia, como la frecuencia fundamental y el tiempo que tarda en alcanzar una oscilación estable. Una de las grandes ventajas de los sistemas QEPAS es que pueden construirse utilizando componentes comerciales, como fuentes láser sintonizables y diapasones de cuarzo estándar. Esto facilita su fabricación, mantenimiento y despliegue en diversas aplicaciones. De hecho, esta tendencia hacia instrumentos modulares y escalables está impulsando el desarrollo de dispositivos portátiles capaces de realizar mediciones precisas en el lugar donde se necesiten, sin necesidad de llevar las muestras a un laboratorio [8]. Gracias a estas características, la espectroscopia basada en QEPAS se ha consolidado como una opción idónea para aplicaciones que requieren alta sensibilidad y especificidad en la detección de gases. En el caso presente, se ha optado por esta técnica y se ha demostrado su capacidad para detectar isótopos del CO_2 con una precisión excepcional y su potencial para integrarse en un sistema portátil. A continuación, se presenta la solución propuesta junto con el esquema del sistema QEPAS desarrollado, seguido de los resultados obtenidos en diversos experimentos que demuestran su efectividad para la monitorización del CO_2 atmosférico.

6.2. Solución propuesta-Esquema del sistema QEPAS

En la Figura 6.1 se muestra el esquema de bloques del sensor propuesto basado en la técnica QEPAS. El primer elemento del sensor es el módulo de detección acústica (ADM en la Figura 6.1), comercializado por Thorlabs con referencia es ADM01. El principio de funcionamiento de dicho módulo se basa en el efecto piezoeléctrico de un resonador de cuarzo, en combinación con la amplificación acústica proporcionada por dos tubos microrresonadores dispuestos a ambos lados de dicho resonador, es decir, en el eje longitudinal de éste. La frecuencia de resonancia del transductor piezoeléctrico de cuarzo es de 12455 Hz, lo cual permite modular el haz de luz incidente en la muestra de gas con equipos sencillos. Por otro lado, el factor de calidad (Q) del diapasón es superior a 12000, con lo que la eficiencia de la conversión de energía es muy alta, dado que un valor elevado de Q significa una menor disipación de energía y una mayor estabilidad en la señal de salida, lo cual, a su vez, mejora la repetibilidad de las mediciones.

El volumen de la muestra a caracterizar, de aproximadamente 7 cm^3 , es otro factor crucial, ya que permite llevar a cabo un análisis rápido y continuo, pues cuanto mayor sea la cantidad de gas, más tiempo se precisa para su estudio. En cuanto a las características ópticas, el módulo ADM01 está dotado de ventanas ópticas que permiten trabajar en un amplio rango de longitudes de onda, incluyendo la zona del espectro del infrarrojo medio donde se sitúan los picos de absorción del CO_2 . Por último, la señal de salida, con una amplitud máxima de 1.8 V y una impedancia de 50Ω , asegura la compatibilidad del módulo con los sistemas habituales de adquisición de datos, facilitando su integración en configuraciones experimentales avanzadas.

En el diseño presente (Figura 6.1), el sistema emplea un láser de cascada cuántica (QCL) como fuente de excitación óptica. Este tipo de láser es especialmente adecuado para espectroscopía de absorción en el rango del infrarrojo medio (MIR), donde se encuentran las bandas de absorción fundamentales del CO_2 . El láser de cascada cuántica empleado es el Hamamatsu L12004-2310H-E, cuya longitud de onda central es de $4.33 \mu\text{m}$ (2310 cm^{-1}) y su potencia mínima de emisión son 20 mW. Este láser permite sintonizar la longitud de onda de emisión mediante el control de su temperatura y corriente de operación. El controlador utilizado para este dispositivo es el Hamamatsu C16174-01, que incluye un sistema de control de temperatura para garantizar un comportamiento estable. Además, el controlador cuenta con dos entradas de señal de tensión externas para la modulación de la corriente inyectada al QCL, de forma que una de ellas se utiliza para generar la señal fotoacústica y la otra para realizar un barrido en torno a la zona del espectro donde se localizan los picos de absorción.

Las señales de modulación del láser (FG en la Figura 6.1) se generan mediante el uso de las salidas analógicas de un módulo de adquisición de datos National Instruments NI-6361, que se encarga tanto de generar como de adquirir las señales procedentes del módulo ADM-01. Se emplean dos señales de modulación: una onda sinusoidal simétrica con una frecuencia equivalente a la mitad de la frecuencia de resonancia del ADM ($f_0 = 12456.496 \text{ Hz} \rightarrow f_0/2 = 6228.248 \text{ Hz}$) para capturar la señal correspondiente al segundo armónico, y una modulación lenta en forma de señal triangular de 25 mHz para realizar un barrido espectral, manteniendo constantes la corriente y la temperatura de polarización. La señal acústica se muestrea y los datos obtenidos son procesados por una computadora, por medio de la técnica de detección síncrona (lock-in) implementada mediante código [9].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

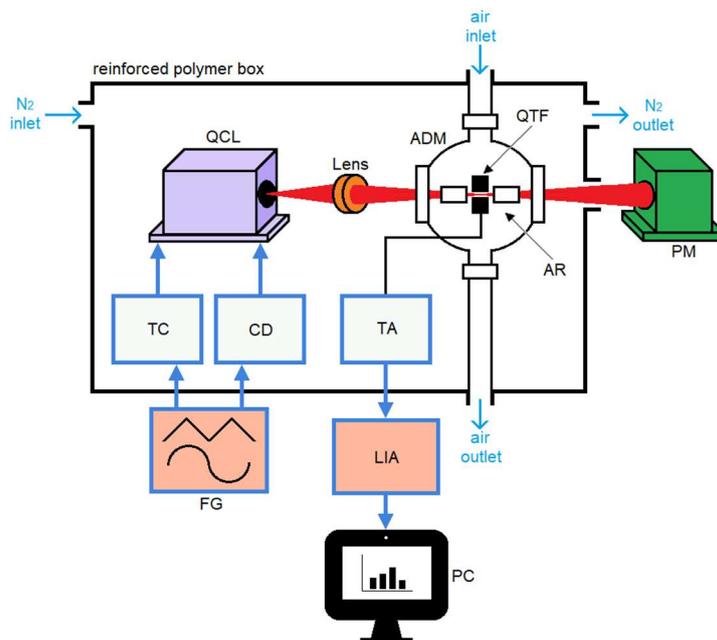


Figura 6.1. Diagrama de bloques del sensor QEPAS: QCL: láser de cascada cuántica; ADM: módulo de detección acústica; AR: resonador acústico – tubos microrresonadores; QTF: resonador de cuarzo; TA: amplificador de transimpedancia; FG: generador de funciones integrado en la tarjeta de adquisición; PM: medidor de potencia lumínica; LIA: amplificador síncrono integrado en la tarjeta de adquisición; PC: computadora.

La parte del sistema que comprende el QCL, el ADM y el sistema óptico (lentes) que permiten enfocar el haz de luz en el centro del diapasón del ADM, está alojado en una caja de polímero reforzado con fibra de vidrio con dimensiones de $20 \times 20 \times 18$ cm, la cual se llena con nitrógeno para evitar la absorción no deseada del CO_2 del aire ambiente entre el láser y el módulo fotoacústico (fotografía de la Figura 6.2). A su vez, esta caja se encuentra dentro de una carcasa de mayor tamaño que alberga todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema (fotografías de las Figuras 6.3 y 6.4).



Figura 6.2. Disposición de los componentes del módulo de detección fotoacústica dentro del contenedor de polímero reforzado.

Dentro de esta carcasa se integran los elementos de control del flujo y la presión del gas a medir, así como la tarjeta de adquisición de datos junto con los adaptadores de señal requeridos, dado que el fabricante del controlador del láser ha recomendado evitar el uso de señales con la masa

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

conectada a tierra. Además, en su interior se encuentran todas las fuentes de alimentación y un sistema de refrigeración diseñado para disipar el calor generado por los equipos, asegurando que este no afecte ni a las mediciones ni al correcto funcionamiento de los componentes más sensibles del instrumento.



Figura 6.3. Disposición de los componentes del instrumento completo.



Figura 6.4. Aspecto exterior del instrumento completo junto con el sistema de mezcla de gases para realizar pruebas.

6.3. Resultados

La etapa previa a la obtención de los resultados directos consistió en determinar el rango operativo seguro del emisor óptico Hamamatsu L12004-2310H-E. Inicialmente, se demostró que el valor de la corriente umbral es aproximadamente 300 mA, mientras que la corriente máxima que el dispositivo puede soportar es de 460 mA. De manera similar, el rango de temperatura de operación se encuentra entre los 5 y los 50 °C. Sin embargo, para evitar la degradación rápida del componente, se ha determinado como estable un rango de corriente entre 300 y 430 mA y un rango de temperatura entre 7.5 y 40 °C. Teniendo en cuenta estos límites, el primer paso consistió en caracterizar el espectro de emisión del láser en función de la corriente de inyección y la temperatura de operación. Para ello, se utilizó un analizador de espectro óptico de transformada de Fourier (Thorlabs OSA 207A), que había sido previamente calibrado para el rango de longitudes de onda que el emisor óptico es capaz de cubrir. Las mediciones se realizaron manteniendo fija la temperatura y variando la corriente cada vez. Se encontró que la relación analizada es prácticamente lineal, con una pendiente constante de $-0.011 \text{ cm}^{-1}/\text{mA}$, tal y como puede apreciarse en la Figura 6.5. La verificación posterior consistió en evaluar la linealidad entre la temperatura de operación y la longitud de onda de emisión. Para tal propósito, se mantuvo constante la corriente del dispositivo mientras se variaba gradualmente la temperatura. La pendiente de la recta que relaciona ambas variables también ha sido constante y de valor $-0.192 \text{ cm}^{-1}/^{\circ}\text{C}$, tal y como se observa en la Figura 6.6.

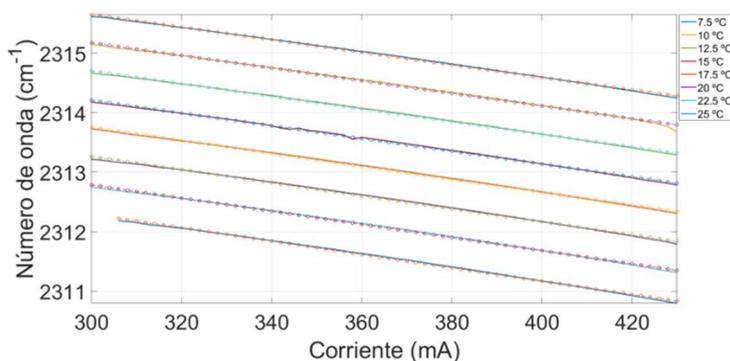


Figura 6.5. Relación entre el número de onda y la corriente para el emisor óptico Hamamatsu L12004-2310H-E.

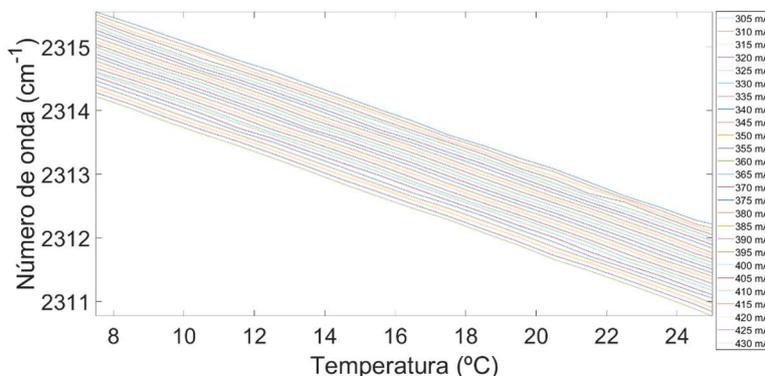


Figura 6.6. Relación entre el número de onda y la temperatura para el emisor óptico Hamamatsu L12004-2310H-E.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Una vez caracterizado el dispositivo, se ha procedido a la localización de la franja espectral óptima del barrido, haciendo uso de la base de datos espectroscópica molecular HITRAN y la información disponible con respecto a los isótopos de interés del CO_2 , el $^{13}CO_2$ y el $^{12}CO_2$. Los picos de absorción más significativos de ambos se encuentran entre los 2230 y los 2390 cm^{-1} . Para el sistema propuesto, la zona óptima de barrido se halla delimitada entre los 2307.8 y los 2308.8 cm^{-1} , pues es la zona que mayor análisis espectral ofrece dentro del estrecho rango que el láser es capaz de barrer. Los datos de la simulación de las Figuras 6.7 y 6.8 han sido generados para 1 atmósfera de presión y 25 °C de temperatura para una concentración de 5000 ppm de CO_2 , lo que permite modelar adecuadamente las condiciones de medición en el entorno de trabajo.

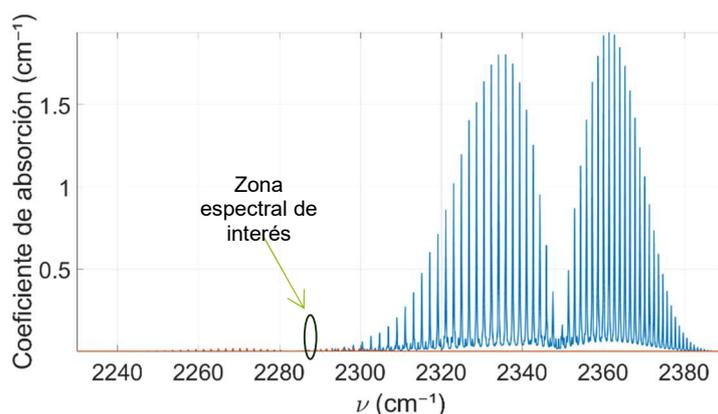


Figura 6.7. Sección significativa del espectro de absorción del $^{13}CO_2$ (rojo) y $^{12}CO_2$ (azul).

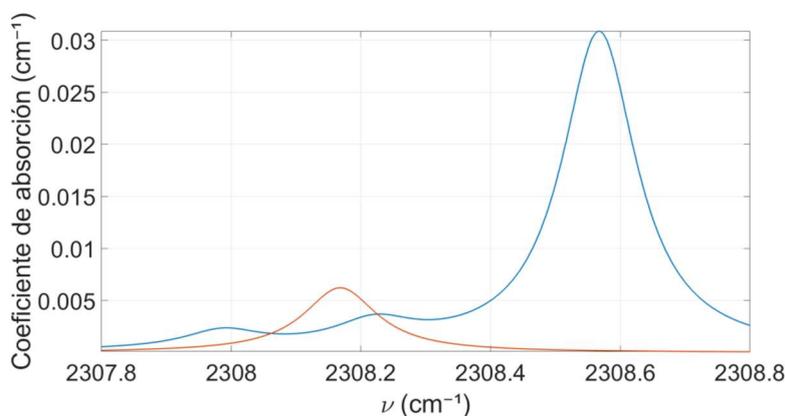


Figura 6.8. Rango espectral óptimo identificado para la detección del $^{13}CO_2$ (rojo) y $^{12}CO_2$ (azul) escogido en función de los límites de operación del QCL empleado.

Una vez determinada la zona espectral óptima en función de las capacidades del láser empleado, se procedió a realizar **una serie de experimentos** para evaluar el rendimiento del sistema y la precisión de las medidas obtenidas.

Así, el **primer experimento** (Figura 6.10) consistió en la obtención de la primera señal fotoacústica midiendo el CO_2 diluido en condiciones de presión atmosférica, temperatura de 25 °C y una concentración de 5000 ppm. La señal obtenida se puede comparar con la simulación del espectro de absorción que se representa en la figura 9 y que se corresponde a una muestra de CO_2 a una concentración de 5000 ppm con un valor del parámetro $\delta^{13}C = -8.1\%$. Lo que se puede observar

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

es que la señal fotoacústica obtenida está directamente relacionada con el espectro de absorción y que es posible identificar claramente un máximo de señal que coincide con un pico de absorción del $^{13}\text{CO}_2$ y otro máximo de señal que coincide con el pico de absorción del $^{12}\text{CO}_2$. La forma de la señal es producto de dos factores principales: la modulación en longitud de onda del láser y detección del segundo armónico de la señal moduladora y la variación de la potencia del láser a lo largo del barrido espectral. A medida que se incrementa el número de onda, la potencia emitida por el láser disminuye, lo que genera una caída en la intensidad de la señal en esas longitudes de onda. Es relevante señalar que la relación entre la potencia emitida y la longitud de onda sigue un patrón aproximadamente lineal, por lo que es fácil de modelar a la hora de llevar a cabo el análisis de los datos.

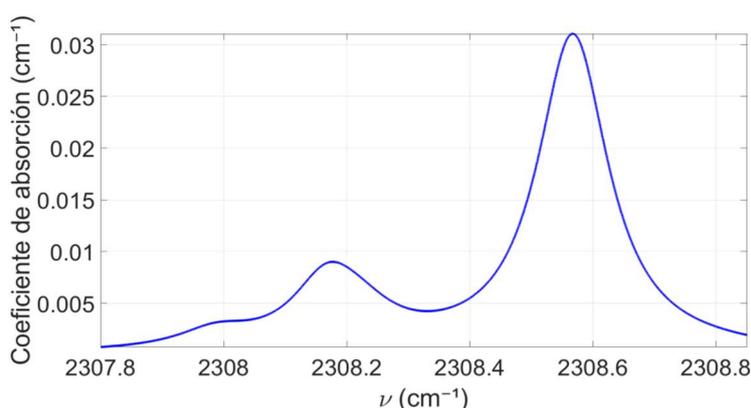


Figura 6.9. Espectro de interés combinado de los isótopos 12 y 13 del dióxido de carbono.

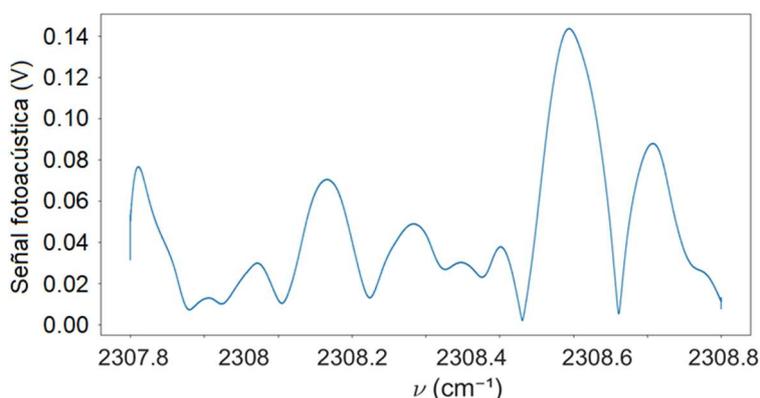


Figura 6.10. Espectro medido en condiciones de $P=1\text{atm}$, $T=25\text{ }^\circ\text{C}$, $C=5000\text{ ppm}$.

El **segundo experimento** (Figura 6.11) ha consistido en la determinación de la presión óptima para mediciones del aire ambiente. Con el objetivo de determinar la presión óptima para estas mediciones, se llevaron a cabo pruebas variando la presión entre 0.5 y 0.8 atmósferas, siendo constantes la temperatura ambiente (25°C), la concentración de 5000 ppm y el índice de modulación. Los resultados muestran que la amplitud de la señal fotoacústica disminuye a medida que la presión decrece, en concordancia con el hecho de ser menor la eficiencia en la generación de ondas acústicas cuando la densidad del gas es menor. Se observó, además, que a menor presión se requiere un índice de modulación menor para visualizar correctamente el espectro.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

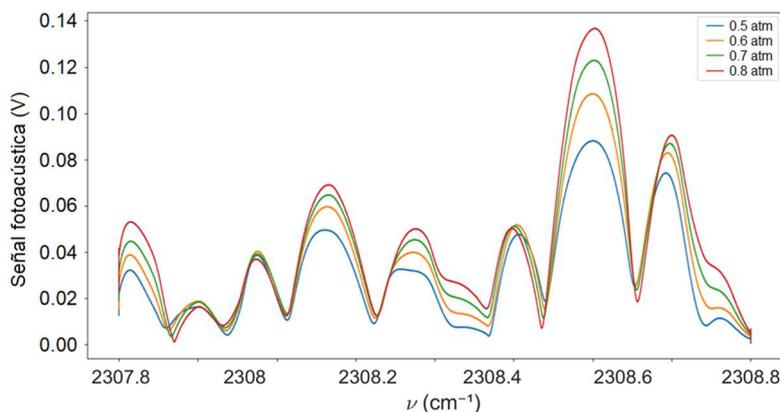


Figura 6.11. Señal obtenida para diferentes valores de la presión de trabajo ($T=25^{\circ}\text{C}$, $C=5000$ ppm).

El **tercer experimento** (Figura 6.12) ha consistido en un barrido de concentraciones a fin de evaluar la sensibilidad del sistema, variando la concentración del CO_2 entre 200 y 1000 ppm, con una presión de 0.8 atmósferas y una temperatura constante de 25°C . Los resultados obtenidos mostraron una variación claramente lineal en la señal fotoacústica, lo que confirma que el sistema es capaz de detectar cambios en la concentración del gas de manera precisa. Además, se observa que varía la amplitud de todo el espectro como cabe esperar si se mantiene constante la relación isotópica en todas las medidas.

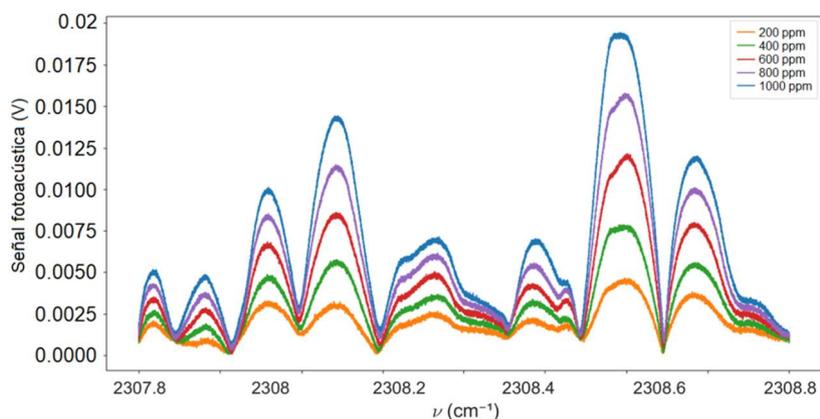


Figura 6.12. Señal obtenida para diferentes concentraciones del CO_2 con $\delta^{13}\text{C}$ constante ($T=25^{\circ}\text{C}$, $P=0,8$ atm)

El **cuarto experimento** (Figura 6.13) se realizó utilizando mezclas de dos botellas de CO_2 , una de ellas estándar, con las que se realizaron las medidas anteriores y que contiene CO_2 con composición isotópica no calibrada diluido en N_2 a 5000 ppm, y otra botella que contiene únicamente $^{13}\text{CO}_2$ diluido en N_2 a 5000 ppm. Las medidas se realizaron utilizando un flujo constante de CO_2 estándar y un flujo variable del $^{13}\text{CO}_2$, con una presión de 0.8 atm y una temperatura de 25°C . Los resultados mostraron un aumento notorio en la amplitud de la señal obtenida en la región espectral correspondiente al isótopo $^{13}\text{CO}_2$, lo que ha permitido verificar que el instrumento desarrollado es sensible al ratio isotópico.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

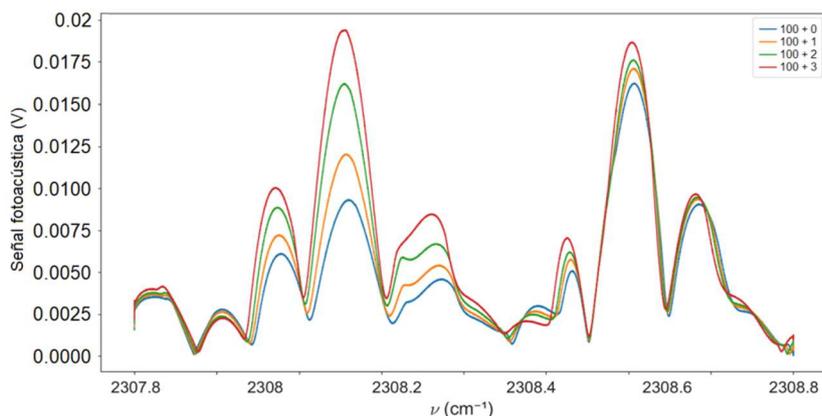


Figura 6.13. Señal obtenida para diferentes valores de $\delta^{13}\text{C}$ (C=500 ppm, T=25°C, P=0.8 atm)

6.4. Conclusiones

Se ha desarrollado un prototipo de sensor QEPAS para la medición local de CO_2 y $\delta^{13}\text{C}$, utilizando exclusivamente componentes comerciales. Las señales obtenidas y el ratio entre ellas presentan una relación lineal con la concentración de los gases. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de un modelo computacional que permita calcular el parámetro $\delta^{13}\text{C}$. Además, se van a utilizar gases de referencia para facilitar la calibración del instrumento.

6.5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Estatal de Investigación en el marco de la convocatoria Proyectos de Transición Ecológica y Digital 2021: 'Hacia la próxima generación de sensores de vigilancia del ciclo de carbono atmosférico' (CarbonSurvey, TED2021-131695B-I00).

6.6. Bibliografía

- [6.1] B.H. Vaughn, J. Miller, D.F. Ferretti, J.W.C. White. "Chapter 14 - Stable isotope measurements of atmospheric CO_2 and CH_4 ". Handbook of Stable Isotope Analytical Techniques, Elsevier, 2004, pp 272-304.
- [6.2] "Global Monitoring Laboratory," NOAA. [Enlace]. Disponible en: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. [Accedido: 2-Feb-2025].
- [6.3] "Atmospheric CO_2 Jump in 2024 off Track With Trajectory Needed to Meet 1.5C Goal, Met Office Says," Earth.org. [Enlace]. Disponible en: <https://earth.org/atmospheric-co2-jump-in-2024-off-track-with-trajectory-needed-to-meet-1-5c-goal-met-office-says/>. [Accedido: 2-Feb-2025].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [6.4] G. Berden, R. Peeters, y G. Meijer, "Cavity ring-down spectroscopy: Experimental schemes and applications," *International Reviews in Physical Chemistry*, vol. 19, no. 4, pp. 565–607, Nov. 2010. DOI: 10.1080/014423500750040627.
- [6.5] Tuzson, B., Mohn, J., Zeeman, M. et al. "High precision and continuous field measurements of δ ¹³C and δ ¹⁸O in carbon dioxide with a cryogen-free QCLAS" . *Appl. Phys. B* 92, 451–458 (2008). DOI: 10.1007/s00340-008-3085-4
- [6.6] Edgar Flores, Joële Viallon, Philippe Moussay, David W. T. Griffith, and Robert Ian Wielgosz. "Calibration Strategies for FT-IR and Other Isotope Ratio Infrared Spectrometer Instruments for Accurate δ ¹³C and δ ¹⁸O Measurements of CO₂ in Air". *Analytical Chemistry* 2017 89 (6), 3648-3655. DOI: 10.1021/acs.analchem.6b05063
- [6.7] D. N. Kosterev et al., "Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy" *Optics Letters*, vol. 27, no. 21, pp. 1902–1904, 2002.
- [6.8] P. Patimisco et al., "Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy: A review," *Sensors*, vol. 14, no. 4, pp. 6165–6206, Apr. 2014. DOI: 10.3390/s140406165
- [6.9] D. Uhl, L. Bruder, y F. Stienkemeier, "A flexible and scalable, fully software-based lock-in amplifier for nonlinear spectroscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 92, no. 8, p. 083101, 2021. DOI: 10.1063/5.0059740

7. Análisis ambiental de la construcción y la vivienda

*Alejandro Payán de Tejada Alonso, Juan López-Asiain Martínez y
José Fernández Castillo
Consejo General de la Arquitectura Técnica.*

7.1. Introducción

La construcción de edificios de viviendas ha sufrido a lo largo de las últimas décadas una transformación que partió desde el punto inicial de suponerle a este tipo de inmuebles la función, prácticamente única, de dar cobijo a los usuarios bajo unos criterios centrados principalmente en la seguridad estructural.

En los últimos años, esta funcionalidad de los edificios se ha visto ampliada teniendo en cuenta el cuidado del medio ambiente, pasando de tener el foco al edificio como ente individual a uno que tiene en cuenta también los impactos que este produce en el ambiente que le rodea.

Así, los edificios y las normativas asociadas han ido incorporando criterios de sostenibilidad dentro de los diseños y textos respectivamente. Esto ha provocado la construcción de edificios que tengan una envolvente que reduzca significativamente el consumo de las instalaciones que proveen de habitabilidad a los usuarios de los edificios. Para conseguir este objetivo, se ha priorizado la siguiente cadena de mejoras (Figura 7.1):

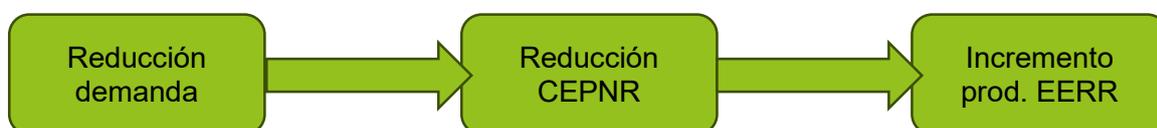


Figura 7. 1. Cadena de priorización de actuación en los edificios

Según este método, tanto de diseño como de actuación de rehabilitación, quiere proveer a la sociedad de un parque de edificios renovado que necesita la menor energía posible por una baja demanda a través de medidas pasivas y una mayor eficiencia energética de las instalaciones, y que, además, posibilite el uso de energías renovables para suplir a la energía procedente de combustibles fósiles (Energía Primaria No Renovable).

Puede decirse que el impulso de esta primera transformación se produjo en 2002 con la primera Directiva específica de Eficiencia Energética en Edificios [1], que tuvo como antecedentes las Directivas de los años 1993 [2] y 1989 [3]. Desde entonces, el ritmo para tener mejores edificios ha sido creciente con hitos como la entrada del Código Técnico de la Edificación en 2006 y las sucesivas versiones de su Documento Básico de Ahorro de Energía.

A nivel económico, ha habido también una inversión decidida por parte de la Unión Europea con el objetivo de independizarse de los combustibles fósiles y, por ende, de terceros países, apostando por la renovación de los edificios y la producción de energías renovables con los Fondos Next Generation. Además, la taxonomía europea marca un camino de inversiones decidido por beneficiar el medio ambiente [4].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Sin embargo, parece que está pasando inadvertido otro tipo de transición paralela y simultánea con la transformación verde, y es que, acentuado por el período de pandemia mundial, la salud en los edificios está adquiriendo un peso importante para los usuarios de los mismos. Esta transición azul se basa en el diseño centrado en las personas (DCP) [5] y convierte el camino verde en un camino turquesa en el que se unen todas las funcionalidades del edificio (Figura 7.2).

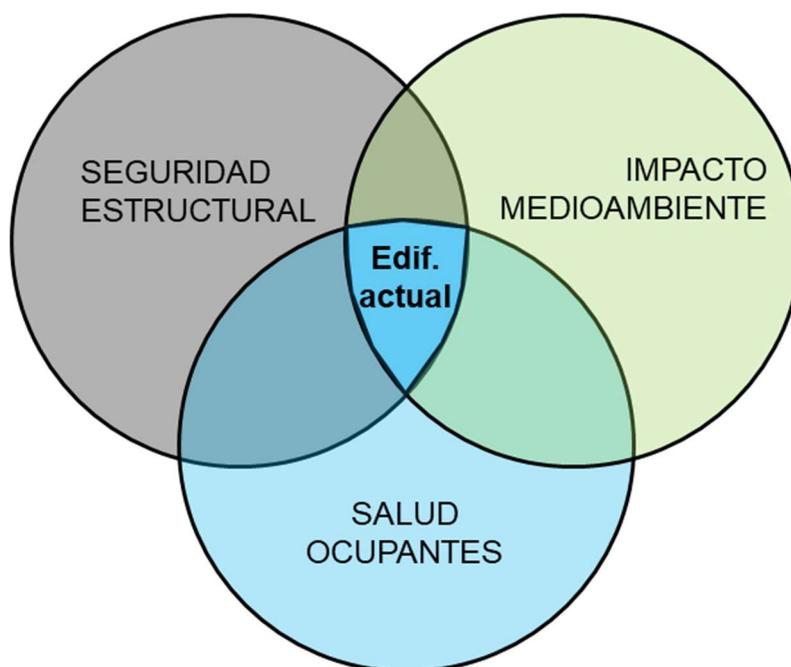


Figura 7.2. Interconexión funcionalidades edificios

Esta transición de dos corrientes simultáneas tiene impacto directo en la forma de construir por la creciente demanda de los usuarios sobre aspectos como el confort térmico, confort acústico y una buena calidad del aire interior. Tanto es así, que la reciente Directiva Europea 2024/1275 en su artículo 13 dice lo siguiente: *“Los estados miembro establecerán requisitos para la aplicación de normas adecuadas de calidad ambiental interior en los edificios, a fin de mantener un ambiente interior saludable”*.

Dentro de este parámetro de calidad ambiental interior, el Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) lleva desde el año 2019 (prepandemia) trabajando con diversas publicaciones e informes como Edificios y Salud - 7 Llaves para un Edificio Saludable [6], Edificios y Salud - Reinventar el Hábitat - Pensando en la salud de las personas [7], Estudio sobre la calidad del Aire Interior en Viviendas [8] o la guía práctica Rehabilita Saludable [9] entre otras investigaciones que han sido fruto de comunicaciones a congresos internacionales [10 - 11].

A continuación, se expone un trabajo de monitorización en una vivienda de reciente construcción (2022) con los siguientes objetivos:

- Monitorizar el ambiente térmico y la calidad del aire interior
- Analizar la tasa de ventilación pasiva y activa
- Centrar el análisis de calidad del aire interior en dos contaminantes principales: la materia particulada 2,5 y el formaldehído.

7.2. Metodología

Para llevar a cabo la monitorización se ha escogido una vivienda de reciente construcción conociendo que los criterios de hermeticidad pueden suponer un empeoramiento de las condiciones de calidad del aire interior si no se lleva a cabo una ventilación apropiada por parte del usuario.

El inmueble se sitúa en la ciudad de Rivas-Vaciamadrid (Madrid), zona climática D3 cuyo año de construcción es 2022. La vivienda cuenta con carpinterías de altas prestaciones clase 4 de permeabilidad según la UNE EN 12207 [12], siendo esta la de mayor calidad en la clasificación establecida por la norma. Los vidrios son dobles con cámara intermedia 4/16/6 y la ventilación que se realiza es manual sin tener activo el sistema de ventilación forzada.

A continuación, en la Figura 7.3 se incluye un plano de distribución de la vivienda donde aparecen marcadas las tres estancias monitorizadas (Dormitorio principal, Salón y Cocina):



Figura 7.3. Plano de distribución de estancias de la vivienda monitorizada

Por otra parte, se indica en el Cuadro 7.1 las superficies de cada una de las estancias:

Cuadro 7.1. Resumen de superficies de estancias monitorizadas

Estancia	Superficie (m ²)
Dormitorio principal	10,14
Salón	24,09
Cocina	7,74

En cuanto a las variables monitorizadas, tal y como se describía anteriormente, son las relacionadas con el confort térmico y calidad del aire interior siguientes:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- **Dióxido de carbono (CO₂):** este contaminante no produce efectos en la salud de las personas hasta altas concentraciones (por encima de 30.000 ppm [13]) por desplazamiento del oxígeno presente, lo que puede producir dificultades en la respiración y, en casos muy extremos, la muerte por asfixia. Sin embargo, las concentraciones halladas en viviendas no suelen superar ni siquiera los 5.000 ppm por lo que no es motivo de preocupación. El objeto de monitorizar este gas es su uso como testigo para el cálculo de la tasa de ventilación de las estancias según la norma establecida por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) [13].
- **Materia particulada 2,5 (PM_{2,5}):** en este caso, entidades como la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha establecido en 5 µg/m³ el límite por encima del cual, estas partículas producen alteraciones en la salud de las personas. Tiene impacto no solo en el sistema respiratorio, sino que se ha detectado su influencia en enfermedades que afectan a los sistemas circulatorio, tegumentario o cognitivo, entre otros [11]. Además, su origen está ligado a actividades que se realizan en las viviendas como el humo de tabaco, las posibles inmisiones por tráfico rodado o la combustión en cocinas. Por todo ello, se ha monitorizado y analizado este contaminante, que está adquiriendo una mayor importancia en el análisis de la calidad del aire interior.
- **Formaldehído:** con origen en algunos productos de construcción, así como todos aquellos derivados de la madera como el mobiliario, está considerado por la International Agency for Research on Cancer (IARC) como carcinógeno Grupo 2A. Esto implica la necesidad de monitorización en interiores comprobando que no supera el umbral saludable establecido por la European Chemical Agency (ECHA) en 50 µg/m³.
- **Índice térmico:** basado en la temperatura seca del aire y la humedad relativa, este índice ofrecido por el equipo de monitorización utilizado y explicado más adelante permite una medida somera sobre las condiciones de confort térmico a través de una medida cuantitativa del grado de satisfacción de las personas, basado en la UNE EN ISO 7730 [14].

Una vez establecidas las variables a monitorizar, se fijaron las condiciones de monitorización incluyendo un período total de 3 meses con medidas cada 15 minutos, lo que resultó en el análisis de más de 9.000 datos.

Los equipos de monitorización utilizados fueron los MICA Plus de InBiot. Estos tienen las siguientes características representativas y relacionadas con el objetivo de este trabajo:

- Cuenta con un sensor NDIR para la monitorización del CO₂ con un rango entre 400 ppm (nivel ambiental habitual) y 10.000 ppm, una resolución de 1 ppm y una precisión de ±30 +3% m.v.
- Contiene un sensor de silicio para la medida de temperatura con rango entre -40 y 145°C con resolución de 0,1 °C y precisión de ±0,5 °C.
- Para la humedad relativa se basa en un sensor capacitivo con rango completo, resolución del 1% y precisión de ±2%.
- Incluye un sensor para materia particulada 2,5 con un rango hasta 1.000 µg/m³, resolución de 1 µg/m³, y precisión por rangos de ±5 + 20% m.v. entre 0 y 100 µg/m³ y de ±25% m.v. entre 101 y 1.000 µg/m³.
- Por último, el formaldehído se mide a través de sensor de rango hasta 1.250 µg/m³, resolución 1,25 µg/m³, y precisión ±25 o el 20% de m.v. µg/m³.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



Figura 7.4. Equipo MICA Plus de InBiot, utilizado en la monitorización

Estos equipos se dispusieron a razón de uno por estancia respetando las pautas de la UNE en 171330 [15] (Figura 7.5):

Distancia desde la superficie interior del elemento (cm)			
Pared exterior con ventanas o puertas		100	
Pared exterior sin ventanas o puertas y pared interior		50	
Suelo	- límite inferior	10	
	- límite superior	- sentado	130
		- de pie	200

Figura 7.5. Cuadro de pautas de ubicación de equipos de monitorización

7.3. Resultados y discusión

Tras la retirada de equipos y análisis de datos se obtuvieron los siguientes resultados.

7.3.1. Confort higrotérmico – Índice térmico

En los siguientes gráficos de sectores (Figura 7.6 a Figura 7.8) se puede observar el comportamiento de los niveles de confort higrotérmico agregado y clasificado en 6 niveles: pobre (Azul oscuro), inadecuado (Naranja), regular (Verde oscuro), moderado (Azul claro), bueno (Morado) y excelente (Verde).

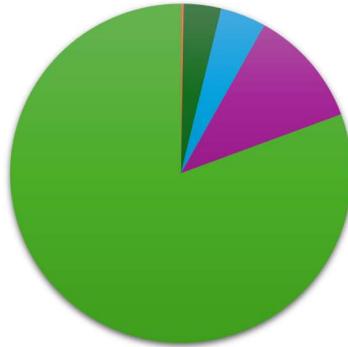


Figura 7.6. Gráfico de sectores de confort higrotérmico. Cocina



Figura 7.7. Gráfico de sectores de confort higrotérmico. Salón



Figura 7.8. Gráfico de sectores de confort higrotérmico. Dorm. Principal

Se puede observar en todos los gráficos expuestos que el confort higrotérmico de la vivienda es de una calidad muy buena. Observados los datos, no existen prácticamente momentos de desconfort (niveles pobre o inadecuado) siendo testimoniales los de nivel moderado siendo todos ellos dominados por las mediciones en los que los niveles eran bueno o excelente.

Se muestra a continuación un gráfico de temperaturas en el que se puede observar los momentos de desconfort, siendo estos coincidentes con los períodos de ventilación manual mediante apertura

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

de carpinterías en el dormitorio principal que provocaban un gran cambio brusco de temperatura (Figura 7.9):

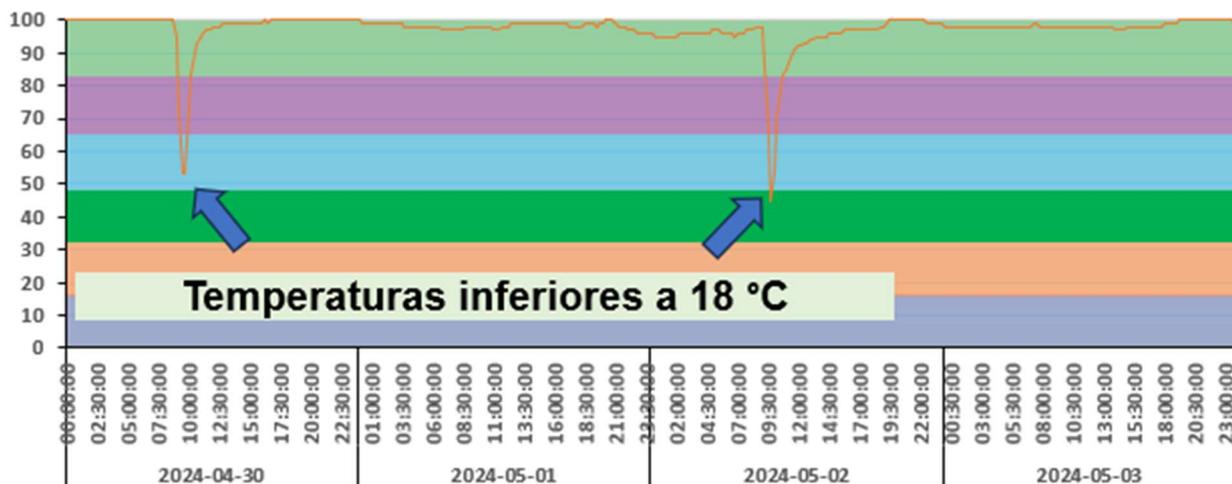


Figura 7.9. Gráfica de valores del índice térmico de la estancia Dormitorio Principal

7.3.2. Tasas de ventilación

Como se comentaba anteriormente, la función de la monitorización del dióxido de carbono se realizó para el cálculo de las tasas de ventilación, comprobando así la capacidad de las estancias para renovar el aire en los distintos momentos del período de monitorización.

Para poder tener una medida de la tasa aproximada, se deben escoger tramos con diferencias de concentraciones de más de 500 ppm. Esto, en los casos de carpinterías cerradas, se dio en casos concretos durante los tres meses. A continuación, se describe por estancia, las tasas de ventilación halladas:

- **Cocina:** el tramo más fiable se produjo de forma continua durante 7,5h con una diferencia de medidas de 474 ppm resultando en unos resultados de 0,24 renovaciones hora y un caudal de ventilación de 4,74 m³/h. La mayor tasa de ventilación que se detectó fue en 3,75h de muestreo con una diferencia de medidas de 427 ppm y unos resultados de 1,62 renovaciones hora y un caudal de 31,27 m³/h, lo que indica que en este período se encontraba alguna carpintería abierta.
- **Salón:** en esta ocasión se contó con dos medidas de diferencias de concentración por encima de los 500 ppm correspondientes a unos resultados de 1,09 renovaciones hora y 21,04 m³/h de caudal y de 1,16 renovaciones y 22,43 m³/h, pudiendo asumirse por tanto estos datos como característicos de la estancia.
- **Dormitorio principal:** en esta ocasión, se detectaron, como era esperable, tasas máximas en períodos de ventilación manual del dormitorio llegando estas hasta caudales de 125,27 m³/h. Sin embargo, la mayor parte del tiempo estas se encuentran cerradas, siendo estos valores los adecuados para caracterizar la estancia. El dato más fiable encontrado fue en un período de 16h (proporcionado por la ausencia de los usuarios de la vivienda) y que resultó en una diferencia entre concentraciones de 816 ppm, 0,12 renovaciones hora y un caudal de 2,38 m³/h.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Sirva como referencia el valor máximo de 0,6 renovaciones hora que establece el estándar de la Plataforma Passivhaus, caracterizada por una alta estanqueidad, ayudada por un sistema de ventilación forzada para la consecución de un ambiente interior saludable además de una alta eficiencia energética de las viviendas y edificios [16].

A continuación, por último, se muestra en la Figura 7.10 una gráfica de evolución de las concentraciones de CO₂ en el dormitorio principal en el que se observan las ventilaciones manuales a primera hora de la mañana y un período de ausencia en fin de semana.

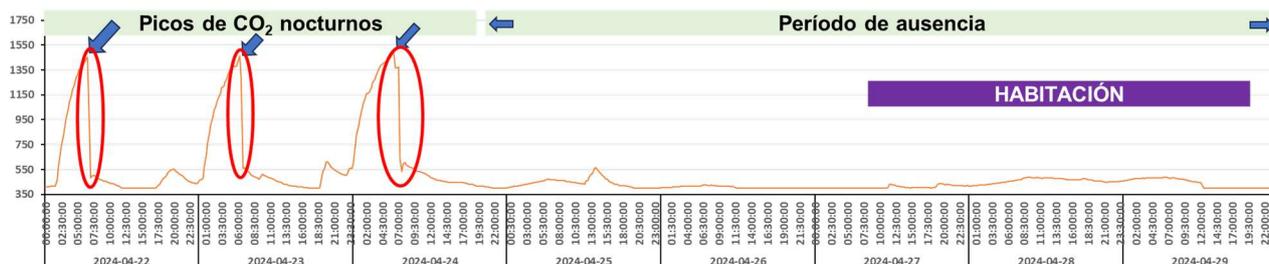


Figura 7.10. Gráfico de evolución de concentración de CO₂. Dormitorio principal

7.3.2.1. Materia particulada 2,5

En este caso, se muestran tres gráficos de sectores en el que se han contabilizado las horas en las que este contaminante se encontraba por encima del límite establecido (Azul oscuro) por la OMS en cada una de las tres estancias (Figura 7.11 a Figura 7.13)

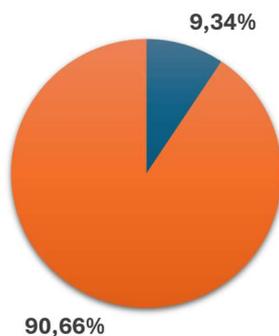


Figura 7.11. Gráfico de sectores de concentración de PM_{2.5}. Cocina

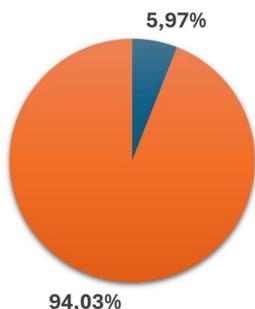


Figura 7.12. Gráfico de sectores de concentración de PM_{2.5}. Dormitorio principal

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

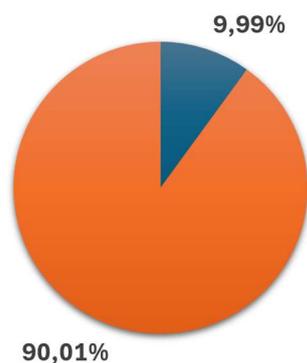


Figura 7.13. Gráfico de sectores de concentración de PM_{2,5}. Salón

Se puede considerar observando los tres gráficos una adecuada calidad del aire interior relacionada con la concentración de materia particulada, aunque no se puede confirmar que sea óptima por el 10% de horas aproximadamente en la que los niveles están por encima del límite establecido.

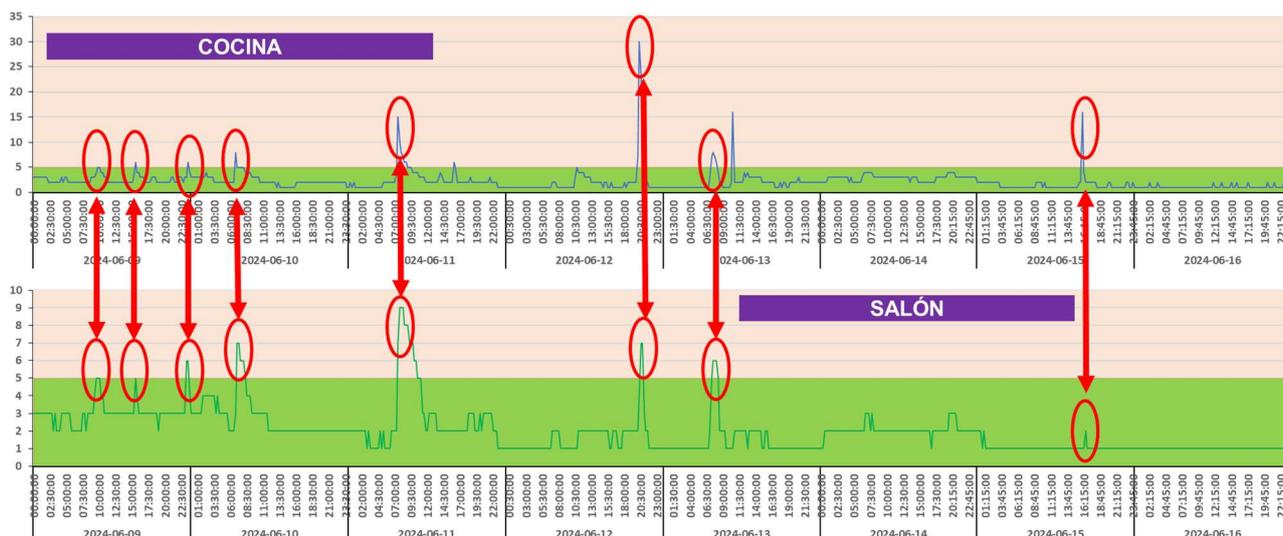


Figura 7.14. Gráfico de evolución de niveles de concentración de PM_{2,5} y correspondencia entre cocina y salón

Es de considerar que en esta vivienda ninguno de los ocupantes son fumadores y la vivienda se encuentra en una ubicación sin apenas tráfico rodado, por lo que se puede presuponer que tiene una concentración base de este contaminante muy baja. Esto cambiaría si la ubicación de la vivienda fuera en un área de tráfico alto o uno o más de los ocupantes tuvieran el hábito de fumar.

Como nota a tener en cuenta, se muestra la Figura 7.14 en la que se observa la correspondencia entre los niveles de cocina y salón por su cercanía, pudiendo marcar por tanto el origen de este contaminante en los períodos de cocina de los ocupantes. En verde se marca la zona saludable y en salmón la zona de valores no saludables.

7.3.3. Formaldehído

Por último, se muestran en forma de gráficas de sectores las mediciones de formaldehído dividido por niveles dentro y fuera del límite establecido por la ECHA (Fig. 15 a Fig. 17). De nuevo, se ha

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

marcado en azul oscuro el porcentaje de tiempo que los niveles de contaminante estaban fuera del límite y en naranja aquel calculado para las horas en las que se encontraba en niveles saludables.

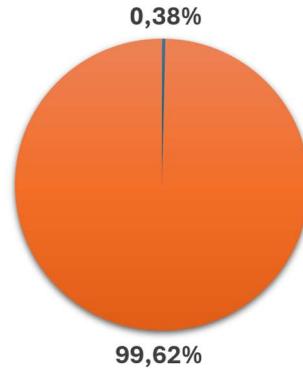


Figura 7.15. Gráfico de sectores de concentración de formaldehído. Cocina

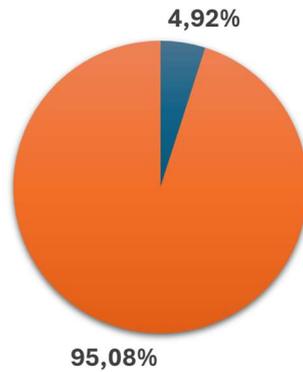


Figura 7.16. Gráfico de sectores de concentración de formaldehído. Dormitorio principal

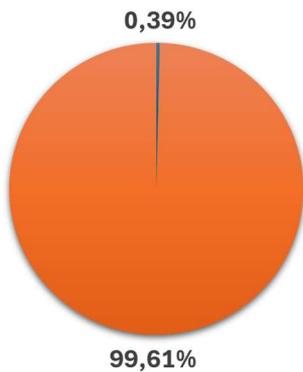


Figura 7.17. Gráfico de sectores de concentración de formaldehído. Salón

Se puede ver en los gráficos anteriores que el número de horas en esta vivienda por encima de los niveles establecidos como saludables para formaldehído son anecdóticos en cocina o dormitorio

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

principal. Sin embargo, superan el 5% en el caso del dormitorio principal, posiblemente provocado por la cantidad de mobiliario y un menor volumen de aire que en el salón, aunque esta relación se debe confirmar con otros estudios más pormenorizados y definidos para este contaminante.

7.4. Conclusiones

En este trabajo se ha recopilado y analizado los datos de confort térmico y de calidad del aire interior de una vivienda de reciente construcción que, por ubicación, partía de unas buenas condiciones base no teniendo a su alrededor grandes focos de contaminación que pudieran producir altas concentraciones en el espacio interior.

Sin embargo, se han observado datos por encima del límite saludable en torno al 10% para materia particulada 2,5 en todas las estancias monitorizadas y un 5% en el dormitorio principal para formaldehído.

Conocer estos datos, y transmitiéndose estos a los usuarios puede posibilitar la concienciación de los mismos para que puedan hacer uso de la ventilación forzada con la que cuenta la vivienda y que, actualmente, se encuentra sin uso por razones de confort acústico.

Como datos a tener en cuenta, se ha observado el buen comportamiento higrotérmico de una vivienda de reciente construcción. También la correspondencia entre estancias cercanas para niveles de contaminación, siendo capaz el contaminante de expandirse por la vivienda antes de poder ser expulsado a través de las carpinterías de altas prestaciones. Esto implica la necesidad de contar con un sistema de ventilación forzada que pueda reducir el nivel de contaminación en origen para que no se disemine a otras estancias y para mantener niveles saludables en la misma estancia.

Como futura línea de investigación para estos datos, se pretende llevar a cabo un análisis más profundo detallando los niveles de exposición para los ocupantes en momentos de ocupación en la estancia ya que el presente análisis tiene como limitación que todos los datos aquí presentados están referidos al período total de muestreo sin discriminar la ocupación o no de la estancia.

7.5. Bibliografía

- [7.1] Parlamento Europeo y Consejo Europeo (2002): “Directiva 2002/91/CE de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de edificios”
- [7.2] Consejo Europeo (1993): “Directiva 93/76/CEE de 13 de septiembre de 1993 relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE)”
- [7.3] Consejo Europeo (1988): “Directiva Directiva 89/106/CEE 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción”
- [7.4] EU Technical Expert Group on Sustainable Finance (2020): “Technical report: Financing a sustainable European economy”

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [7.5] Heydarian *et al.* (2017): Heydarian, A., E. Pantazis, A. Wang, D. Gerebr, B. Becerick-Gerber (2017): "Towards user centered building design: Identifying end-user lighting preferences via immersive virtual environments", *Automation in Construction*, 81 (2): 56-66. ISSN 0926-5805 <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.05.003>.
- [7.6] CGATE (2019): "Edificios y Salud - 7 Llaves para un Edificio Saludable".
- [7.7] CGATE, AEICE & GBCe (2021): "Edificios y salud: Reinventar el hábitat pensando en la salud de las personas".
- [7.8] CGATE (2022): "Estudio sobre la calidad del Aire Interior en Viviendas".
- [7.9] CGATE, AEICE & GBCe (2023): "Rehabilita saludable".
- [7.10] Fernández Castillo *et al.* (2022): Fernández Castillo, J., J. López-Asiain Martínez, A. Payán de Tejada Alonso, A. Sanz Corma (2022): "Indoor air quality at night in bedrooms depending on the door opening", *Anales de Edificación*, 8 (2): 52-56. <https://doi.org/10.20868/ade.2022.5043>
- [7.11] Payán de Tejada Alonso *et al.* (2022): Payán de Tejada Alonso A., J. Fernández Castillo, J. López-Asiain Martínez, S. Aragón Chicharro (2024): "Monitoring of pm2. 5 in residential buildings in northern Spain", *Advances in building engineering research*. Dyckinson. 49-70. <https://doi.org/10.20868/ade.2022.5043>
- [7.12] UNE (2017): "UNE EN 12207:2017 Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación".
- [7.13] INSST (2000): "NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior".
- [7.14] UNE (2006): "UNE EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local".
- [7.15] UNE (2024): "UNE 171330:2024 Revisión de la calidad ambiental en interiores".
- [7.16] Passivhaus Institute (2013): "Certification criteria for residential Passivhaus houses". https://passiv.de/downloads/03_certification_criteria_residential_en.pdf

8. Nuevos sistemas de medición de nutrientes (amonio, nitrato, nitrito y fosfato) en tiempo real para control de efluentes de depuradoras

Jordi Cros Herrero(*), Montserrat Batlle Ribas()**

(*) Jefe de Innovación. ADASA, (**) . Especialista en Innovación. ADASA

8.1. Introducción

La gestión de efluentes en depuradoras es fundamental para proteger los ecosistemas acuáticos y responder a los requisitos de la normativa europea. La reciente revisión de la Directiva sobre el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (91/271/EEC)^{1 2}, y que pronto entrará en vigor, establece disposiciones más estrictas para el control de nutrientes críticos en las aguas residuales, en especial nitrógeno (N) y fósforo (P). En particular, a partir de 2039, la normativa exigirá que todas las plantas de tratamiento que gestionen efluentes de más de 150,000 habitantes equivalentes implementen tratamientos avanzados (terciarios) para eliminar eficazmente estos nutrientes y mitigar su impacto en el medio ambiente. Esta normativa surge como respuesta a los efectos negativos que tienen el nitrógeno y el fósforo cuando se liberan al medio ambiente sin tratar. La acumulación de estos nutrientes en cuerpos de agua puede causar eutrofización, un proceso que promueve el crecimiento excesivo de algas y reduce el oxígeno disponible, afectando la biodiversidad acuática y, en algunos casos, la calidad del agua para el consumo humano.

Estos nuevos estándares imponen también la necesidad de adoptar tecnologías de medición sostenibles y respetuosas con el entorno, capaces de realizar monitoreos en continuo y en tiempo real sin comprometer la sostenibilidad de las operaciones. Sin embargo, hasta ahora, los sistemas de monitoreo en tiempo real requerían altos costos de adquisición y un mantenimiento intensivo, lo cual complicaba su adopción. La aparición de nuevas tecnologías de medición de bajo costo, de menor mantenimiento y con un enfoque ambientalmente responsable podría transformar el control de nutrientes en las depuradoras, facilitando el cumplimiento de los requisitos normativos, optimizando la eficiencia de los procesos y promoviendo una gestión de aguas residuales alineada con los objetivos de sostenibilidad europeos. Este artículo propone soluciones innovadoras que pueden facilitar la implementación de estas medidas y su potencial impacto en la gestión del agua en toda Europa.

8.2. Principio tecnológico

El sistema propuesto para medición en tiempo real proporciona datos precisos y oportunos, facilitando una gestión más eficiente en el tratamiento de aguas y asegurando el cumplimiento de las normativas ambientales. El dispositivo de medición Dropletsense™ utiliza un sistema de

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271>

² <https://www.boe.es/doue/2024/3019/L00001-00059.pdf>

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

monitoreo continuo patentado basado en nanogotas, lo que permite una alta frecuencia de muestreo con un consumo mínimo de reactivos y energía. Su tecnología de detección se basa en un enfoque microfluídico que permite un formato compacto y eficiente para el análisis de agua. Durante el proceso, la muestra se combina con reactivos líquidos dentro del dispositivo y se inyecta en una corriente de aceite, formando "zonas de nanogotas" discretas donde los reactivos interactúan rápidamente con la muestra, produciendo un cambio de color casi instantáneo. Esta tecnología permite obtener una nueva nanogota cada 10 segundos, generando datos de alta frecuencia de forma autónoma, ideales para el monitoreo continuo y la detección de tendencias.

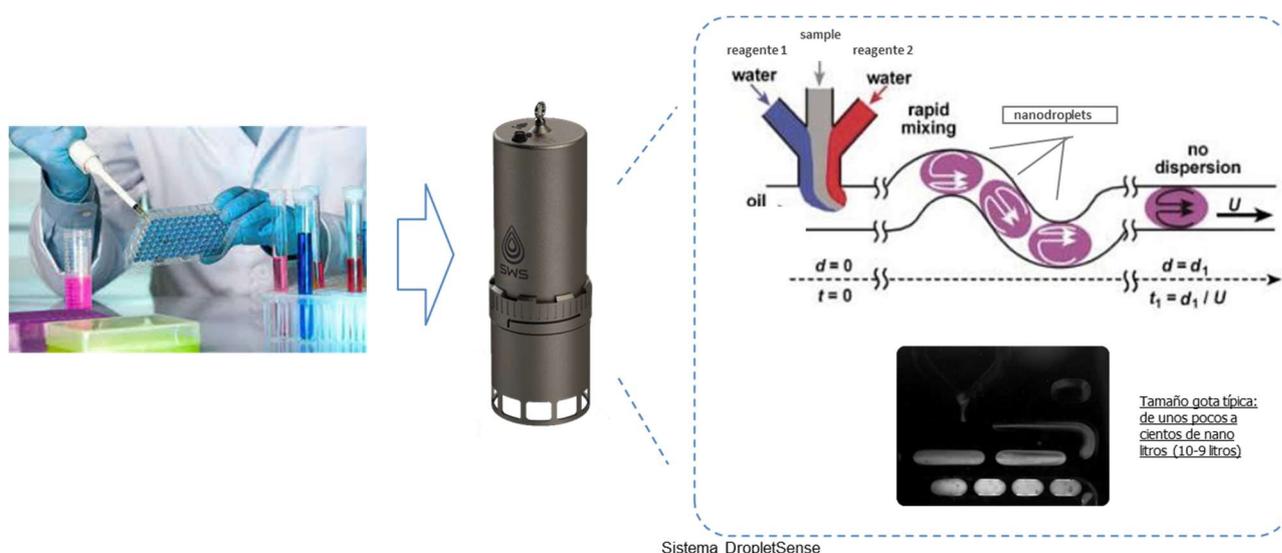


Figura 8.1. Detección microfluídica.

8.2.1. Determinación de amonio

El monitoreo de los niveles de amonio/amoniaco es fundamental para optimizar los procesos de tratamiento de aguas residuales y para comprender mejor el impacto de los vertidos de aguas residuales crudas en las aguas superficiales.

El amonio (NH_4^+) y el amoniaco (NH_3) son parte del ciclo del nitrógeno y existen en equilibrio. El amonio, típicamente inofensivo, es prevalente (>98%) frente al amoniaco más tóxico (<2%), a menos que se den condiciones de pH y temperatura elevados.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, el amonio se monitorea para el control del proceso, asegurando una nitrificación/desnitrificación óptima que convierta el nitrógeno disuelto (NH_4^+ , NO_2 , NO_3) en gas nitrógeno (N_2), dejando típicamente bajos niveles de nitrógeno disuelto en el vertido. Si el proceso no se gestiona adecuadamente, se libera óxido nitroso, un gas de efecto invernadero perjudicial.

Sin embargo, el vertido de aguas residuales no tratadas durante eventos de descargas del sistema unitario de alcantarillado (CSO), junto con el escurrimiento de fertilizantes agrícolas e industriales, puede resultar en niveles elevados de amonio/amoniaco, lo que provoca un crecimiento excesivo de algas y eutrofización en ríos, estuarios y aguas costeras, con efectos perjudiciales sobre la vida acuática local.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La determinación del amonio mediante el sistema de detección microfluidica ofrece alta precisión y confiabilidad, ideal para aplicaciones industriales y ambientales. Basado en la reacción de Berthelot, según la norma ISO 23695, utiliza el método químico del Indofenol, una técnica ampliamente empleada en laboratorios, que permite la detección autónoma y cuantitativa de amoníaco sin sufrir de derivas en las mediciones, a diferencia de otros métodos como los electrodos selectivos de iones (ISE).

Este sistema mide el nitrógeno amoniacal total tras una activación por calor, lo cual permite obtener datos estables y precisos para un amplio rango de concentraciones, desde niveles bajos hasta altos de amoníaco. El dispositivo también incorpora un estándar de referencia para el control de calidad de rendimiento, asegurando así la precisión y consistencia en el análisis a lo largo del tiempo.

El diseño continuo de este método permite el monitoreo constante de amonio/amoníaco en distintas aplicaciones, con una frecuencia de mantenimiento optimizada: tanto el cambio de filtro como el cambio de reactivos se realizan cada tres meses en aplicaciones ambientales con turbidez de hasta 250 NTU. Esto convierte al método en una solución eficiente y autónoma para la detección precisa de amonio/amoníaco en diferentes entornos.

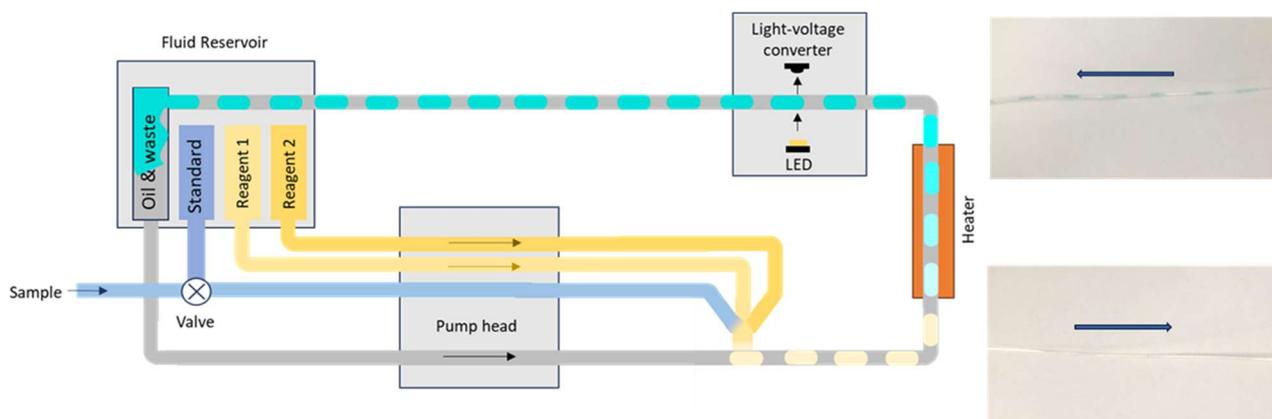


Figura 8.2. Sistema de medida de amonio.

8.2.2. Determinación de nitratos y nitritos

El monitoreo de nitrato y nitrito en aguas superficiales permite detectar de manera temprana niveles elevados para investigaciones de vertidos y para guiar acciones correctivas, incluidas soluciones basadas en la naturaleza. En las plantas de tratamiento de aguas residuales, los niveles de nitrato y nitrito pueden medirse para mejorar el control de los procesos (nitrificación y desnitrificación) y el monitoreo de los vertidos.

El nitrato y el nitrito son parte del ciclo del nitrógeno. En aguas superficiales, el amonio se oxida típicamente a través del nitrito hasta el nitrato, que es más estable. Las principales fuentes contribuyentes son el escurrimiento de fertilizantes agrícolas y estiércol, así como las aguas residuales descargadas. Los niveles elevados de nitrato pueden provocar un crecimiento excesivo de algas y eutrofización en lagos, estuarios y aguas costeras, con efectos perjudiciales sobre la vida acuática local. En el agua potable, el objetivo suele ser obtener unos niveles de nitrato ≤ 10 mg/L para evitar el síndrome del bebé azul y otros efectos adversos para la salud humana.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En el sistema presentado, la detección de nitritos y nitratos se basa en métodos de química húmeda estándar, cumpliendo con la normativa de la EPA de EE. UU. y la Directiva Marco del Agua de la UE. El rango de nitrato es de 0 a 100 mg/L NO₃ con un límite de detección (LD) de 0.10 mg/L NO₃, y el rango de nitrito es de 0 a 75 mg/L NO₂ con un LD de 0.10 mg/L NO₂.

8.2.3. Determinación de fosfatos

El fosfato se monitoriza en las redes de agua y en los cursos fluviales para comprender mejor y reducir el impacto ambiental causado por los vertidos de aguas residuales, los desbordamientos de tormentas y los escurrimientos agrícolas, que pueden resultar en un crecimiento excesivo de algas y la muerte de peces. Estos datos de contaminación pueden usarse para orientar decisiones de inversión o supervisar la efectividad de medidas correctivas como los humedales.

Además del fosfato disuelto 'reactivo' u 'orto-fosfato', que se mide colorimétricamente con DropletSens™, existe también el fosfato suspendido o ligado, y todos los compuestos de fosfato juntos suman el 'Fósforo Total' o 'Total-P'.

La Directiva 91/271/EEC, así como su revisión, establecen límites de descarga de fosfato para proteger los ecosistemas receptores. También se está poniendo un mayor enfoque en la recuperación de fósforo, ya que es un recurso limitado y necesario para la producción de fertilizantes.

La detección de fosfatos en el sistema presentado se realiza mediante el método de azul de molibdeno, que se basa en la formación de un complejo de fosfomolibdato, que, en presencia de un agente reductor, adquiere un color azul intenso. Este método es altamente sensible y permite la cuantificación precisa del ortofosfato disuelto, operando de forma autónoma en un rango de 0 a 8 mg/l de PO₄-P, con un límite de detección de 0,01 mg/l de PO₄-P, lo que asegura mediciones detalladas y adecuadas para diversas aplicaciones ambientales e industriales.

Cuadro 8.1. Rangos y límites de detección de los nutrientes.

ANALITO	RANGO	LD
Nitrato NO ₃	0 –100 mg/L NO ₃	0.10 mg/L NO ₃
Nitrito NO ₂	0 –75 mg/L NO ₂	0.10 mg/L NO ₂
Amonio NH ₄	0 –35 mg/L NH ₄ -N	0.01 mg/L NH ₄ -N
Orto-fosfato PO ₄	0 –8 mg/L PO ₄ -P	0.01 mg/L PO ₄ -P

Personalizable en términos de rango y LD

8.3. Aplicaciones

El sensor de medida de nutrientes tiene diversas aplicaciones cruciales para la gestión ambiental y operativa en instalaciones de tratamiento de aguas y procesos industriales.

Monitoreo de Efluentes: El sensor permite un monitoreo continuo de los parámetros clave en el efluente, lo que previene infracciones legislativas y costosas penalizaciones por descargas no conformes. Al proporcionar datos de calidad de laboratorio en tiempo real, ayuda a asegurar que las descargas cumplan con las normativas, evitando así sanciones y problemas regulatorios.

Control de Procesos: En procesos industriales, como el control de dosificación y aireación, el sensor ofrece datos precisos y en tiempo real para el control de procesos de bucle cerrado. Esto facilita la optimización de las operaciones, reduciendo costos operativos mediante una dosificación y aireación eficientes, lo que permite mejorar el rendimiento del proceso y minimizar el uso de recursos.

Monitoreo Ambiental: En la gestión de cuencas, el sensor de nutrientes proporciona una solución de monitoreo remoto continuo, con capacidad de implementación durante varios meses. Esto permite detectar de forma temprana la contaminación de las zonas de captación, actuando como una alerta temprana ante posibles contaminantes. Esta capacidad de monitoreo prolongado es clave para la gestión de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente.

8.4. Ejemplos de aplicación

8.4.1. Monitoreo de efluentes en una gran planta de tratamiento de aguas residuales (Wiesbaden, Alemania)

El caso de estudio se centra en la planta de tratamiento de aguas residuales Hauptklärwerk (HKW) de Wiesbaden, que sirve a una población de más de 250,000 personas y trata más de 50 millones de litros de aguas residuales diariamente antes de su descarga segura al río Rin. El objetivo de la implementación fue probar los sensores de nitratos/nitritos de SWS para monitorizar los niveles de efluente y verificar tanto la eficiencia operativa como el cumplimiento de los límites de descarga. Hasta ese momento, el monitoreo de efluentes en HKW se realizaba principalmente mediante muestreo y análisis en laboratorio, un proceso que resultaba laborioso y limitaba la resolución temporal de las mediciones. Además, se medían los niveles de nitrógeno total (N_{tot}), que incluyen amoníaco (NH_4-N), nitrato (NO_3-N) y nitrito (NO_2-N), con un límite combinado de descarga de 8 mg/L. El reto principal consistía en evaluar si los sensores de nitratos/nitritos de SWS podían medir con precisión los niveles de NO_3-N y NO_2-N , cumpliendo con los siguientes objetivos de despliegue: más del 90% de precisión y exactitud, ser compatibles con las condiciones del efluente y ser fáciles de operar para el personal de HKW, y permitir un monitoreo autónomo del cumplimiento de los límites de descarga.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



Figura 8.3. Planta depuradora de Wiesbaden.

Para ello, se instaló un sensor SWS DropletSens™ NO₃/NO₂ en una cámara de desbordamiento de efluente en las instalaciones de HKW, con un filtro de entrada de 20 µm. El sensor estaba configurado para medir los niveles de nitrato y nitrito en el efluente cada 10 segundos. Además, cada dos días se realizaban controles de calidad de manera autónoma utilizando un estándar interno, y se recogieron 49 muestras puntuales y 41 muestras compuestas de 24 horas para ser analizadas en el laboratorio de HKW como referencia.

A lo largo de las seis semanas del despliegue, los resultados fueron muy positivos. El sensor mostró una excelente alineación con las mediciones de referencia del laboratorio, con una precisión del 4.3% basada en más de 20 controles de calidad internos. El personal de HKW operó el sistema sin inconvenientes, realizando el mantenimiento necesario, como el cambio del filtro de entrada después de cuatro semanas. Además, el sensor demostró su capacidad para monitorizar de manera continua el cumplimiento de los límites de descarga, manteniendo los niveles combinados de NO₃ y NO₂ por debajo de 6 mg/L durante todo el período.

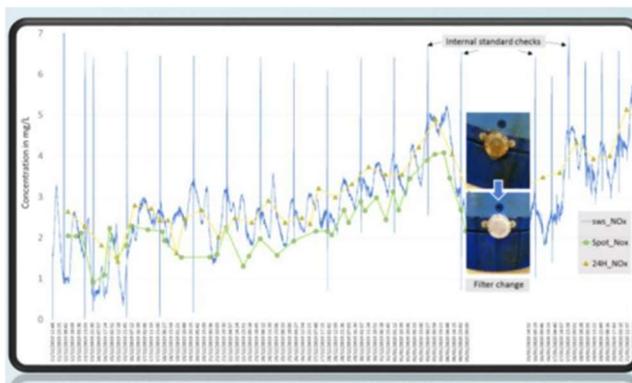


Figura 8.4. Monitorización NO_x sensor (azul) datos laboratorio NO_x (amarillo y verde).

Más allá de confirmar el cumplimiento de las normativas de descarga, los datos de alta densidad revelaron variaciones diarias y estacionales significativas en los niveles de efluente, lo que podría servir para optimizar aún más los procesos de tratamiento. Se observó que los niveles de NO₃/NO₂ fluctuaban de forma diaria, con una disminución por la mañana, un mínimo alrededor del mediodía y un aumento constante hacia la medianoche. Además, los datos mostraron una variación estacional

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

considerable, con un aumento de los niveles en los días previos a la Navidad, seguido de una fuerte disminución en enero.

Con estos resultados exitosos, se plantearon futuras implementaciones, como la posibilidad de añadir la medición de amoníaco (NH_4) y explorar el uso del formato de analizador en línea de SWS para continuar mejorando el monitoreo de la calidad del efluente.

8.4.2. Monitoreo ambiental del río Itchen (Southampton, Reino Unido)

En el corazón de Hampshire, Inglaterra, se encuentra el río Itchen, una vía fluvial de 26 millas que desemboca en el Southampton Water y el Solent. Este río, un ejemplo destacado de aguas calcáreas, ha sido designado como un Sitio de Especial Interés Científico (SSSI) debido a sus hábitats de alta calidad que albergan especies protegidas. Fue aquí donde se decidió probar los sensores de nitratos/nitritos de SWS, con el objetivo de demostrar su capacidad para realizar monitoreo ambiental en aguas salobres.

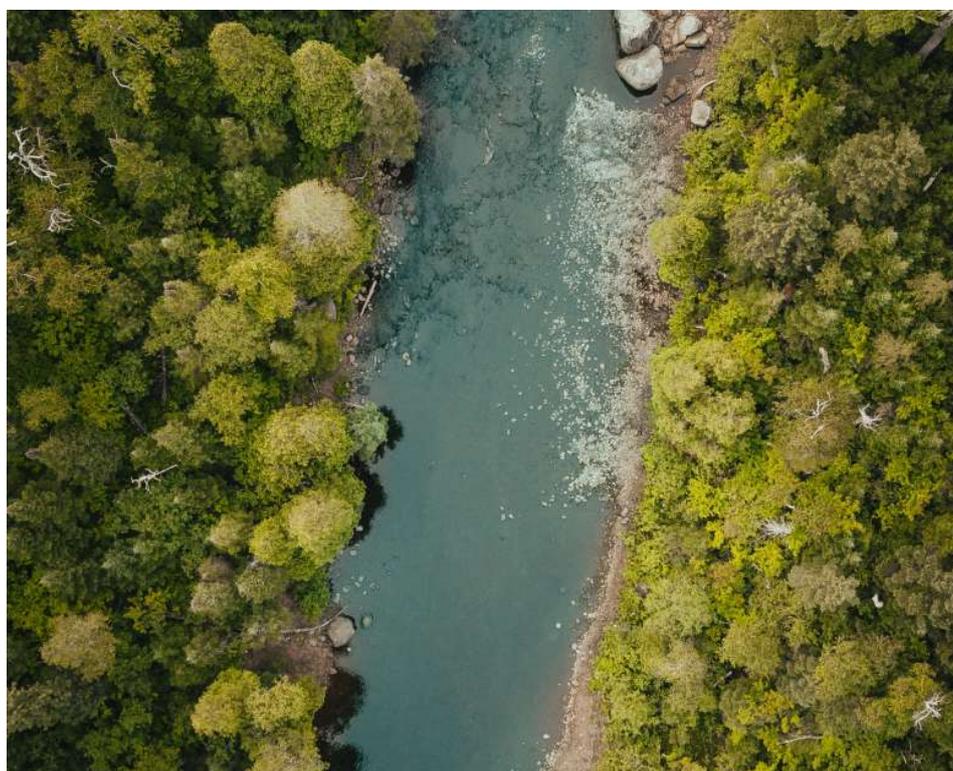


Figura 8.5. Río Itchem.

El desafío de este proyecto fue doble. Primero, se buscaba comprobar las capacidades operativas de los sensores SWS en condiciones reales, con metas muy claras: garantizar una precisión y exactitud superior al 90%, asegurar que los sensores fueran compatibles con los niveles de nitrógeno total (nitrato y nitrito) de hasta 50 mg/L, y que pudieran funcionar correctamente en aguas salobres con salinidad de hasta 10 dS/m. El segundo objetivo era detectar eventos ambientales clave relacionados con la salud del río, como los efectos de las mareas diarias y la influencia de eventos externos, como lluvias intensas o descargas de aguas residuales.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Para ello, se instaló un sensor SWS DropletSens™ NO₃/NO₂ con un filtro de entrada de 20 µm, suspendido sobre el río mediante una plataforma flotante que se movía con las mareas. El sensor fue configurado para medir los niveles de nitrato y nitrito en el agua cada 10 segundos. Durante un período de 4 semanas, se tomaron 30 muestras puntuales a lo largo de todas las fases de marea, que luego fueron analizadas en el laboratorio para proporcionar mediciones de referencia. El sistema de alimentación del sensor se gestionó a través de una batería, mientras que la telemetría remota se realizó a través de banda ancha móvil, todo ello protegido en una pequeña caja de soporte junto al río.

Los resultados del monitoreo fueron muy prometedores. El sensor demostró una precisión del 6.4% respecto a las mediciones de laboratorio y un 5.1% de precisión con el estándar interno. Se registraron niveles de nitrógeno total de hasta 37 mg/L, siendo más del 90% de este nitrógeno proveniente de NO₃-N. El sensor fue capaz de medir con precisión a lo largo de todas las fases de marea, desde aguas frescas hasta salobres, lo que confirmó su capacidad para operar en un entorno tan variable como el río Itchen.

Lo más destacable fue la cantidad y calidad de los datos obtenidos. Más de 160,000 puntos de medición revelaron patrones claros en los niveles de nutrientes relacionados con las mareas: el nivel de nitrógeno total variaba entre 40 mg/L en la bajamar y 25 mg/L en la pleamar, principalmente debido a los cambios en el nitrato. Además, eventos de lluvia fuerte redujeron los niveles de nitrógeno total a menos de 18 mg/L en algunos días. Un evento inesperado fue la detección de un aumento temporal en los niveles de nitrito (+2 mg/L) debido a una posible descarga de aguas residuales procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Portswood, situada a solo 400 metros río arriba.

Este despliegue exitoso no solo validó el uso de los sensores para monitorear la salud del río, sino que también sirvió como base para futuras implementaciones. Los datos obtenidos abrieron nuevas oportunidades para el monitoreo ambiental de otros estuarios y aguas costeras, tanto a nivel nacional como internacional. La capacidad de estos sensores para ofrecer datos en tiempo real de alta calidad y densidad representa un avance significativo en la monitorización de ecosistemas acuáticos. Esta tecnología podría convertirse en una herramienta esencial para mejorar el monitoreo de las descargas y, en última instancia, la salud de los ríos en todo el mundo.

8.4.3. Monitorización de la escorrentía de nutrientes agrícolas para proteger el estuario del río Ebro (Ballobar, España)

El río Ebro, el más largo de España, culmina en los humedales protegidos del Delta del Ebro, una zona de gran importancia ecológica. Sin embargo, la escorrentía agrícola a lo largo del río, especialmente de nitratos durante la temporada de riego, están afectando su salud y podrían causar eutrofización. Para abordar este problema, la Autoridad del Río Ebro está llevando a cabo un monitoreo constante con el objetivo de impulsar medidas correctivas.

Con este fin, se seleccionó una estación de medida en Ballobar como sitio piloto para evaluar cómo los sensores en línea pueden ayudar a monitorear los niveles de nitrato en el río. ADASA, líder de soluciones tecnológicas para la medición de calidad del agua, realiza los mantenimientos para gestionar la red de monitoreo. El desafío era evaluar la idoneidad, precisión y autonomía de los sensores Dropletsense™ propuestos para este propósito.

Como parte del proyecto piloto, se instaló un sensor DropletSens™ de nitratos en la estación de medida, que tomaba muestras de agua del río Ebro. Los objetivos para el sistema de monitoreo

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

eran claros: lograr una precisión superior al 90%, asegurar que las mediciones fueran válidas en uso autónomo y mantener un intervalo de servicio de un mes.

El sensor fue calibrado el primer día y, a lo largo de los siguientes dos meses, se realizaron cambios en el cartucho de reactivos y el filtro de entrada para asegurar un rendimiento constante. Durante este tiempo, el sensor se configuró para medir los niveles de nitrato de manera continua cada 10 segundos. Además, se realizaban controles semanales con un estándar de nitrato para asegurar la calidad de las mediciones, mientras que también se tomaban muestras en el laboratorio para comparar y validar los datos obtenidos.



Figura 8.6. Estación de medida en el río Ebro.

Los resultados del proyecto piloto fueron muy positivos. Se alcanzaron todos los objetivos establecidos en términos de precisión, mediciones válidas y mantenimiento del equipo. Además, se demostró que el sensor era compatible con turbideces de hasta 250 NTU, lo cual es común en las aguas del Ebro durante ciertas épocas del año. Los datos obtenidos revelaron fluctuaciones significativas en los niveles de nitrato a lo largo del día y a corto plazo, con un aumento claro de estos niveles a medida que avanzaba la temporada de riego.

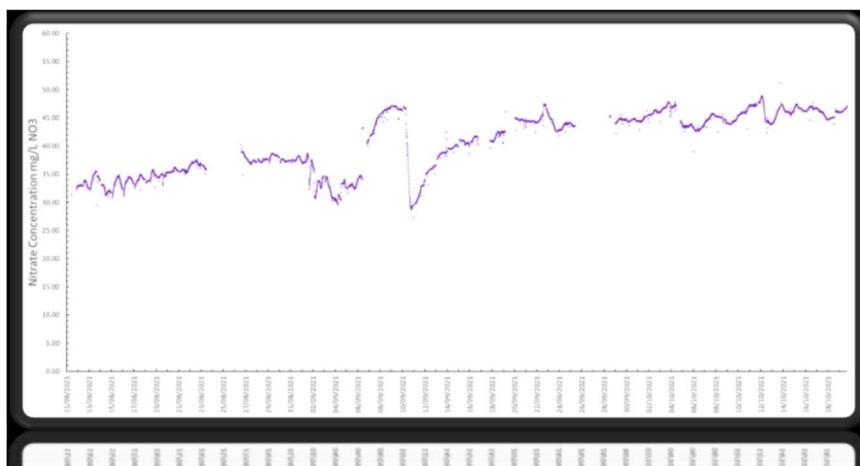


Figura 8.7. Datos del sensor Dropletsense™.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Al final del periodo de monitoreo, se habían recopilado más de 750,000 puntos de medición. Los niveles de nitrato en el río comenzaron en 30 mg/L en agosto y aumentaron a más de 50 mg/L a finales de octubre, lo que muestra el impacto directo de los escurrimientos de nitratos durante la temporada de riego.

Este proyecto piloto ha sido un éxito, demostrando que Dropletsense™ es una herramienta eficaz para monitorear la calidad del agua en tiempo real y ayudar a abordar los problemas ambientales relacionados con la agricultura y el manejo del agua en el Ebro.

8.5. El proyecto SPORE-MED

El proyecto SPOREMED (Sustainable Upgraded WWTPs for Resource Recovery, Water Reuse, and Health Surveillance in the Mediterranean Region)³ se enmarca dentro de la convocatoria PRIMA, en el ámbito de la gestión integrada y adaptativa de aguas residuales en el Mediterráneo. Su objetivo es mejorar la eficiencia de las depuradoras, fomentando la reutilización del agua, la recuperación de recursos y la vigilancia de la salud, garantizando a su vez el cumplimiento normativo y la seguridad en los procesos. Con un presupuesto de 3,63 millones de euros (financiado en un 92% por la UE), el proyecto se desarrollará entre 2024 y 2026.

Los avances incluyen el uso de equipos de medición en línea como aquaBio, para la detección de *E. coli* y coliformes totales, y aquaNutri, para fosfatos, nitratos y nitritos. Se prioriza la seguridad operativa y la ciberseguridad mediante normas como ISO/IEC 27001, NIS2 y NDIS, asegurando la protección de datos y la resiliencia ante ciberataques. Además, se integra el criterio de ecodiseño, con metodologías basadas en las normas EN4555X para minimizar el impacto ambiental, facilitando el desmontaje, la reutilización y el reciclaje de los equipos.

Este proyecto ofrece una respuesta integral a los desafíos del Mediterráneo, abordando la sostenibilidad, el desarrollo tecnológico y la protección del medio ambiente.

8.6. El proyecto INNO4H2O

El proyecto INNO4H2O⁴ se enmarca en el esfuerzo por abordar los desafíos relacionados con la escasez de agua en España, uno de los problemas más urgentes para el ciclo hídrico. Este ecosistema de innovación busca mejorar la gestión del agua mediante la colaboración entre centros tecnológicos y empresas, promoviendo soluciones avanzadas basadas en tecnologías desarrolladas previamente, como aquaNutri (amonio, nitratos nitritos y fosfato) entre otras.

Con un enfoque en la economía circular, la digitalización inteligente y las sinergias agua-energía, el proyecto impulsa el desarrollo de tecnologías sostenibles que se integran con servicios de alta eficiencia para optimizar los recursos hídricos. Este proyecto, financiado por el CDTI en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y el Plan de Recuperación, Transformación y

³ [Home - spore-med.eu](https://home-spore-med.eu)

⁴ [Proyecto INNO4H2O: Ecosistema de Innovación del sector del agua - ADASA](#)

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Resiliencia, tiene una duración prevista, de mayo de 2024 a diciembre de 2025, permitirá implementar y comercializar estas soluciones, que se alinean con los objetivos de sostenibilidad.

En este contexto, el desarrollo de equipos avanzados para la monitorización de nutrientes se convierte en una pieza clave dentro del marco de INNO4H2O, ya que contribuye a la optimización de los recursos disponibles, mejorando tanto la calidad como la eficiencia en la gestión hídrica. La gobernanza y el marco de colaboración estatal que impulsa el proyecto posicionan a España como líder en la innovación hídrica, con tecnologías que responden a las necesidades presentes y futuras del sector.

8.7. Conclusiones

Los sistemas de medición en tiempo real para la monitorización de nutrientes como amonio y fosfato en los efluentes de depuradoras representan una innovación clave para cumplir con los estrictos requisitos normativos establecidos por la legislación europea, especialmente en lo que respecta a la reducción de nutrientes críticos como el nitrógeno y el fósforo. La adopción de tecnologías de bajo costo, mínimo mantenimiento y con un enfoque sostenible tiene el potencial de transformar la gestión de las aguas residuales, permitiendo una mejora en la eficiencia operativa y en el cumplimiento normativo sin comprometer la sostenibilidad.

El uso de tecnologías como el sensor Dropletsense™ basado en microfluídica no solo facilita un monitoreo preciso y continuo de los niveles de nutrientes, sino que también destaca por su bajo consumo energético y reducido uso de reactivos. Esto es esencial para mantener sistemas sostenibles con un impacto mínimo en las emisiones y en la huella ecológica. Además, su capacidad para realizar mediciones en tiempo real permite la optimización de los procesos industriales, reduciendo costos operativos y mejorando la calidad del tratamiento de aguas.

Los casos de estudio presentados en Wiesbaden, el río Itchen y en el río Ebro han demostrado la efectividad y fiabilidad de estos sistemas en condiciones ambientales reales, validando su capacidad para operar en una variedad de entornos y detectar patrones relevantes. La implementación de estos sensores también puede ofrecer valiosos datos que contribuyan a la mejora continua de los procesos y a una gestión más eficiente de los recursos hídricos, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de la normativa europea.

Gracias a la convocatoria PRIMA y en el ámbito del proyecto SPORE-MED se ha podido realizar la fusión en un solo equipo las medidas de amonio, nitratos, nitritos y fosfato, incorporando elementos claves como son la ciberseguridad y el ecodiseño en el desarrollo del equipo de nutrientes.

El proyecto INNO4H2O completa el ciclo del desarrollo de la medida de nutrientes facilitando la llegada del equipo al mercado donde contribuirá a aumentar el potencial de mejora de la gestión hídrica en España.

9. Superficies Reflectoras Inteligentes para mejora eficiente de la cobertura en redes 5G y 6G de ondas milimétricas

Eduardo Martínez de Rioja del Nido¹, José Daniel Martínez de Rioja del Nido²

¹ Grupo de Ingeniería de Microondas y Sistemas de Radiocomunicación, Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones y Sistemas Telemáticos y Computación, Universidad Rey Juan Carlos (URJC)

² Grupo de Electromagnetismo Aplicado, Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Resumen

El despliegue de las nuevas redes 5G y 6G en las bandas de ondas milimétricas debe hacer frente a un reto significativo: las condiciones de propagación son más adversas que en las bandas de frecuencia utilizadas tradicionalmente. Esto ocasiona problemas de cobertura y la aparición de las denominadas “zonas ciegas”. Recientemente, se ha propuesto la utilización de superficies reflectoras inteligentes (RIS) para mejorar las prestaciones de las redes móviles. Las RIS no realizan ningún procesamiento activo de la señal recibida antes de volver a transmitirla, por lo que pueden desplegarse masivamente con un coste reducido y bajo consumo energético. En este trabajo, se presentan los resultados de varios diseños de RIS basadas en tecnología reflectarray para mejorar la cobertura en las redes 5G y 6G. Estas superficies cuentan con la capacidad de redirigir y conformar el haz, permitiendo la operación simultánea en varias bandas de frecuencia. Además, son una tecnología de bajo coste y energéticamente eficiente, cuya superficie plana facilitan su instalación en paredes o techos, minimizando el impacto visual en el entorno.

9.1. Redes 5G y 6G de ondas milimétricas

Una de las tecnologías clave de los futuros sistemas 5G y 6G es la utilización de nuevas bandas de frecuencia en el espectro de milimétricas para la red de acceso (e.g., 24-28 GHz, 38-40 GHz) [9.1]. El gran ancho de banda disponible en esta región del espectro permitirá aumentar significativamente la capacidad del sistema y las tasas de transmisión de datos, así como reducir la latencia [9.2]. Las redes 5G de ondas milimétricas quedan englobadas dentro de lo que se denomina como *5G Frequency Range 2* (5G FR2), mientras que el despliegue de 5G en las bandas de frecuencia tradicionales, inferiores a 6 GHz, se conoce como *5G Frequency Range 1* (5G FR1). Las redes 6G todavía no cuentan con un estándar definido, pero se espera que utilicen frecuencias por encima de los 100 GHz, en el rango de sub-THz. La Figura 9.1 muestra un esquema de la evaluación de las frecuencias utilizadas por los diferentes sistemas móviles.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES



Figura 9.1. Bandas de frecuencia utilizadas en la red de acceso: evolución del 4G al 5G y 6G de ondas milimétricas.

La contrapartida a todas las ventajas que ofrecen las ondas milimétricas es que éstas experimentan unas pérdidas de propagación y de penetración en objetos mayores que las de las ondas de frecuencia inferior a 6 GHz utilizadas por los sistemas anteriores [9.3]-[9.4]. Es decir, se reduce la distancia de cobertura y las ondas son más sensibles al bloqueo producido por obstáculos. Esto puede resultar en problemas de cobertura (aparición de “zonas ciegas” cuando no existe línea de visión directa con la estación base) o afectar a la estabilidad de los enlaces punto a punto [9.5]. Una posible solución al problema consistiría en desplegar un mayor número de estaciones base con celdas de menor tamaño. El inconveniente de esta estrategia es que supondría un coste muy elevado en equipos de red, produciendo también un aumento de los niveles de interferencia. Por tanto, no puede considerarse una solución eficiente desde el punto de vista energético, ni económico.

9.2. Superficies reflectoras inteligentes (RIS)

Como solución a los problemas de cobertura de las ondas milimétricas, se ha propuesto recientemente el desarrollo de entornos radioeléctricos inteligentes [9.6], donde el despliegue de superficies reflectoras inteligentes (RIS) juega un papel fundamental para resolver los problemas de cobertura [9.7]-[9.8]. Las RIS actúan como una especie de “repetidor” muy sofisticado, situado entre la estación base y los usuarios. Están formadas por una agrupación de celdas reflectoras, que pueden diseñarse independientemente para controlar la fase y/o amplitud de la señal reflejada. Estas celdas pueden incluir elementos reconfigurables o ser completamente pasivas. En cualquier caso, no realizan ningún procesamiento activo de la señal recibida antes de volver a transmitirla, por lo que pueden desplegarse masivamente con un coste reducido y bajo consumo energético (o incluso nulo, en el caso de RIS pasivas).

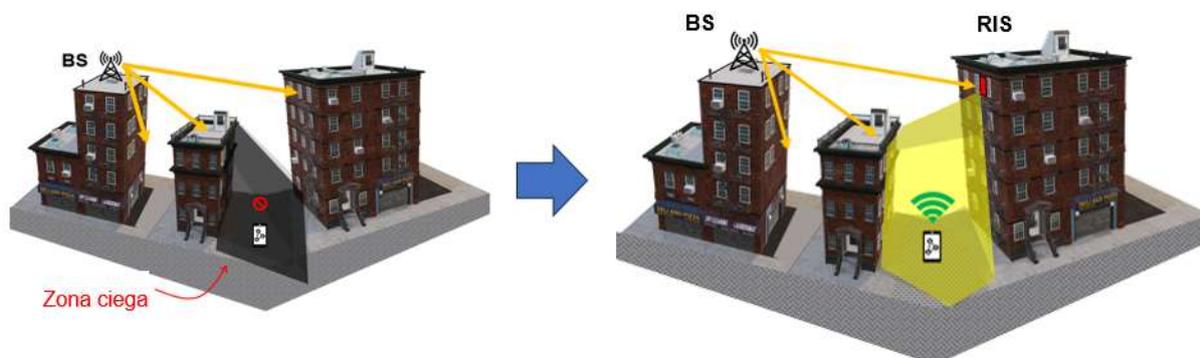


Figura 9.2. Utilización de una RIS en un escenario exterior para proporcionar cobertura en una zona ciega.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La Figura 9.2 muestra un ejemplo de cómo se proporcionaría cobertura en una zona ciega empleando una RIS fijada a la fachada de un edificio. La RIS recibiría la señal procedente de la estación base y la reflejaría hacia la zona ciega, conformando un haz con un apuntamiento y un ancho (tanto en azimut como en elevación) que se ajusten a los requisitos del escenario de cobertura.

Otro ejemplo de aplicación lo podemos encontrar en la Figura 9.3, donde la RIS se encuentra en el interior de un edificio y proporciona cobertura a los usuarios que trabajan en una oficina. En este caso, la estación base que ilumina la RIS se encuentra en el exterior del edificio, pero también sería posible plantear un escenario con una femtocelda situada dentro del edificio desde la que se ilumine una RIS para proporcionar cobertura en una zona ciega (por ejemplo, en aeropuertos, museos, estadios u otras grandes superficies).

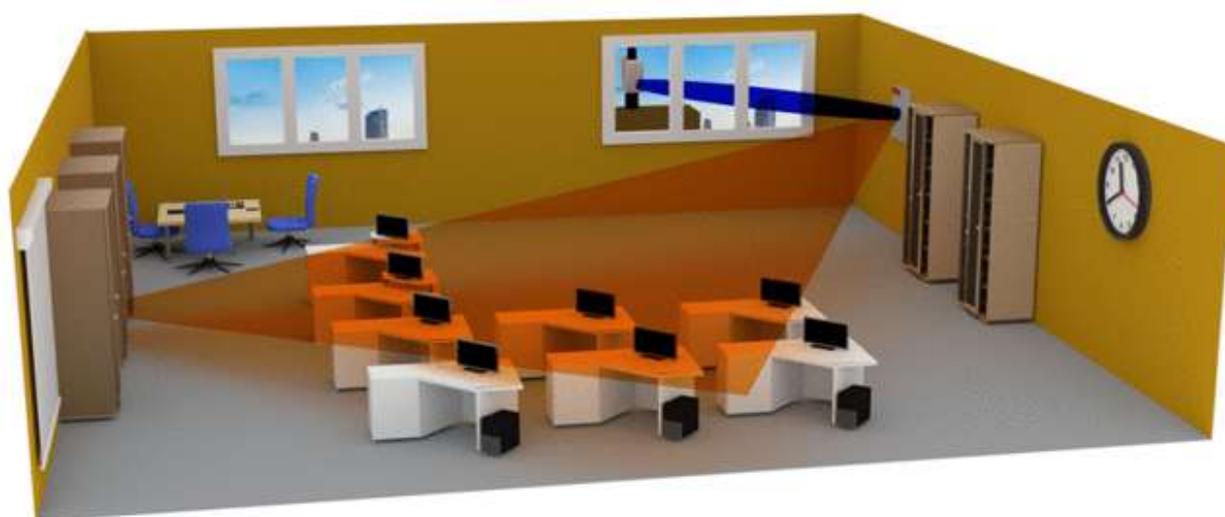


Figura 9.3. Utilización de una RIS en un escenario interior.

9.2.1. Clasificación de las RIS

Las RIS pueden dividirse en dos grandes grupos:

- RIS pasivas, también denominadas *Electromagnetic Skins* (ES). Este tipo de RIS están formadas por celdas pasivas, que se diseñan para proporcionar una cobertura específica. Este tipo de RIS cuentan con las ventajas de un proceso de fabricación sencillo y muy barato, facilidad de instalación y mantenimiento, y nulo consumo energético, lo que permite su producción y despliegue masivo a un bajo coste. Su limitación es el hecho de que proporcionan una cobertura fija [9.8]–[9.9].
- RIS reconfigurables: cuentan con dispositivos reconfigurables que permiten modificar el funcionamiento de la RIS (apuntamiento y conformado del haz, número de haces, etc.) en función de los requisitos del escenario. Proporcionan una flexibilidad mucho mayor que las RIS pasivas, ya que permiten implementar algoritmos de optimización de la red. A cambio, cuentan con las desventajas de una fabricación compleja y cara, y un mayor consumo energético [9.10]–[9.11].

9.2.2. Principio de funcionamiento

¿De dónde viene el calificativo de superficies “inteligentes”? Se puede justificar a partir de la comparación entre la RIS y una placa metálica reflectora (ver Figura 9.4). El panel metálico refleja todas las señales incidentes en la dirección especular (aplicación directa de la ley de Snell), por lo que no es posible controlar la dirección de la señal reflejada ni conformar el haz de radiación. Por el contrario, la RIS permite redirigir la señal en una dirección arbitraria y conformar una cobertura que cumpla una serie de requisitos. Esto es posible a partir de un diseño adecuado de sus celdas reflectoras. Cada una de dichas celdas debe diseñarse para introducir un desfase determinado en el campo incidente, que permite, mediante el efecto conjunto de todas las celdas, conformar un diagrama de radiación determinado [9.9].

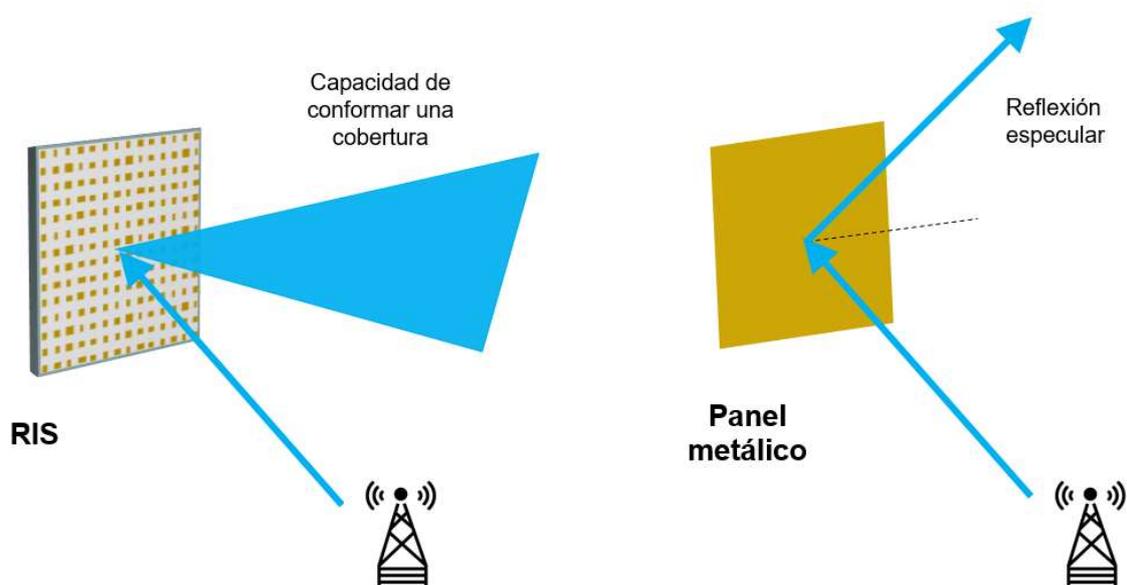


Figura 9.4. Comparativa entre el principio de funcionamiento de una RIS y un panel metálico.

9.2.3. RIS basadas reflectarrays

Una de las formas más eficientes de implementar una RIS es utilizando la tecnología reflectarray [9.12]-[9.14]. Las RIS basadas en paneles reflectarray pasivos cuentan con unos costes de fabricación, instalación y mantenimiento muy reducidos en comparación con los de las RIS reconfigurables, además de no requerir consumo energético y tener un bajo impacto visual. Un reflectarray se compone de una agrupación plana de elementos resonantes (parches, dipolos, anillos, etc.) impresos sobre un sustrato dieléctrico respaldado por un plano metálico. Los reflectarrays pueden diseñarse para generar un haz pincel [9.12]-[9.13] o un haz conformado [9.9], [9.14], sin que ello suponga un incremento en el coste de fabricación. La Figura 9.5 muestra una fotografía de un prototipo de RIS para 6G implementado mediante un reflectarray de 7 cm x 7 cm que funciona en la banda de 100 GHz.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

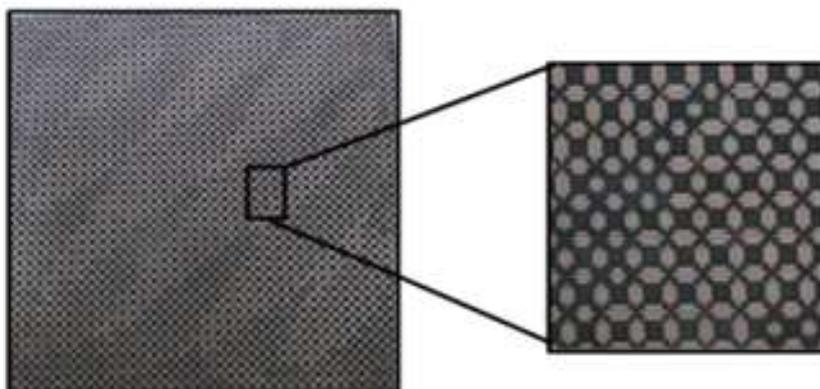


Figura 9.5. Fotografía de una RIS basada en un panel reflectarray pasivo (incluye una vista ampliada de las celdas).

La Figura 9.6 muestra varios ejemplos de celdas reflectoras utilizadas en el diseño de RIS. En la Figura 9.6(a) se muestra el que posiblemente sea el elemento más sencillo: el parche rectangular. Este tipo de RIS presentan un proceso de diseño muy simple, pero cuentan con algunas limitaciones de funcionamiento, como un ancho de banda pequeño y un rango limitado de ángulos de incidencia [9.12]. Para mejorar las prestaciones de la RIS, se pueden formar celdas más robustas apilando varias capas de parches, aunque esto tiene el inconveniente de un mayor peso y coste de fabricación. En la Figura 9.6(b) se muestra un ejemplo de elemento multi-resonante, que combina un anillo cuadrado con unos dipolos con forma de flecha [9.13]. Estos elementos proporcionan mayor ancho de banda que los parches, pero su simetría no permite controlar de manera independiente cada polarización (normalmente, los sistemas de comunicaciones móviles emplean las polarizaciones lineales horizontal y vertical). Finalmente, en la Figura 9.6(c) se muestran unas celdas formadas por agrupaciones ortogonales de dipolos paralelos, que también son configuraciones multi-resonantes (mayor ancho de banda) y cuentan con la ventaja de permitir un control independiente del haz radiado en cada polarización [9.14].

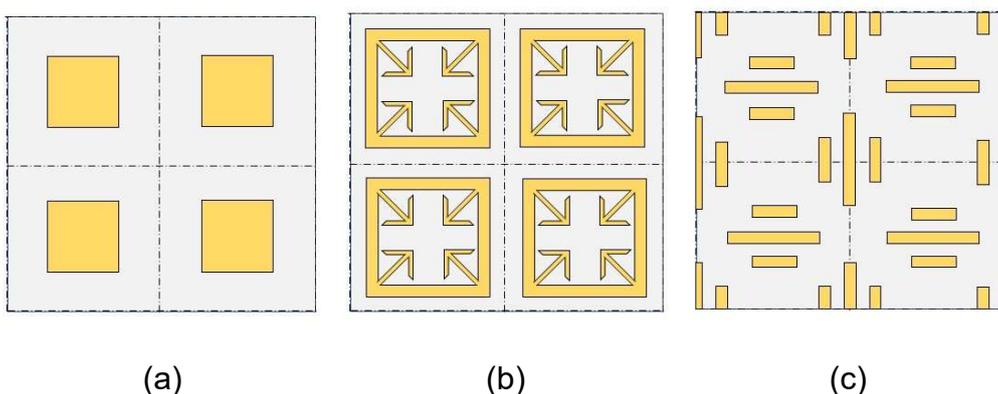


Figura 9.6. Distintos tipos de celdas reflectoras empleadas en las RIS: (a) parches rectangulares, (b) elementos multi-resonantes, (c) agrupaciones de dipolos.

9.3. Resultados de los proyectos de investigación en curso

En esta sección, se presentan algunos de los diseños de RIS más relevantes realizados durante los últimos años en el marco de los proyectos de investigación desarrollados en el Grupo de Ingeniería de Microondas y Sistemas de Radiocomunicación (MW-RCOM) de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) y el Grupo de Electromagnetismo Aplicado (GEA) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Todos los diseños están basados en la tecnología reflectarray, ya que, como se ha comentado anteriormente, los reflectarrays presentan una serie de ventajas significativas para esta aplicación:

- Son capaces de redirigir el haz reflejado y aplicarle un conformado específico adaptable a la zona que se desea cubrir.
- Permiten implementar capacidades avanzadas en un mismo panel (operación simultánea en varias bandas de frecuencia o en distintas polarizaciones, conformado de haz diferente en cada polarización, etc.).
- Son una tecnología de bajo coste y energéticamente eficiente, lo que contribuye a que puedan desplegarse masivamente.
- Su superficie plana y peso ligero facilitan su instalación en fachadas, paredes o techos, minimizando el impacto visual en el entorno.

9.3.1. RIS de haz conformado en campo próximo

El primer diseño consiste en una RIS que genera un haz conformado para cobertura en interiores, en la banda de 28 GHz. La cobertura tiene forma rectangular, con un ancho de $20^\circ \times 20^\circ$ (elevación x azimut) y se obtiene en la región de campo próximo de la RIS. Esto se debe a que, en este tipo de escenarios interiores, los usuarios suelen estar relativamente cerca de la RIS, por lo que todavía no se ha formado el diagrama en campo lejano. La RIS fue diseñada en colaboración con la Universidad de Oviedo, dentro del proyecto “ENHANCE-5G: Tecnologías habilitantes en antenas para conectividad inteligente en redes 5G de ondas milimétricas y redes futuras (PID2020-114172RB-C22)” del Ministerio de Ciencia e Innovación.

La Figura 9.7(a) muestra una imagen de la RIS en la cámara anecoica de la Universidad de Oviedo. El prototipo tenía un tamaño de 40 cm x 40 cm y se basaba en un reflectarray monocapa con celdas formadas por dipolos ortogonales, como los de la Figura 9.6(c). Se aplicó un algoritmo de síntesis para obtener los desfases que debían ser introducidos por las celdas reflectoras para obtener la cobertura deseada en el campo próximo, basado en el método descrito en [9.15], considerando como escenario de aplicación el interior de un edificio de oficinas (ver Figura 9.7(b)). Los resultados de las medidas se muestran en las Figura 9.7(c) y 9.7(d), que representan la cobertura generada a 28 GHz y los cortes del diagrama de radiación en el plano de azimut para distintas frecuencias [9.16].

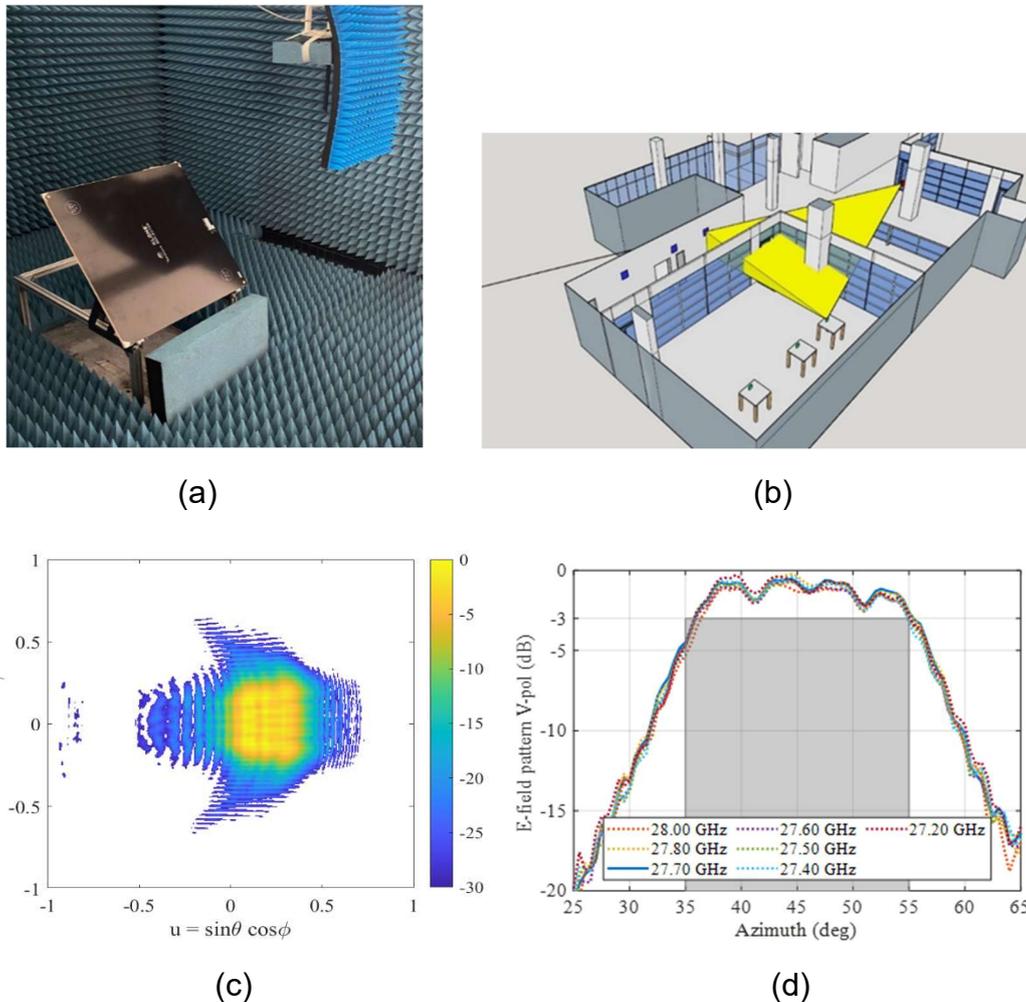


Figura 9.7. RIS de haz conformado en campo próximo: (a) prototipo en la cámara anecoica, (b) escenario de aplicación propuesto, (c) cobertura generada a 28 GHz, (d) corte del diagrama de radiación en el plano de azimut para distintas frecuencias 0.

9.3.2. RIS de cobertura dual en polarización ortogonal

El segundo diseño es una RIS que genera dos coberturas diferentes en polarización ortogonal (una cobertura en polarización Horizontal y otra en polarización Vertical), en la banda de 100 GHz, para comunicaciones 6G. Las dos coberturas son similares, con una anchura de haz de $10^\circ \times 10^\circ$, pero se generan en direcciones diferentes. La RIS fue desarrollada en el marco del proyecto “INCREASE-5G: Superficies reflectoras inteligentes basadas en reflectarrays para mejorar la cobertura en redes 5G de ondas milimétricas y redes futuras”, financiado por la Comunidad de Madrid y la URJC.

El prototipo desarrollado para validar esta tecnología (ver Figura 9.9) cuenta con 40×40 celdas reflectoras, con unas dimensiones totales de $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$. Está basado en un reflectarray monocapa con un dieléctrico de bajas pérdidas en el rango de sub-THz. La síntesis de los haces se llevó a cabo aplicando la técnica descrita en [9.17]. El ancho de banda de funcionamiento cubre desde 94 hasta 106 GHz. La aplicación es similar a la del caso anterior: proporcionar cobertura en interiores.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Los diagramas de radiación medidos a 100 GHz para cada polarización lineal se muestran en las Figuras 9.8(c) y 9.8(d), donde se observa cómo los haces apuntan en direcciones diferentes para cada polarización (dos coberturas distintas) [9.18].

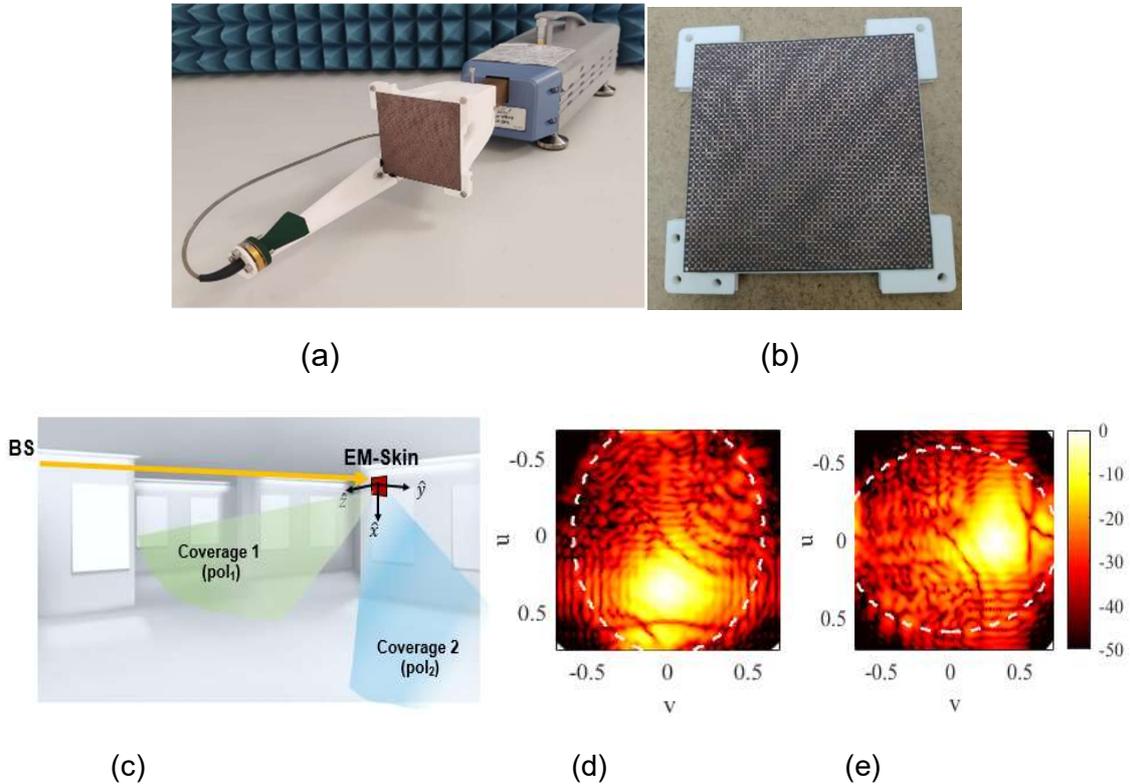


Figura 9.8. RIS de cobertura dual en polarización ortogonal: (a) prototipo ensamblado en el setup de medida, (b) vista ampliada de la RIS, (c) escenario de aplicación propuesto, y coberturas generadas a 100 GHz en polarización Vertical (d) y Horizontal (e) 0.

9.3.3. RIS de doble banda y cobertura dual

El tercer diseño es una RIS que genera dos haces diferentes en bandas de frecuencias distintas (una cobertura a 28 GHz y otra a 39 GHz), para comunicaciones 5G FR2. La RIS fue desarrollada en el marco del proyecto “ANTHEM5G: Tecnologías de Antenas Avanzadas y Sistemas de Medida in Situ para la Mejora de las Redes 5G de Ondas Milimétricas (TED2021-131975A-I00)”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

La RIS opera en polarización lineal dual en ambas bandas de frecuencia, es decir, el haz se genera tanto en polarización Vertical como Horizontal, lo que permite aplicar técnicas de diversidad de polarización. La Figura 9.9(a) muestra una imagen del prototipo de RIS de doble banda en la cámara anecoica de la URJC. El tamaño del panel es de 22 cm x 22 cm y está diseñado empleando un reflectarray de doble capa (ya que cada capa controla una frecuencia), con agrupaciones de ortogonales dipolos en cada capa como elemento desfasador. El escenario de aplicación propuesto es un exterior urbano donde las coberturas se generan en la región de campo lejano de la RIS, ver Figura 9.9(b). Los diagramas de radiación medidos a 28 y 39 GHz se muestran en las Figuras 9.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

9(c) y 9.9(d), respectivamente. Como puede verse, los haces se reflejan en direcciones diferentes para cada banda (dos coberturas distintas). El ancho de banda de la RIS es de 26-30 GHz para la banda inferior y de 38-40 GHz para la superior [9.19].

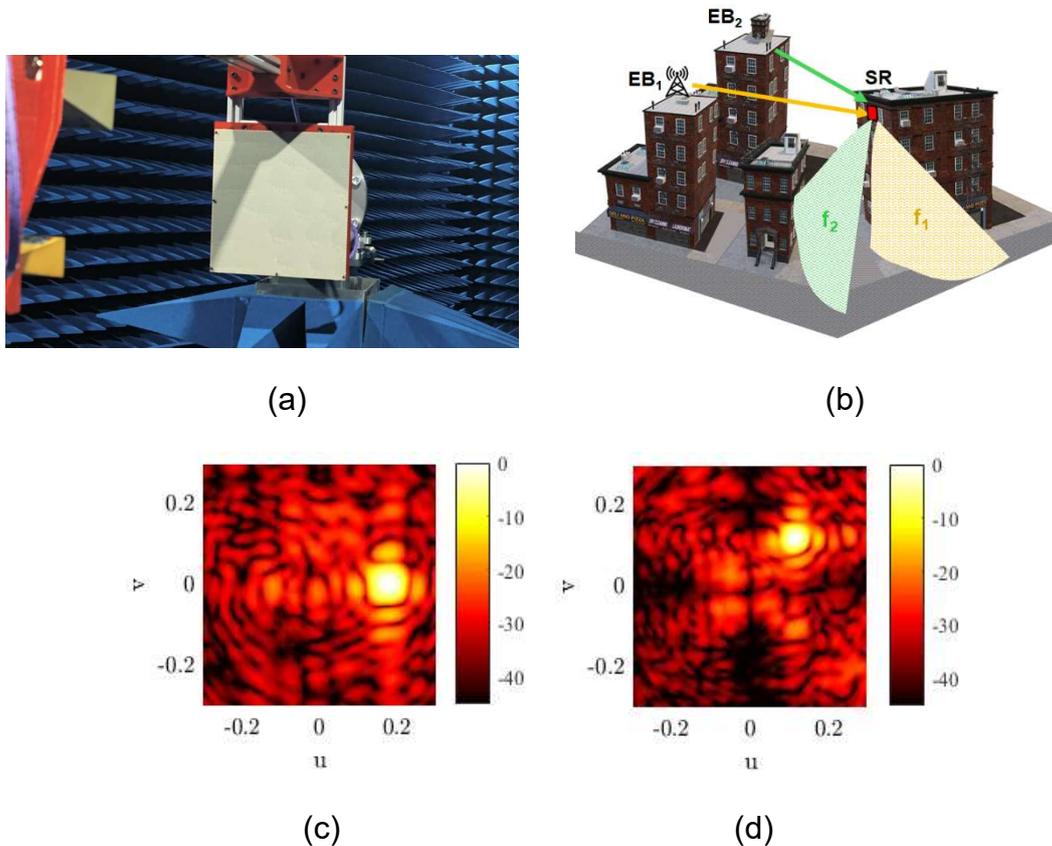


Figura 9.9. RIS de doble banda: (a) prototipo en la cámara anecoica de la URJC, (b) escenario de aplicación propuesto, y haces generados a 28 GHz (c) y 39 GHz (d).

9.3.4. Evaluación de una RIS en escenario realista

En el marco del proyecto DISRADIO (TSI-063000-2021-82), financiado por el Ministerio de Economía y Transformación Digital, se ha llevado a cabo la validación de una RIS en un escenario realista, empleando un transmisor 5G FR2 en la banda de 27 GHz y evaluando la mejora en las prestaciones del sistema proporcionada por la RIS. El experimento consistió en ubicar la RIS en la pared del vestíbulo de la 4ª planta de la Escuela Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la UPM, ubicando receptores de señal en distintos puntos, como se muestra en las Figuras 9.10(a) y 9.10(b). La RIS fue diseñada para generar un haz ensanchado a 27 GHz, siguiendo un método similar al de los trabajos anteriores [9.17]-[9.18].

Para evaluar el impacto de la RIS, se compararon 3 escenarios: (a) dejando la pared desnuda, (b) colocando una placa metálica y (c) colocando la RIS. El transmisor empleaba una modulación 16-QAM con un ancho de banda de 50 MHz y una separación entre subportadoras de 120 kHz. Los resultados obtenidos para la potencia de señal recibida (RSRP) y la relación señal a ruido e interferencia (SINR) en los 3 casos objeto de estudio se muestran en las Figuras 9.10(c) y 9.10(d).

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Como puede observarse, la utilización de la RIS proporciona una mejora importante en ambos parámetros en la mayoría de las ubicaciones del receptor.

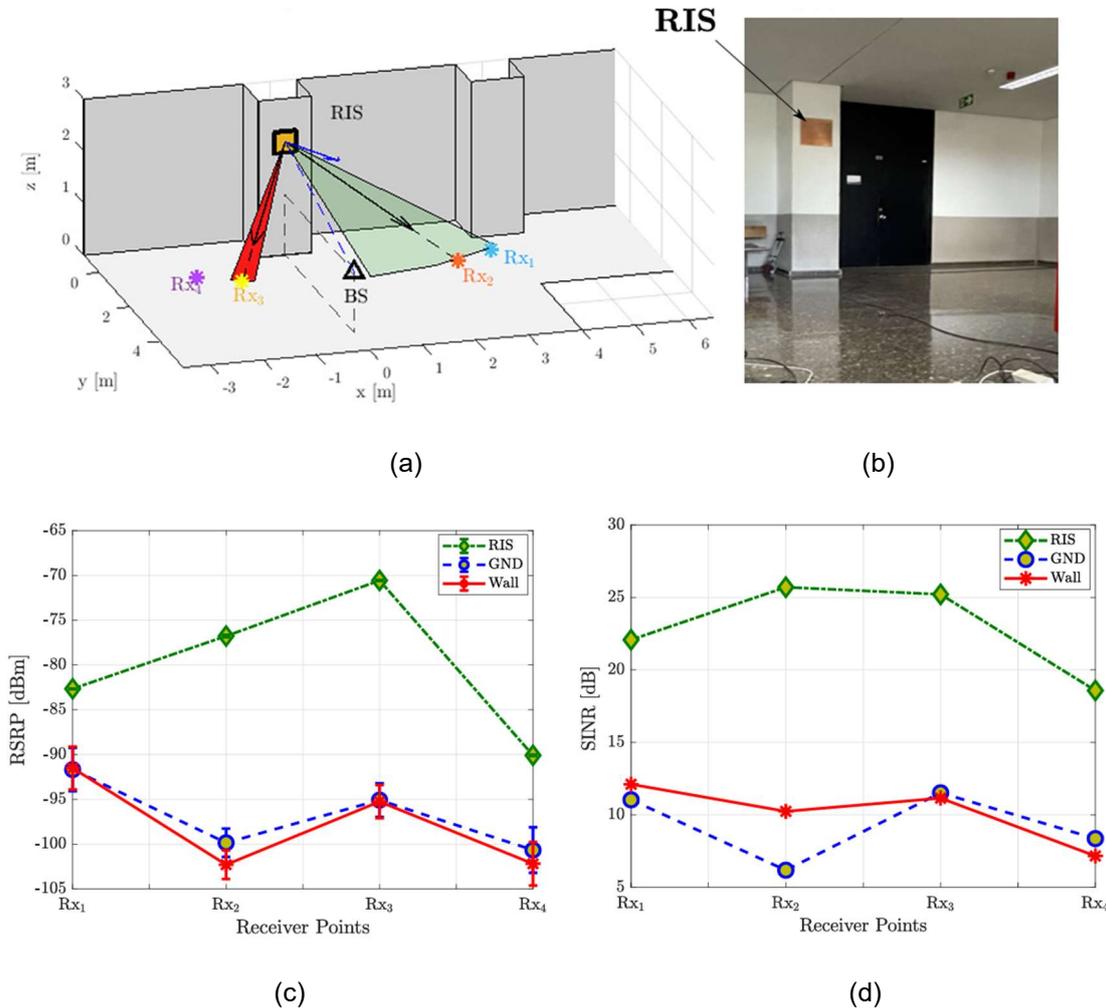


Figura 9.10. Evaluación de RIS en escenario realista: (a) geometría del escenario, (b) fotografía del escenario con la RIS, (c) potencia de señal recibida (RSRP) y (d) relación señal a ruido e interferencia (SINR) para los casos: pared desnuda, reflector metálico plano y RIS0.

9.4. Conclusiones

La utilización de superficies reflectoras inteligentes (RIS) constituye una solución energéticamente eficiente y de bajo coste que permitiría mejorar las prestaciones de las redes móviles 5G y 6G de ondas milimétricas. Estas superficies cuentan con la capacidad de redirigir y conformar el haz reflejado, permitiendo la operación simultánea en varias bandas de frecuencia y/o en distintas polarizaciones. Además, la superficie plana y peso ligero de las RIS facilita su instalación en fachadas, paredes o techos, minimizando el impacto visual en el entorno.

Los diseños realizados hasta la fecha en los proyectos de investigación en curso en la URJC y la UPM han proporcionado resultados muy satisfactorios, confirmando la tecnología de RIS como una

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

solución muy prometedora a los problemas de propagación de las ondas milimétricas. Hasta el momento, la mayoría de los prototipos desarrollados consisten en RIS pasivas con coberturas fijas, que se definen en función de las especificaciones del escenario de aplicación. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de RIS reconfigurables, que ofrecerán una mayor flexibilidad al operador de red, al permitir la reconfiguración en tiempo real del haz reflejado y la generación de haces múltiples.

9.5. Bibliografía

- [9.1] W. Hong et al., "The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 101-122, Jan. 2021.
- [9.2] S. A. Busari, S. Mumtaz, S. Al-Rubaye and J. Rodriguez, "5G millimeter-wave mobile broadband: Performance and challenges", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, pp. 137-143, Jun. 2018.
- [9.3] M. Shafi et al., "Microwave vs. millimeter-wave propagation channels: Key differences and impact on 5G cellular systems", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 12, pp. 14-20, Dec. 2018.
- [9.4] S. Sun, T. S. Rappaport, M. Shafi, P. Tang, J. Zhang, and P. J. Smith, "Propagation models and performance evaluation for 5G millimeter-wave bands", *IEEE Trans. Vehicular Techn.*, vol. 67, no. 9, pp. 8422-9439, Sept. 2018.
- [9.5] K. Zheng, D. Wang, Y. Han, X. Zhao and D. Wang, "Performance and Measurement Analysis of a Commercial 5G Millimeter-Wave Network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163996-164011, 2020.
- [9.6] M. Di Renzo et al., "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020.
- [10.7] Q. Wu and R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent Reflecting Surface aided wireless network", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 106-112, Jan. 2020.
- [9.8] G. Oliveri, F. Zardi, P. Rocca, M. Salucci, A. Massa, "Constrained design of passive static EM skins," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 2, pp. 1528-1538, Feb. 2023.
- [9.9] E. Martinez-de-Rioja et al., "Passive Intelligent Reflecting Surfaces based on reflectarray panels to enhance 5G millimeter-wave coverage", *Inter. Jour. Microw. Wireless Techn.*, vol. 15, no. 1, pp. 3-14, Jan. 2023.
- [9.10] X. Pei et al., "RIS-aided wireless communications: prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 69, no. 12, pp. 8627-8640, Sept. 2021.
- [9.11] M. M. Amri et al., "Reconfigurable Intelligent Surface-aided wireless communications: Adaptive beamforming and experimental validations", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 147442-147457, Oct. 2021.
- [9.12] D. Kitayama et al., "5G radio access experiments on coverage expansion using metasurface reflector at 28 GHz," 2019 *IEEE AsiaPacific Microw. Conf. (APMC)*, Singapore, Dec. 2019.
- [9.13] Z. Lu, Y. Fang, H. Yi, L. Li, "Broadband reflectarray for millimeter wave coverage enhancement in indoor NLOS scenario", 2019 *Cross Strait Quad-Reg. Rad. Sci. & Wirel. Techn. Conf.*, China, Jul. 2019.
- [9.14] E. Martinez-de-Rioja, et al., "Enhancement of 5G millimeter-wave coverage in indoor scenarios by passive shaped-beam reflectarray panels", 16th *Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Madrid, Spain, Mar. 2022.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [9.15] D. R. Prado, M. Arrebola, M. R. Pino, and F. Las-Heras, "Improved reflectarray phase-only synthesis using the generalized intersection approach with dielectric frame and first principle of equivalence", *Int. Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, pp. 1-11, 2017
- [9.16] A. F. Vaquero, E. Martinez-de-Rioja, M. Arrebola, J. A. Encinar, and M. Achour, "*Smart Electromagnetic Skin to enhance near-field coverage in mm-wave 5G indoor scenarios*", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 72, no. 5, pp. 4311-4326, May 2024.
- [9.17] D. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, E. Martinez-de-Rioja, Á. F. Vaquero, M. Arrebola, "A simple beamforming technique for intelligent reflecting surfaces in 5G scenarios", 2022 Int. Wor. Antenna Technology (iWAT), Dublin, Ireland, May 2022.
- [9.18] E. Martinez-de-Rioja, A. Feito, J. Palací, A. Arboleya, J. Laviada and F. Las-Heras, "*Dual-coverage Electromagnetic Skin with independent shaped beams for sub-THz 6G communications*", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 134624-134634, Oct. 2024.
- [9.19] E. Martinez-de-Rioja, A. Arboleya, F. Rodríguez Varela, and C. Fontá, "*Dual-band Electromagnetic Skin with independent reflection performance at 28 and 39 GHz for 5G millimeter-wave communications*", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 23, no. 10, pp. 3138-3142, Oct. 2024.

10. La futura red de comunicaciones móviles 6G y el medio ambiente

José Javier Martínez Vázquez (Coordinador), José Daniel Martínez de Rioja del Nido (Universidad Politécnica de Madrid) y Eduardo Martínez de Rioja del Nido (Universidad Rey Juan Carlos)

Resumen.

Este trabajo pretende destacar aquellos aspectos de la futura 6G que tienen una relación directa con el medio ambiente, la mayoría son específicos de esta generación y los que son comunes a generaciones anteriores presentan particularidades de interés. Los problemas de propagación, la creación de una plataforma, auspiciada por la ITU, para manejar de forma conjunta señales de comunicaciones y de teledetección, el cálculo de niveles de referencia con señales correladas temporal y espacialmente, o la aparición de los modos OAM como sustitutos de los sistemas MIMO convencionales, son algunos ejemplos de una vertiente medioambiental tan amplia como compleja.

10.1. Sobre la futura red móvil 6G

Algunos trabajos apuntan a una simbiosis entre la AI y la 6G: si la 6G va a ser el soporte para la difusión de la AI en los núcleos urbanos, las nuevas redes móviles manejarán métodos de computación imprescindibles para establecer en tiempo real las complejas comunicaciones que están por venir. Esta generación heredará de la 5G el Internet Táctil, el super IoT y la ultra Smart City que, a día de hoy, colapsarían la capa de transporte, y tendrá que iniciar la comunicación holográfica y la integración de la red móvil terrestre con las redes aéreas y aeroespaciales. La cloud computing ya evoluciona hacia la cloud-native computing, que desgrana las aplicaciones en microservicios para procesarlos y gestionarlos posteriormente por medio de protocolos sencillos, haciendo estas arquitecturas aún más dinámicas, gracias también a la virtualización de los servidores de red y de los sistemas de almacenamiento masivo de datos. La velocidad de transmisión pasará de 20 Gbps a 1Tbps de una generación a otra. La red de acceso radio 6G habrá de ocupar la banda superior de las milimétricas (100-300 GHz) y la banda sub-THz (300 GHz-2 THz). En la zona de las milimétricas, con distancias entre estaciones base de 100 m a 1 km, las pérdidas de propagación van de 100 a 150 dB, y crecen rápidamente hasta los 300 dB para distancias mayores. También, aumenta la absorción molecular de los gases traza y la atenuación producida por cualquier tipo de obstáculo situado entre el UE y las estaciones base.

En consecuencia, una buena penetración de los nuevos sistemas de telefonía móvil en las áreas urbanas exige que el tamaño de las celdas sea muy reducido para minimizar las pérdidas y tener una tasa de error aceptable en el enlace ascendente, tratando de evitar cualquier tipo de obstáculo. Nacen así las futuras redes *cell free*, actualmente en desarrollo, en las que un abonado podrá conectarse de forma simultánea a varias estaciones base o puntos de acceso. De esta manera, la tasa de transmisión aumenta al distribuir el flujo de datos de un usuario entre varios puntos de acceso a la vez que se reduce el número de traspasos entre el usuario y los posibles puntos de acceso a los que podría conectarse. En el enlace descendente, la misma información llega al UE o MTD, desde distintos puntos de acceso, por lo que la fiabilidad del canal es mucho mayor. En definitiva, las redes *cell free* mejorarán la calidad de la comunicación y la capacidad del sistema.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Dentro de la zona del espectro radioeléctrico correspondiente a las distintas tecnologías 6G, se encuentra el pico de absorción del vapor de agua y de los gases producidos por la agricultura industrial: metano, amoníaco y anhídrido carbónico. Esto, que inicialmente es un problema de transmisión, supondrá una gran reducción de costes en el control y la monitorización de la concentración de los citados compuestos químicos en la atmósfera, ya que se implementaría con una red de nano-bio-sensores, que transmitirían sus datos aprovechando los puntos de acceso de la red móvil. Aparece aquí la necesidad de utilización conjunta de las redes de comunicaciones y las de teledetección y sensores. Las comunicaciones V2X, por ejemplo, han de emplear datos radar para dar información de seguridad o de carácter meteorológico a los conductores. En este momento, con el respaldo de la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-R, y bajo distintas denominaciones como JCS (Joint Communications and Sensing) o ISAC (Integrated Sensing And Communications), se plantea una iniciativa para integrar equipos de teledetección y comunicaciones en una única plataforma. Se abre, por tanto, un área de trabajo de gran calado con un marcado signo medioambiental, formatear las señales provenientes de “sensing” y “remote sensing” para ser transmitidas por equipos de comunicaciones convencionales o buscar un formato conjunto de modulación y acceso múltiple que sirva tanto para comunicaciones como para detección y teledetección.

Otro aspecto de interés medioambiental es la infraestructura. La red celular estaba ligada a grandes torres de celosía incluso mayores de 30 metros o mástiles de hasta 20 metros de altura, con el objeto de conseguir el máximo radio de cobertura. En el caso 6G, ya que tanto las dimensiones de las antenas como las de los vanos entre puntos de acceso serán más reducidas, los soportes tendrán menor envergadura. A esta última consideración, debe añadirse la aplicación de los modos OAM como sistemas MIMO y que parecen fáciles de implementar. El acceso vía radio también cambia de arquitectura, pasando de la C-RAN a la O-RAN de carácter distribuido con el fin de liberar a la CPU de carga computacional y mejorando los tiempos de latencia. La distancia entre puntos de acceso del orden del centenar de metros implica, por un lado, que se manejarán densidades de potencia radiada menores o como mucho iguales que las correspondientes a las estaciones base celulares y por otro, que el número de estaciones base se multiplicará por 5 ó 6, lo que aumentará el consumo de energía de las futuras redes en la misma proporción. En este punto, se puede subrayar que las potencias disponibles, para los elementos comerciales de sistemas radio a frecuencia de utilización 6G, son del orden de 100 milivatios.

En lo relativo a niveles de referencia y de acción, aparece como novedad en las redes 6G que es necesario tener en cuenta varias fuentes de radiación en un área determinada, y como las señales de puntos de acceso distintos podrían estar correladas espacial y temporalmente, se alcanzan valores de densidad de potencia radiada mayores que la suma algebraica de las densidades correspondientes a los puntos de acceso considerados, lo que tiene trascendencia sobre todo en cobertura de espacios interiores. Además, la regulación nacional (R.D. 1066/2001 y R.D. 299/2016) y la internacional (IEEE Std C 95.1-2019) tienen su límite en los 300 GHz. No obstante, cabe señalar que los Niveles de Referencia van aumentando con la frecuencia entre 0 Hz y 300 GHz, alcanzándose cada vez más cerca de la fuente de campo y, por tanto, más lejos de las personas que se encuentren en las proximidades del sistema radiante. Durante el periodo de tiempo en que la tecnología vaya por delante de la normativa, parecería apropiado ampliar el Nivel de Referencia y el de Acción (incluidos los Valores Límite de Exposición) de los 300 GHz para toda la banda sub-THz, hasta que se determinen los nuevos niveles a aplicar, ya que equivaldría a realizar un análisis del caso peor.

10.2. De la bobina de Bell al despliegue de LEOs

El teléfono de A. G. Bell consistía básicamente, en una bobina de tres devanados acoplados que convertía los dos hilos de la línea telefónica en cuatro hilos del aparato de abonado: dos para el micrófono y dos para la cápsula auricular. Luego vino el circuito integrado que sustituyó a la bobina de Bell, algo que los italianos llamaron la **forqueta** electrónica. El siguiente paso fue cambiar el dial giratorio de marcación mediante impulsos por un teclado numérico multifrecuencia, donde cada tecla establecía un contacto en una matriz de 4x3. Al principio, los contactos se fabricaron con una pequeña pieza metálica cóncava y después, con siliconas conductoras.

Los teléfonos móviles cambiaron los cuatro hilos del teléfono fijo por una interfaz radio con un enlace ascendente y otro descendente. Los primeros móviles, de tecnología analógica, eran voluminosos y pesados, podría decirse portátiles más que móviles. Aquellas **motorolas**, casi exclusivas de los altos ejecutivos, funcionaban con una potencia en torno a los 2 vatios. Desde entonces, los móviles han ido rebajando su tamaño y peso para convertirse en terminales de bolsillo, y reduciendo su potencia de trabajo hasta valores alrededor de los cincuenta milivatios. Los teclados fueron sustituidos por pantallas táctiles y desde un punto de vista funcional, en algún momento entre la 3G y la 4G, los móviles dejaron de ser meros teléfonos para convertirse en terminales de datos, cada vez con más capacidad de memoria y mayor nivel de procesado.

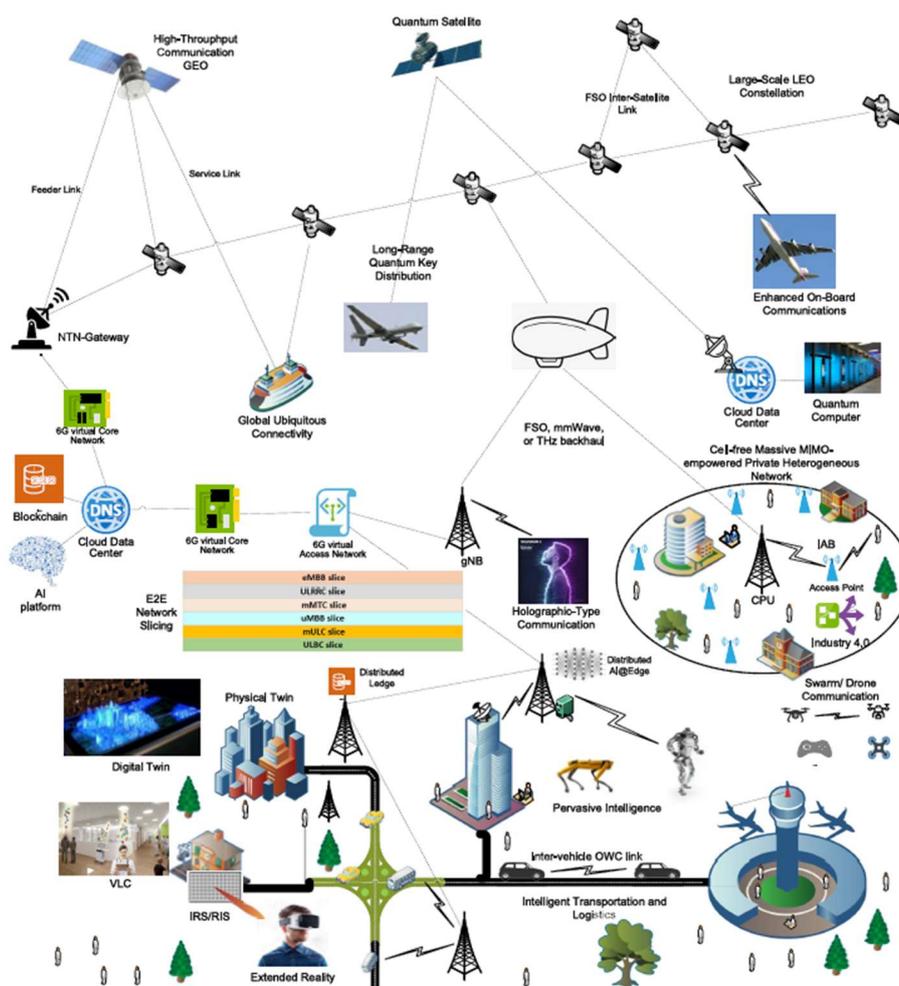


Figura 10.1. Escenarios y arquitectura 6G, mostrando casos de utilización representativos y algunas tecnologías clave^[23].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La 4G es la primera generación con conectividad total IP, lo que simplificó los sistemas de acceso y de conexión a los diferentes servicios de red. Esta generación consolidó la convergencia IP: voz, sonido e imágenes transmitiéndose por la misma infraestructura de comunicaciones. La 4G también representó la utilización generalizada de la modulación / multiplexación OFDM que llegó tiempo antes con la TDT.

		4G	5G	6G
Escenarios		MBB	eMBB, ULLC, mMTC	FeMBB, ERLLC, umMTC, LDHMC, ELPC
Aplicaciones		HDV, Voice, Mobile TV, Mobile Internet, Mobile Pay.	VR/AR/360°V, UHD Video, V2X, IoT, Smart city/Industria /Domótica	Comunicación 3D Internet Táctil Conducción autónoma Internet industrial Internet de las BioNanoCosas.
Características de red		Conectividad total IP	C-RAN, Virtualización, Definición por SW, Slicing	C-RAN, Inteligencia de Red, Virtualización, Definición por SW, Slicing
Servicios		Conexión entre personas	Conexión entre personas y cosas	Interacción entre personas y el mundo exterior
KPI's	Tasa de datos máxima	100 Mb/s	20 Gb/s	≥ 1 Tb/s
	Tasa de datos práctica	10 Mb/s	0,1 Gb/s	10 Gbps/m ³
	Eficiencia espectral	1	3 veces la de 4G	60 bps/Hz 5 - 10 veces la de 5G
	Eficiencia energética de red	1	10 -100 veces la de 4G	1 p J /b 10 – 100 veces la de 5G
	Capacidad de tráfico	0,1 Mb/s /m ²	10 Mb/s /m ²	1 Gb/s/m ²
	Densidad de conectividad	10 ⁵ dispositivos/km ²	10 ⁶ dispositivos/km ²	10 ⁷ dispositivos/km ²
	Latencia	10 ms	1 ms	10-100 μs
	Movilidad	350 km/h	500 km/h	≥ 1.000 km/h
	Slices/operador	-	-	10.000
	Fiabilidad BER	99,99	99,99999	99,99999999
Tecnologías		OFDM, MIMO, Turbo CODE, Agregación de portadora, HetNet, ICIC, D2D Com.	Milimétricas, MIMO masivo, LDPC, Estructuras de trama flexible, Redes ultradensas, NOMA, Cloud/Edge/Fog Computing, NFV/SDN/Network Slicing	Comunicaciones en la banda de los THz, SM MIMO, LIS y HBF, OAM Multiplexing, VLC y laser, Comunicaciones y computación óptica, AI /Machine Learning y Distribución espectral por Blockchain

Cuadro 10.1. Características 6G y comparación con 4G y 5G^{[28],[5]}.

Ahora mismo estamos de lleno en la denominada quinta generación de telefonía móvil que opera con anchos de banda de transmisión considerablemente mayores que las generaciones anteriores, las tasas de transmisión son del orden de 1 Gbps. Esta 5G es la generación de los servicios de banda ancha, además de la cloud computing y de la edge computing encaminadas a la implantación del IoT ubicuo e igualmente entroncadas con el vehículo conectado y el vehículo autónomo. El aumento del ancho de banda se traduce en frecuencias de funcionamiento cada vez más elevadas,

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

lo que conlleva mayores pérdidas de propagación y, en consecuencia, un menor tamaño de las celdas o la alternativa de radiar con mayor potencia.

Ya se trabaja en la 6G, que será la generación de la AI ubicua, de la Edge AI y de la cloud-native computing. Además, esta 6G hará posible el Internet Táctil, la ultra Smart City, el super IoT y las redes vía radio del futuro con la posibilidad de utilizar la comunicación holográfica. Las tasas de transmisión van a ser del orden de 1Tbps, unas 50 veces la velocidad de la generación anterior.

La 5G ha llegado a explorar la banda inferior de las milimétricas (30 - 100 GHz) de forma que la 6G está obligada a utilizar en la red de acceso vía radio, la banda superior de las milimétricas (100 – 300 GHz) y la llamada banda sub-THz (300 GHz – 10 THz). Para estas frecuencias no sólo aumentan las pérdidas de propagación, también crece de manera notable la absorción molecular de los gases que se encuentran en suspensión en la atmósfera, así como la atenuación de los materiales de construcción, de la vegetación y del cuerpo humano .

De cara a una buena penetración de los nuevos sistemas de telefonía móvil en los núcleos urbanos, el tamaño de las celdas ha de ser muy reducido para minimizar la distancia entre estaciones base y evitar cualquier tipo de obstáculo. Surge así, la idea de las futuras redes celulares sin celdas, las denominadas redes **cell free**.

Tipo de conexión		Utilización	Escenario	
Comunicación aérea	1	Tráfico aéreo comercial	Entretenimiento en vuelo de pasajeros, movimiento de aviones, (Torre de control- piloto). Comunicación entre equipos de tierra.	
	2	Movilidad aérea urbana (UAM)	Taxis aéreos, logística, servicios de smart city	
	3	Relativos a UAM	Seguridad pública y manejo de vehículos voladores	
	4	Integración de la red aérea y la terrestre	Gestión del tráfico aéreo y gestión del tráfico aéreo urbano, sistemas de seguridad nacional	
NTN	Ampliación de capacidad	5	Conectividad de áreas remotas y rurales	Extender a las áreas rurales y remotas los servicios 3GPP con soporte para URLLC, incluyendo la integración de HAPS/HIBS
		6	Satélite/HAPS/HIBS	Satélite y HAPS para observación de la tierra y gestión de catástrofes
	Ampliación de cobertura	7	Internet de las cosas	Comunicación eficiente para seguimiento logístico, telemetría, monitorización remota, seguridad, etc.

Cuadro 10.2. Posibles escenarios para la integración de la red terrestre y las redes aéreas^[4].

Los datos generados por dispositivos móviles en las ciudades inteligentes: transportes, sanidad y edificios inteligentes, se van a multiplicar debido a la utilización de las nuevas aplicaciones surgidas de la Inteligencia Artificial, la Robótica, Industria 4.0 y el super Internet de las Cosas. Las comunicaciones V2X van a necesitar latencias extremadamente bajas, por debajo de 0.1ms, niveles de fiabilidad mayores de 10^{-9} , sistemas de comunicaciones con una tasa de transmisión de 1 Tbps.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El Internet Táctil, la Ultra Smart City, el Super IoT, funcionan con velocidades elevadas de transmisión que muy probablemente, provocarían el colapso de la 5G en torno a los 50 Gb/s. Por tanto, la 6G habrá de aportar una serie de características nuevas en relación con la 5G: tasas de transmisión de 1Tbps, latencias extremadamente bajas, entre 10 y 100 μ s, una fiabilidad muy elevada, un soporte técnico para las aplicaciones de Internet Táctil y las comunicaciones holográficas, una cobertura en 3D que pueda conectar a la red terrestre las comunicaciones aéreas y aeroespaciales, así como las acuáticas y subacuáticas. Además, los dispositivos tipo máquina o equipos de usuario, han de tener un consumo de energía extremadamente bajo y la red ha de funcionar con una densidad de 10 millones de dispositivos por km^2 , una seguridad muy alta e información de localización precisa, con un margen de error entre 1 y 10 centímetros.

Por último, la 6G prevé la integración de la red móvil terrestre con las redes de comunicaciones aéreas (aviones, plataformas a gran altura HAPs, drones y diversos vehículos tripulados o no tripulados) y las comunicaciones vía satélite. Una red de comunicaciones de grandes dimensiones integrando las redes no terrestres con la red móvil terrestre es necesaria para dar cobertura a diversas aplicaciones de amplia utilización en vuelos comerciales, viajes por mar, o por tierra con vehículos automóviles. Igualmente, este aspecto de la futura red móvil tiene una gran importancia para la conexión a la red de zonas rurales, a las que no llega el tendido de fibra óptica y la instalación de enlaces vía radio terrestres es igualmente difícil, así como la cobertura radio de áreas geográficas que pudieran ser declaradas como zona catastrófica.

Desde un punto de vista estructural, habrá que distinguir 4 niveles: espacial, aéreo, terrestre y oceánico. A nivel espacial, se podrá dar cobertura radio por medio de los sistemas LEO, MEO y GEO a aquellas zonas a las que no llegue la cobertura terrestre.

El nivel terrestre, todavía está considerado como la parte principal de la red, la que ha de cursar el mayor volumen de tráfico como consecuencia de dar cobertura a la mayor parte de las actividades humanas. En el nivel aéreo, se han venido utilizando hasta ahora plataformas a gran altura (HAP's) para dar cobertura a zonas afectadas por algún tipo de catástrofe. Se prevé en adelante, la utilización de vehículos no tripulados como drones para que lleven a cabo las tareas propias de los puntos de acceso o estaciones base.

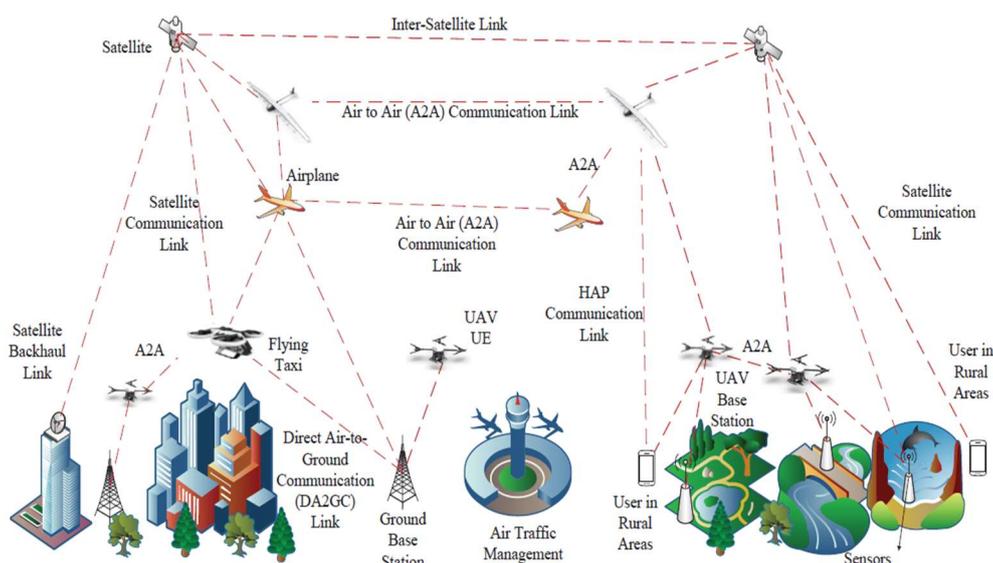


Figura 10.3. Visión general de la futura red integrada de comunicaciones 6G^[4].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Dado que las bandas de las milimétricas y la THz se caracterizan por unas pérdidas elevadas de propagación, la red terrestre 6G habrá de desplegar un elevado número de puntos de acceso y dará lugar a una red troncal de muy alta capacidad. Esto fuerza la utilización de fibra óptica como capa física para la red troncal.

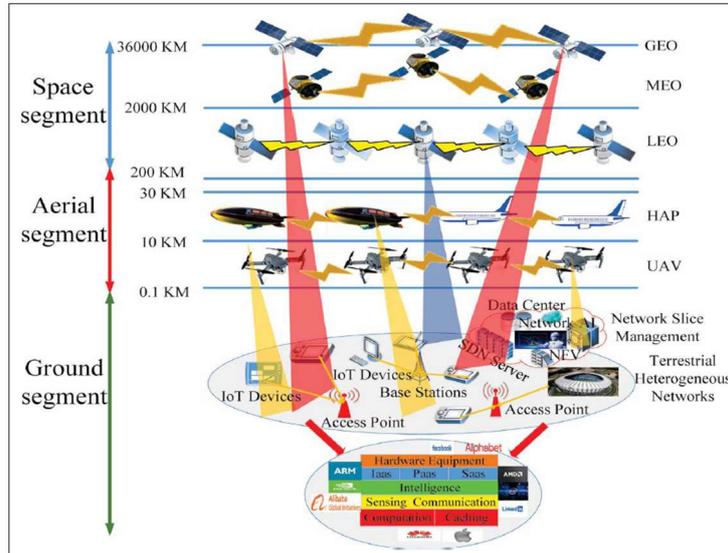


Figura 10.4. Arquitectura SGIN que integra teledetección, comunicaciones, computación, almacenamiento rápido e inteligencia de red [49].

Los satélites transmiten datos de un punto remoto a los servidores situados en la superficie terrestre. Estos servidores, dotados de una elevada capacidad de computación, producen un retardo en la entrega de la documentación que cae fuera de los requisitos impuestos por las aplicaciones de IoT. Para llevar a cabo un procesado en tiempo real, un número cada vez mayor de satélites van equipados con recursos de computación, como Starlink, Tianzhi 1 o Baoyun. También, se aplican en las redes vía satélite sistemas como Software Defined Network (SDN) y Network Function Virtual (NFV) para mejorar los tiempos de respuesta.

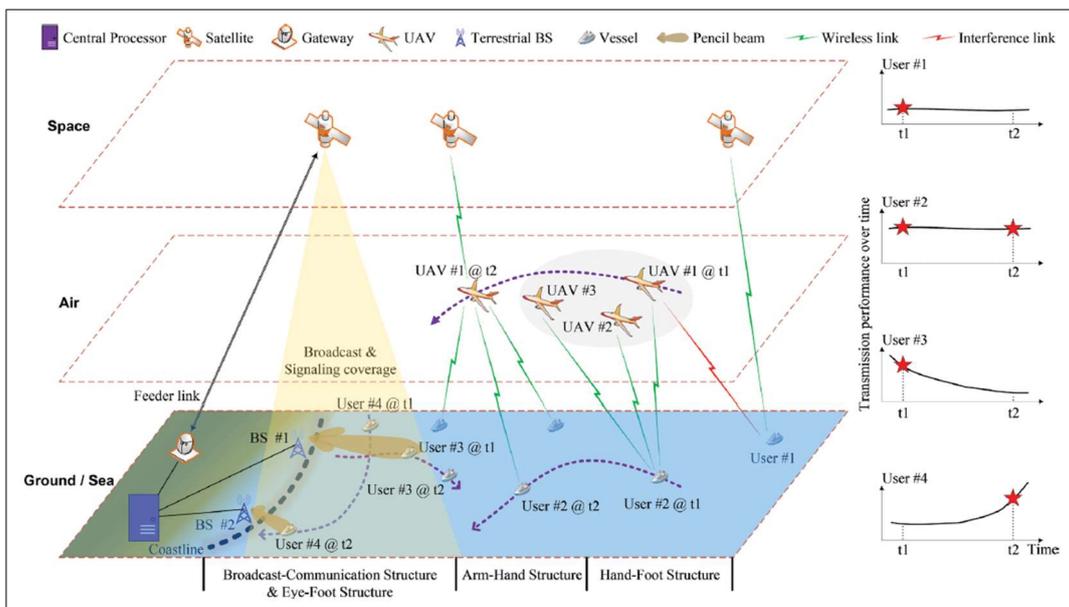


Figura 10.5. Proceso de cobertura bajo demanda, las líneas de puntos de color púrpura señalan la ruta de los barcos o la trayectoria de los UAV [47].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Las redes integradas Satélite – Tierra (SGINs) se contemplan como una arquitectura para realizar distintas medidas con sistemas de teledetección, reduciendo la congestión de la red terrestre y proporcionando servicios de inteligencia de red como soporte para los usuarios terrestres. En SGINs, los satélites LEO, MEO y GEO se despliegan para conseguir una cobertura global y suministrar servicios de comunicaciones a los usuarios terrestres. Sin embargo, la integración de tareas de teledetección, computación, comunicación y almacenamiento rápido debe ser visto como un gran desafío encaminado a conseguir una disminución del tiempo real de ejecución de las tareas de procesado en entornos de red que varían de forma dinámica y compleja.

El nivel acuático dará cobertura y servicios de Internet mar adentro, con aplicaciones militares y comerciales. Las comunicaciones con barcos de una cierta envergadura, equipados con antenas de alta ganancia, pueden implementarse directamente vía satélite. Para barcos de menor tamaño, equipados con antenas no tan directivas, las comunicaciones con el satélite pueden apoyarse en vehículos no tripulados (UAV) que harían las funciones de repetidor o de estación base. Si los barcos operan en navegación de cabotaje, la señal del satélite puede enviarse a una estación terrena y de ahí, a través de la RAN y de las estaciones base más próximas a la costa, enlazar con las embarcaciones. En cualquier caso, las áreas de cobertura tanto de satélite como de las estaciones base próximas al litoral son susceptibles de ser utilizadas por cualquier tipo de usuario.

10.3. La evolución de las redes de acceso radio hasta la 6G

La primera generación de telefonía móvil pública, la denominada 1G, era analógica y empezó a funcionar a principios de los 90. Algunos, ya ni se acuerdan de aquellos teléfonos tan populares que cuando llegó la 2G, la primera generación digital, hubo que recurrir al “apagón radioeléctrico” para extinguir su funcionamiento. La Telefonía Móvil Automática TMA llegó a tener dos tipos de sistemas el TMA 450 y el TMA 900, funcionando en las bandas de frecuencia de 450 MHz y 900 MHz.

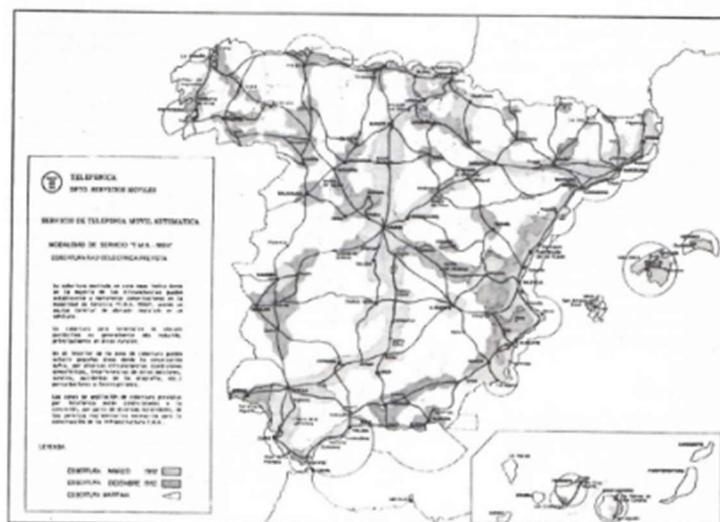


Figura 10.6. Previsión de cobertura radioeléctrica del sistema TMA 900 para el año 1992 [50].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El TMA 450 ocupaba una banda de frecuencias de 20 MHz entre los 450 y los 470 MHz, con un ancho de banda por usuario o intervalo entre portadoras de 25 kHz. El TMA 900 utilizaba la banda de frecuencias de 70 MHz que iba de los 890 a los 960 MHz, con un intervalo entre portadoras de 12,5 kHz. Ambos sistemas trabajaban con señales FM moduladas en frecuencia.

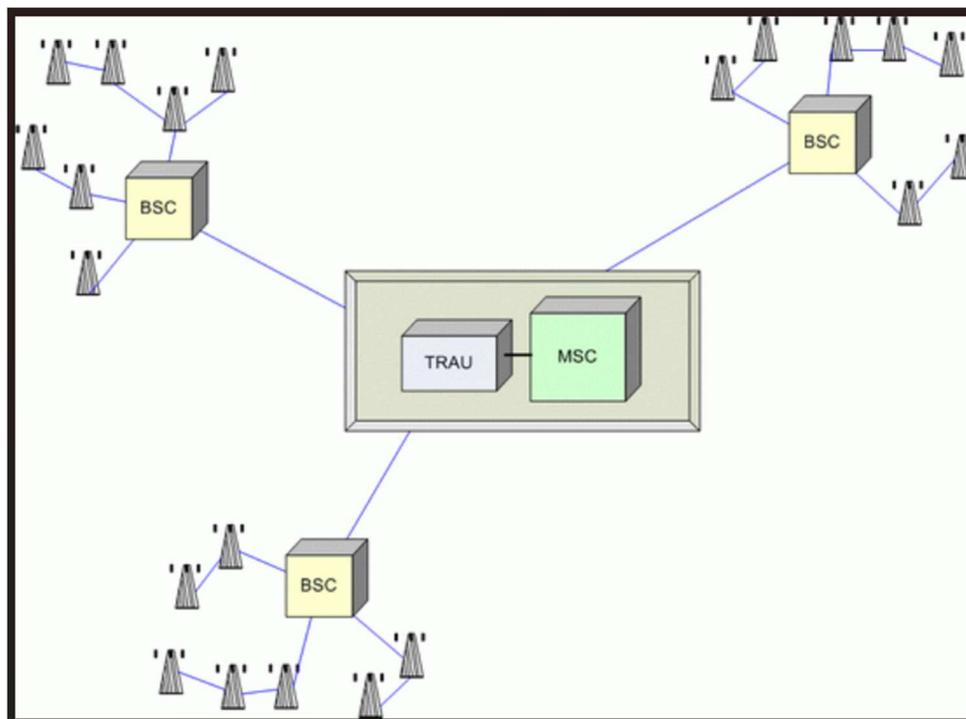


Figura 10.7. Topología de una red GSM [51].

El sistema GSM también entró en funcionamiento en los años 90. El primer elemento de red con un cierto nivel de inteligencia era la controladora de estaciones base BSC. En el núcleo de la red están la central móvil MSC y la unidad de transcodificación y adaptación de tasa de transmisión TRAU que convertía las señales recibidas de las estaciones base en canales PCM de 64 kbps. El sistema GSM funcionaba con dos bandas de frecuencias, una en torno a 900 MHz y otra sobre los 1800 MHz. Para la primera, se utilizaban frecuencias de 890 a 915 MHz en el enlace ascendente y de 935 a 960 MHz en el enlace descendente. En la banda de 1800 MHz, el enlace ascendente se situaba entre 1710 y 1785 MHz y en el enlace descendente entre 1805 y 1880 MHz. La separación entre portadoras era de 200 kHz y la separación entre canales dúplex de 45 MHz para la banda de 900 MHz y de 95 MHz en el caso de 1800 MHz. Las celdas, en zonas urbanas, tenían radios medios de 1 km y en zonas rurales alcanzaban varios kilómetros. La modulación utilizada era GSMK, con velocidades de modulación de 270 kbps. La potencia nominal de las estaciones base tenía valores de 2, 5, 8 y 20 vatios y la PIRE máxima por portadora estaba especificada en 500 vatios.

Los primeros ejemplos de celdas pequeñas fueron las microestaciones base y los repetidores que se desplegaron como complemento de las macroestaciones base (MEB) en puntos con mucha demanda de tráfico, cobertura en interiores o en lugares de difícil acceso. Con una potencia en torno a 2W frente a los 20 W de las MEB, las micro-celdas tienen áreas de cobertura mucho menores que la MEB. Los repetidores son sistemas analógicos que amplifican y transmiten señales de RF de una MEB para dar cobertura a zonas aisladas. Dependiendo de cómo se implemente el enlace con la MEB de la que dependen, surgen distintos tipos de repetidores: RF, F.O., etc. Con la evolución de los estándares de telefonía móvil celular, han ido apareciendo distintas soluciones de cobertura con celdas de pequeño tamaño que básicamente se diferencian por el tipo de enlace con la troncal de la red jerárquica.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

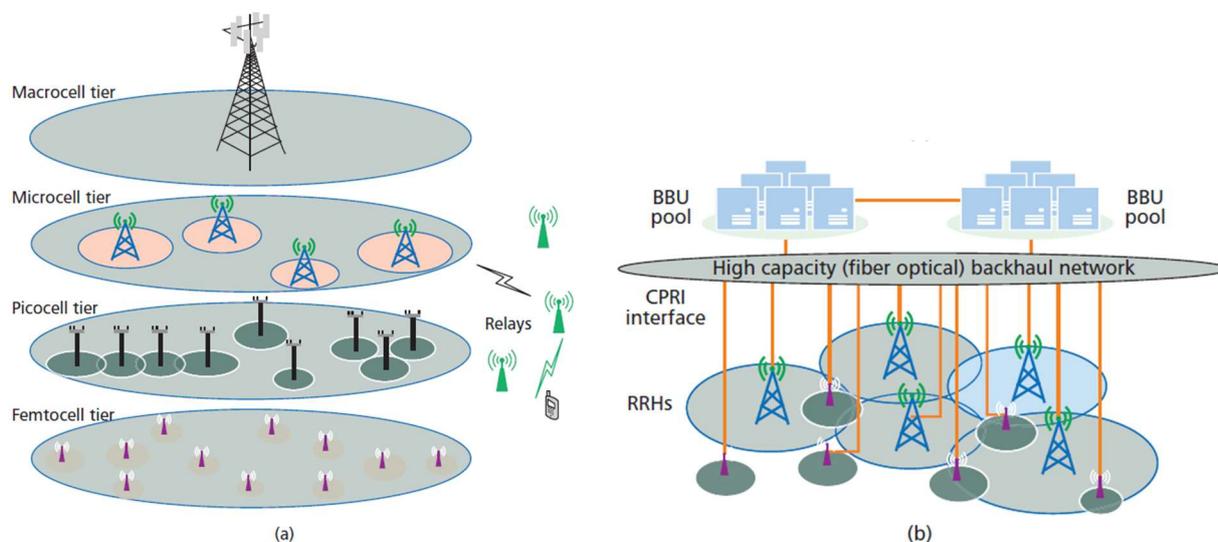


Figura 10.8. Evolución de la arquitectura en las redes de telefonía móvil. (a) Red de Acceso Radio Multicapa RAN y (b) Cloud RAN o C-RAN^[13].

Las micro-celdas han evolucionado hacia las pico-celdas y las femto-celdas, tratando de rebajar la potencia de las estaciones base. El radio de cobertura de una pico-celda es aproximadamente una tercera parte del correspondiente a una micro-celda y permite mejorar la capacidad y la cobertura en zonas donde la densidad de usuarios es elevada, como en edificios de oficinas o zonas urbanas muy pobladas. La aparición de nuevos escenarios como la cobertura en nuestras casas y en los vehículos automóviles ha dado lugar a células de menor tamaño con potencias mucho menores, denominadas femto-celdas, cuyo ejemplo más conocido es el popular wi-fi que suele ser habitual en nuestras viviendas. Las femto-celdas hicieron más flexible el despliegue de la red 3G y fueron la base para nuevos servicios de telefonía móvil.

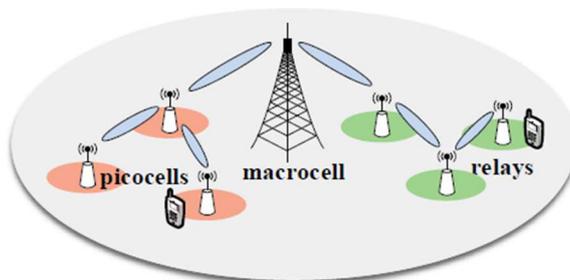


Figura 10.9. Mejora del sistema mediante pequeños puntos de acceso^[9].

Aunque la zona de cobertura de los puntos de acceso o los repetidores es pequeña, el rendimiento espectral es mucho mejor que el de la macrocelda puesto que la distancia entre el punto de acceso y el usuario es muy reducida.

Para la conexión de los repetidores con las estaciones base mediante fibra óptica, el estándar más utilizado de Radio on Fiber es el denominado CPRI (Common Public Radio Interface). El estándar CPRI utiliza anchos de banda considerables: 20 MHz de ancho de banda en la interfaz aire equivalen a velocidades de transmisión de 10 Gb/s en la fibra. La idea fue trasplantada a las estaciones base, utilizando una conexión de fibra óptica con los servidores que manejan la señal en Banda Base, Base Band Unit pools, y otra conexión igualmente de fibra óptica con las unidades o cabezas remotas de radio conocidas como RRH o RRU. Esta configuración ha sido bautizada

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

como cloud-RAN o C-RAN y permite que un pool de CPU's dé soporte a un número elevado de RRU's.

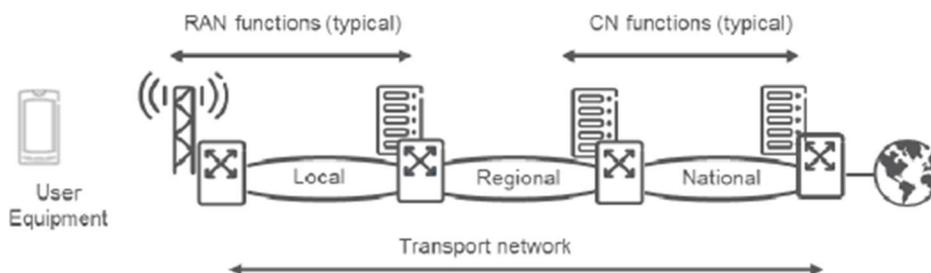


Figura 10.10. Sistema de comunicaciones 5G: Equipo de abonado, red de acceso vía radio, red de transporte y núcleo de la red^[30].

La 5G mejoró las tasas de transmisión a 1 Gb/s con movilidad y 10 Gb/s para acceso fijo. También, el número de conexiones por celda se multiplicó por un factor entre 10 y 100. La duración de las baterías pasó a ser 10 veces mayor que en las generaciones anteriores. Todo esto fue posible gracias a la utilización de una arquitectura de red heterogénea basada en diferentes capas para diferentes tecnologías de acceso vía radio. La mejora de la eficiencia tanto espectral como energética, se basó en la implantación de redes de pequeñas celdas en las áreas metropolitanas más densas y los sistemas de múltiples antenas distribuidos.

10.3.1. Network Function Virtualization (NFV) y Defined Network (SDN)

A partir de la 4G, aparecen las tecnologías **Network Function Virtualization (NFV)** y **Software Defined Network (SDN)**. La tecnología NFV permitió sustituir mediante software y de manera virtual, las funciones de algunos componentes físicos de red. Ejemplos de utilización de la tecnología NFV: **Routers Virtuales**, que reducen la dependencia de los routers físicos mediante funciones virtuales de enrutado o encaminamiento. **Firewalls virtuales**, implementados con software permitiendo un despliegue más flexible de la red. **Equilibrado Virtual de Cargas**, que regula de una forma dinámica el tráfico en la red en función de la demanda. **Virtual Private Networks (VPNs)**: Canales de comunicación seguros establecidos utilizando componentes virtuales. **Content Delivery Networks (CDNs)**: Entrega eficiente de contenidos web y multimedia mediante un servicio virtual de distribución de contenidos.

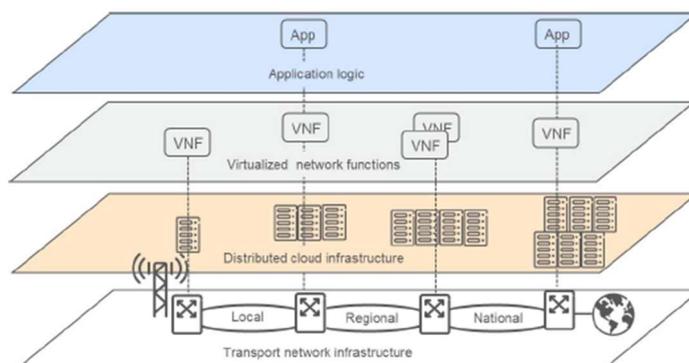


Figura 10.11. Red 5G dividida en infraestructura de transporte de red, infraestructura distribuida en la nube, funciones virtuales de red y capa de aplicaciones y servicios^[30].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La segunda generación, denominada eNFV, está diseñada para cumplir los requisitos de las redes 5G, incluyendo baja latencia, ancho de banda elevado, y conectividad masiva. Junto con la arquitectura edge computing consigue un procesamiento más próximo a la fuente de datos, reduciendo la latencia y aumentando la sensibilidad de la red. Supone, igualmente, una mejora de la automatización, de la fiabilidad y de la interoperabilidad entre NFV's de distintos proveedores, de la eficiencia y de la seguridad de la red.

Como ya se ha indicado, con la tecnología NFV aparece la tecnología SDN. Se trata de un conjunto de técnicas que separan el plano de datos del plano de control para permitir una gestión más dinámica de los dispositivos de red. Con la SDN, todos los componentes de red, tanto físicos como virtuales, empezaron a ser controlados mediante programas de software. Esto permitió que las actualizaciones de red consistieran básicamente, en la sustitución de las versiones software en uso por otras nuevas actualizadas, dando a la red una versatilidad que no tenía, al realizar las actualizaciones sin interrumpir el funcionamiento normal de la red.

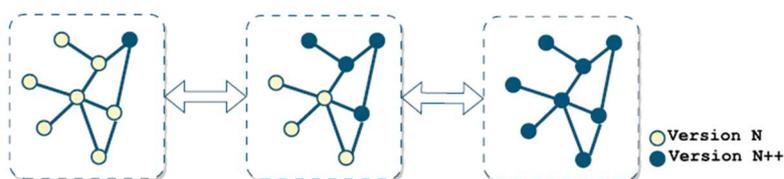


Figura 10.12. Representación esquemática de una actualización de red con SDN [1].

10.3.2. Network Slicing

El **slicing** consiste en dividir una red física en múltiples redes virtuales o slices que coexisten de manera independiente, cada una con sus propios recursos y configuraciones. Estas redes virtuales están optimizadas para diferentes servicios o aplicaciones, lo que permite una gestión más eficiente y flexible de los recursos de la red. El slicing global de la red incluye el slicing correspondiente del núcleo de la red que está apoyado en las tecnologías NFV y SDN.

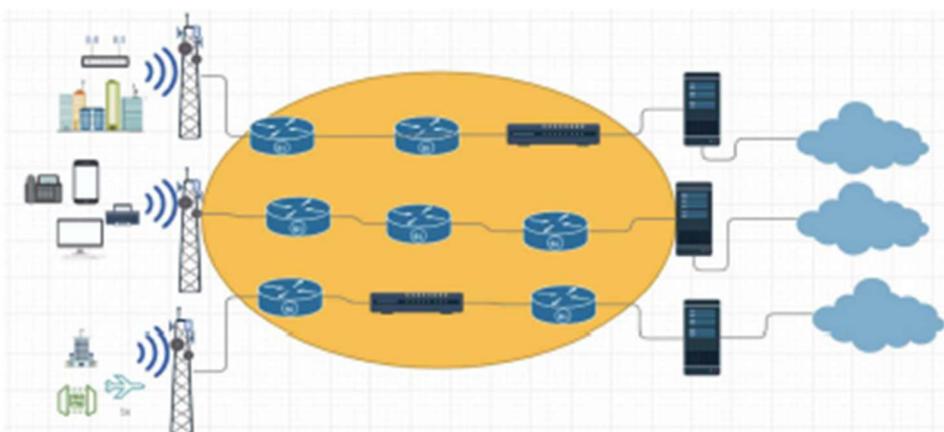


Figura 10.13. Primera aproximación al Network Slicing [33].

Una primera idea de Network Slicing puede ser la que muestra la Figura 10.13, donde hay diferentes clases de usuarios como juegos de realidad virtual y comunicaciones de banda ancha, usuarios de

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

móviles o portátiles utilizando aplicaciones bancarias u otras de alta seguridad o, por último, transmisión de indicaciones para dispositivos IoT. Todos ellos acceden a la red a través de diferentes RANs y sus datos viajan con encaminamientos y canales distintos para alcanzar la nube. Según los tipos de tráfico, pueden asignarse diferentes canales y encaminamientos buscando un funcionamiento óptimo de la red.

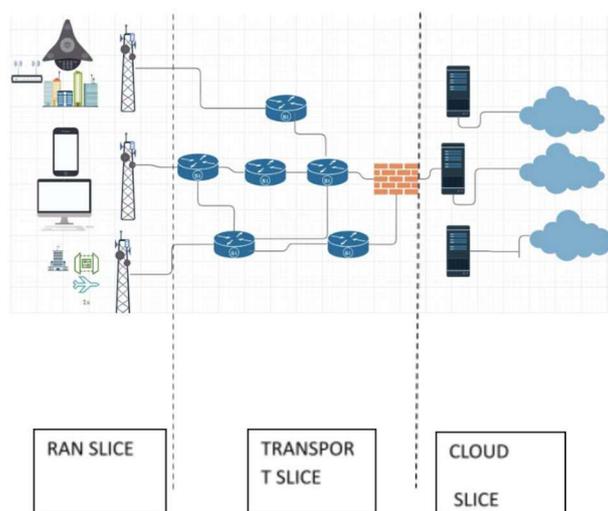


Figura 10.14. Network Slicing vertical [33].

En la distribución vertical del proceso de slicing, la red se divide en tres partes: la red de acceso vía radio, la parte correspondiente a la capa de transporte y conmutación y la conexión con la nube. La primera parte, va de los dispositivos de los usuarios a los puntos de acceso, y podría denominarse la parte de la comunicación vía radio. La segunda parte incluye todo tipo de dispositivos de conmutación que intervienen en el encaminamiento de la información: routers, switches, cortafuegos, pasarelas, cables de fibra óptica, etc. por lo que se ha denominado la parte de transporte. La tercera parte contiene los servidores de almacenamiento y del núcleo de la red situados en la nube. La ventaja de este slicing vertical es su fácil implementación, pero tiene como contrapartida una baja eficiencia.

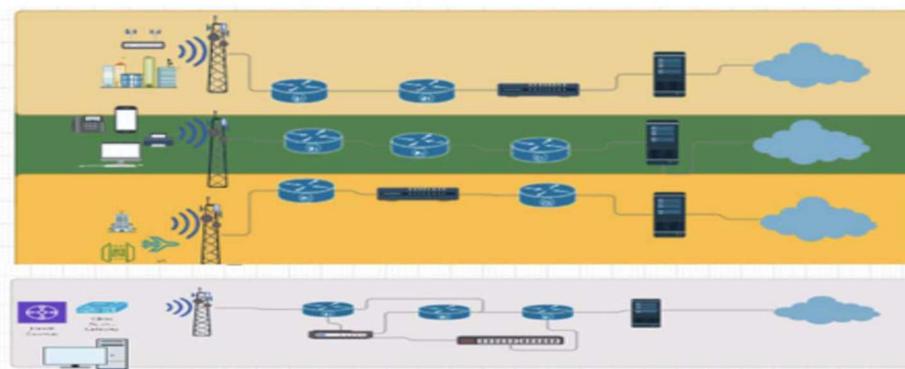


Figura 10.15. Network Slicing horizontal [33].

En el slicing horizontal, la red puede verse dividida en tres o cuatro partes: Una para usuarios de banda ancha, otra para usuarios de baja latencia, otra para usuarios de comunicaciones tipo

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

máquina masivas (mMTC) y por último, otro tipo de usuarios. De hecho, esta clasificación está regulada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) que define claramente estos tres tipos de slicing:

- Enhanced Mobile Broad Band (eMBB). Comunicaciones de banda ancha en espacios interiores y exteriores. Realidad aumentada y realidad virtual.
- Massive Machine Type Communications (mMTC). IoT, smart agriculture, smart city, smart home, monitorización remota, etc.
- Ultra Reliable Low Latency Communications (uRLLC). Vehículos autónomos, monitorización de pacientes, automatización industrial y telemedicina.

Como consecuencia, el slicing RAN está encaminado a la virtualización y centralización en la nube de los recursos de la red de acceso radio y tiene tres subredes: eMBB, URLLC y mMTC. Dicho de otro modo, se trata de clasificar el tráfico según se trate de sistemas de banda ancha, de baja latencia o de comunicaciones tipo máquina. Los recursos de estas tres subredes pueden ser virtuales o físicos. Los recursos físicos son gestionados a través de la **3GPP network slicing management system** mientras que los virtuales lo hacen por medio del **NFV-MANO** (management and orchestration) del ETSI. Dentro de un nodo gNB, hay dos unidades virtuales, CU y DU, una centralizada y otra distribuida, y la parte física de la unidad de radio (RU). La red de acceso vía radio, la red transporte y el núcleo de la red completan sus propias funciones de gestión y la función de gestión de slices de red es la encargada de coordinar los slices de cada una de las áreas de la red.

El núcleo de la red gestiona funciones como la autenticación de usuarios, el encaminamiento de tráfico y la conexión entre dispositivos y servicios externos. Con network slicing en el núcleo de la red, es posible dividir esta infraestructura central en múltiples slices, cada uno con sus propios recursos y configuraciones específicas para satisfacer los requisitos de los diferentes casos de uso.

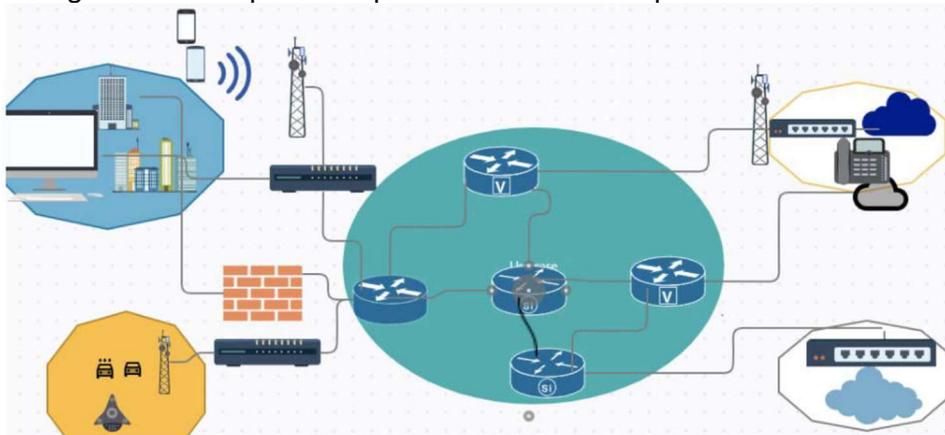


Figura 10.16. Cuatro redes conectadas a través del núcleo de red [33].

Cuando el núcleo de red es sliced, diferentes tipos de tráfico de cliente son cursados por distintos caminos. Los puertos de los routers pueden reservarse para un tipo específico de datos o diferentes caminos pueden también reservarse para distintos tipos de tráfico, siempre que los recursos estén disponibles.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

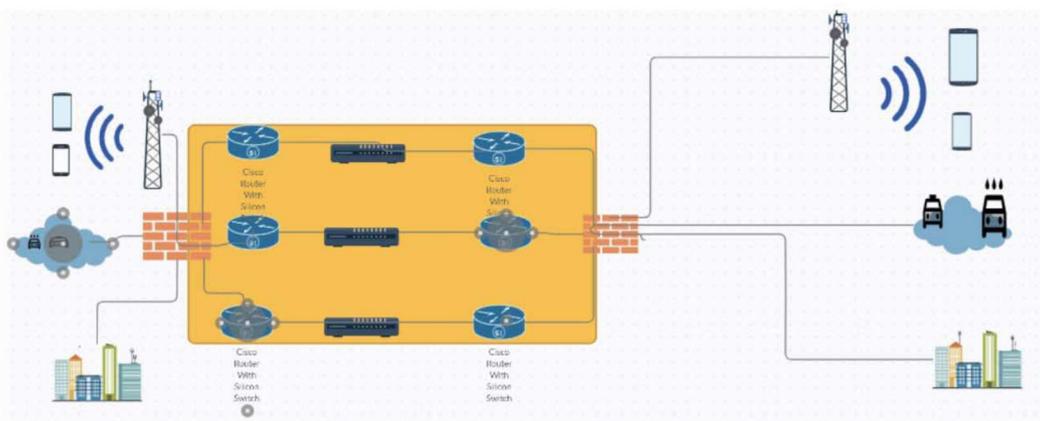


Figura 10.17. Slicing de núcleo de red [33].

La Figura 10.17 muestra como varios routers están reservados para distintas categorías de usuarios. Los slices están dispuestos como conjuntos recursos para proporcionar los correspondientes servicios de red.

10.3.3. Cloud-Native Computing

Las arquitecturas Cloud Computing y Edge Computing han evolucionado hacia la Cloud-Native Computing. En los sistemas de computación distribuidos, la arquitectura orientada a los servicios (SOA) es la que proporciona aplicaciones web de bajo coste, debido fundamentalmente a sus características: escalable, mantenible, flexible e interoperable. Durante los últimos años, ha surgido una variante de SOA conocida como la arquitectura de los microservicios, que consiste en descomponer una aplicación de carácter monolítico en un conjunto de microservicios que se manejan por medio de protocolos sencillos. En la última década, esta arquitectura de microservicios ha ido considerándose un Cloud Computing V2.0, un sistema distribuido, elástico y escalable. El cloud computing actúa como administrador de servicios de Internet, mientras que el cloud-native computing maximiza los rendimientos del cloud computing.

NOMBRE	VENTAJAS	DESVENTAJAS	COMENTARIOS	EJEMPLOS
Hypervisor tipo 1	Alta eficiencia no modifica SO	Poco flexible	conocido como barra metálica	VMware ESXi Microsoft Hyper-V
Hypervisor tipo 2	Alta compatibilidad y flexibilidad No modifica SO	Eficiencia poco más baja que el tipo 1	Corre en el SO	Oracle Virtual Box VMware Workstation
Contenedor	Bajo overhead Despliegue flexible	No necesita licencia	Basado en sistemas Cloud-Native	Docker, FreeBSD jail

Cuadro 10.3. Tecnologías para la virtualización de la computación [31].

Los recursos de la Cloud-Native Computing son: a) Virtualización de la computación, b) Virtualización de la red y c) virtualización del almacenamiento. La virtualización de la computación consiste en la creación de una capa de abstracción de la capa de computación, generalmente en forma de máquina virtual (VM) o de contenedores. Este es el núcleo de todos los despliegues de red cloud-native. El control de la creación y ejecución de una VM se lleva a cabo mediante una capa

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

software denominada hypervisor. Existen dos tipos de hypervisores: el tipo 1, corre directamente en el hardware. El tipo 2, forma parte de un sistema operativo. Mientras el tipo 1 permite un mayor rendimiento y eficiencia, el tipo 2 es más flexible a costa de un menor rendimiento.

10.3.4. Contenedores y virtualización de red

La virtualización de red añade a los conceptos ya reseñados, NFV y SDN, el nuevo concepto Cloud Native Network Function (CNF) diseñado para funcionar con contenedores, en lugar de VMs. La containerización es un mecanismo de aislamiento que aprovecha el núcleo de Linux para aislar recursos creando contenedores como procesos diferentes en un Sistema Operativo remoto. Combinando la arquitectura de microservicios con la containerización, cada parte de una aplicación como librerías, procesos, etc, es empaquetada en su propio contenedor. Esto aumenta el aislamiento, la transparencia y la capacidad de replicar el propio recurso. Con la utilización de CNF junto con NFV y SDN, los operadores de red pueden ganar flexibilidad y reducir costes de explotación, manteniendo la instalación actualizada dentro de las tendencias actuales de las arquitecturas cloud computing.

La virtualización de almacenamiento es una técnica de creación de una capa de abstracción sobre los dispositivos de memoria para proporcionar un pool de almacenamiento grande, rápido y redundante sobre un elevado número de discos duros. Como las operaciones de I/O son buena parte del tiempo total de utilización de la red, la virtualización de memoria afecta profundamente a la eficiencia de todo el sistema. Es más, la redundancia de datos y la seguridad son requisitos inherentes a los sistemas cloud-native que descansan sobre la capacidad de almacenamiento.

10.3.5. Machine learning y orquestación del servicio

La arquitectura cloud-native contempla tres tipos de nube: a) Nube única, b) Multinube y c) Coordinación de nodos Edge o Mobile Edge Computing. La nube única utiliza la red de Internet para el suministro de servicios tanto de software como de hardware a clientes externos. Para optimizar tanto la utilización de recursos como el tiempo de respuesta de la red, es necesaria la implantación de un servicio de orquestación. Actualmente hay dos tipos de servicios de orquestación: heurístico estático y machine learning (ML). Los primeros están basados en algoritmos heurísticos como los algoritmos genéticos y se utilizan en determinados escenarios que no son a gran escala como por ejemplo la optimización del tamaño de distintas variables. También, se han utilizado algoritmos heurísticos para equilibrar el tráfico en la red implantando contenedores para llevar a cabo diferentes servicios desde la nube. El principal problema es que cuando el sistema crece, la adaptación del método heurístico de orquestación es poco dinámica y hay que utilizar algoritmos ML para la orquestación ya que caracterizan mejor las tareas y pueden amoldarse a su posible evolución en el tiempo. La nube única puede tener también limitaciones relativas a costes, fiabilidad y recursos. Se propone la solución de la multinube, de esta forma, los recursos de varias nubes serán utilizados y repartidos de acuerdo con las tareas que han de llevarse a cabo, disminuyendo los costes y aumentando la fiabilidad. Dada la heterogeneidad de los recursos y servicios de las distintas nubes, surgen nuevos retos para la orquestación de los servicios.

10.3.6. Coordinación de nodos Edge

La arquitectura Mobile Edge Computing (MEC) o de coordinación de nodos Edge, fue proyectada durante la 5G pero será seguramente heredada por la 6G. Cuando un cliente solicita un servicio de baja latencia, la red puede encaminar la petición al nodo Edge más próximo. En el caso de aplicaciones complejas, y debido a la necesidad de equilibrar el tráfico de la red, es posible repartir las tareas entre varios nodos que han de participar en las actividades de computación de forma coordinada. Las imágenes de Realidad Aumentada o de Realidad Virtual, las comunicaciones holográficas o la conducción autónoma, son ejemplos de servicios o aplicaciones que tendrían que aplicar la coordinación entre nodos Edge.

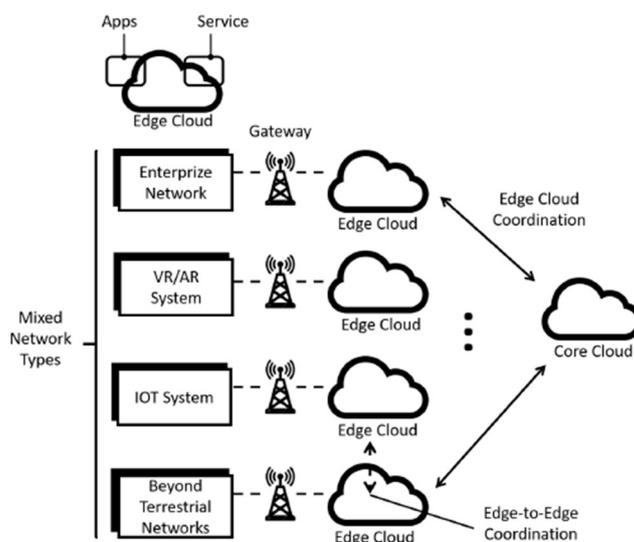


Figura 10.18. Representación de la coordinación entre nodos Edge a través de los nodos locales de diferentes tipos de redes y servicios y la coordinación con el núcleo de la arquitectura Cloud Computing [24].

Con las mejoras en la nube, el cuello de botella de las redes móviles ha pasado de la red de acceso al entronque con la capa de transporte. A este hecho hay que añadir los requisitos cada vez más restrictivos del retardo, por lo que la funcionalidad de la red se ha de trasladar hacia el Edge Cloud.

10.3.7. Las redes orgánicas

Las redes orgánicas son un paso más hacia una arquitectura de red que dé servicio a las nuevas redes móviles. Apoyándose en la red actual 5G, se pretende disminuir en lo posible su complejidad y dotarla de una mayor flexibilidad para que pueda ser el soporte técnico de la futura 6G.

El núcleo de la futura red orgánica 6G tendrá que cumplir las funciones del núcleo de la red 5G actual: autenticación, autorización, movilidad, ancho de banda, etc. También, algunas funciones nuevas como la gestión y el procesado ultrafiable y de muy baja latencia, de resultados de medidas realizadas con sistemas de detección y teledetección.

Con el despliegue de la 5G se ha aumentado en gran medida la capacidad de los accesos a la red, trasladando el cuello de botella de las comunicaciones a la capa de transporte. Si bien la integración de las redes no terrestres supone una mejora de la capa de transporte al aumentar la capacidad total de la red, la idea generalizada de que la capa de transporte está bien dimensionada y planificada para cursar el tráfico generado por la red de acceso radio debe considerarse de nuevo.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

De igual manera, la diversidad existente en las conexiones físicas de backhaul entre la red de acceso radio y la capa de transporte, puede ser un aspecto que estudiar de cara a la flexibilidad de la futura red.

Una infraestructura de red que proporcione un crecimiento y una elasticidad orgánicos ha de estar dotada de un plano de control que aumente o disminuya con los recursos. De esta manera, tan pronto como un recurso, físico o virtual, se pone en funcionamiento, debe ser automáticamente controlable para regular su operación. Se prevé un plano de control que interconecte todos los recursos sin intervención externa ya que actualmente, cada operador de red tiene un acceso separado e independiente al plano de control, lo que impide los cambios rápidos en la infraestructura de la red.



Figura 10.19. Representación esquemática del crecimiento orgánico de una red [1].

Una red orgánica debe ser capaz de crecer a partir de uno o un número reducido de nodos hasta un gran sistema distribuido en un área geográfica, con su núcleo central y sus nodos en los límites geográficos de la red y también, reducir su tamaño y número de nodos. Algunos trabajos proponen una red homogénea en la que una serie de órganos sean capaces de manejar toda clase de situaciones por sí mismos. Un sistema de este tipo puede crecer fácilmente sin tener que tomar decisiones complicadas. Para homogeneizar el núcleo de la red, habría que olvidar el concepto clásico de **función de red distribuida** a través de interfaces. En su lugar, se sugieren órganos de procesado, basados en rutinas que puedan ser utilizadas de forma dinámica como bloques para la construcción de la futura red.

La utilización de la red virtual de acceso (vRAN) que ya se emplea en la 5G puede dar una gran flexibilidad al despliegue, operación y escalado de las redes de comunicaciones. Existe un gran número de estudios de aplicación del ML a las redes de comunicaciones y más recientemente del DL que muestran un gran potencial como herramientas para el diseño, optimización y adaptación de las redes de comunicaciones.

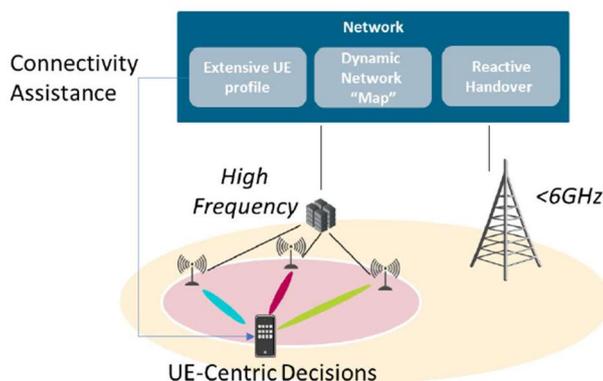


Figura 10.20. Futuras funciones RAN en una red orgánica [1].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Desde el punto de vista del núcleo de la red, hay tres ejes de interés en el desarrollo de la red de acceso vía radio: a) El desplazamiento en la banda espectral de utilización hacia frecuencias más altas. b) El despliegue de la red de acceso radio. c) La interacción entre el UE y la RAN.

La utilización de las bandas sub-THz y THz disminuye las zonas de cobertura reduciendo la movilidad y perdiendo seguridad en la conexión. Para mantener la continuidad en el servicio debe replantearse el concepto de handover. Con la aparición de las RAN móviles y nómadas, la topología de las redes de acceso puede cambiar de forma dinámica. Desde el punto de vista del núcleo de red, esto implica que los enlaces establecidos van a cambiar, no sólo por el handover de los UE sino también por la variación entre la posición relativa de unos puntos de acceso con otros. Es más, todo ello requiere del desarrollo de un mapa dinámico de puntos de acceso que recoja la posición momentánea y las frecuencias utilizadas por cada uno de ellos. Puede decirse que hay un cambio de filosofía, la red pasa de gestionar los recursos de equipamiento radio a reaccionar a las decisiones del usuario a través de su UE.

10.3.8. Inteligencia Artificial y la 6G

La inteligencia artificial puede aportar a la arquitectura de la red 6G la gestión inteligente de los recursos, adaptación automática de la red y prestar un servicio de forma inteligente. En este caso, se propone dividir la arquitectura de red en cuatro capas: detección inteligente, análisis y procesado de datos, control y aplicaciones inteligentes.

La red 6G ha de recoger datos en su entorno ambiental a través de una gran cantidad de dispositivos: cámaras de tv, sensores, vehículos, drones y terminales de usuario. La detección de variables asistida por AI permitirá clasificar grandes cantidades de datos diversos. Por ejemplo, spectrum sensing es una técnica que permite mejorar la eficiencia en la utilización del espectro de frecuencias y evitar los problemas de escasez para emplear una banda de frecuencias dentro de una determinada zona del espectro. Sin embargo, en 6G un elevado número de dispositivos pueden solicitar un ancho de banda utilizable y causar un problema de grandes dimensiones. Para estos casos, la AI puede establecer modelos, por medio de algoritmos como Support Vector Machine (SVM) y Deep Neural Network (DNN), que exploren el estado de utilización del espectro y asignar a cada solicitud una banda determinada.

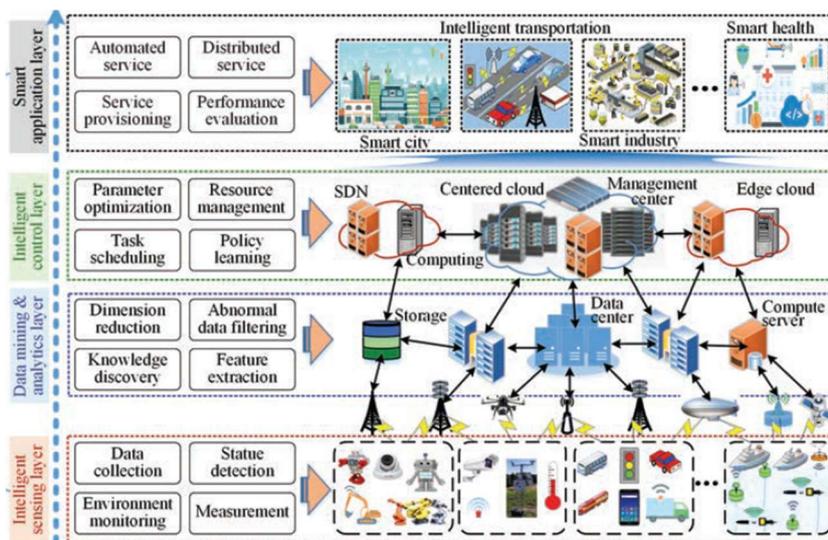


Figura 10.21. Arquitectura de una red 6G basada en AI [32].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En relación con la capa de análisis y procesado de datos, hay que indicar que es muy costoso transmitir o almacenar una elevada cantidad de datos en redes muy densas. Es necesario reducir el volumen total de datos a manejar. Los sistemas PCA (Análisis de Componentes Principales) e ISOMAP (Isometric Mapping) basados en AI pueden convertir los datos a espacios de menor dimensión, reduciendo el tiempo de computación y el espacio de almacenamiento.

La capa de control inteligente consiste en el aprendizaje, optimización y la toma de decisiones aprovechando el conocimiento de capas inferiores para habilitar el aprendizaje inteligente de dispositivos y estaciones base o puntos de acceso y elegir la decisión más adecuada en cuestiones como control de potencia, acceso al espectro, gestión de tráfico telefónico, etc. Todo realizado aplicando técnicas de AI en las redes 6G, donde cada elemento de red está equipado con una parte inteligente para tomar decisiones por sí mismo.

Por último, la capa de aplicaciones es la encargada de suministrar servicios específicos a los usuarios. La AI es la que se ocupa de que la red pueda compaginar varios servicios de alto nivel de manera simultánea: Smart City, Smart Industry, Smart Grid, Smart Health, y manejar la gestión de este tipo de aplicaciones. Todas las actividades de dispositivos inteligentes, terminales e infraestructuras en redes 6G están también gestionadas por esta capa con técnicas AI. Otra función de la capa de aplicaciones es valorar la realización del servicio en base a los datos obtenidos en la red sobre la Calidad del Servicio (datos de carácter técnico) y la Calidad de la Experiencia por parte del usuario.

10.3.9. Una primera aproximación a los puntos de acceso

De acuerdo con lo reseñado en el apartado de network slicing o los sistemas Mobile Edge Computing, las redes de acceso radio C-RAN de la 6G están enfocadas al tipo de terminal. Hasta ahora las redes de telefonía móvil se proyectaban buscando el mayor área de cobertura posible desde las estaciones base. La 6G establece las conexiones en función del tipo de terminal, de forma que hay Puntos de Acceso dedicados a las comunicaciones entre dispositivos tipo máquina (Machine Type Communications MTC o M2M): dispositivos IoT, Smart City, monitorización remota, etc., otros para comunicaciones de banda ancha como los sistemas de realidad virtual y otros para comunicaciones muy fiables y de muy baja latencia como comunicaciones para servicios de telemedicina.

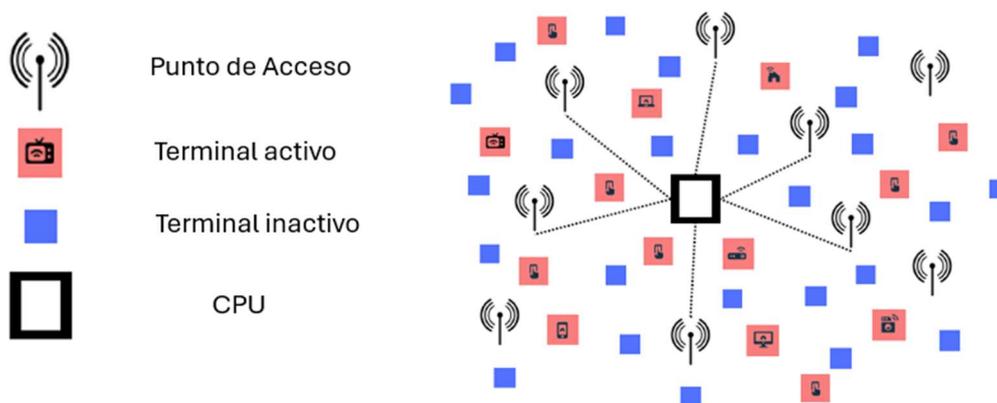


Figura 10.22. Configuración de una zona de cobertura de telefonía móvil 6G [8].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El modelo está basado en una red que ha de dar servicio a una gran cantidad de dispositivos IoT, nodos de sensores y terminales móviles de usuario. Para ello se distribuyen dentro de un área determinada un elevado número de Puntos de Acceso. Uno o varios servidores centrales conocidos con la denominación de Central Processing Unit (CPU) conectan los Puntos de Acceso con el núcleo de la red.

En la 6G, los puntos de acceso estarán situados a distancias menores de 100 metros y distribuidos de forma que den cobertura uniforme a un área geográfica determinada. A este tipo de sistemas MIMO se les denomina distribuidos (DmMIMO) y son estructuras que se prevé frecuentes en el despliegue de la 6G ya que la gran diversidad de aplicaciones de IoT implica un elevado número de nodos de tipo MTC.

10.4. Características de las futuras redes 6G

La necesidad de mayores anchos de banda de transmisión obliga a emplear zonas del espectro de radiofrecuencia de frecuencias más altas. La 5G utilizó la banda inferior de las milimétricas, hasta los 100 GHz y la 6G ha de utilizar frecuencias por encima de ese valor. Dado que las pérdidas de propagación son grandes y las atenuaciones introducidas por los edificios, el arbolado y la vegetación urbana, las personas, la lluvia, etc, son igualmente elevadas, el tamaño de las celdas ha de ser pequeño para mantener los niveles de señal necesarios para el buen funcionamiento de la red y evitar en lo posible obstáculos.

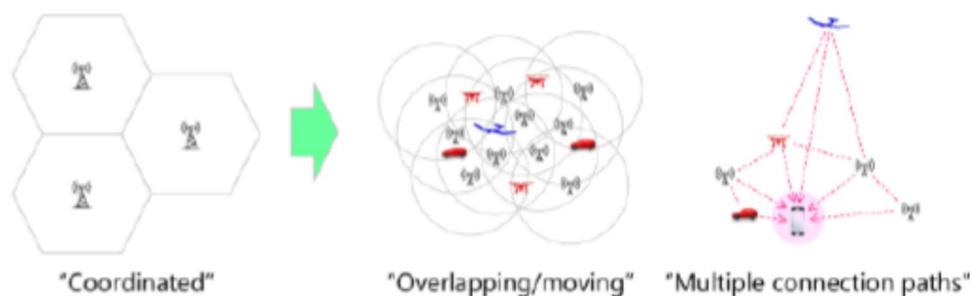


Figura 10.23. Transformación de la topología de red para redes 6G [3].

Surge un nuevo tipo de red vía radio en el que el tamaño de la celda es tan pequeño que puede hablarse de una red de telefonía celular sin celdas: Las nuevas redes **cell free**. La telefonía móvil convencional proporciona cobertura desde una estación base y el terminal del usuario va conectándose en su movimiento a sucesivas estaciones base, pero siempre desconectándose de la anterior. Con la tecnología **cell free** un usuario podrá conectarse a varias estaciones base a la vez, lo que aumenta el área de cobertura y reduce el número de traspasos entre celdas, incrementa las tasas de transmisión al poder distribuir flujos de datos entre varias estaciones base y permite optimizar la utilización de recursos, mejorando así la calidad de la comunicación y la capacidad del sistema.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

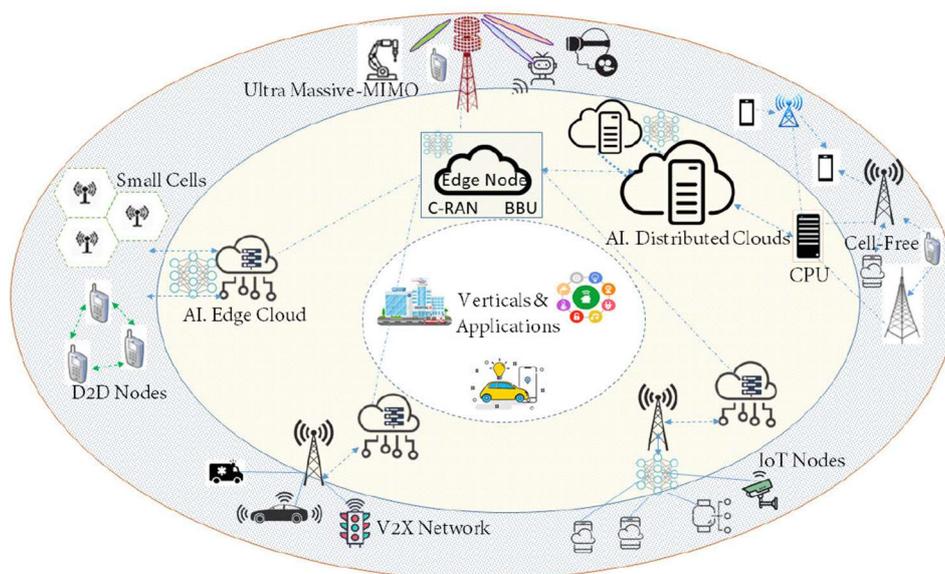


Figura 10.24. Arquitectura de una red 6G [5].

En el enlace descendente, el trasiego de la información se lleva cabo por diferentes caminos, disminuyendo la probabilidad de error en la transmisión. La topología de las redes 6G no es, por tanto, estrictamente celular. Es cierto que se puede hablar de reutilización de frecuencias, de igual manera que hay que considerar una zona de cobertura, que son conceptos ligados a la telefonía celular, pero ya no hay celdas. Se elimina de este modo, la denominada interferencia de borde de celda que afecta a celdas adyacentes, y que supone una mejora sustancial en la calidad de la comunicación entre la estación base y el terminal de abonado. Probablemente, no sea muy correcto decir que el número de traspasos disminuya, pero si es cierto que no serán traspasos duros, sino que serán traspasos más rápidos y, en consecuencia, más flexibles. En cualquier caso, el concepto de traspaso, tal y como se conocía hasta ahora, seguramente habrá de ser revisado.

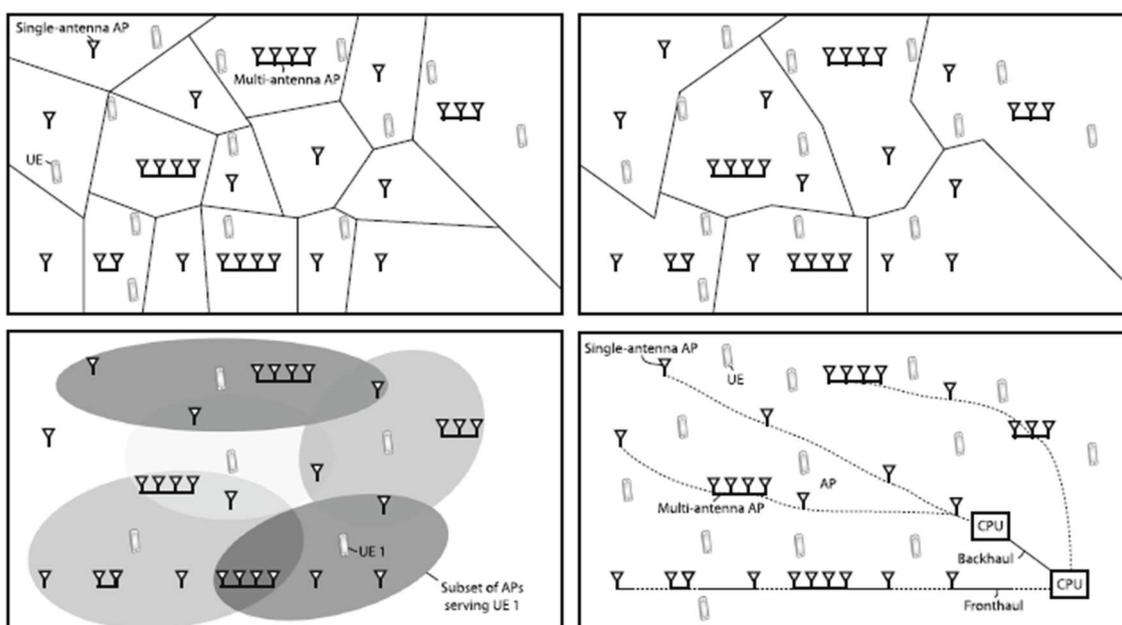


Figura 10.25. Evolución del despliegue de red de acceso vía radio [27], [46].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La Figura 10.25 muestra la evolución de las topologías de las redes de acceso vía radio hacia una red cell free. Arriba a la izquierda, se observa una red celular convencional en la que cada usuario está conectado a una sola estación base o punto de acceso. Arriba a la derecha, se describe una red convencional con CoMP-JT (Coordinated Multi Point with Joint Transmission) donde los puntos de acceso de un cluster se coordinan para dar servicio a los usuarios que están dentro del área conjunta de cobertura. Abajo a la izquierda, puede verse el despliegue de una red CoMP-JT centrada en el usuario, de forma que cada UE se comunica con sus puntos de acceso más próximos. Abajo derecha, una red cell free MIMO masivo como forma de implementar una red centrada en el usuario. Los sistemas cell free son distribuidos, tanto en el despliegue de red en espacios abiertos como en espacios interiores.

La Figura 10.26 muestra la eficiencia espectral para los usuarios de una zona cubierta por 9 puntos de acceso desplegados de forma uniforme. Se ha seleccionado la máxima eficiencia espectral de 8bps/Hz/usuario que se corresponde con un 256-QAM sin codificar. En el caso de la red celular convencional en los límites de las celdas se producen interferencias debido a que la eficiencia espectral es muy reducida lo que se traduce en niveles de modulación muy bajos o esquemas de modulación sencillos. En el caso de las redes cell free los índices de modulación son elevados y la interferencia entre celdas es mucho menor dada la proximidad entre el usuario y el punto de acceso. Otra ventaja de las redes cell free es que son fácilmente escalables en el caso de variaciones bruscas en el número de usuarios de alguna zona, dicho de otro modo, son mucho más flexibles que las redes celulares.

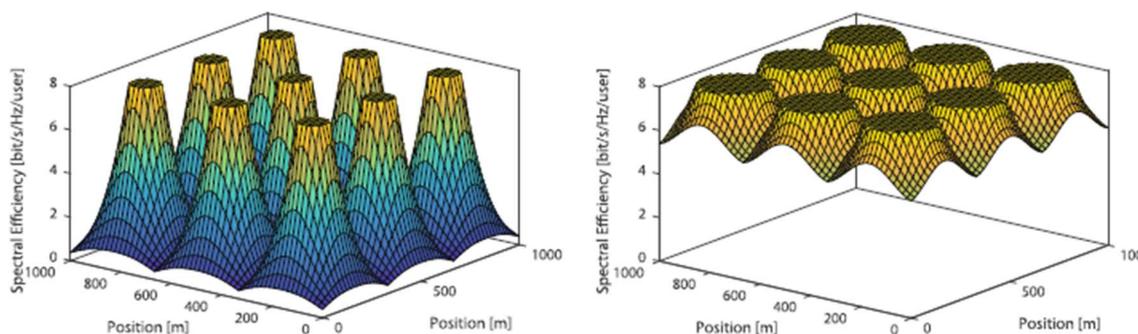


Figura 10.26. Comparación en la cobertura de datos de una red celular (i) y una cell free (d) [27].

Como las frecuencias de funcionamiento son más elevadas, las dimensiones de los sistemas radiantes son más reducidas y permiten la instalación de sistemas MIMO masivos y distribuidos. La idea de sistema MIMO masivo está asociada a una gran cantidad de antenas, incluso más de 100, en el punto de acceso y dar servicio al mayor número de usuarios. El sistema es energéticamente eficiente ya que, si la potencia transmitida por el punto de acceso es un valor fijo, las potencias asignadas a cada antena son reducidas y las interferencias entre señales de distintas antenas pueden evitarse con directividades elevadas.

10.4.1. Un cambio radical en la forma de enfocar las situaciones

Las fotografías muestran los equipos instalados en una nave industrial, en Bélgica, para llevar a cabo un estudio de propagación en interiores de locales o edificaciones destinados a la producción industrial en el año 2008.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

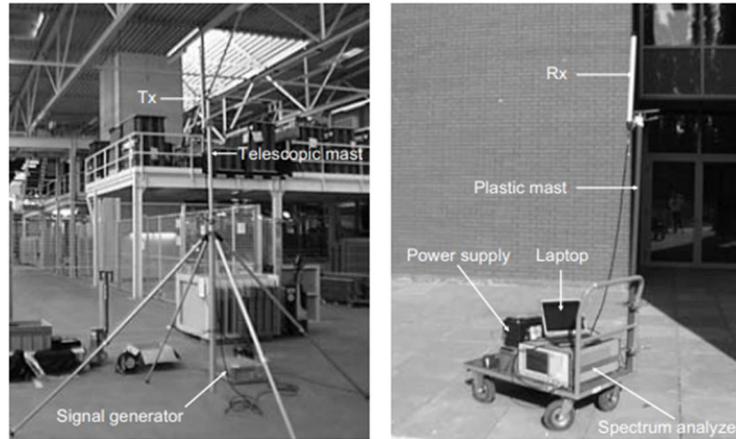


Figura 10.27. Equipos para realizar estudios de propagación en una nave industrial con maquinaria para la fabricación de piezas metálicas con el objeto de efectuar el control vía radio de la producción [34].

La idea consiste en sustituir las conexiones por cable entre las diferentes máquinas de la planta por conexiones vía radio, para lo cual se realizan estudios de propagación en la nave. Se pretende, de esta manera, agilizar la respuesta a los continuos cambios que sufren las plantas de fabricación hoy en día por mejoras, ampliaciones o supresión de maquinaria. De cara a una futura integración en IEEE 802.11(Wi-Fi) ó IEEE 802.15.4 (Zeg Bee) se contemplan dos tipos de fading. Por un lado, el fading lento también denominado a gran escala, debido fundamentalmente a variaciones en la posición de transmisor y receptor y que se ha aproximado mediante el modelo de pendiente única. Por otra parte, el fading rápido, temporal o de pequeña escala, producido por fenómenos de propagación como el multipath y que se ha aproximado por medio de una distribución de tipo Rice.

En el primer caso se estudian tres escenarios:

- Desvanecimiento a gran escala (LSF) en un enlace con línea de visión.
- LSF con obstrucción en la línea de visión con poco material en el entorno de transmisor y receptor.
- LSF con obstrucción en la línea de visión con mucho material en el entorno de transmisor y receptor.

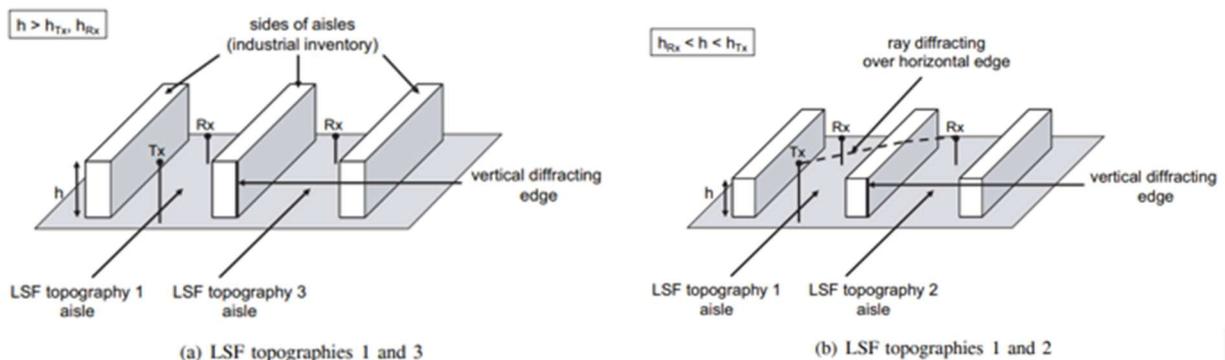


Figura 10.28. Escenarios de medida en la nave industrial [34].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La nave industrial tiene una altura entre 7 y 8 metros y una longitud de 100 metros por un ancho de 100 metros. Las medidas se han llegado a realizar sobre una distancia máxima de 140 metros. El suelo es de hormigón pretensado y los tres muros de carga, también. La cubierta descansa sobre una estructura metálica ligera de tipo celosía.

La propagación se ha supuesto que se ajusta al modelo de pendiente única, en donde la expresión:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

Permite estimar las pérdidas de propagación a una distancia d del transmisor, conociendo las pérdidas a una distancia arbitraria d_0 y siendo n el exponente de pérdidas que es una cantidad adimensional. Las medidas se llevan a cabo con una diferencia de alturas entre transmisor y receptor de 4m, midiéndose a 900, 2400 y 5200 MHz. La distancia mínima de las medidas es de 15 metros para asegurar que la medida tanto en transmisión como en la recepción cae dentro de los lóbulos principales de las antenas transmisora y receptora respectivamente. Además, se aprovecha para asignar los 15 metros como distancia d_0 .

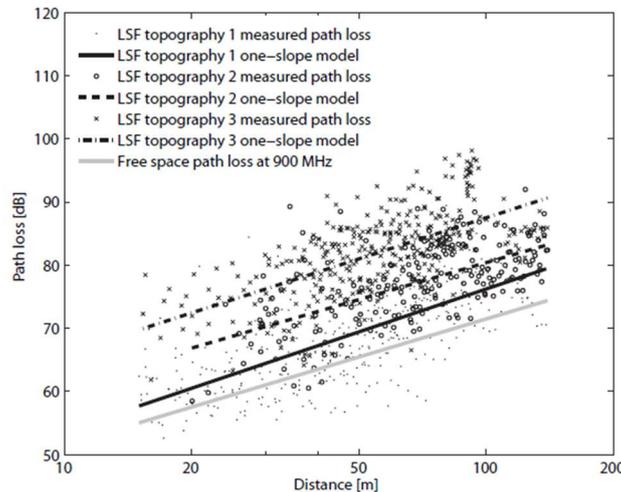


Figura 10.29. Pérdidas de propagación medidas y estimadas con el modelo de pendiente única para las diferentes topografías LSF a 900 MHz ^[34].

Como puede verse en la Figura 29, las pérdidas calculadas mediante el modelo de pendiente única son siempre menores que la media de los valores medidos. También, se observa que las pérdidas de las topografías distintas de LOS son mayores que las correspondientes a LOS y dentro de las que no son LOS, las pérdidas son mayores en el caso en que hay mucho material diverso en el entorno de la medida. Otros resultados de las medidas confirman el aumento de pérdidas con el incremento de la frecuencia, tanto con carácter general como en particular con el valor de $PL(d_0)$.

Para el caso de fading rápido o temporal, el trabajo ha estudiado cuatro escenarios:

- Fading Temporal, topografía 1. Línea de producción automatizada. Se supone que la intervención de personas en la producción es muy limitada. El entorno de la medida es prácticamente estático.
- Fading Temporal, topografía 2. Línea de producción parcialmente automatizada. Aquí, la intervención de los trabajadores de la planta es mayor que en el caso anterior. Es necesario manejar el funcionamiento de la maquinaria y su supervisión.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

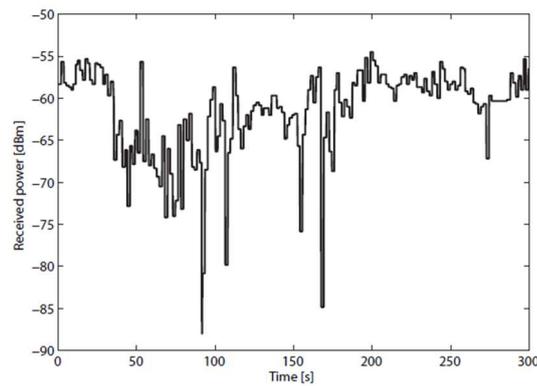


Figura 10.30. Medida de fading temporal en topografía 1 a 900 MHz [34].

c) Fading Temporal, topografía 3. Línea de producción manual.

d) Fading Temporal, topografía 4. Almacenaje y distribución de productos y materiales. Carga y descarga con carretillas elevadoras de los camiones que llegan a la factoría.

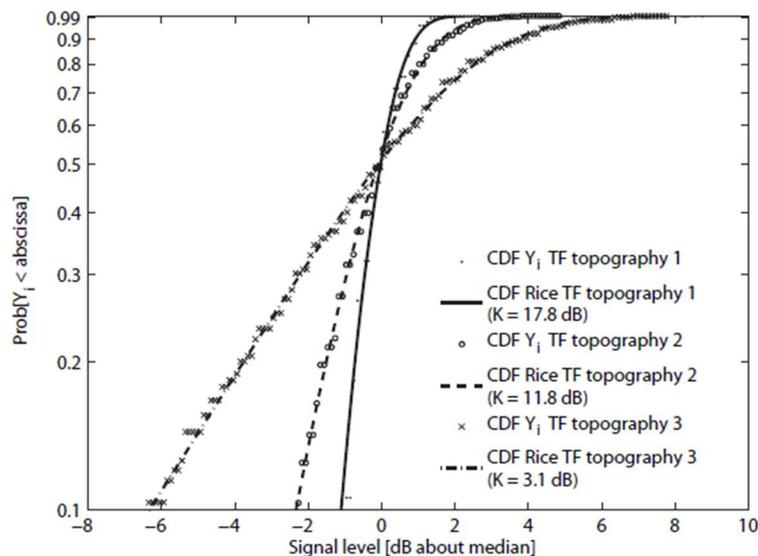


Figura 10.31. Función de distribución de las desviaciones Y_i y de Rice para tres conjuntos de medidas en las tres primeras topologías [34].

El estudio concluye que la distribución de Rice describe de forma muy precisa el fenómeno del desvanecimiento rápido.

Un trabajo posterior, en el año 2019, vuelve a considerar la misma planta y las mismas frecuencias de trabajo. La distancia de referencia d_0 es también, de 15 metros y el valor de $PL(d_0) = 70,28$ con un valor del exponente $n = 2,59$. El número de Puntos de Acceso es $L = 400$, para un número de usuarios $K = 20$ UE y un ancho de banda de 20 MHz. La potencia máxima radiada por cada punto de acceso es de 200 mW.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

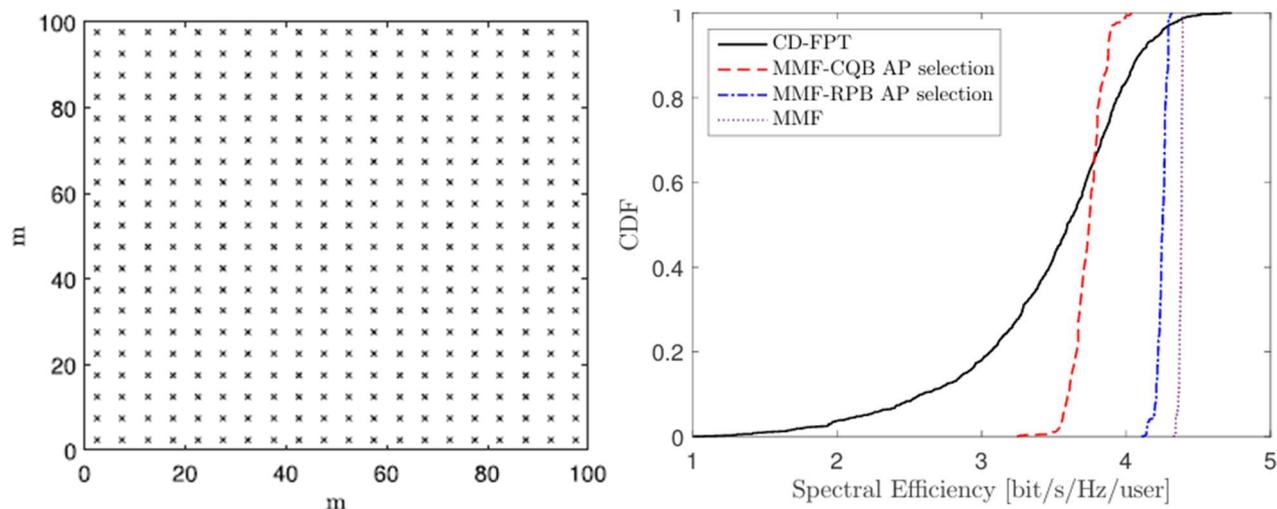


Figura 10.32. Se considera el mismo escenario que en [34] con cobertura de 400 Puntos de Acceso [27].

En este último caso, se ha supuesto que el desvanecimiento es a pequeña escala (SSF) y con una distribución de Rayleigh. La Figura 10.32 dcha, representa la función de distribución acumulada de la ganancia del canal en función de la eficiencia espectral por usuario para distintos tipos de control de potencia. CD-FPT: Channel Dependent Full Power Transmission. El control de potencia entre AP y UE es el mismo para los K enlaces. MMF: Max-Min fairness control power. El control de potencia se ajusta de manera coherente en cada uno de los K enlaces. MMF-RPB AP: MMF with Received Power Based AP selection. MMF con selección del Punto de Acceso en función de la potencia recibida. MMF-CQB AP: MMF with Channel Quality AP selection. MMF con selección del Punto de Acceso en función de la calidad del canal. Puede observarse que la estimación para un sistema MMF es la mejor y la MMF-RPB supone una buena aproximación independientemente de la situación del canal, mientras que el sistema MMF-CQB tiene un menor rendimiento espectral por usuario.

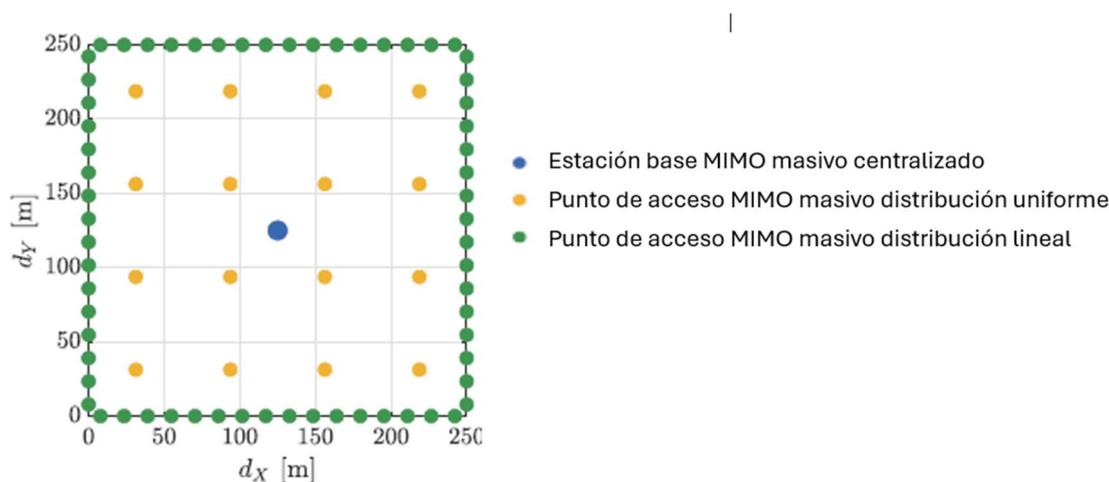


Figura 10.33. Diferentes despliegues de MIMO masivo [20].

La Figura 10.33 representa un escenario en el año 2023, donde el espacio de 250 metros por 250 metros corresponde al interior de una nave industrial. K dispositivos MTD de una sola antena reciben señal de Q puntos de acceso. Si el número total de antenas es M , cada punto de acceso estará equipado con $S=M/Q$ antenas. Se ha de cumplir que $M \geq K$ para dar servicio a todos los dispositivos MTD en funcionamiento.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Se consideran tres posibles arquitecturas:

- MIMO masivo centralizado (CmMIMO). Una Estación Base situada en el punto central de la nave ($d_x/2, d_y/2, h$), con un número M de antenas.
- MIMO masivo distribuido (DmMIMO). Despliegue en rejilla. Q puntos de acceso se distribuyen en el techo de la nave industrial. Cada punto de acceso tiene $S=M/Q$ antenas, las coordenadas del punto de acceso q-ésimo, son:

$$(x_q, y_q, z_q) = \left[\left(q_x - \frac{1}{2} \right) \frac{l}{\sqrt{Q}}, \left(q_y - \frac{1}{2} \right) \frac{l}{\sqrt{Q}}, h \right]$$

- MIMO masivo distribuido (DmMIMO). Despliegue en línea. Los puntos de acceso se distribuyen alrededor de la nave. Las coordenadas del punto de acceso q-ésimo, son:

$$(x_q, y_q, z_q) = \left[\left(q_B - \frac{1}{2} \right) \frac{4l}{\sqrt{Q}}, 0, h \right] \text{ donde } q_B \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{Q}{4} \right\} \text{ para puntos de acceso en la pared inferior}$$

$$(x_q, y_q, z_q) = \left[0, \left(q_L - \frac{1}{2} \right) \frac{4l}{\sqrt{Q}}, h \right] \text{ donde } q_L \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{Q}{4} \right\} \text{ para puntos de acceso en la pared izquierda}$$

$$(x_q, y_q, z_q) = \left[\left(q_T - \frac{1}{2} \right) \frac{4l}{\sqrt{Q}}, l, h \right] \text{ donde } q_T \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{Q}{4} \right\} \text{ para puntos de acceso en la pared superior}$$

$$(x_q, y_q, z_q) = \left[l, \left(q_R - \frac{1}{2} \right) \frac{4l}{\sqrt{Q}}, h \right] \text{ donde } q_R \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{Q}{4} \right\} \text{ para puntos de acceso en la pared derecha}$$

El modelo de señal utilizado viene dado por:

$$\mathbf{y} = \sqrt{p_u} \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n}$$

Donde p_u es la potencia de señal en el enlace ascendente que es un valor fijo y común a todos los MTD. \mathbf{G} es la matriz canal que enlaza M antenas con K dispositivos MTD, \mathbf{x} es el vector de símbolos transmitido por los MTD, \mathbf{y} es el vector correspondiente a la señal recibida y \mathbf{n} es ruido blanco gaussiano aditivo. La potencia de ruido en vatios:

$$\sigma^2 = N_0 B N_F$$

En la expresión anterior, $N_0 = 10^{-14.4} W/Hz$ es la densidad espectral de potencia de ruido térmico, B es el ancho de banda de transmisión y N_F es la cifra de ruido de los receptores. El modelo de canal está basado en el fading lento como en algunos de los casos anteriormente estudiados en este apartado.

$$\overline{PL}_{kq} [dB] = 32.5 + 20 \log_{10} f_c + 10 \eta \log_{10} d_{kq}$$

Siendo $\eta = 3.19$ el exponente de pérdidas utilizado y d_{kq} es la distancia entre el MTD k-ésimo y el punto de acceso q-ésimo. Desde el punto de vista del tráfico, los dispositivos MTD pueden operar en dos modos diferentes: uno en funcionamiento regular y otro en alarma. En estado de funcionamiento regular, los MTD actualizan periódicamente la información sobre su forma de operar. El funcionamiento de este modo nunca es correlado tanto en espacio como en tiempo.

En una red de este tipo suelen producirse acontecimientos de alarma que generan la activación de distintos circuitos que están próximos al epicentro del suceso. En otras palabras, cuando se produce

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

una situación de este tipo, la activación de MTDs es altamente correlada en el espacio y en el tiempo.

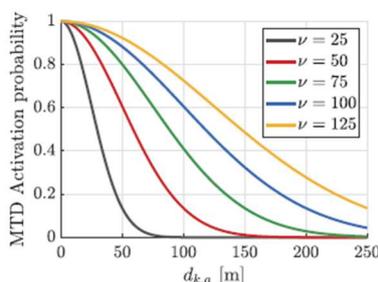


Figura 10.34. Probabilidad de activación de un MTD en función de la distancia al epicentro de la situación, para diferentes intensidades de la alarma [20].

Se realizan una serie de simulaciones por el método de Monte Carlo, para distintos esquemas de despliegue de sistemas mMIMO, tanto con tráfico regular como con tráfico de alarma. Para las simulaciones, se emplean los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor
Número total de antenas, M	16 - 96
Número total de antenas por Punto de Acceso, S	4
Número de Puntos de Acceso, Q	4-16
Número de MTD activos, K	16 - 64
Longitud del lado del área cuadrada, l	250 metros – 1 km
Altura de la estación base o puntos de acceso, h	6 metros
Altura de los MTD, hMTD	1,5 metros
Tasa objetivo de datos, R	1 bps/Hz
Frecuencia portadora, f_c	3,5 GHz
Potencia transmitida por MTD, p_u	20 dBm
Densidad Espectral de Potencia, ruido térmico, N_0	-174 dBm/Hz
Ancho de Banda B	20 MHz
Cifra de ruido en la recepción, N_f	7dB
Número simultaneo de situaciones de alarma, A	1
Epicentro de la alarma	l/4, l/4, 0
Intensidad del evento de alarma, ν	50

Cuadro 10.5. Parámetros utilizados en la simulación [20].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La Figura 10.35 (a) representa la probabilidad de suspender la producción en función del número de MTDs activos K para un número total de antenas $M = 64$ y $l = 250$ metros.

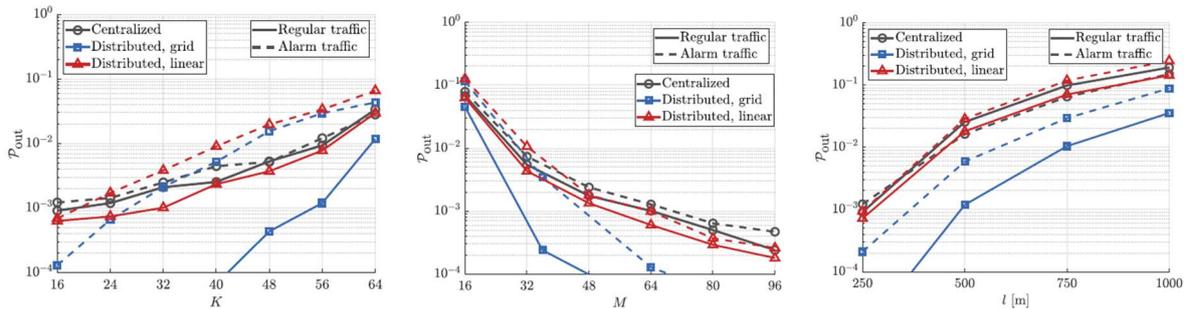


Figura 10.35. Probabilidad de suspensión de la producción en función del número de MTDs, de antenas y de la longitud del lado del perímetro [20].

La Figura 10.35 (b) representa la probabilidad de paralizar o suspender la producción en función del número de antenas M para $K=16$ MTDs activos y $l=250$ metros. La Figura 10.35 (c) la probabilidad de paralizar la producción está en función de la longitud de las paredes l , cuyo valor varía entre 250 y 1000 metros.

De las curvas relativas a tráfico de alarma, se obtienen algunas conclusiones. El sistema centralizado CmMIMO puede superar al distribuido DmMIMO para algunas combinaciones de valores de $[M, K, l]$. Cuando un suceso ocurre, la mayoría de los MTDs están situados cerca del epicentro del suceso. En consecuencia, en una red DmMIMO, la mayoría de las antenas están lejos del epicentro, dando peor cobertura a los MTDs activos. En este caso, CmMIMO puede superar a la red DmMIMO porque la posición de la estación base en el centro de la nave disminuye la distancia media entre las antenas y los MTDs. DmMIMO sólo supera a CmMIMO con tráfico de alarma si el número total de antenas es lo suficientemente grande como para asegurar que una buena parte de aquellas está cerca de la posición del suceso de alarma.

Para el tráfico regular, las conclusiones son, como era de suponer, que el sistema centralizado está superado por el distribuido y entre los sistemas distribuidos, mejor funcionamiento del desplegado en malla que el desplegado linealmente. Sin embargo, en la conexión a la CPU, el sistema de DmMIMO en malla requiere una conexión de muy alta capacidad con una conexión para cada punto de acceso mientras que la distribución en línea solo necesita una sola conexión a la CPU.

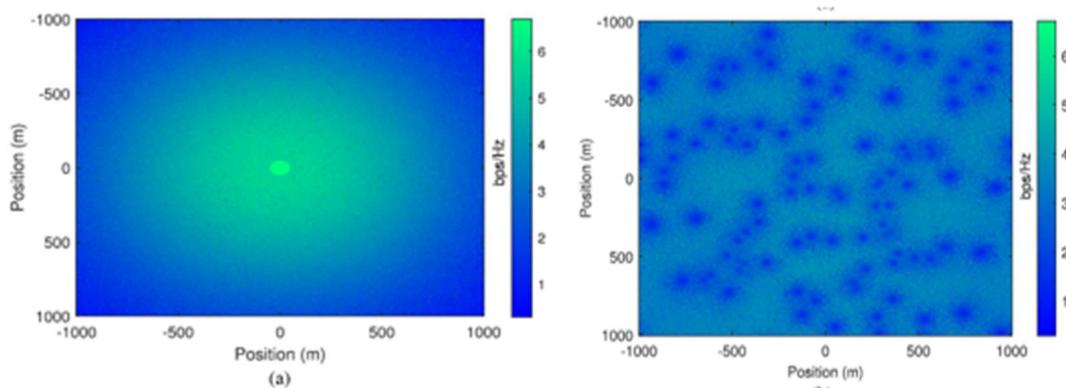


Figura 10.36. Tasas de transmisión en bps/Hz con 100 antenas de servicio en un área de 2 km x 2 km, (a) con las 100 antenas en el centro del área y (b) en un sistema cell free distribuido [46].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Un estudio reciente, cuyo resultado es el mostrado en la Figura 11.36, determina cómo según estén distribuidas las antenas en un área de 2 km², la conectividad de un sistema MIMO masivo expresada en bits por segundo y por hertzio, puede variar. Cuando las antenas están todas en el centro del área considerada, la conectividad varía entre 7 bps/Hz en la zona central y 1 bps/Hz en los bordes. Cuando las antenas están distribuidas según una red cell free, el valor de la conectividad es casi uniforme dentro de todo el área, entre 3 y 4 bps/Hz.

10.4.2. Las nuevas arquitecturas Open RAN (O-RAN)

Las nuevas arquitecturas O-RAN suponen un concepto innovador que transformará las redes de acceso radio en redes inteligentes, virtuales, abiertas y totalmente interoperables. Además, las redes O-RAN crearán un ecosistema en el que los fabricantes podrán contribuir a distintas soluciones de un mismo planteamiento, incorporando nuevas tecnologías y mejorando la puesta en servicio de los diferentes sistemas que integran las redes de comunicaciones móviles. Esta arquitectura y sus características constituyen una buena plataforma para la implantación de redes cell free. Las principales razones son las siguientes:

En O-RAN, la parte física está dividida en dos componentes: la unidad de radio O-RU que se encarga de configurar el haz de radiación y la unidad distribuida O-DU que se encarga de la modulación/demodulación, estimación del canal y ecualización. Dentro de la unidad de radio, existe un O-RU de categoría A y otro de categoría B. El O-RU de categoría B tiene capacidad para llevar a cabo funciones de precodificación mientras que el de categoría A carece de esa funcionalidad. Este tipo de diseño se ajusta mucho al modelo de CF-MIMO, donde el procesado en la capa física se lleva a cabo entre los Puntos de Acceso y las CPUs.

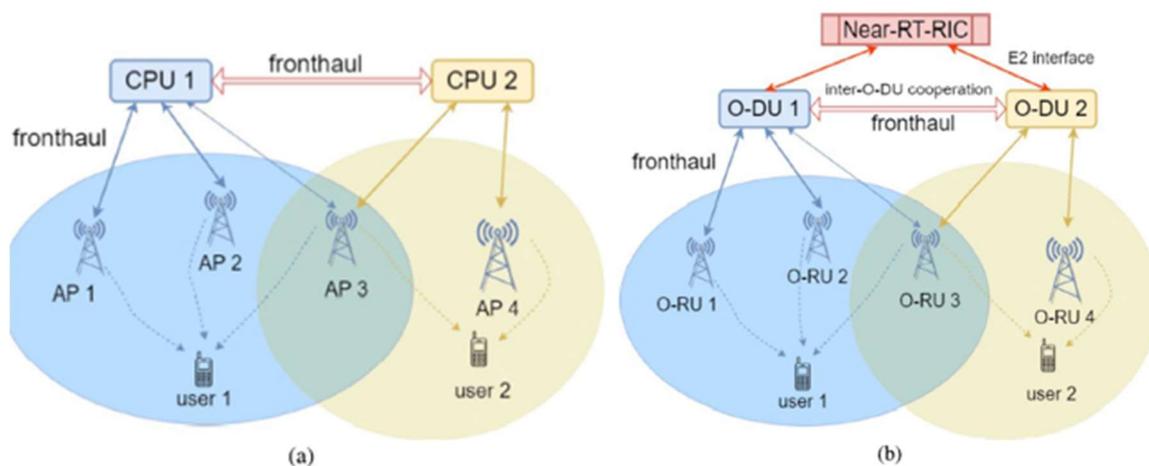


Figura 10.37. a) CF-mMIMO para redes centradas en el usuario y b) Arquitectura O-RAN para CF-mMIMO^[46].

Hay que reseñar cómo, dependiendo del contexto y de los condicionantes del operador, el despliegue de las O-RU y O-DU puede hacerse por separado.

Se añaden a la red bloques adicionales para facilitar la integración de la AI y la orquestación del servicio de containerización. Esto incluye, el controlador inteligente en tiempo real de la RAN (Near RT-RIC), el controlador inteligente en tiempo no real de la RAN (no RT-RIC) y el servicio de gestión y orquestación (SMO). Todo lo cual entronca con la arquitectura cloud-native computing.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Las opciones de control pueden extenderse para lograr la cooperación entre O-RUs incluso más allá de los límites de la O-DU. El bloque Near RT-RIC proporciona la monitorización, control y optimización de los recursos radio y las funciones de red y ejecuta estas tareas en un marco de tiempo cercano al real (entre 10 milisegundos y 1 segundo). También, permite la integración de inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) para la toma de decisiones. Otra característica de este bloque funcional es la implementación de nuevas funciones y algoritmos mediante aplicaciones especializadas, sin necesidad de modificar el hardware. El no RT-RIC opera en intervalos más largos (minutos a horas) y está enfocado a tareas de planificación, análisis avanzado y optimización a nivel estratégico.

O-RAN ofrece además un sistema de reloj avanzado y un mecanismo de sincronización para múltiples RUs. Con una calibración OTA recíproca, la transmisión en el enlace descendente ha sido probada y validada con O-RUs ya disponibles comercialmente.

En sistemas CF-mMIMO, cada usuario puede estar conectado con O-RUs asociadas a diferentes O-DUs para disminuir los niveles de interferencia y mejorar el funcionamiento del sistema. El establecimiento de una cierta cooperación entre las O-DUs de cara a intercambiar datos correspondientes al usuario, significa que es necesario un proceso de intercambio de señalización entre unidades distribuidas. Este proceso constituye un trabajo exhaustivo que actualmente se está llevando a cabo. La solución más probable consistiría en la utilización de un enlace flexible a la troncal por medio de una red SDN de procesadores que permita a los usuarios ir cambiando su posición y su conexión a la red.

10.4.3. Procesado de señal en sistemas CF-mMIMO

El procesado de señal en los sistemas CF-mMIMO está previsto que sea de carácter local, es decir que tenga lugar en el propio punto de acceso. La alternativa sería un procesado centralizado que se efectuaría en la CPU para todos los puntos de acceso conectados a dicha CPU. En el procesado local, los vectores de combinación del enlace ascendente y de precodificación del descendente se computan en cada punto de acceso. El hecho de escoger el procesado local frente al centralizado se debe a tres razones: a) Reduce la complejidad computacional en las CPUs. b) La adición o fallo de un punto de acceso no afecta a la operatividad general del sistema. c) El procesado local funciona bien con puntos de acceso de múltiple antena.

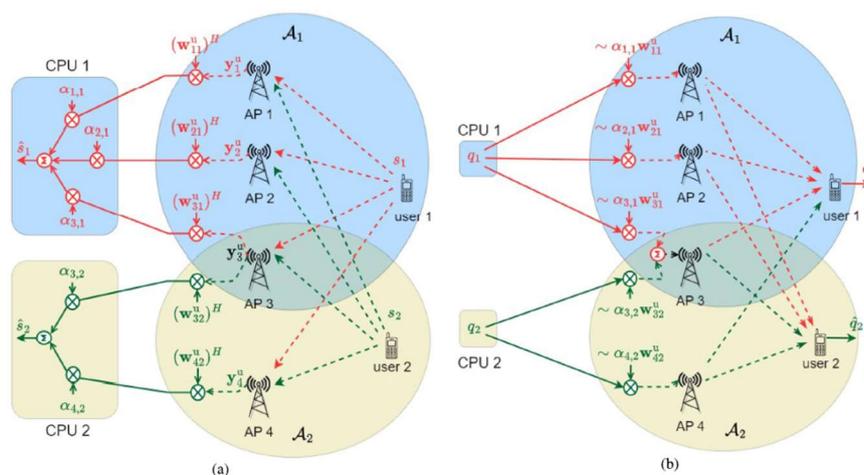


Figura 10.38. CF- mMIMO centrado en el usuario. a) UL y b) DL [46].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

En el enlace ascendente, cada punto de acceso al que está conectado un usuario envía su versión detectada de la señal correspondiente a ese usuario a la CPU. El vector recibido en un punto de acceso m pueden ser expresado como:

$$\mathbf{y}_m^u = \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta_k^u} \mathbf{g}_{mk} s_k + \mathbf{n}_m^u$$

Donde K es el número de usuarios atendidos por ese punto de acceso m , η_k^u es la potencia transmitida por el UE del usuario k , \mathbf{g}_{mk} es la respuesta del canal para ese usuario, s_k es la secuencia de datos correspondiente al usuario k y \mathbf{n}_m^u es el ruido gaussiano aditivo. Más concretamente, el punto de acceso m recibiría una detección de símbolos enviada por el usuario k :

$$r_{mk}^u = (\mathbf{w}_{mk}^u)^H \mathbf{y}_m^u$$

Siendo (\mathbf{w}_{mk}^u) un vector de detección de dimensión $N \times 1$ que se obtiene de forma local en el punto de acceso m utilizando la estimación del canal en el enlace ascendente. Cuando el punto de acceso envía a la CPU su versión de r_{mk}^u , la CPU genera una señal para el usuario k :

$$r_k^u = \sum_m \alpha_{mk} r_{mk}^u$$

Donde $\{\alpha_{mk}\}$ son los coeficientes elegidos para gestionar la interferencia entre usuarios y el nivel de ruido. Dicho de otro modo, la CPU combina las señales correspondientes a un usuario k y recibidas de un punto de acceso m , afectadas de un determinado factor de ponderación α_{mk} . Si la señal recibida tiene una relación SINR baja, el punto de acceso envía a la CPU el menor nivel de señal o simplemente no lo envía a la CPU ya que se le asignaría un valor de α_{mk} muy bajo. Por el contrario, cuando el nivel de señal es bueno, conviene asignarle un valor elevado de α_{mk} . Los valores óptimos de $\{\alpha_{mk}\}$ pueden ser obtenidos y tratados de forma eficiente resolviendo un problema general de autovalores para maximizar la relación SINR de la señal recibida. El proceso anterior puede ser descrito como “detección local y combinación a nivel de conjunto de usuarios”. Finalmente, se obtiene s_k procesando r_k^u como si fuera un usuario único de un canal con ruido aditivo.

En el enlace descendente, cada punto de acceso m calcula los vectores de precodificación combinados con los coeficientes de control de potencia η_{mk}^d como:

$$\sqrt{\eta_{mk}^d} \mathbf{w}_{mk}^d$$

para todo usuario k . Los vectores de precodificación y los coeficientes de control de potencia del enlace descendente pueden obtenerse directamente del vector combinación \mathbf{w}_{mk}^u y los coeficientes α_{mk} del enlace ascendente. Esto indica que no hay tarea extra de cálculo en la precodificación del enlace descendente si ambos enlaces, ascendente y descendente, utilizan el mismo esquema de procesado.

En conclusión, el procesado local se perfila como una opción muy interesante para los sistemas CF-mMIMO, ya que presenta un excelente balance entre la complejidad computacional, la fortaleza del sistema y el funcionamiento del sistema. El trabajo pendiente para poner en servicio esta técnica es la implantación de una infraestructura de enlace con la red troncal (fronthaul) capaz de encaminar de forma dinámica el tráfico entre conjuntos de usuarios.

10.5. La propagación en las bandas de frecuencias 6G

Las pérdidas de propagación en el espacio libre vienen dadas por la expresión:

$$L = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

Donde P_t es la potencia radiada por la antena transmisora y P_r la potencia captada en la antena receptora, ambas en las mismas unidades. En función de las áreas efectivas, se tiene^{[54],[55]}:

$$\frac{P_r}{P_t} = A_r A_t / d^2 \lambda^2$$

Siendo A_r el área efectiva de la antena receptora y A_t la correspondiente a la antena transmisora. Teniendo en cuenta que el área efectiva de la antena es proporcional a la ganancia G :

$$A = G \lambda^2 / 4\pi$$

Si la antena del UE es isotrópica y la del punto de acceso tiene ganancia 3:

$$\frac{P_t}{P_r} = 4,2 \cdot 10^3 \cdot f^2 \cdot d^2$$

Estando la frecuencia f en MHz, la distancia d en km. La expresión de la atenuación en dB:

$$L (dB) = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

Para distancias en km y frecuencias en MHz:

$$L (dB) = 20 \log_{10}(d \text{ en km}) + 20 \log_{10}(f \text{ en MHz}) + 32.44$$

A los valores obtenidos de estas expresiones, se ha de añadir la absorción de las moléculas gaseosas que se encuentran en suspensión en la atmósfera, por lo general moléculas de oxígeno y de vapor de agua.

Window #	f_c [THz]	B_{3dB} [GHz]	Loss at 10 mm [dB]	Loss at 1 m [dB]	Loss at 100 m [dB]	Absorption Loss [dB/Km]
W1	0.245	210	60.18	80.18	120.18	3
W2	0.41	65.61	64.65	84.65	124.65	20
W3	0.49	86.21	66.2	86.2	126.2	40
W4	0.66	152.59	68.79	88.79	128.79	60
W5	0.84	141.91	70.88	90.88	130.88	80
W6	0.94	47.3	71.86	91.86	131.86	150
W7	1.03	57.98	72.65	92.65	132.65	-

Cuadro 10.6. Ventanas de funcionamiento dentro de la banda alta de las milimétricas y la banda sub-THz. Las pérdidas de propagación se calculan en el centro de cada ventana. Los valores de absorción se obtienen de la Figura 39 ^[24].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

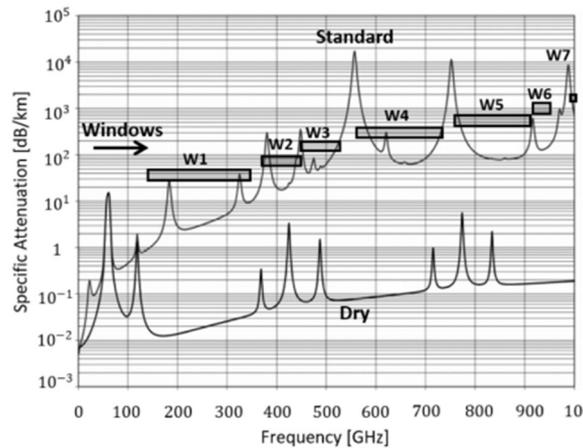


Figura 10.39. Absorción molecular de gases atmosféricos, documento ITU-R P.676-12, Aug. 2019 [25].

La Figura 10.40 muestra las pérdidas de propagación para las bandas de utilización 5G+ y 6G. Puede observarse como en la banda superior de las milimétricas, para vanos de 100 metros, las pérdidas se sitúan ligeramente por debajo de los 150 dB's. Lo mismo sucede en la banda sub-THz, si bien en este caso la atenuación está sobre los 150 dB's.

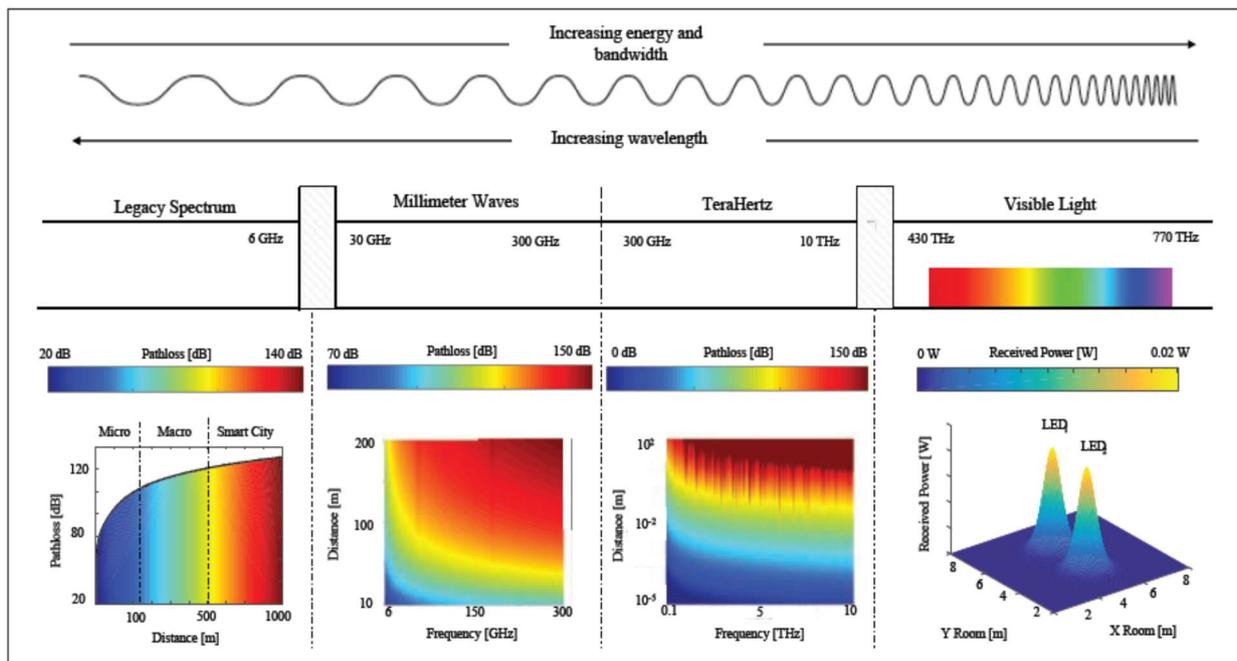


Figura 10.40. Pérdidas de propagación para las bandas sub-6GHz, milimétricas y sub-THz, y potencia recibida para VLC. Para la banda sub-THz y VLC sólo se han considerado condiciones LoS, en el resto de los casos LoS y NLoS [2].

La Figura 10.41 muestra como las pérdidas de propagación en la banda superior de las milimétricas se sitúan en torno a una media de 150 dB para distancias menores de 1 km. Para distancias mayores, este valor crece rápidamente hasta los 300 dB. En el caso de la frecuencia central de 183 GHz, el aumento tiene una pendiente 10 veces mayor, dado que coincide con el pico de absorción del vapor de agua.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

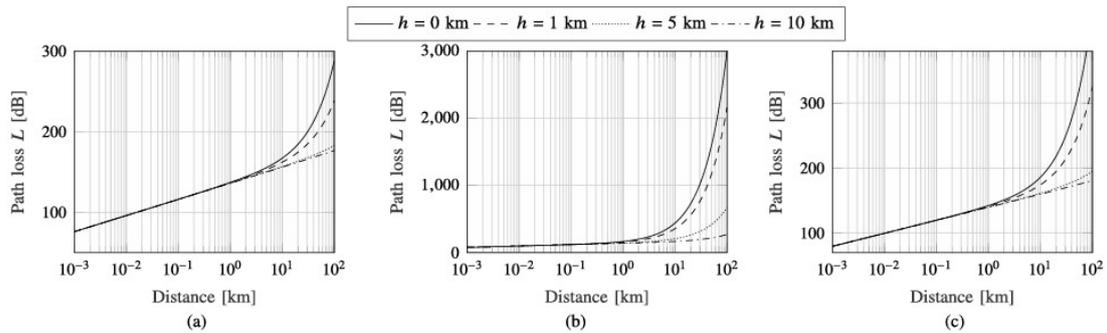


Figura 10.41. Pérdidas de propagación en función de la distancia y de la altura sobre el nivel del mar: (a) para $f_c = 150$ GHz, (b) $f_c = 183$ GHz y (c) $f_c = 230$ GHz [6].

También, se observa en la ya citada Figura 10.41 que la propagación mejora cuando nos alejamos de la corteza terrestre debido a que la atmósfera se hace menos densa a medida que nos elevamos sobre la superficie. En los 183 GHz, se encuentra el pico de absorción del vapor de agua. A esta frecuencia, las moléculas de vapor de agua suspendidas en el aire absorben la energía de la señal radioeléctrica en forma de energía cinética.

10.5.1. Tasa de error en transmisión (BER)

La necesidad de una tasa de error aceptable es otro factor que limita la distancia entre los UE o MTD y los puntos de acceso, también impone un determinado nivel de potencia en transmisión. La tasa de error de bit (BER) es la relación entre el número de bits transmitidos erróneamente y el total de bits transmitidos.

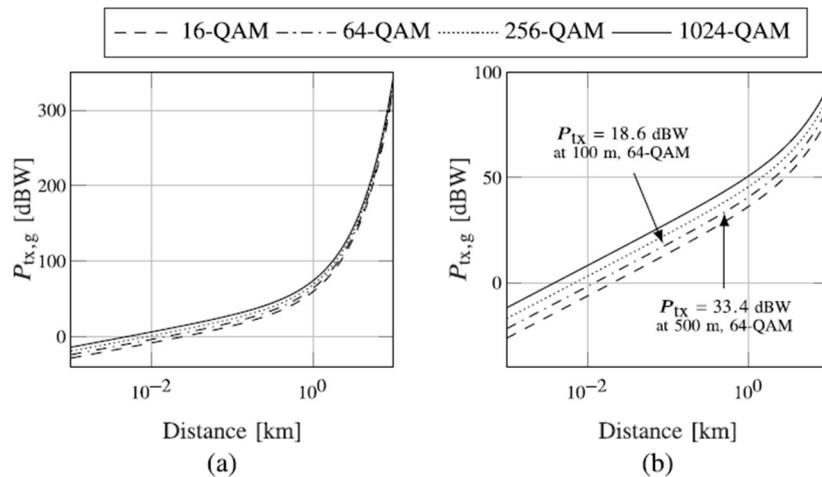


Figura 10.42. Potencia de transmisión en función de la distancia para velocidades de transmisión de 1 Tb/s y con una tasa de error (BER) de 10^{-5} , para (a) $f_c = 180$ GHz y (b) $f_c = 230$ GHz [6].

Así, con distancias de 100 metros, la potencia necesaria para obtener una tasa de 10^{-5} es de 72,5 vatios. Para 500 metros y la misma tasa de error, la potencia necesaria sería de 2,2 kilovatios. De igual forma, se observa que, a mayor nivel de modulación, mayor nivel de potencia transmitida. En

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

el caso de la Figura 11.42, la diferencia entre la potencia transmitida con modulación 16 QAM y con 1024 QAM es de 14,46 dB. En cualquier caso, las potencias manejadas de 72 vatios y de 2,2 kilovatios, no tienen carácter comercial a fecha de hoy, en este rango de frecuencias.

Dado que las bandas milimétricas y la THz se caracterizan por unas pérdidas elevadas de propagación, la red terrestre 6G habrá de desplegar un elevado número de puntos de acceso y dará lugar a una capa de transporte de muy alta capacidad. Debido a esto, la red de F.O. será la opción más atractiva para la capa de transporte en sistemas dentro de la banda de las milimétricas.

10.5.2. Balance de potencias y umbral de sensibilidad

La ecuación de balance de potencias:

$$Prx,g(f,d) = Ptx,g - L(f,d) + Gg,tx,max + Gg,rx,max$$

Relaciona la potencia detectada en el receptor con la potencia transmitida en el lado emisor, con las pérdidas de propagación y las ganancias de las antenas transmisora y receptora. El producto de la potencia transmitida por la ganancia de la antena transmisora se conoce como potencia EIRP o PIRE, potencia equivalente radiada de forma isotrópica:

$$Prx,g(f,d) = PIRE tx,g - L(f,d) + Gg,rx,max$$

Suponemos una ganancia unidad en la antena del UE:

$$Prx,g(f,d) = PIRE tx,g - L(f,d)$$

Fijando el umbral de sensibilidad del UE en -110 dBm, puede expresarse la potencia equivalente radiada de forma isotrópica en el punto de acceso como:

$$-110 \text{ dBm} = PIRE tx,g - L(f,d)$$

metros Que sería la potencia PIRE mínima necesaria para dar servicio cualquier usuario situado a una distancia d del punto de acceso.

Si se toma una distancia $d = 100$, se tiene:

VENTANA	FREC. CENTRAL	PÉRDIDAS A 100 M	ABSORCIÓN 100 M	PIRE
1	245 GHz	120 dB	0,3 dB	10 mW
2	410 GHz	125 dB	2 dB	50 mW
3	490 GHz	126 dB	4 dB	100 mW
4	660 GHz	129 dB	6 dB	315 mW
5	840 GHz	130 dB	8 dB	630 mW
6	940 GHz	132 dB	15 dB	5 W
7	1000 GHz	133 dB	100 dB	-

Cuadro 10.7. Valores de potencia necesarios para un nivel de señal en la recepción de -110 dBm

Para valores de señal recibida en el UE de -100 dBm, se tiene:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$-100 \text{ dBm} = PIRE_{tx,g} - L(f,d)$$

VENTANA	FREC. CENTRAL	PÉRDIDAS A 100 M	ABSORCIÓN 100 M	PIRE
1	245 GHz	120 dB	0,3 dB	100 mW
2	410 GHz	125 dB	2 dB	500 mW
3	490 GHz	126 dB	4 dB	1 W
4	660 GHz	129 dB	6 dB	3,2 W
5	840 GHz	130 dB	8 dB	6,3 W
6	940 GHz	132 dB	15 dB	50 W
7	1000 GHz	133 dB	100 dB	-

Cuadro 10.8. Valores de potencia necesarios para un nivel de señal en la recepción de -100 dBm

Para valores de señal recibida en el UE de -90 dBm se tiene:

$$-90 \text{ dBm} = PIRE_{tx,g} - L(f,d)$$

VENTANA	FREC. CENTRAL	PÉRDIDAS A 100 M	ABSORCIÓN 100 M	PIRE
1	245 GHz	120 dB	0,3 dB	1 W
2	410 GHz	125 dB	2 dB	5 W
3	490 GHz	126 dB	4 dB	10 W
4	660 GHz	129 dB	6 dB	32 W
5	840 GHz	130 dB	8 dB	63 W
6	940 GHz	132 dB	15 dB	500 W
7	1000 GHz	133 dB	100 dB	-

Cuadro 10.9. Valores de potencia necesarios para un nivel de señal en la recepción de -90 dBm

Que serían valores de potencia PIRE para dar servicio a un usuario situado a 100 mts del punto de acceso, con un nivel de señal que podría considerarse bueno a 20 dBm por encima del umbral de recepción. Esto implicaría que, para frecuencias hasta 900 GHz, los niveles de potencia de un punto de acceso estarían por debajo o igual, en orden de magnitud, de los empleados para las macro estaciones base (MBS) de las generaciones anteriores.

Las pérdidas de absorción se han aproximado a la décima parte de las pérdidas por km, pues parece coherente ya que la absorción no es función de la distancia sino de la frecuencia de resonancia y la concentración molecular.

El umbral de sensibilidad 5G son aproximadamente -140 dBm mientras que un nivel de señal que pudiera considerarse como bueno en 5G pueden ser -44 dBm. En 6G, según lo calculado, alcanzar un nivel umbral de -110 dBm, teniendo en cuenta valores de ganancia en transmisión alrededor de 8 dBi, sería posible con los componentes comerciales fabricados actualmente. De igual manera, podrían asumirse las potencias PIRE necesarias para un nivel en la recepción de -100 dBm, con las citadas ganancias en transmisión, hasta la ventana 5. Para señales de -90 dBm parece más complicado por los elevados niveles de potencia que entran en juego, salvo casos de muy alta ganancia que no son para dar servicio de manera habitual a dispositivos tipo UE.

10.5.3. Anchos de banda de utilización

Está previsto que las redes 6G manejen tasas de transmisión de 1 Tbps. Partiendo de una velocidad de transmisión de esa magnitud, es posible convertirla en una señal OFDM/QAM obtenida a partir de dos señales moduladas ASK en cuadratura, con el objeto de rebajar el ancho de banda de transmisión y mejorar la eficiencia espectral de la comunicación. Para una señal ASK, cuya duración de símbolo es D , la tasa de símbolo viene dada por la expresión^[7]:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$r = \frac{1}{D} \cong B_T \text{ símbolos/seg}$$

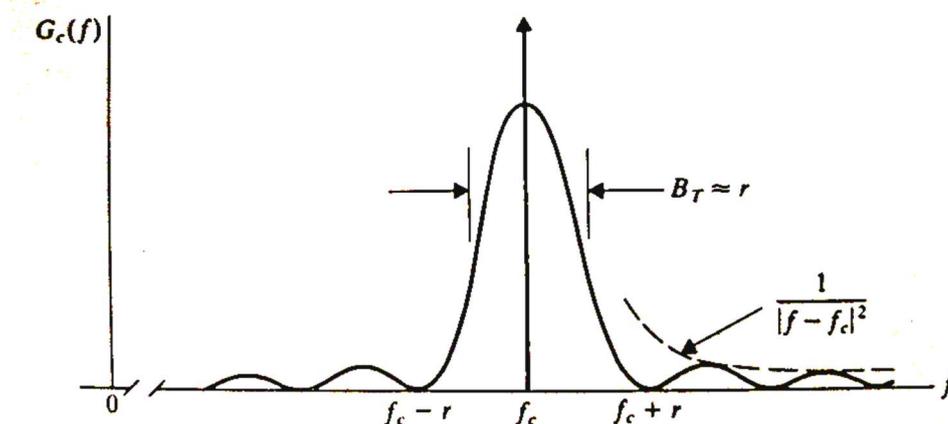


Figura 10.43. Densidad espectral de potencia de una señal modulada ASK [7].

Si se transmite mediante un sistema ASK de nivel M, la tasa de bit será:

$$r_b \leq r \left(\frac{\text{símbolos}}{\text{seg}} \right) \cdot \log_2 M \left(\frac{\text{bits}}{\text{símbolo}} \right)$$

En consecuencia, el ancho de banda de transmisión para una señal ASK nivel M, viene dado por [7]:

$$r_b \leq B_T \cdot \log_2 M$$

Para señales QAM, hay que tener en cuenta que un símbolo contiene dos informaciones en cuadratura de fase, pero cada una de ellas está definida por un número de bits:

$$\frac{1}{2} \cdot \log_2 M$$

la mitad del total, es decir que, para transmitir 1024 informaciones equivalentes a 10 bits, es necesario enviar 32 informaciones equivalentes a 5 bits, en cada eje:

$$r_b \leq B_T \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \log_2 M$$

Donde r_b es la tasa de transmisión, mientras que B_T es el ancho de banda necesario para transmitir la señal QAM formada por dos señales ASK de orden M. Si, como se ha indicado la 6G tiene como objetivo una tasa de transmisión de 1Tb/s, para M=2:

$$B_T \geq 1000 \text{ GHz}$$

En el caso de M=1024:

$$B_T \geq 100 \text{ GHz}$$

Teniendo en cuenta la tasa de Nyquist:

$$B_T \geq \frac{1}{2} \cdot r_b$$

En el caso que está en estudio:

$$B_T \geq 500 \text{ GHz}$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Sin embargo, para $M=1024$, con la modulación QAM, se obtiene un ancho de banda 5 veces menor.

Las redes 6G, van a repartir los flujos de datos espacialmente, tanto en el enlace ascendente como en el descendente, por medio de sistemas MIMO distribuidos, por lo que podría incluirse este factor en la expresión para el cálculo del ancho de banda^[6]:

$$r_b \propto K \cdot B_T \cdot \log_2 M \cdot f(\Gamma)$$

Siendo $f(\Gamma)$ una función de la relación señal ruido más interferencia Γ y K el orden de la matriz MIMO que interviene en el intercambio de la información, obteniéndose un ancho de banda por canal MIMO distribuido:

$$B_T \geq \frac{r_b}{K \cdot \log_2 M}$$

Para un MIMO distribuido de orden 8 y un QAM de nivel 1024:

$$B_T \geq 12.5 \text{ GHz}$$

Como se muestra en la Figura 6, el caso peor viene dado por un QAM de nivel 16 y un MIMO de orden 2, que necesita 125 GHz por canal MIMO. Para QAM de nivel de modulación 1024 y MIMO de orden 2, el ancho de banda por canal MIMO es de 50 GHz.

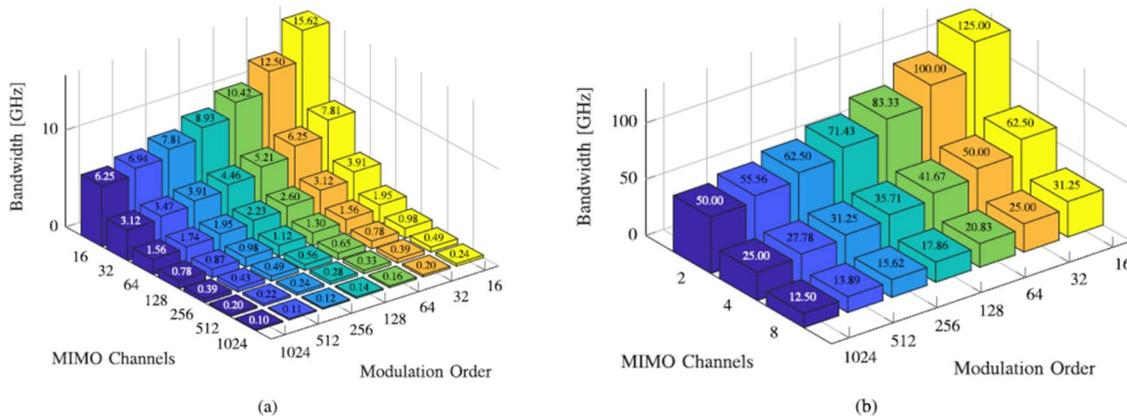


Figura 10.44. Ancho de banda por canal MIMO y orden de modulación QAM, a) para un número de canales MIMO entre 16 y 1024 y b) para un número de canales MIMO ≤ 8 ^[6].

De forma que la modulación QAM es la misma, y el ancho de banda menor:

$$r_b \leq B_T \cdot \log_2 M$$

Por lo que, siguiendo con el caso QAM-1024 y MIMO de orden 8, la tasa de transmisión por canal MIMO será:

$$r_b \leq 12.5 \text{ GHz} \cdot 10 = 125 \text{ Gb/s}$$

Esta disminución del canal de transmisión MIMO mejora la relación señal interferencia ruido, SINR, ya que la potencia de ruido es proporcional a la anchura del canal.

10.6. La 6G y el medio ambiente

La futura red móvil 6G tendrá una relación más estrecha con el medio ambiente que las generaciones anteriores. La creación de plataformas conjuntas de teledetección y comunicaciones buscando formatos y nuevas formas de acceso múltiple comunes para ambas actividades, la reducción de la envergadura de las futuras estructuras mecánicas que sirven de soporte físico a los sistemas radiantes en contraposición con el incremento en un 600% del número de estaciones base, la consideración en espacios interiores de fuentes de campo correladas o la necesidad de una nueva reglamentación relativa a la exposición a las emisiones radioeléctricas para frecuencias por encima de los 300 GHz, hacen pensar que hay por delante una amplia tarea en el ámbito de las telecomunicaciones y el medio ambiente.

10.6.1. Sobre los límites de la reglamentación actual

La normativa actual, tanto nacional como internacional, relativa a la exposición a emisiones radioeléctricas es la que se relaciona a continuación:

DIRECTIVA 2013/35/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 26 de junio de 2013 sobre las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos) (vigésima Directiva específica con arreglo al artículo 16, apartado 1, de la Directiva 89/391/CEE), y por la que se deroga la Directiva 2004/40/CE

REAL DECRETO 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.

REAL DECRETO 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.

C 95.1. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. Rev. 2019.

IEC-62232. International Standard. International Electrotechnical Commission. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure. V3.0. 2022.

Prácticamente, todas estas normas regulan el comportamiento de los sistemas radioeléctricos para frecuencias entre 0 y 300 GHz. La última, IEC-62232, sólo llega a los 90 GHz. Cabe preguntarse que podría ocurrir cuando se proyecte una instalación en la banda sub-THz, si no existe en ese momento una regulación para cualquier zona del espectro radioeléctrico situada por encima de los 300 GHz. Pues bien, tanto los Niveles de Referencia como los Niveles de Acción, incluidos los Valores Límite de Exposición, van aumentando con la frecuencia y por lo tanto, los valores para los que las emisiones son inocuas, se alcanzan a distancias más próximas al sistema radiante y también, y en consecuencia, más alejadas de las personas que se encuentran en las proximidades de la antena. Así pues, podría considerarse el cálculo de la distancia a la que se cumplen los niveles de referencia para 300 GHz como un “análisis del caso peor” cuando se trate de frecuencias por encima de ese valor, resolviendo el problema hasta que se genere nueva reglamentación para la banda sub-THz.

10.6.2. Análisis de impacto Ambiental: de la RAN 5G+ a la RAN 6G

Con el objeto de tener un orden de magnitud de las potencias en transmisión que podrán utilizar los futuros puntos de acceso 6G, utilizaremos la siguiente tabla de celdas 5G+. A tener en cuenta que cuanto menor sea el área de la celda, más próximo estará el UE ó MTD al punto de acceso y menor será la tasa de error (BER).

Type	Typical deployment	# concurrent users supported	Typical power range		
			Indoor	outdoor	Range
Femto	<i>Primarily residential and enterprise environments</i>	<i>Residential Femto: 4–8 users Enterprise Femto: 16–32 users</i>	10–100 mW	0.2–1W	tens of meters
Pico	<i>Public areas (indoors/ outdoors ; airports, shopping malls, train stations)</i>	<i>64–128 users</i>	100–250 mW	1–5 W	tens of meters
Micro	<i>Urban areas to fill macro coverage gaps</i>	<i>128–2568 users</i>	–	5–10 W	Few hundreds of meters
Metro	<i>Urban areas to provide additional capacity</i>	<i>>250 users</i>	–	10–20 W	hundreds of meters
WiFi	<i>Residential, office and enterprise environments</i>	<i><50 users</i>	20–100 mW	0.2–1 W	Few tens of meters

Cuadro 10.10. Distintos tipos de celdas 5G evolucionando hacia la 6G [22].

Según la normativa actual, tanto nacional como internacional, el valor de la densidad de potencia máxima radiada, para frecuencias entre 2 y 300 GHz, es de 10 vatios por metro cuadrado. Para el cálculo de la densidad de potencia radiada de una antena j a una distancia r se puede emplear la expresión:

$$S_{AP}(\mathbf{r}, j) = \frac{1/2}{Z_0} |E_j(\mathbf{r})|^2$$

Donde $E_j(\mathbf{r})$ es el valor de campo eléctrico radiado por la antena j a una distancia r en la dirección de máxima radiación. La expresión anterior es equivalente a:

$$S_{AP}(\mathbf{r}, j) = \frac{P_{tj} \cdot G_j}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Siendo P_{tj} la potencia transmitida por la antena j y G_j la ganancia o directividad de la antena. En el caso de i fuentes, la densidad de potencia radiada podría venir dada por:

$$S_{AP}(\mathbf{r}_i, i) = \frac{1/2}{Z_0} \sum_i |E_i(\mathbf{r}_i)|^2$$

De acuerdo con lo hasta ahora expuesto, también:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$S_{AP}(\mathbf{r}_i, i) = \sum_i \frac{P_{ti} \cdot G_i}{4 \cdot \pi \cdot r_i^2}$$

No obstante, cabe aclarar que la formulación que se ha llevado a cabo para más de una fuente supone que las señales de las distintas fuentes no son correladas. En el caso de que las fuentes fueran correladas temporal y espacialmente, se suman los campos generados por las distintas fuentes y después se calcula la densidad de potencia total:

$$S_{AP}(\mathbf{r}_i, i) = \frac{1/2}{Z_0} \left(\sum_i |E_i(\mathbf{r})| \right)^2$$

Para la 6G en general, y la topología cell-free en particular, habrá que tener en cuenta que el cálculo va a incluir algunos puntos de acceso correlados y otros no correlados, lo que complica la estimación de la densidad de potencia en un punto determinado. En el caso de cobertura en interiores, es muy probable que la consideración de fuentes de campo correladas sea la más correcta. Para la cobertura en espacios abiertos, en terreno urbano o rural, la utilización de fuentes correladas o incorreladas para el cálculo, no tendrá seguramente ninguna trascendencia en la estimación de campo realizada para alturas próximas al nivel de suelo.

10.6.2.1. Nivel de referencia de un Punto de Acceso en espacios exteriores

De acuerdo con el Cuadro 9, para obtener un radio de cobertura del orden de 100 metros con tasas de transmisión elevadas, se necesita una potencia en transmisión entre 5, 10 y 20 vatios. La altura del mástil o punto de sujeción de la antena se ha supuesto de 10 metros.

Si hay sectorización del punto de acceso y una ganancia de 8 dBi, la potencia equivalente radiada isotrópicamente (PIRE) será:

$$\text{PIRE} = \{ 30, 60, 120 \} \text{ vatios}$$

Donde se han considerado tres valores posibles de potencia transmitida: 5, 10 y 20 vatios. Si el nivel de referencia considerado en la normativa es 10 vatios/m², se tiene:

$$\frac{\{30, 60, 120\}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = 10$$

De donde:

$$r^2 = \frac{\{30, 60, 120\}}{40 \cdot \pi}$$

Y, en consecuencia:

$$r \approx \{0.5, 0.7, 1\} \text{ metros}$$

Que es la distancia a la que se cumpliría el nivel de referencia. Por otra parte, la densidad de potencia radiada a 15 metros sería:

$$S = \frac{\{30, 60, 120\}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \approx \{10, 20, 40\} \text{ mw/m}^2$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Para potencias PIRE más elevadas de {120, 240, 360}:

$$S = \frac{\{120, 240, 360\}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = 10$$

Obteniendo:

$$r \approx \{1, 1.4, 1.7\} \text{ metros}$$

Para potencias PIRE de 500 y 1000 w:

$$S = \frac{\{500, 1000\}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = 10$$

$$r \approx \{2, 3\} \text{ metros}$$

Si los mástiles tienen entre 10 y 15 metros de altura, la distancia a la que puede situarse un usuario es un lugar completamente seguro en el que se cumplen los Niveles de Acción y Referencia.

10.6.2.2. Cobertura de espacios interiores: viviendas, oficinas, etc. con sistemas MIMO masivos y distribuidos (D-mMIMO)

Los sistemas cell free MIMO masivos equivalen a los sistemas MIMO distribuidos conocidos por las siglas D-MIMO. Estos sistemas combinan las redes ultradensas con las comunicaciones multipunto y están considerados actualmente como una tecnología 6G que puede mejorar la interferencia entre celdas y superar la capacidad de las redes 5G. En las redes D-MIMO, los puntos de acceso están equipados por una o más antenas y repartidos en la zona donde se quiere dar cobertura, pudiendo depender de una única CPU o de varias diferentes. Los distintos terminales de usuario (UE) se conectarán simultáneamente a varios puntos de acceso siendo las CPU's las encargadas de coordinar la comunicación entre la red y los terminales. Esta solución explota más diversidad espacial que los sistemas MIMO masivos convencionales, mejorando la eficiencia espectral en la zona de cobertura.

Hasta ahora, la distancia entre dos estaciones base es por lo general, relativamente grande de forma que la contribución al campo electromagnético de una estación sobre otra podría considerarse despreciable. En consecuencia, el cálculo del campo electromagnético en un punto producido por una estación base no necesita tener en cuenta la contribución al mismo de otras estaciones próximas. Sin embargo, cuando consideramos una red D-mMIMO la situación cambia. Cada punto de acceso transmite con una potencia mucho menor y la potencia equivalente radiada isotrópicamente (PIRE) y la distancia entre puntos de acceso es mucho más pequeña que en las redes móviles convencionales. Por esta razón, la contribución al campo electromagnético de puntos de acceso adyacentes no puede despreciarse en las estimaciones de campo y densidad de potencia radiada. Todavía no hay un estándar de metodología de cálculo de la intensidad de campo para el despliegue de redes D-mMIMO, sin embargo, este ejemplo pretende iniciar una manera de tener en cuenta la contribución de distintas fuentes de campo al cálculo del valor total de este concepto.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El ejemplo propone dos distribuciones de 9 y 5 puntos de acceso para dar cobertura a un espacio interior.

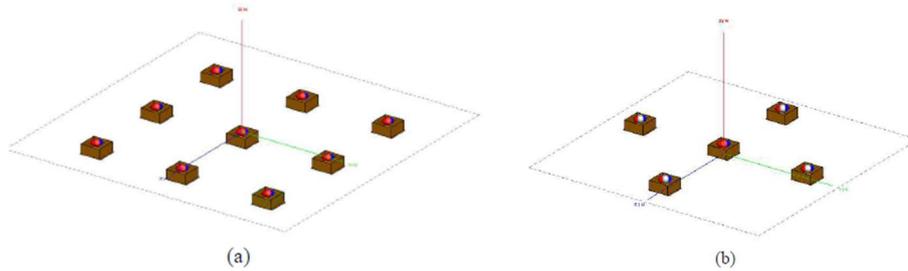


Figura 10.45. Cobertura en interior de viviendas: a) Configuración con 9 Puntos de Acceso y b) con 5 Puntos de Acceso [19].

Cada punto de acceso puede estar formado por 1 elemento, un array de 4 elementos o un array de 16 elementos. Cada elemento del array es una cavidad resonante ranurada con un reflector de tipo dipolo.

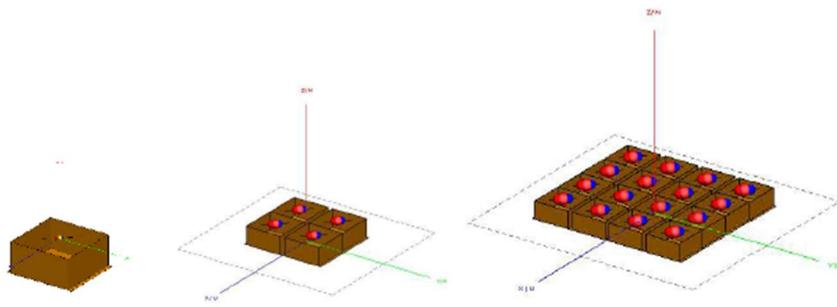


Figura 10.46. Para cada Punto de Acceso se utilizan arrays de 1, de 4 y de 16 elementos [19].

En el caso de señales correladas, la densidad de potencia debida a un punto de acceso j y sus N elementos, vendrá dada por:

$$S_{AP}(\mathbf{r}, j) = \frac{1/2}{Z_0} \left(\sum_{i=1}^{N_j} |E_{ij}(\mathbf{r})| \right)^2$$

Si los puntos de acceso están controlados por CPUs, puede considerarse correlación entre las señales de distintos puntos de acceso:

$$S_{tot,c}(\mathbf{r}) = \left[\sum_j^{N_{AP}} \sqrt{S_{AP}(\mathbf{r}, j)} \right]^2$$

En el caso de que las señales sean incorreladas:

$$S_{tot,u}(\mathbf{r}) = \sum_j^{N_{AP}} S_{AP}(\mathbf{r}, j)$$

En consecuencia, puede concluirse con carácter general, que:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$S_{tot,u}(r) < S_{tot,c}(r)$$

Si se tiene en cuenta un solo punto de acceso, con una potencia PIRE de 4 vatios, la distancia a la que se alcanza el nivel de referencia de 10 w/m², vendrá dada por:

$$\frac{4}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = 10$$

De donde se obtiene:

$$r = \frac{1}{\sqrt{10 \cdot \pi}} = 17 \text{ cm}$$

Que está de acuerdo con el resultado de la Figura 47, que se muestra a continuación:

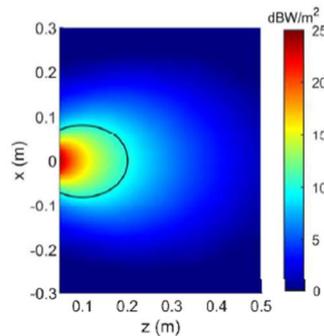


Figura 10.47. Nivel de referencia considerando un solo Punto de Acceso con una PIRE de 4 vatios [19].

La diferencia en el cálculo de densidades de potencia para las señales, según sean correladas o incorreladas, estriba en que para el caso en que hay correlación, la densidad de potencia es el cuadrado de la suma de las señales individuales mientras para el caso en que no hay correlación, la densidad de potencia es la suma de los cuadrados, siendo por tanto la diferencia entre un caso y el otro, considerable y, en consecuencia, habrá de tenerse en cuenta.

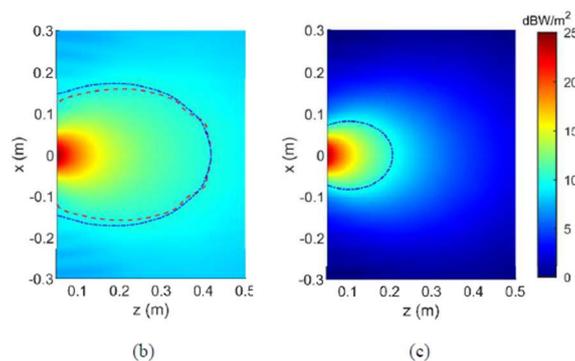


Figura 10.48. Niveles de referencia considerando 9 puntos de acceso con una potencia PIRE de 4 vatios cada uno. b) caso de señales correladas y c) señales incorreladas [19].

Puede observarse en la Figura que para las señales correladas, el nivel de referencia se alcanza a 40 cm del punto de observación, mientras que para el caso incorrelado, se cumple a partir de los 20 cm. También, en el futuro, habrá que considerar los casos en que una parte de los puntos de acceso estén correlados y otra parte incorrelados.

10.6.2.3. MIMO masivo distribuido en naves industriales

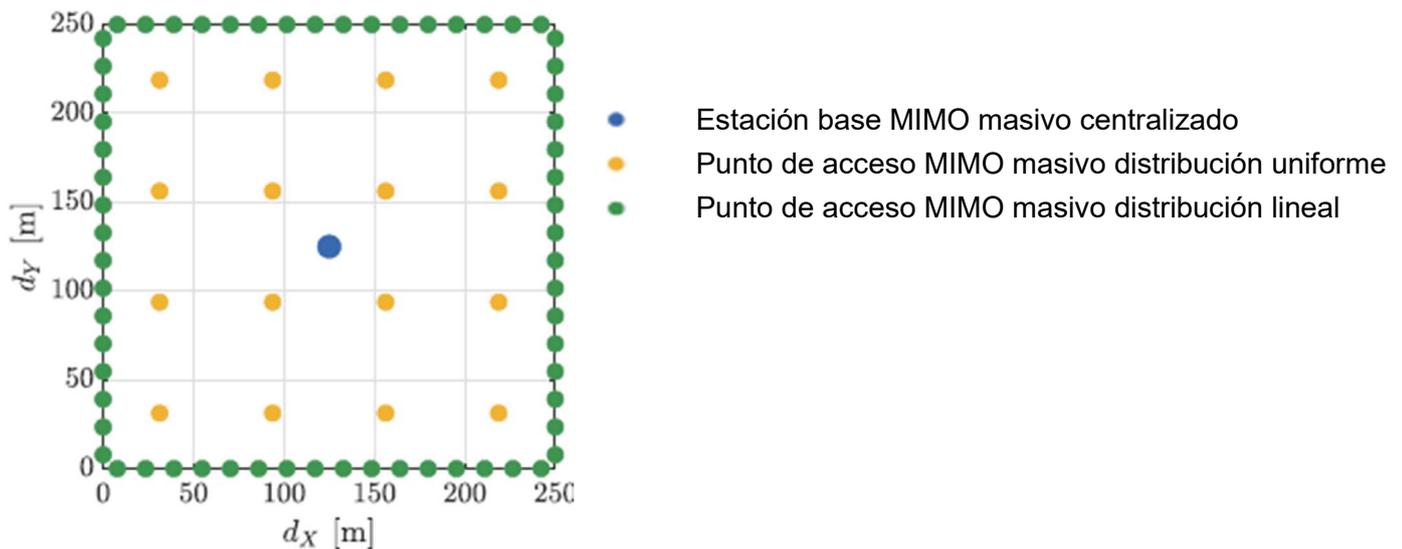


Figura 10.49. Distribución en malla y en línea de puntos de acceso [20].

Si suponemos una potencia máxima de 100 mW para cada punto de acceso y una ganancia máxima de 8 dBi, se tiene para un punto de acceso:

$$\text{PIRE} = 600 \text{ mW}$$

La densidad de potencia radiada:

$$S = \frac{0,6}{4\pi r^2} = 10$$

El nivel máximo normalizado de 10 w/m^2 , se alcanza a 7 cm del punto de acceso. Teniendo en cuenta ganancias más elevadas, por ejemplo:

$$G = 1.000$$

El nivel de referencia se alcanzaría aproximadamente a 2 metros del punto de acceso. Dado que el resto de las antenas están a distancias mayores de 50 metros en el caso de distribución en malla y a más de 12 metros en el caso de la distribución en línea, no parece que exista ninguna influencia entre unas antenas y otras desde el punto de vista medioambiental.

10.6.2.4. Superficies Inteligentes Reflectoras (RIS) para MIMO pasivo.

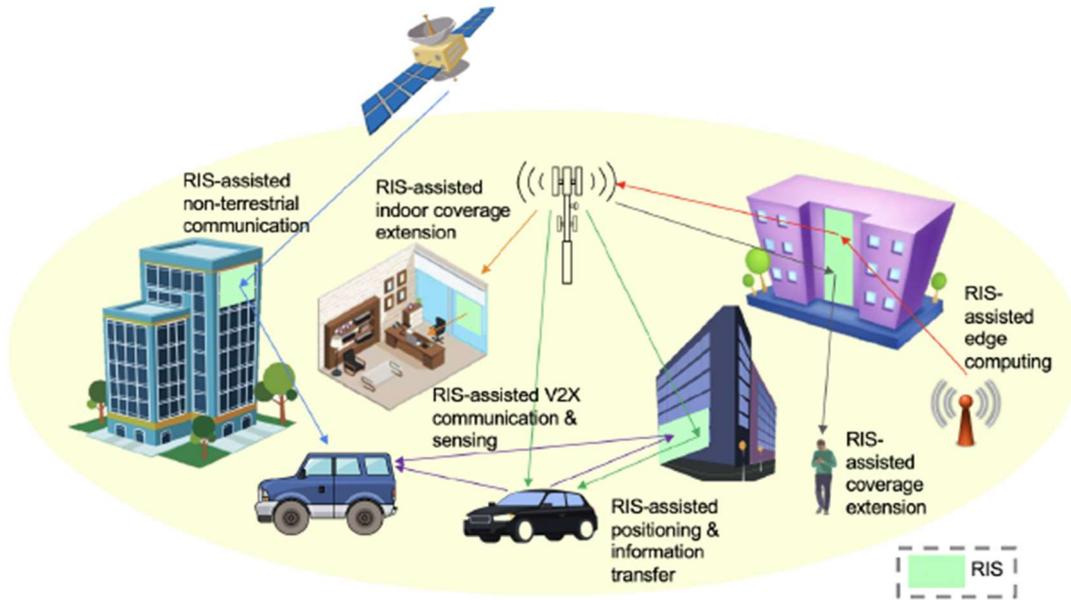


Figura 10.50. Utilización de RIS en distintos servicios de comunicaciones 6G [21].

Un estudio realizado en la Universidad de Oviedo con una estación base que transmite una potencia de 1 W, y una antena que tiene un ancho de haz a -3 dB de unos 13°, situando el reflectarray/RIS a una distancia entre 10 y 20 m, la potencia que refleja el reflectarray está entre 4 y 11 mW.

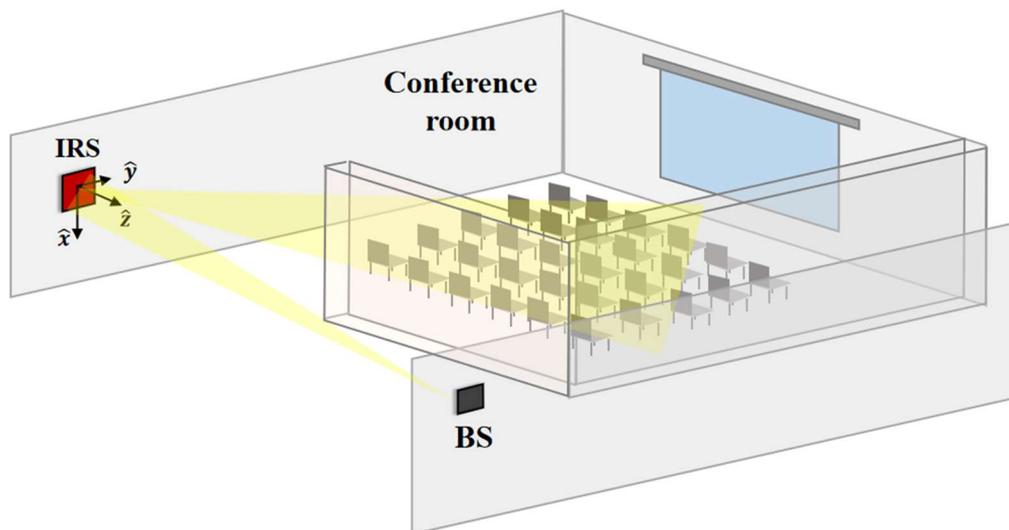


Figura 10.51. Utilización de RIS pasivos para cobertura en espacios interiores [58],[59],[60],[61].

La mayor parte de la potencia que se pierde es porque el reflectarray está muy lejos y la antena de la estación base no es todo lo directiva que se necesitaría (si el haz fuese mucho más estrecho, se iluminaría sólo el reflectarray y se reflejaría prácticamente toda la potencia). Las dimensiones del RIS son 40 cm x 40 cm.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Unas veces se diseña el reflectarray para que genere un haz pincel que es más estrecho y tiene más ganancia y otras veces se genera un haz ensanchado para cubrir una región mayor, a costa de una menor ganancia. Esto puede hacerse independientemente del resto de parámetros como posición de la estación base, potencia radiada, etc.

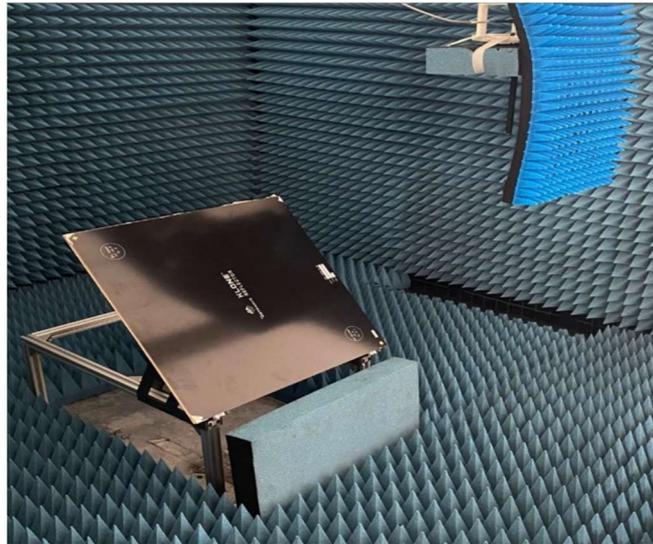


Figura 10.52. Reflectarray de 40x40 cm de haces ensanchados y frecuencia de trabajo de 27,6 GHz en la cámara anecoica de la Universidad de Oviedo ^[60].

- a) **Reflectarray de 40 x 40 cm**, el haz del reflectarray tiene un ancho a -3 dB de 20° en azimuth (plano horizontal) y 20° en elevación (vertical). Así que radiaba un haz ensanchado en un plano, tipo abanico. La frecuencia de trabajo 27.6 GHz, con un ancho de banda de 400 MHz. La ganancia del RIS puede expresarse como:

$$G = 4\pi \frac{1}{\Delta\theta \cdot \Delta\varphi} \approx 100$$

Considerando los valores de potencia reflejada de la Universidad de Oviedo, la potencia PIRE a considerar es de 0,4 a 1,1 W y el nivel de densidad de potencia máxima de 10 vatios por metro cuadrado:

$$S = \frac{1,1}{4\pi r^2} = 10$$

De donde se obtiene un valor de $r = 9$ cm, es decir a 9 cm de la superficie RIS se cumple el Nivel de Referencia.

- b) **Reflectarray de 20 x 20 cm** con haces pincel y frecuencias de funcionamiento de 28 y 39 GHz.

En este caso, el reflectarray tiene un tamaño de 20 x 20 cm y los haces son tipo pincel: el ancho de haz es de 2.8° a 28 GHz y de 2.2° a 39 GHz. En este caso, para 28 GHz:

$$G = 4\pi \frac{1}{\Delta\theta^2} \approx 5.600$$

Mientras que para 39 GHz:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$G = 4\pi \frac{1}{\Delta\theta^2} \approx 8.100$$

Las potencias PIRE a considerar, para 11 mW de potencia reflejada, son 62 W para el caso de 28 GHz y 90 W para el caso de 39 GHz.

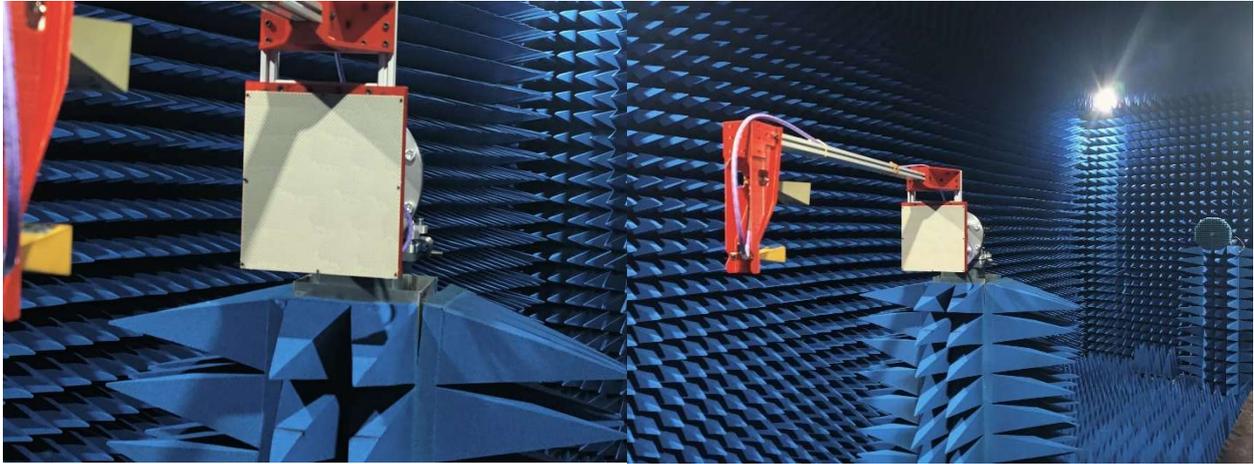


Figura 10.53. Reflectarray de 20x20 cm y frecuencia de trabajo de 28 y 39 GHz, en la cámara anecoica de la Universidad Rey Juan Carlos ^[59].

El nivel de densidad de potencia de 10 W/m², para cada uno de los casos:

$$S = \frac{62}{4\pi r^2} = 10 \text{ y } S = \frac{90}{4\pi r^2} = 10$$

Que se alcanzará a 70 cm para 28 GHz y 85 cm para 39 GHz.

- c) **Reflectarray con haces ensanchados de 6,7 x 6,7 cm** y frecuencia de trabajo de 100 GHz.

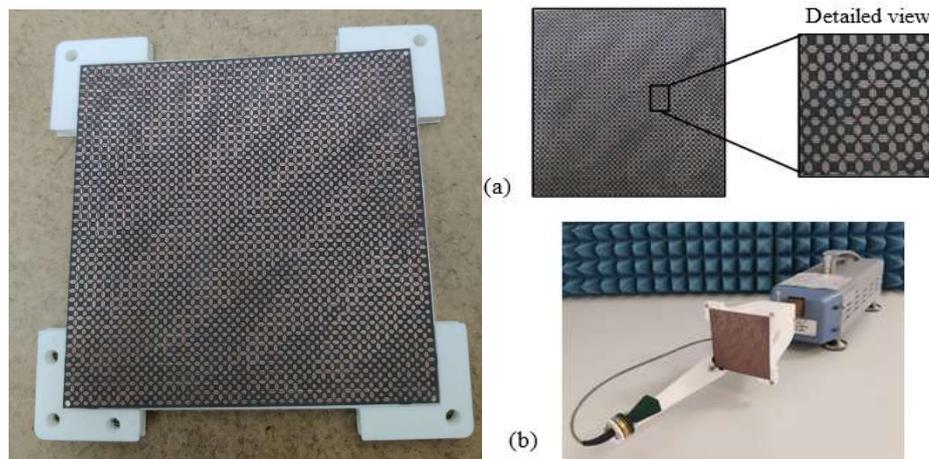


Figura 10.54. Reflectarray de 6,7x 6,7 cm y frecuencia de trabajo de 100 GHz, en la cámara anecoica de la Universidad Politécnica de Madrid ^[60].

En este caso, se hace un ensanchado de haz de 2.5° a 10.5° por lo que la ganancia será aproximadamente:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$G = 4\pi \frac{1}{\Delta\theta^2} \approx 500$$

El nivel de referencia de densidad de potencia 10 vatios por metro cuadrado, con una potencia reflejada de 11 mw:

$$S = \frac{5,5}{4\pi r^2} = 10$$

Por lo que la distancia a la que se cumple el nivel de referencia es de 21 centímetros.

d) Reflectarray de haces ensanchados de 30 x 30 cm y frecuencias de trabajo de 28 y 39 GHz. Radia con haces de 12° tanto en el plano horizontal como en el vertical.

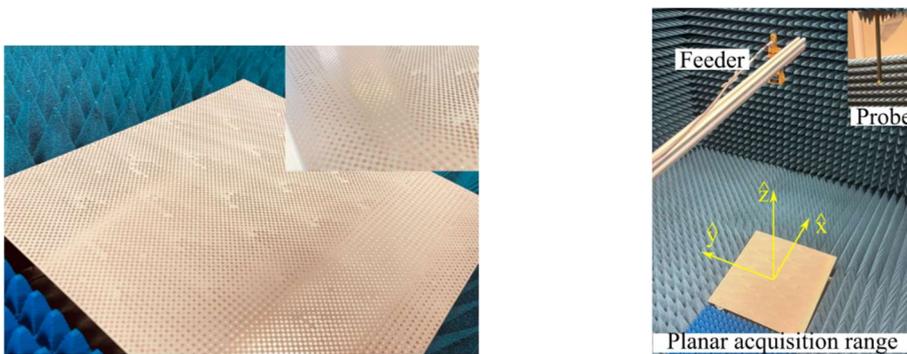


Figura 10.55. Reflectarray de 30x30 cm y frecuencia de trabajo de 28 y 39 GHz, en la cámara anecoica de la Universidad de Oviedo [61].

Así, la ganancia de la antena:

$$G = 4\pi \frac{1}{\Delta\theta^2} \approx 285$$

El nivel de referencia correspondiente a 11 mW de potencia reflejada:

$$S = \frac{3}{4\pi r^2} = 10$$

Se cumple para una distancia de 15 cm de la antena.

10.6.2.5. Consideraciones sobre el campo radiado

La propagación de ondas electromagnéticas utiliza la aproximación de ondas planas para la estimación del campo lejano. Sin embargo, el campo próximo requiere la utilización del modelo de onda esférica para realizar cálculos en las proximidades del sistema radiante. El efecto producido es que la onda a medida que se aleja de la fuente de campo se va aplanando. A las frecuencias de trabajo de la 6G, que son muy elevadas, podrían aparecer algunas situaciones fuera de lo que se viene considerando habitual.

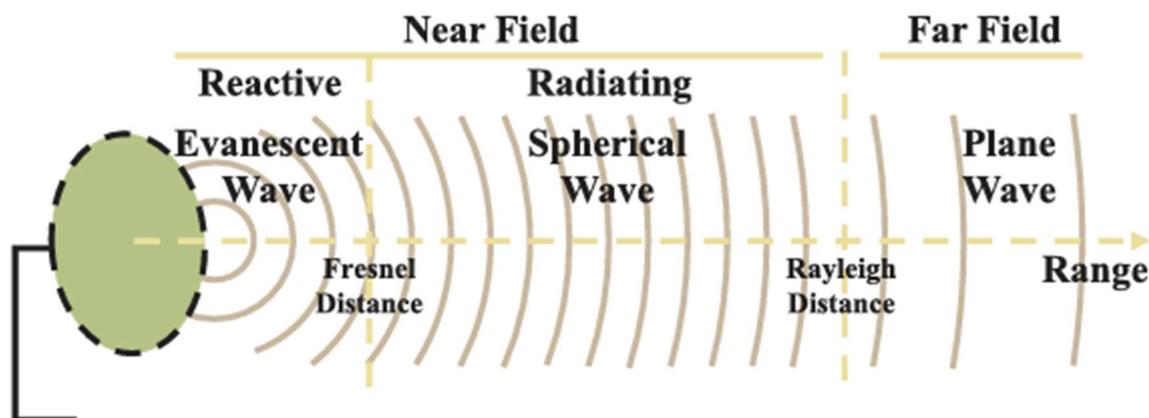


Figura 10.56. Aplanamiento de la onda electromagnética con la distancia [63].

La región de campo próximo reactivo se caracteriza por campos evanescentes correspondientes a ondas que no se propagan. Convencionalmente, la frontera entre la zona de campo próximo reactivo y la de campo próximo radiado, conocida como distancia de Fresnel, viene dada por:

$$r_F = 0,5 \sqrt{\frac{D_a^3}{\lambda}}$$

Mientras el límite entre el campo lejano y el campo próximo, conocida como distancia de Rayleigh, se calcula mediante la expresión:

$$r_R = \frac{2D_a^2}{\lambda^2}$$

Donde D_a es la distancia máxima entre dos antenas cualesquiera de un array. La aparición, con los sistemas MIMO, de arrays de apertura extremadamente grande (extremely large aperture array ELAAs) aumenta el valor de D_a y provoca que el campo próximo se prolongue hasta varios kilómetros de distancia de la fuente de campo. Por ejemplo, a 3,5 GHz, con un valor de D_a de 4 metros, la distancia de Rayleigh se sitúa a 373 metros. Para 28 GHz, la distancia se aproxima a 3 km.

A efectos de la red móvil 6G, el campo radiado por los Puntos de Acceso o Estaciones Base habrá de considerarse campo cercano, lo que quiere decir que, en un caso ideal, la fuente de campo es puntual y radia una onda esférica de forma isótropa. Más allá de esta consideración, y desde un punto de vista medioambiental, el cálculo de la densidad de potencia radiada para obtener la distancia a la que se cumple el Nivel de Referencia, no se verá afectado por tratarse de una onda plana o esférica. El flujo del vector de Poynting a través de una superficie esférica con la condición de radiar de forma isótropa, tanto para onda esférica como para onda plana, se tendrá que calcular de igual manera.

10.6.3. Plataforma conjunta de comunicaciones y teledetección ISAC

La futura 6G tendrá servicios y aplicaciones que necesitan la utilización conjunta de sistemas de comunicaciones y teledetección. Así, por ejemplo, las comunicaciones de tipo V2X, que pueden ser entre vehículos, entre vehículo y la señalización lateral, entre el vehículo y los viandantes, etc. van a necesitar sistemas de teledetección. También, las aplicaciones de pronóstico meteorológico, la detección y monitorización de partículas contaminantes que se encuentran en suspensión en la atmósfera, el control del movimiento de los vehículos industriales guiados, la localización de UAV's y su correspondiente identificación, constituyen ejemplos de sistemas que funcionan con redes de sensores y equipos radar.

Las aplicaciones de teledetección que van a utilizarse dentro de la 6G pueden clasificarse en tres categorías: sistemas radar, sistemas pasivos de observación de La Tierra y sistemas astrofísicos. En los dos últimos campos, tanto equipos de banda ancha como de banda estrecha pueden aportar informaciones y datos de carácter relevante. Los equipos de banda estrecha están dedicados a la detección de determinadas moléculas como el oxígeno O₂ cuya resonancia molecular está dentro de una banda entre 50 y 70 GHz o el vapor de agua con un pico de absorción a 183 GHz, puede ocupar una banda entre 165 y 200 GHz. En el ámbito astrofísico, la molécula más importante ha venido siendo el monóxido de carbono CO con resonancias en 115, 230 y 346 GHz. Los sistemas pasivos de banda ancha se utilizan en la detección de emisiones de carácter térmico y electromagnético de algunas partículas atómicas. Los sistemas activos de banda ancha están dedicados al estudio de emisiones en toda la banda de las milimétricas.



Figura 10.57. Representación de funcionamiento de una plataforma conjunta de comunicaciones y detección^[35].

La utilización de modulaciones OFDM, concretamente OFDM-QAM facilita el manejo de señales radar moduladas Orthogonal Frequency Time Space en el dominio Delay-Doppler (OFTS-DD) dado

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

que ambos formatos tienen puntos de coincidencia, pero se trata de señales de muy diferente generación y recepción.

Dado que el espectro radioeléctrico está actualmente ocupado prácticamente en su totalidad ha surgido una iniciativa, bajo distintas denominaciones como radar-communication (Rad-Com), dual-functional radar communications (DFRC), joint sensing and communications (JSC), o Integrated Sensing and Communications (ISAC), para planificar la implementación conjunta de sistemas de teledetección con las redes de comunicaciones. Esta iniciativa tiene como objetivo, compatibilizar las señales de los dispositivos de teledetección y los sensores con las señales de comunicaciones. Quizás el mayor escollo lo presentan las señales pulsadas de los equipos radar y su recepción, transmisión y procesamiento en los sistemas de comunicaciones. La iniciativa cuenta con el respaldo de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R).

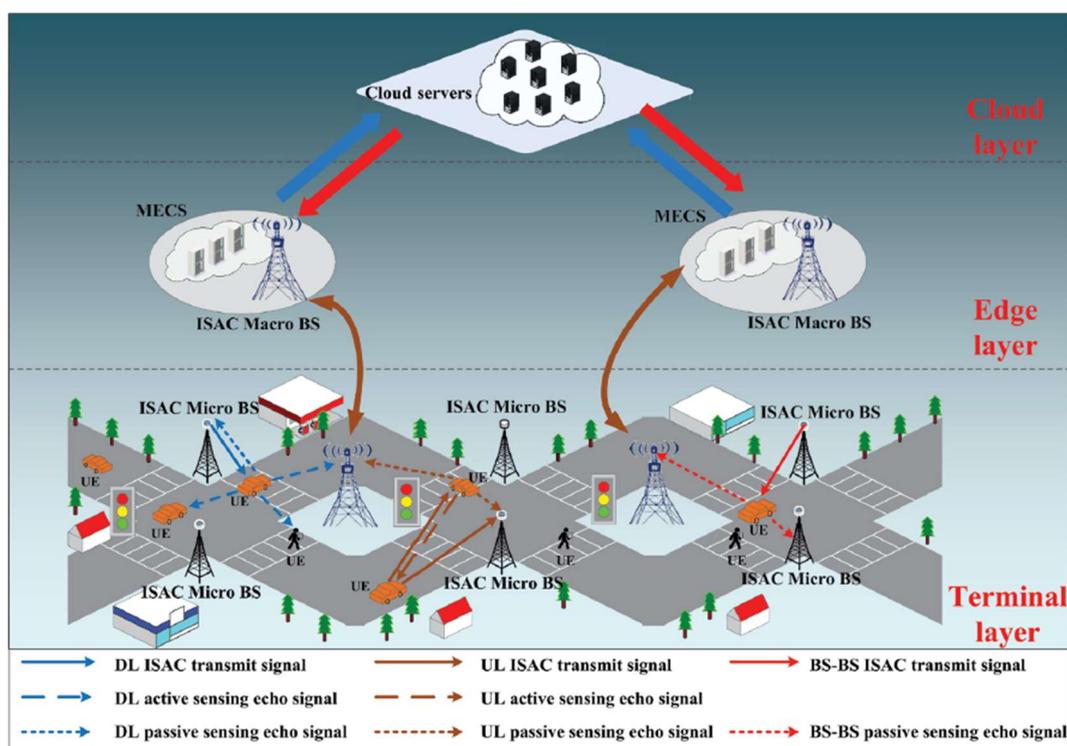


Figura 10.58. Entorno de funcionamiento cooperativo de una plataforma ISAC para comunicaciones y detección^[36].

La plataforma ISAC plantea la utilización de forma cooperativa de las estaciones base situadas en los laterales de las carreteras para apoyar las comunicaciones V2X. Este tipo de aplicaciones se consideran de interés para mejorar la seguridad vial y disminuir el número de accidentes.

ISAC contempla varias capas de funcionamiento en cooperación de la plataforma: a) La capa Terminal, consta de micro estaciones base o puntos de acceso y equipos de usuario, ambos sistemas con posibilidad de funcionamiento ISAC. La micro estación base o punto de acceso puede hacer funciones de integración de datos procedentes de otras micro estaciones. b) La capa Edge, que consta de una estación base y los servidores Edge-cloud (Mobile Edge Computing Servers MECS), que pueden realizar la integración de los datos de teledetección de las distintas estaciones base. c) La capa Cloud con capacidad de almacenamiento y de computación para integrar toda la información de teledetección obtenida de las capas inferiores Terminal y Edge.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La cooperación entre capas y entre nodos, estaciones base o puntos de acceso y equipos de usuario, tiene la ventaja de que aumenta la precisión y el radio de utilización en la teledetección. Sin embargo, implica una coordinación entre nodos que es compleja en lo relativo a la computación y a la sincronización de los datos obtenidos en las capas más bajas.

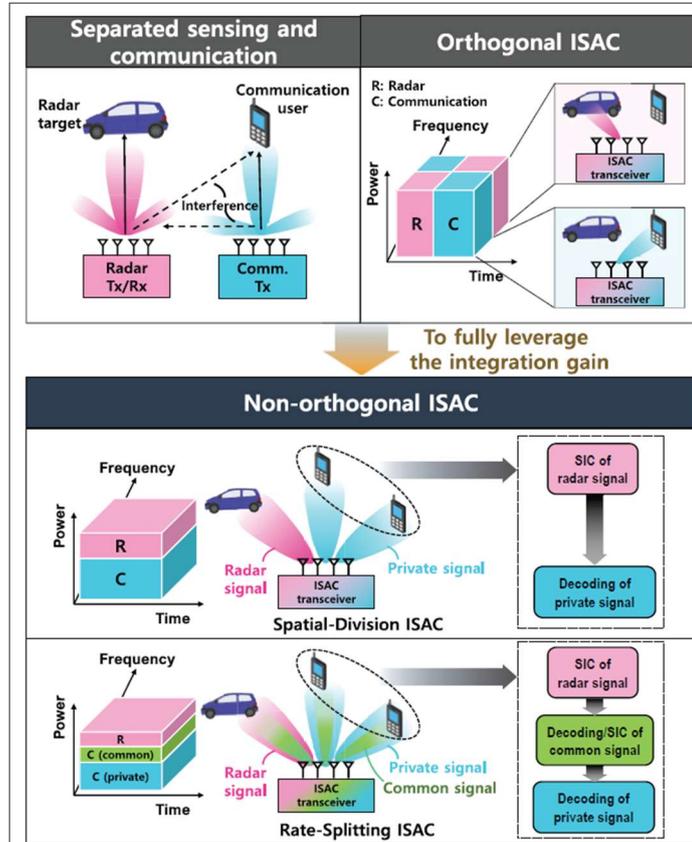


Figura 10.59. Las posibilidades de utilización conjunta de sistemas de comunicaciones y teledetección^[47].

Desde el punto de vista de la asignación de recursos, las técnicas de Acceso Múltiple deben servir de ayuda para una asignación apropiada de los diferentes tipos de recursos para conseguir un funcionamiento óptimo de las funciones de detección y de comunicaciones. Tradicionalmente, han venido existiendo áreas comunes en ambos campos, de forma que se establece una cierta disputa por los recursos asignados a uno y otro servicio. Por tanto, es necesario gestionar los recursos para mejorar la eficiencia tanto de la detección como de las comunicaciones.

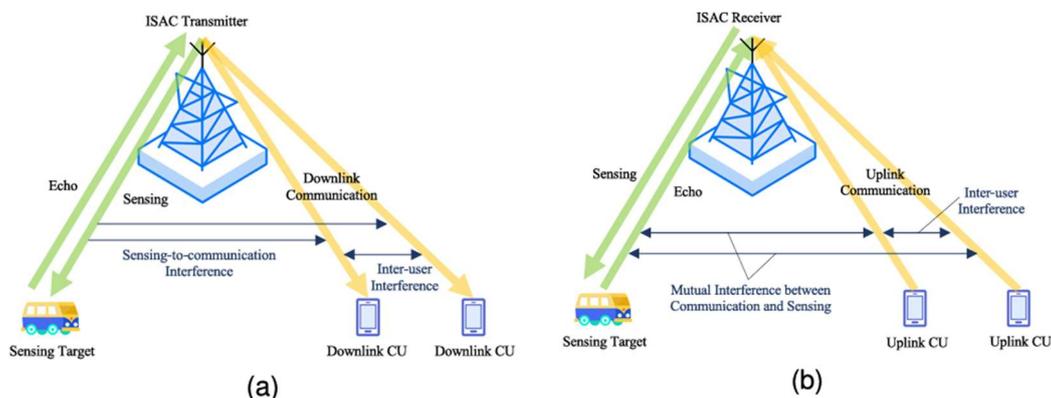


Figura 10.60. Distintos tipos de interferencia en ISAC: a) Enlace descendente, b) Enlace ascendente ^[57].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Las técnicas de acceso múltiple pueden cancelar las interferencias entre puntos de acceso para conseguir un mejor funcionamiento dual de la red. Salvo para el caso de interferencia entre usuarios de las redes convencionales de comunicaciones, las tareas de detección introducen un mayor nivel de interferencia que se intentará eliminar en ISAC. En el enlace descendente, cuando el usuario de comunicaciones CU recupera la información que va destinada a él, la interferencia entre usuarios y la nueva interferencia originada por los sistemas de detección y teledetección coexisten, impidiendo el buen funcionamiento de la comunicación como se muestra en la Figura 59 a. Para el enlace ascendente, la señalización de prueba para la detección se produce simultáneamente con la transmisión para comunicaciones, dando lugar a interferencias en la recogida de datos del usuario y en la detección de cualquier objetivo, como se muestra en la Figura 59 b). Puesto que la eliminación de las interferencias entre los sistemas de comunicaciones y detección es similar a la cancelación de la interferencia entre usuarios de los canales de comunicaciones convencionales, las técnicas de acceso múltiple pueden ser utilizadas para eliminar o atenuar la nueva interferencia en ISAC. Así pues, los nuevos esquemas de acceso múltiple constituyen un aspecto esencial de las plataformas conjuntas de comunicaciones y detección.

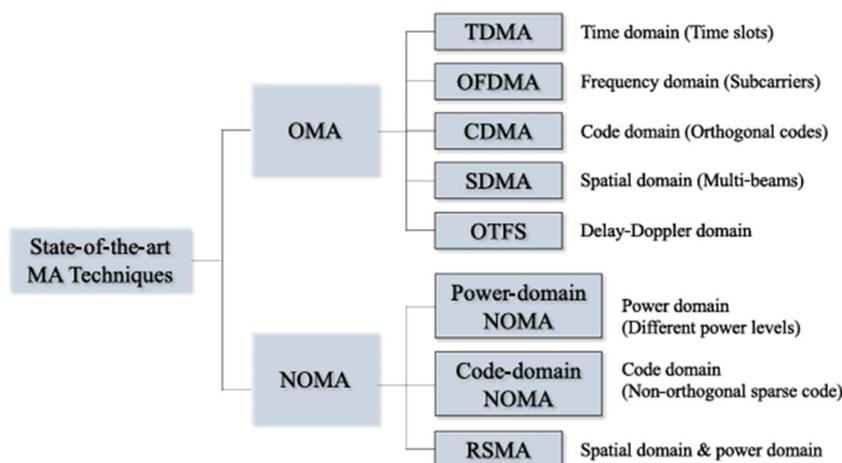


Figura 10.61. Técnicas de acceso múltiple^[57].

Un trabajo reciente plantea la utilización de la plataforma ISAC para la integración de los sistemas de comunicaciones y de teledetección de una constelación LEO en la red 6G terrestre. Los satélites LEO se han venido utilizando hasta la fecha en la teledetección de diferentes magnitudes de carácter geográfico, oceanográfico, meteorológico, agrícola, militar, etc. Actualmente, la principal actividad LEO en teledetección es meteorológica, aportando datos para la previsión del tiempo climático. Estas tareas se llevan a cabo mediante sistemas radar de apertura sintética (SAR), que permiten la obtención de imágenes en condiciones de baja visibilidad y a cualquier hora del día. En cuanto a las comunicaciones puede apuntarse que los terminales de usuario (UE) para comunicaciones LEO son muy parecidos en tamaño y peso a los equipos UE de la red móvil terrestre. La arquitectura LEO de comunicaciones utiliza enlaces entre satélites para evitar el alto número de dispositivos que han de procesar y encaminar la información en la red móvil terrestre, minimizando la latencia y permitiendo tasas de transmisión elevadas.

En los satélites, los sistemas de posicionamiento, navegación y sincronización (Positioning, Navigation, Timing, PNT) se encuentran instalados en los satélites MEO, (Galileo, GPS, etc.) con órbitas de 20.000 km de radio, unas 20 veces mayores que los LEO. Sin embargo, las señales Global Navigation Satellite Systems GNSS, no pueden ser captadas en algunos puntos de la superficie terrestre quedando el posicionamiento de objetos en función de sistemas inerciales de navegación y de medida que son aproximaciones independientes de cualquier información externa y que pueden generar datos erróneos de observación. En consecuencia, se estudia la posibilidad

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

de utilizar los satélites LEO para este tipo de servicios. Un escenario LEO-PNT tendría las siguientes ventajas: La constelación LEO cubriría toda la superficie terrestre, el intervalo entre dos pasos consecutivos por un mismo lugar es mucho menor ya que las órbitas son más bajas y la localización del receptor en 3-D, es más precisa. La cobertura LEO en las zonas polares, actualmente muy débil con GNSS, mejoraría de forma notable.

El funcionamiento coordinado de la plataforma ISAC con una constelación LEO haría posible la monitorización y el control del tráfico marítimo, gestión del tráfico aéreo y de las fronteras en cualquier punto de la superficie terrestre donde esté instalada la plataforma ISAC.

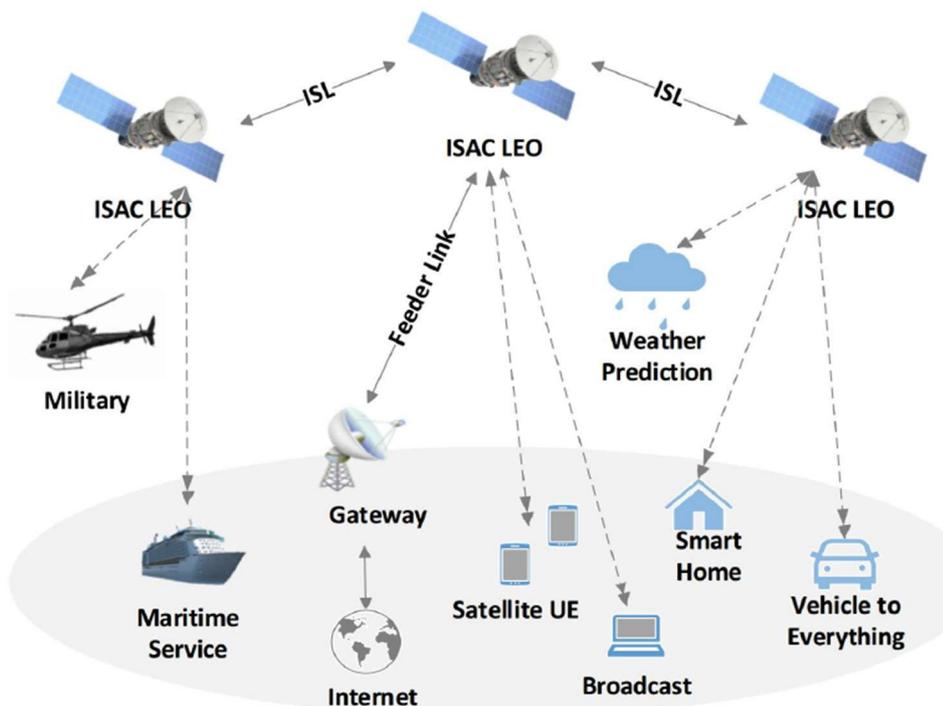


Figura 10.62. Utilización coordinada de la plataforma ISAC con sistemas de satélites LEO [37].

Ya se ha indicado en este mismo apartado que uno de los mayores problemas de la plataforma ISAC para la implantación de un sistema con múltiples estaciones base para la teledetección era la falta de sincronización. El funcionamiento conjunto de ISAC con sistemas PNT a bordo de satélites LEO, resolvería el problema al utilizar una señal de reloj de gran precisión para el conjunto ISAC-LEO.

10.7. Nuevas formas de acceso múltiple

La transmisión a altas frecuencias permite la generación de desplazamientos Doppler con velocidades bajas ya que varía de forma inversamente proporcional a la longitud de onda. La 6G va a trabajar en la banda de frecuencias milimétricas por lo que cualquier movimiento en el receptor podría causar variaciones en frecuencia al enviar señales al punto de acceso o a la estación base. Por otra parte, al ser necesaria la integración de los sistemas de teledetección con los de comunicaciones para algunos de los servicios 6G, es obligado encontrar nuevos tipos de modulación que permitan la transmisión conjunta de señales tanto de comunicaciones como de teledetección.

10.7.1. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)

En el despliegue de la 2G se utilizaron distintos sistemas de OMA (Orthogonal Multiple Access) como TDMA o FDMA. En la 3G se utilizó el sistema de acceso múltiple por código (CDMA). La cuarta generación y la TDT se desplegaron con OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Estos sistemas OMA no cumplen las especificaciones 5G en lo relativo a número de usuarios, eficiencia espectral, altas tasas de transmisión, baja latencia, etc. Se plantea, por tanto, un esquema NOMA que mejore la capacidad y las limitaciones de los sistemas ortogonales.

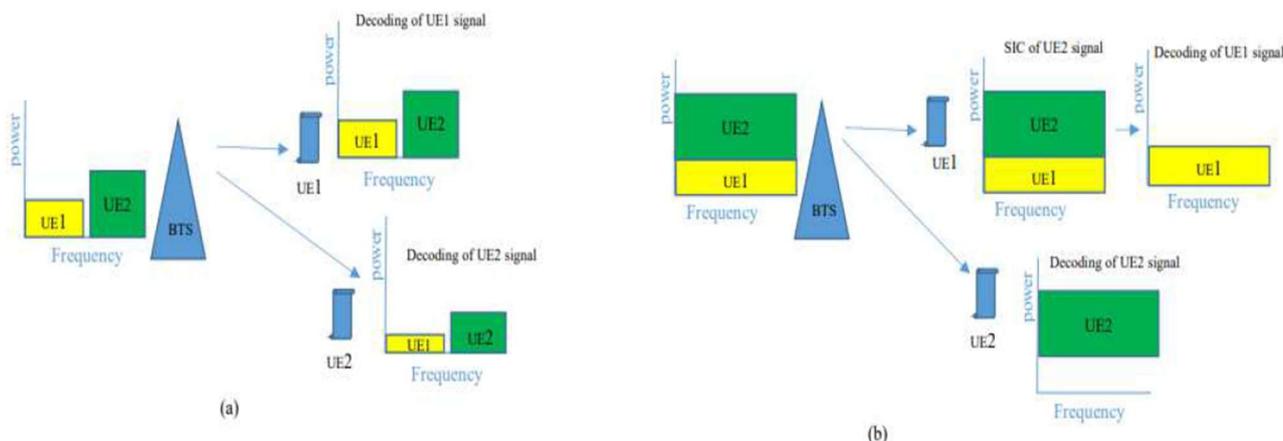


Figura 10.63. Diferencia entre señales OMA (a) y NOMA (b) [42].

Contrariamente a lo que sucede en los sistemas tradicionales, los esquemas NOMA facilitan que diferentes usuarios con distintos niveles de potencia compartan recursos. La combinación de sistemas MIMO con métodos de acceso NOMA permitiría, en principio, ajustar el tráfico a un previsible aumento de la demanda. La idea básica de un acceso NOMA es dar servicio a un número elevado de usuarios utilizando los mismos recursos radio simultáneamente en tiempo, frecuencia y código.

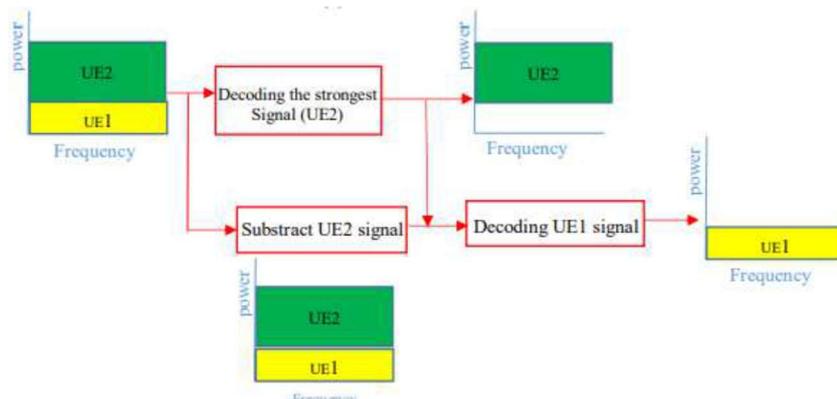


Figura 10.64. Diagrama de bloques de un proceso de supresión continua de interferencias (SIC) [42].

Existen dos tipos de sistemas NOMA: NOMA en el dominio de la potencia y NOMA codificado. En el primero, cada usuario es identificado por su coeficiente de potencia para unas determinadas condiciones del canal y los recursos radio son compartidos por todos los usuarios. Este NOMA en el dominio de la potencia, utiliza una codificación superpuesta en el emisor y una supresión

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

continuada de interferencias (SIC) en la recepción. El NOMA codificado permite la separación de usuarios utilizando códigos de redundancia.

Si suponemos una situación con una estación base o punto de acceso y dos usuarios, el usuario 1 está más cerca de la estación base que el 2, los dos usuarios coinciden en tiempo, código y frecuencia, pero diferentes niveles de potencia. El usuario 1 tiene peores condiciones de propagación que el usuario 2, por lo que la señal más débil corresponde al equipo de usuario 1 que interpreta la señal correspondiente al equipo de usuario 2 como una interferencia y la elimina por el método de cancelación sucesiva de interferencias.

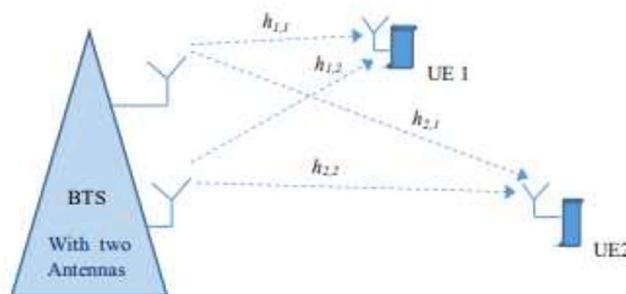


Figura 10.65. Enlace descendente con un sistema NOMA-MIMO [42].

La señal transmitida por la estación base a los equipos de usuario viene dada por:

$$x(t) = \sum_{i=1}^2 \sqrt{a_i \cdot P} \cdot x_i(t)$$

Donde P es la potencia transmitida por la estación base y los coeficientes a_i representa el porcentaje de la potencia total asignada a cada usuario. La señal recibida por cada uno de los usuarios viene dada por:

$$y_1(t) = \sum_{k=1}^2 h_{1,k} \cdot x(t) + N_1$$

$$y_2(t) = \sum_{k=1}^2 h_{2,k} \cdot x(t) + N_2$$

En donde N_i es la potencia de ruido aditivo gaussiano de media 0 y varianza σ^2 y $h_{i,k}$ la respuesta del canal para las antenas 1 y 2 de la estación base y los equipos de usuario 1 y 2, respectivamente.

Con el objeto de establecer una comparación entre los sistemas MIMO-OMA y MIMO-NOMA, las señales OMA que reciben los usuarios 1 y 2 son:

$$y_{1,OMA}(t) = \sqrt{P} \cdot \sum_{k=1}^2 h_{1,k} \cdot x(t) + N_1$$

$$y_{2,OMA}(t) = \sqrt{P} \cdot \sum_{k=1}^2 h_{2,k} \cdot x(t) + N_2$$

Las tasas de transmisión para un ancho de banda ω y una relación señal ruido en los equipos de usuario $SNR_{i,OMA}$, según la fórmula de Shannon para la capacidad del canal:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$R_{1,OMA} = \frac{\omega}{2} \cdot (1 + SNR_{1,OMA})$$

$$R_{2,OMA} = \frac{\omega}{2} \cdot (1 + SNR_{2,OMA})$$

Las relaciones señal ruido de cada equipo de usuario vendrán dadas por:

$$SNR_{1,OMA} = \frac{P \cdot [\sum_{k=1}^2 h_{1,k}]^2}{\sigma^2}$$

$$SNR_{2,OMA} = \frac{P \cdot [\sum_{k=1}^2 h_{2,k}]^2}{\sigma^2}$$

Siendo la tasa de transmisión total:

$$R_{TOTAL,OMA} = R_{1,OMA} + R_{2,OMA}$$

Para la transmisión NOMA, la señal en cada equipo de usuario después del proceso SIC puede expresarse:

$$y_{1,NOMA}(t) = \sqrt{a_1 \cdot P} \cdot \sum_{k=1}^2 h_{1,k} \cdot x_1(t) + N_1$$

$$y_{2,NOMA}(t) = \sqrt{a_2 \cdot P} \cdot \sum_{k=1}^2 h_{2,k} \cdot x_2(t) + N_2$$

Volviendo a aplicar la fórmula de Shannon, la tasa de transmisión por usuario vendrá dada por:

$$R_{1,NOMA} = \frac{\omega}{2} \cdot \left(1 + \frac{P \cdot a_1 \cdot [\sum_{k=1}^2 h_{1,k}]^2}{\sigma^2} \right)$$

$$R_{2,NOMA} = \frac{\omega}{2} \cdot \left(1 + \frac{P \cdot a_2 \cdot [\sum_{k=1}^2 h_{2,k}]^2}{[\sum_{k=1}^2 h_{1,k}]^2 + \sigma^2} \right)$$

Se ha considerado que para el usuario 2, la señal del usuario 1 es ruido. La tasa de transmisión total:

$$R_{TOTAL,NOMA} = R_{1,NOMA} + R_{2,NOMA}$$

El cuadro que se muestra a continuación muestra siguientes datos para una simulación:

Parámetro	Valor
d ₁	100 m
d ₂	100 m
Pérdidas de propagación	0,45
a ₁	0,35
a ₂	0,65
ω	2 MHz
Canal	Gaussiano

Cuadro 10.11. Datos para una simulación OMA-NOMA^[42].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Con estos datos se obtienen los siguientes resultados:

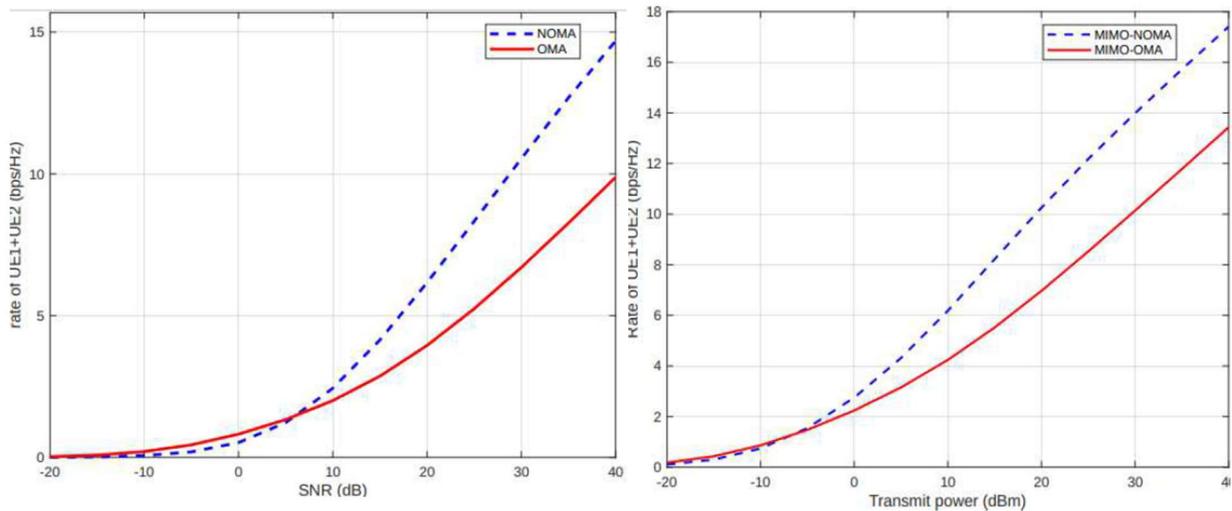


Figura 10.66. Tasa de transmisión entre la estación base y los usuarios 1 y 2 [42].

Se concluye de la simulación que los sistemas NOMA presentan tasas de transmisión por Hz mejores que las de los sistemas OMA, aproximadamente 4 bps/Hz, por lo que los esquemas NOMA maximizan la tasa de transmisión y reducen el nivel de interferencia para una misma potencia transmitida o una misma relación señal ruido.

Para el enlace ascendente, un estudio reciente plantea agrupar los usuarios no sólo por grupos para asimilarlos a niveles de potencia sino por grupos en función de la distancia a la estación base. Así, tal como se muestra en la Figura 11.67, se crean K grupos con N usuarios cada grupo.

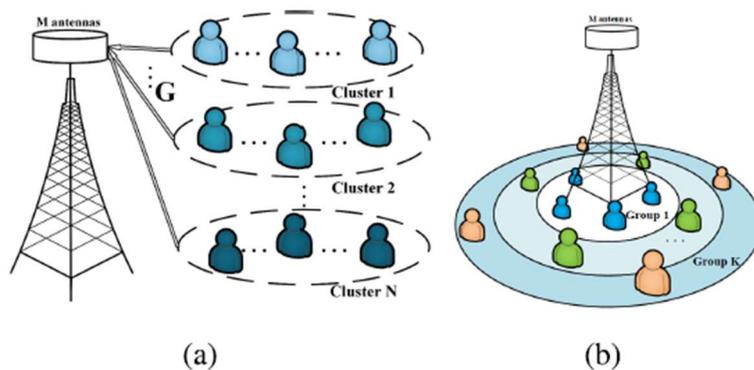


Figura 10.67. Representación de sistemas MIMO-NOMA: Sistema con procesado SIC (a) y Sistema con procesado GLSIC o SIC a nivel de grupo (b)[43].

La señal recibida en la estación base o punto de acceso, vendrá dada por la expresión:

$$y = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N g_{k,n} \sqrt{P_{k,n}} s_{k,n} + n$$

Donde $g_{k,n}$ es la respuesta del canal para la señal del usuario n del grupo k , $UE_{k,n}$ que se transmite con una potencia $P_{k,n}$ y símbolo $s_{k,n}$. Según Hartley-Shannon la tasa de transmisión del citado usuario es^[4]:

$$R_{k,n} = \frac{\tau_c - \tau}{\tau_c} \log_2(1 + SINR_{k,n})$$

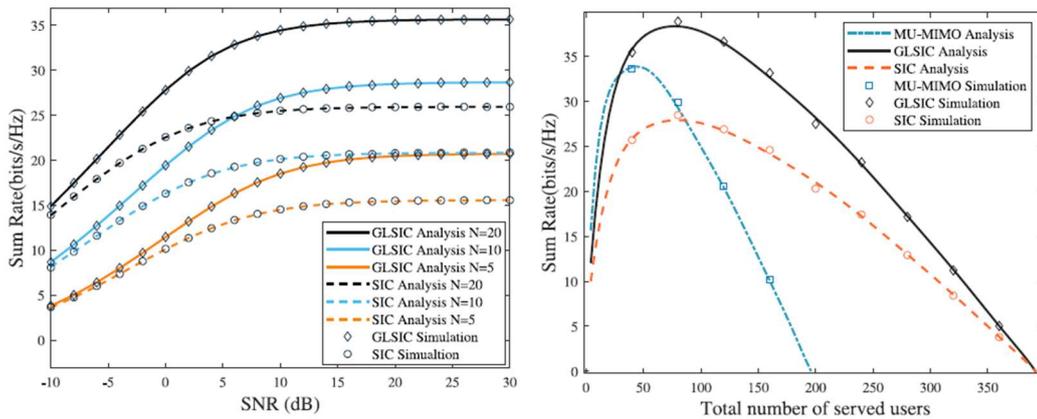


Figura 10.68. Resultados del análisis y simulación para distinto número de usuarios: tasa de transmisión en función de la relación señal ruido y del número de usuarios^[43].

Con $\tau_c - \tau$, siendo τ_c el tiempo de coherencia del canal, equivale a tiempo de utilización del canal por el usuario (k,n). El primer término de la expresión representa la relación entre el tiempo de utilización del canal por el usuario (k,n) y el tiempo máximo de transmisión que coincide con el tiempo de coherencia del canal. La tasa total, considerando el número total de usuarios:

$$R_{sum} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N R_{k,n}$$

10.7.2. Orthogonal Time Frequency Space – Delay Doppler domain (OTFS-DD)

Normalmente, un canal de transmisión vía radio se caracteriza por un número relativamente bajo de caminos de propagación. En la figura, la estación base y el equipo de usuario son estáticos y por tanto no generan desplazamiento Doppler. Los reflectores 1 y 3, también son estáticos y sólo originan un retardo, por lo que están situados en el eje de tiempo. Los reflectores 2 y 4, producen retardo y desplazamiento Doppler. El vehículo 2 se aleja de la fuente y el 4 se acerca, por lo que los desplazamientos Doppler de uno tiene signo opuesto al otro y están definidos por un retardo τ y un desplazamiento Doppler ν .

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

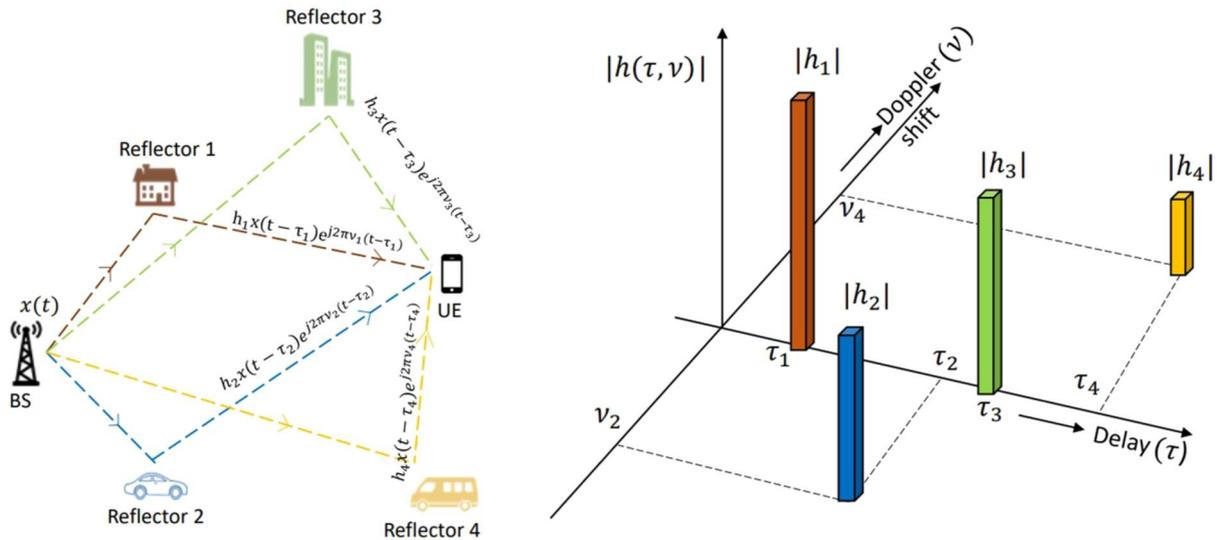


Figura 10.69. Respuesta de un canal doblemente dispersivo $h(\tau, \nu)$ [40].

Puede hablarse de un canal radio doblemente dispersivo, por un lado, el retardo y por otro el desplazamiento Doppler en frecuencia, y que su respuesta impulso es compleja para cada uno de los 4 caminos posibles para el impulso. En consecuencia, la expresión analítica para definir la respuesta al impulso del canal sería:

$$h(\tau, \nu) = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot \delta(\tau - \tau_i) \cdot \delta(\nu - \nu_i)$$

Y la señal recibida por el UE en el dominio temporal, sin ruido, vendrá dada por:

$$y(t) = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot x(t - \tau_i) \cdot e^{-i2\pi\nu_i(t-\tau_i)} d\nu dt$$

Donde se ha supuesto que la señal Doppler modula los impulsos de la fuente y que es la suma de las respuestas de cada uno de los cuatro caminos descritos en la representación gráfica de la situación planteada.

La transformada de Fourier de un tren de impulsos en el dominio temporal con periodo τ_p es un tren de impulsos en el dominio de la frecuencia espaciados ν_p de forma que:

$$\nu_p = \frac{1}{\tau_p}$$

Se crea un espacio Retardo-Doppler donde se pueden situar los diferentes impulsos recibidos en función del retardo y el desplazamiento Doppler de la señal enviada, con la condición:

$$\nu_p \tau_p = 1$$

Se crea así, el dominio Retardo-Doppler que presenta la característica de ser prácticamente invariante en el dominio tiempo (retardo) y el dominio frecuencia (Doppler), por lo que mejora el comportamiento del canal cuando se transmiten señales moduladas en OTFS-DD.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

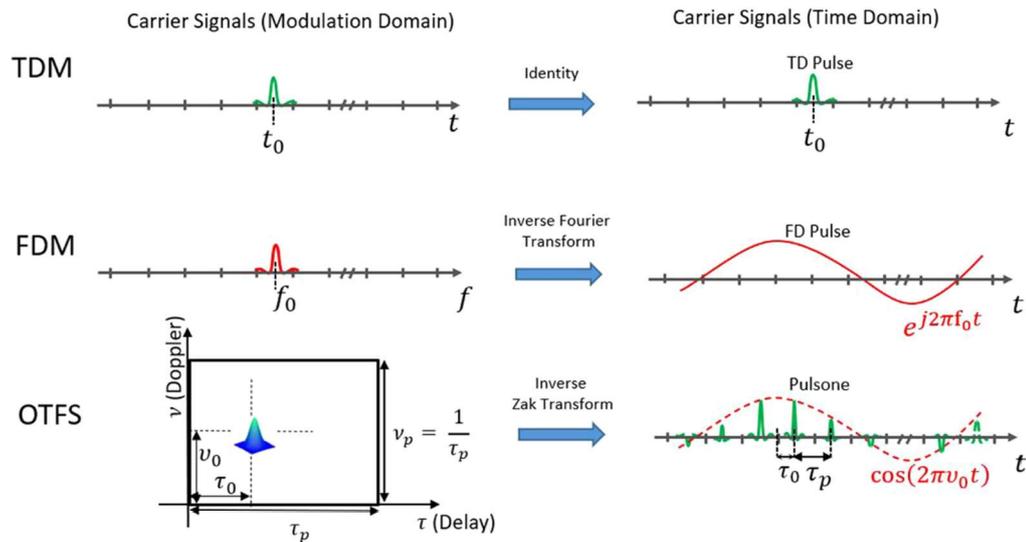


Figura 10.70. Portadoras TDM, FDM y dominio OTFS-DD^[40].

Los impulsos están localizados en los instantes:

$$t = \tau_0 + n \tau_p$$

Donde τ_0 es el retardo del primer impulso con respecto al origen en el eje de tiempos. De igual manera que

$$f = \nu_0 + n \nu_p$$

Siendo ν_0 la coordenada Doppler del primer impulso en el dominio DD.

El espacio OTFS-DD es periódico de manera que alrededor del dominio DD descrito existen otros dominios idénticos que cumplen igualmente la condición $\nu_p \tau_p = 1$.

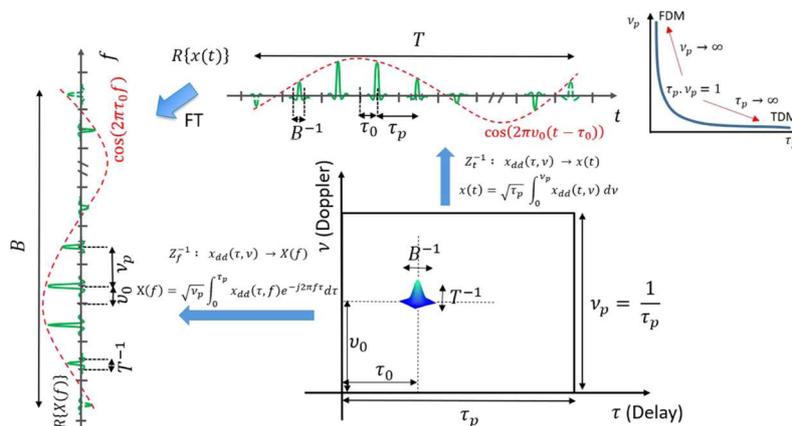


Figura 10.71. Impulso en el dominio DD y su correspondiente representación en el dominio temporal y en el dominio frecuencia^[40].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La transmisión de dos impulsos perfectamente definidos tanto en el dominio retardo (τ_a, τ_b) como en el dominio Doppler (ν_a, ν_b) permite a través de la caracterización del canal $h(\tau, \nu)$ obtener en el plano DD las diferentes respuestas ($\nu_a + \nu_i, \nu_b + \nu_i$) y ($\tau_a + \tau_i, \tau_b + \tau_i$) para $i = 1, 2, 3, 4$.

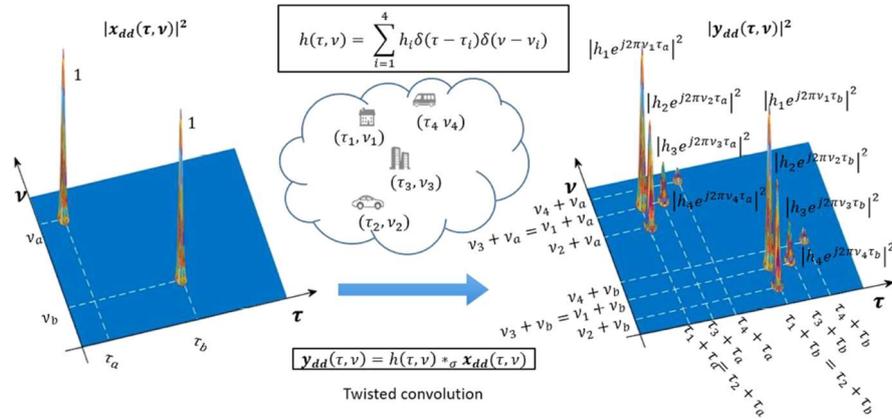


Figura 10.72. Un impulso transmitido en el dominio DD con coordenadas (τ_a, ν_a) y la respuesta del sistema en las coordenadas $(\tau_a + \tau_i, \nu_a + \nu_i)$ [40].

Además, se ha de cumplir que:

$$\begin{aligned} \tau_p &> (\text{máx } \tau_i - \text{mín } \tau_i) \\ \nu_p &> (\text{máx } \nu_i - \text{mín } \nu_i) \end{aligned}$$

para evitar que el plano DD no sea periódico y las señales se desvirtúen. Dicho de otro modo, puesto que:

$$\nu_p \tau_p = 1$$

Se requiere:

$$(\text{máx } \nu_i - \text{mín } \nu_i) \cdot (\text{máx } \tau_i - \text{mín } \tau_i) < 1$$

Que deja de cumplirse cuando la dispersión del canal es mayor que τ_p o la dispersión Doppler es mayor que ν_p , situación que se corresponde con el hecho de que ν_p ó τ_p tiendan a valores muy elevados como se indica en la Figura 10.73.

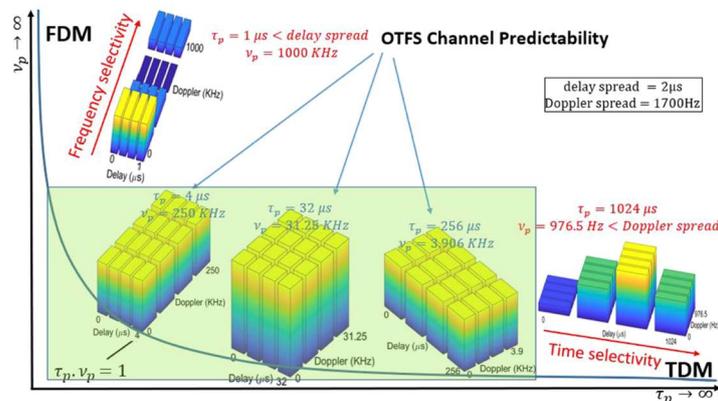


Figura 10.73. Para $M=N=4$, la potencia media de señal recibida en un periodo (τ_p, ν_p) del dominio DD [40].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

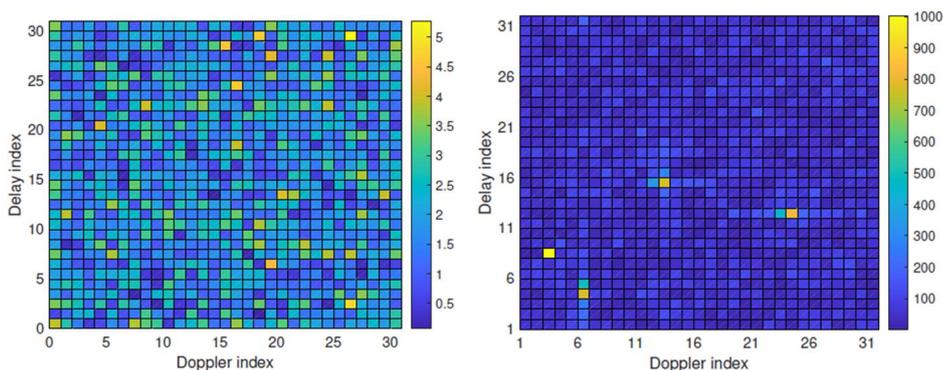


Figura 10.74. Imagen de un dominio DD con cuatro objetivos, antes de la correlación 2D (a) y después de la correlación 2D (b)^[38].

La imagen de la Figura 10.74 corresponde a una situación $M=N=32$, con cuatro objetivos que pueden verse claramente diferenciados en la gráfica (b) después de efectuar la correlación. Podría ser un bloque de $33 \mu\text{s}$ por 330 kHz , con celdas de $1 \mu\text{s}$ por 10 kHz . La disposición de las celdas dentro del dominio DD es muy semejante al mapa de puntos de una modulación 1024 QAM con 32 divisiones en cada uno de los ejes y 1024 puntos en el mapa.

La utilización en la transmisión de la información del dominio DD es la que se muestra en la Figura 10.72.

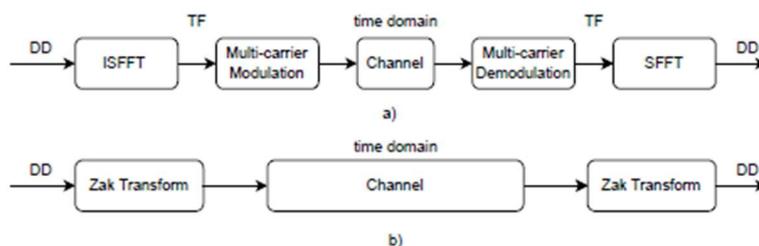


Figura 10.75. Diagrama de bloques para la implementación de un sistema OTFS. a) Conversión en dos pasos a OFDM y b) conversión en un paso por medio de la transformada de Zak ^[39].

El plano DD es periódico ya que cualquier bloque con las dimensiones del formato elegido cumple $\nu_p \tau_p = 1$.

10.7.3. Rated Splitting Multiple Access (RSMA)

La 6G tendrá que ser capaz de afrontar una demanda creciente de tráfico telefónico, voz y datos. También, necesita aumentar la fiabilidad de la red y mejorar la calidad del servicio para cumplir los requisitos de las comunicaciones de baja latencia, ultra extremadamente fiables y con grandes anchos de banda. Además, dará soporte a los sistemas de conexión masiva e integrará las redes aéreas y aeroespaciales con la red móvil terrestre. Finalmente, se vislumbra obligado el uso conjunto de las redes de comunicaciones para gestionar los datos de los sistemas de teledetección, a través de la iniciativa ISAC (Integrated Signaling and Communications).

En comparación con otras técnicas de acceso múltiple, OMA, NOMA, SDMA, la técnica RSMA ofrece algunas ventajas: a) mejora la eficiencia espectral, energética y computacional, b) unifica y generaliza los sistemas OMA, NOMA y SDMA, c) flexibiliza el comportamiento frente a distintos

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

niveles de interferencia, diferentes cargas de tráfico en la red, servicios y número de usuarios, d) es fiable y robusta frente a los cambios de condiciones del canal y e) tiene baja latencia.

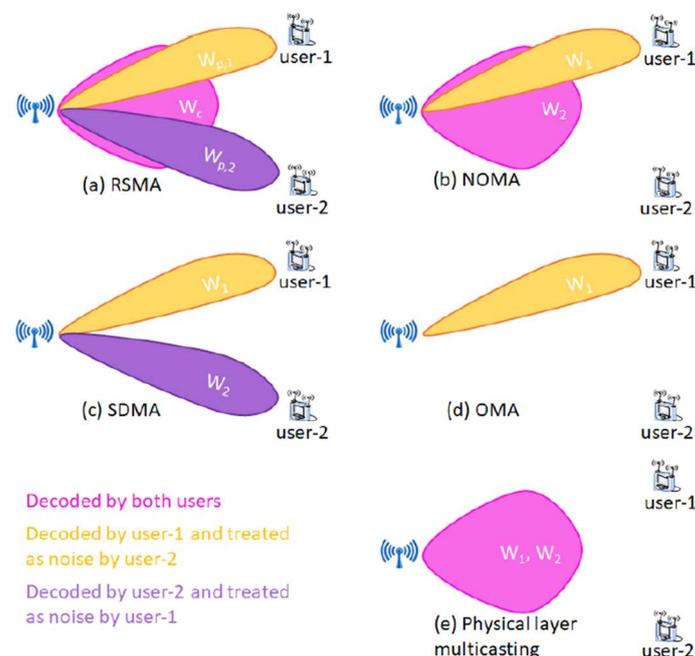


Figura 10.76. Representación del haz radio para RSMA, NOMA, SDMA, OMA y capa física multi-usuario^[44].

Tanto en el dominio espacio SDMA, como en el dominio potencia NOMA, los sistemas de acceso múltiple no son ortogonales. La diferencia entre ambos es que SDMA gestiona las interferencias como ruido mientras que NOMA decodifica las interferencias. RSMA es un esquema de acceso múltiple que se apoya en el principio de troceado o partición de una trama (rated splitting). Lo que se pretende es trocear un mensaje de usuario en dos o más partes de tal manera que cada una de las partes pueda ser decodificada de forma flexible por uno o varios receptores. La ventaja de esta partición del mensaje de usuario es que facilita y flexibiliza la gestión de la interferencia que se produce entre usuarios. RSMA es un sistema de acceso múltiple no ortogonal que trata una parte de la interferencia como ruido y otra parte la decodifica. El transmisor de RSMA divide el mensaje en dos partes, una común y otra específica. Todos los usuarios reciben la parte común de la trama y superpuesta de forma no ortogonal la parte específica o privada. La parte común puede ser decodificada por todos los usuarios, pero la parte privada solo por el usuario al que va dirigido. En el enlace ascendente, cada usuario trocea su trama en distintas partes y asigna a cada parte una potencia determinada. En este enlace ascendente, NOMA es una parte de RSMA. En la estación base o punto de acceso, se aplica la cancelación sucesiva de interferencia (SIC) para recuperar las tramas y reconstruir el mensaje original. La partición de los mensajes evita el empleo de un esquema TDM entre los usuarios para aumentar la capacidad.

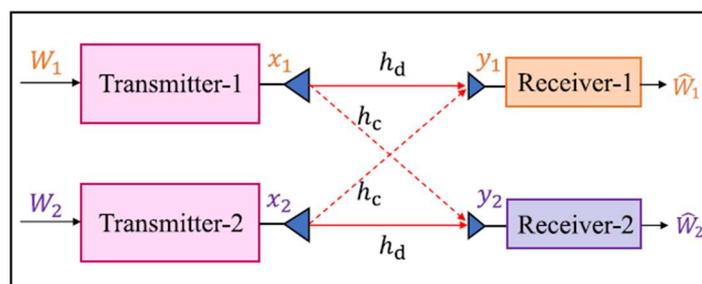


Figura 10.77. Canal simétrico con 2 usuarios^[44].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Consideremos un canal simétrico con dos usuarios. El sistema tiene cuatro nodos, dos transmisores y dos receptores, cada uno de los cuales va equipado con una antena. Para manejar la interferencia del canal, hay algunas estrategias que se indican a continuación.

Es posible ortogonalizar los recursos, tiempo o frecuencia. Los transmisores envían la información de forma que lo que envía uno no interfiere con lo que envía el otro. También, otra posibilidad es tratar la interferencia como ruido aditivo blanco gaussiano, lo que es factible cuando h_c es mucho más débil que h_d , en este caso la interferencia causada por h_c puede diluirse en el ruido generado por el receptor. Por último, cuando h_c es comparable en orden de magnitud a h_d , es preferible decodificar la interferencia.

No obstante, RSMA puede aplicar más de una de las estrategias citadas, ya que divide la información en dos partes, una parte común que será decodificada por ambos receptores y una parte privada que será decodificada sólo por el receptor al que va dirigida. De esta forma, el receptor que no es destinatario de la parte privada maneja ésta como si fuera ruido. Así, RSMA decodifica una parte de la interferencia y procesa como ruido otra parte de la interferencia que le llega a través del canal gaussiano.

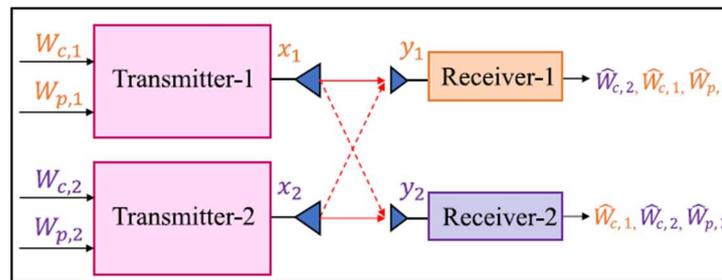


Figura 10.78. RSMA para dos usuarios SISO y canal con interferencia (IC)^[44].

Se adopta la estrategia de dividir la información del transmisor W_k en dos partes, una común $W_{k,c}$ y una privada $W_{k,p}$ como puede verse en la Figura 10.78. Un mismo código se utiliza para la parte común de ambos transmisores $W_{k,c}$ $k=1,2$ dentro de la trama común $s_{k,c}$ $k=1,2$ de forma que puede ser decodificada por cualquiera de los dos receptores. La parte privada de los transmisores $W_{k,p}$ $k=1,2$ se codifica de manera independiente para cada una de las tramas privadas s_k $k=1,2$, con lo que el transmisor Tx- k transmite la superposición de su trama común $s_{k,c}$ y de su trama privada o específica s_k asignando a cada trama una potencia determinada:

$$x_k = \sqrt{P_c} s_{c,k} + \sqrt{P_k} s_k$$

Donde, la potencia media transmitida cumple:

$$P_c + P_k = P$$

Y se denominará t a la relación:

$$t = \frac{P_c}{P}$$

Que es la fracción de potencia transmitida asignada a la trama común. La señal recibida en ambos receptores puede ser descrita por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} y_1 &= h_d x_1 + h_c x_2 + n_1 \\ y_2 &= h_c x_1 + h_d x_2 + n_2 \end{aligned}$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Si se considera el ruido adicional causado por las tramas privadas s_1 y s_2 como :

$$I = (1 - t) \cdot P \cdot (|h_c|^2 + |h_d|^2)$$

Se puede escribir que la tasa de transmisión de la trama común viene dada por:

$$R_c \leq \log_2\left(1 + \frac{tP|h_c|^2}{1 + I}\right)$$

Por simetría:

$$R_c \leq \log_2\left(1 + \frac{tP|h_d|^2}{1 + I}\right)$$

Mientras que, para la trama privada, la tasa de transmisión es:

$$R_p \leq \log_2\left(1 + \frac{(1 - t)P|h_d|^2}{1 + (1 - t)P|h_c|^2}\right)$$

Donde el término $(1 - t)P|h_c|^2$ en el denominador se debe a considerar la interferencia generada por el mensaje privado Tx-j en Rx-k.

Por último, la tasa de símbolo puede expresarse como:

$$R_{smb} = R_c + R_p$$

De acuerdo con todo lo aquí planteado, pueden establecerse los siguientes niveles de interferencia:

a) Muy débil.

En este caso ($|h_c| \ll |h_d|$) y por lo tanto toda la potencia transmitida recae sobre el mensaje privado, con lo que $t=0$ y

$$R_{smb} \leq \log_2\left(1 + \frac{P|h_d|^2}{1 + P|h_c|^2}\right)$$

Por lo tanto, no hay troceado de la información y todo el mensaje se envía como parte privada. Cualquier interferencia generada por el transmisor Tx-k sobre el receptor Rx-j es tratada como ruido, por lo que la estrategia de tratar la información como ruido es óptima.

b) Débil.

En este caso ($|h_c| \leq |h_d|$) y eligiendo t como:

$$(1 - t)P|h_c|^2 \approx 1$$

Se minimiza el impacto de una interferencia generada por un mensaje privado sobre cualquier otro receptor.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

c) Fuerte.

En este caso $|h_d|^2 \leq |h_c|^2 \leq |h_d|^2(1 + P|h_d|^2)$ la tasa de símbolo se maximiza cuando $t=1$ pero en ese supuesto solo hay trama común. Este nivel de interferencia impondría restricciones de velocidad de transmisión al equipo que esté tratando de decodificar y aplicar el proceso SIC a una trama común.

d) Muy fuerte.

En esta situación $|h_c|^2 \geq |h_d|^2(1 + P|h_d|^2)$ los enlaces directos h_d pueden transmitir con una tasa de transmisión:

$$R_{\text{símb}} \leq \log_2(1 + P|h_d|^2)$$

Que es equivalente a transmitir sin ningún tipo de interferencia, por lo que la estrategia de decodificar las interferencias es óptima.

En consecuencia, moviéndonos desde un nivel de interferencia muy débil a otro muy fuerte, el mensaje se codifica en tramas privadas, mezcla de privadas y comunes y sólo comunes.

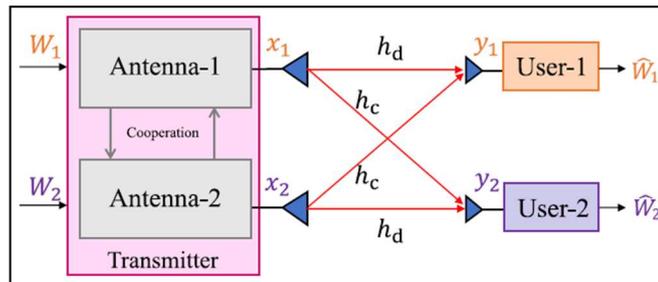


Figura 10.79. RSMA para dos usuarios MISO y canal con interferencia (IC)^[44].

Se estudia ahora el caso de un transmisor equipado con M antenas que da servicio a dos usuarios. Con este fin, se supone que ambas antenas funcionan de manera coordinada intercambiando información sobre el estado del canal (CSI) y mensajes como si pertenecieran a un mismo transmisor. Los dos usuarios del canal con interferencias son dos usuarios MISO de un canal de radio (BC) con $M=2$ antenas transmisoras en la estación base que emiten a dos usuarios receptores cuyos canales quedan definidos por h_1 y h_2 definidos como $\mathbf{h}_1=[h_d h_c]$ y $\mathbf{h}_2=[h_d h_c]$. Considerando una señal \mathbf{x} que se transmite, la señal que recibe un receptor k vendrá dada por:

$$y_k = \mathbf{x} \cdot \mathbf{h}_k + n_k$$

Este canal de radio multiantena es un bloque elemental de los modernos sistemas de comunicación vía radio en un enlace descendente. A continuación, se describe un escenario de dos usuarios en un enlace descendente.

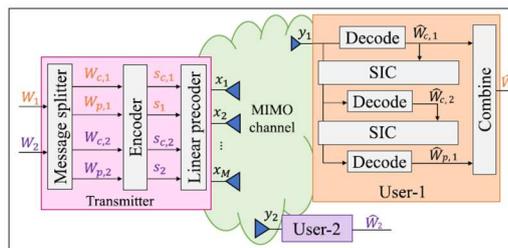


Figura 10.80. MISO RSMA para dos usuarios y sin combinador de mensajes^[44].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

La señal que se va a transmitir puede describirse como:

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1,2} \mathbf{p}_{c,k} s_{c,k} + \mathbf{p}_k s_k$$

En la expresión anterior, $\mathbf{p}_{c,k}$ es la codificación de la trama común $s_{c,k}$ y \mathbf{p}_k la codificación de la trama privada o específica s_k . Puesto que $s_{c,1}$ y $s_{c,2}$ son generadas en el mismo transmisor, se puede asignar $\mathbf{p}_{c,1} = \mathbf{p}_{c,2} = \mathbf{p}_c$ y la señal a transmitir:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c (s_{c,1} + s_{c,2}) + \sum_{k=1,2} \mathbf{p}_k s_k$$

Un usuario puede decodificar utilizando la técnica SIC o la decodificación conjunta de las tramas comunes $s_{c,1}$ y $s_{c,2}$ y después de la trama privada. Utilizando SIC, un receptor necesitaría 2 capas de SIC. Una para las tramas comunes y otra para la trama privada. En conclusión, esta arquitectura genera cuatro tramas para enviar dos mensajes y necesita dos SIC en cada receptor.

Puede contemplarse una segunda arquitectura MISO RSMA consistente en generar una sola trama común para los dos mensajes:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{k=1,2} \mathbf{p}_k s_k$$

En este caso, la señal recibida por un usuario k , será:

$$y_k = \mathbf{h}_k \mathbf{p}_c s_c + \mathbf{h}_k \mathbf{p}_k s_k + \mathbf{h}_k \mathbf{p}_j s_j + n_k$$

Esta arquitectura se conoce como RSMA de una sola capa ya que es suficiente un dispositivo SIC en el receptor. Se simplifica la complejidad en el transmisor puesto que sólo se generan tres mensajes en lugar de cuatro. En el receptor, la decodificación se lleva a cabo con un solo SIC.

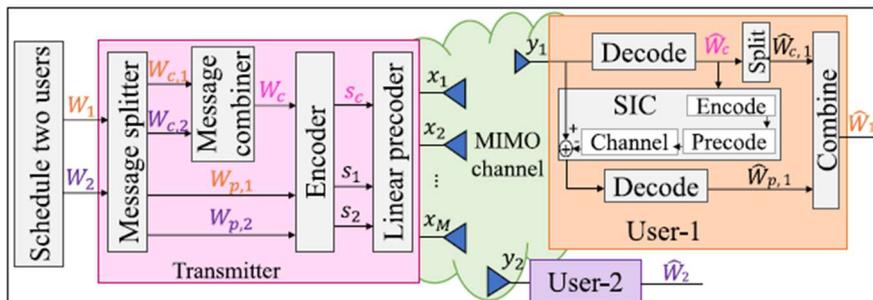


Figura 10.81. MISO RSMA para dos usuarios en enlace descendente y combinador de mensajes (1 capa RS)^[44].

Una ampliación interesante del sistema es que uno de los receptores, a requerimiento del transmisor, puede actuar como un repetidor. Esto se conoce como funcionamiento cooperativo del canal de radio.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

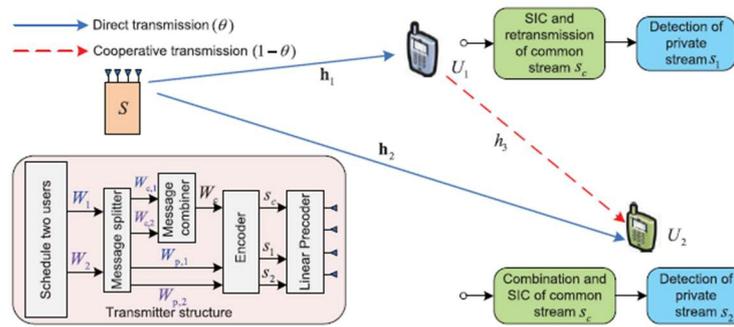


Figura 10.82. Funcionamiento cooperativo de un enlace descendente RSMA utilizando un UE^[44].

Este tipo de arquitectura puede ser de mucha utilidad en casos de desvanecimiento profundo de uno de los canales, que es sustituido como alternativa, por un equipo de usuario actuando como repetidor de forma cooperativa.

Por último, en el enlace descendente, se va a describir un sistema de dos usuarios MIMO RSMA. El sistema tiene M antenas transmisoras y N antenas receptoras por usuario. El transmisor emite dos vectores N-dimensionales como mensajes \mathbf{w}_1 y \mathbf{w}_2 al usuario 1 y al usuario 2, respectivamente.

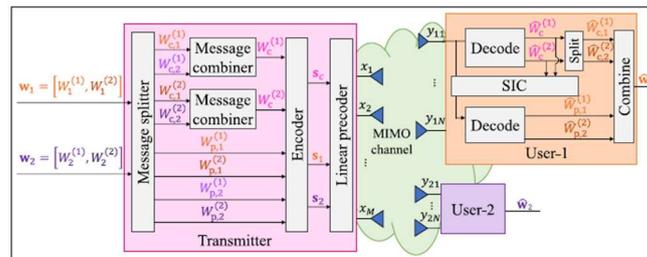


Figura 10.83. Enlace descendente MIMO RSMA para dos usuarios^[44].

Cada uno de los N mensajes es dividido en una parte común y una parte privada. Todas las partes comunes de ambos usuarios son combinadas y codificadas en un vector N-dimensional de tramas comunes s_c y las partes privadas lo hacen en dos vectores N-dimensionales s_k de tramas privadas. La señal transmitida podría expresarse como:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{k=1,2} \mathbf{p}_k s_k$$

La figura anterior asigna a N el valor N=2. Hay cuatro mensajes a transmitir $\mathbf{w}_1 = \{W_1^{(1)}, W_1^{(2)}\}$ y $\mathbf{w}_2 = \{W_2^{(1)}, W_2^{(2)}\}$ que se dividen en una parte común y una privada:

$$W_1^{(1)} = \{W_{c,1}^{(1)}, W_{p,1}^{(1)}\}$$

$$W_1^{(2)} = \{W_{c,1}^{(2)}, W_{p,1}^{(2)}\}$$

$$W_2^{(2)} = \{W_{c,2}^{(2)}, W_{p,2}^{(2)}\}$$

$$W_2^{(1)} = \{W_{c,2}^{(1)}, W_{p,2}^{(1)}\}$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Las partes comunes se combinan en $W_c^{(1)}$ y $W_c^{(2)}$ y se codifican en dos tramas comunes $s_c^{(1)}$ y $s_c^{(2)}$, que forman una trama común que es un vector de 2 dimensiones $\mathbf{s}_c = [s_c^{(1)}, s_c^{(2)}]^T$, las partes privadas son codificadas en cuatro partes privadas:

$$W_{p,1}^{(1)} \rightarrow s_1^{(1)}, W_{p,1}^{(2)} \rightarrow s_1^{(2)}$$

$$W_{p,2}^{(1)} \rightarrow s_2^{(1)}, W_{p,2}^{(2)} \rightarrow s_2^{(2)}$$

que dan lugar a dos vectores de 2 dimensiones: $\mathbf{s}_1 = [s_1^{(1)}, s_1^{(2)}]^T$ y $\mathbf{s}_2 = [s_2^{(1)}, s_2^{(2)}]^T$. En los receptores, ambos usuarios decodifican la trama de vector común utilizando ambas antenas y llevando a cabo un SIC, decodifican sus respectivas tramas privadas.

En relación con el funcionamiento RSMA del enlace ascendente, el sistema más sencillo sería el SIMO RSMA de dos usuarios. Se trata de dos usuarios que transmiten cada uno con un equipo de una sola antena.

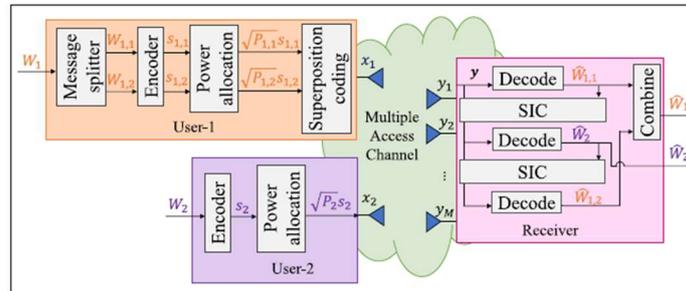


Figura 10.84. Enlace ascendente SIMO RSMA para dos usuarios^[44].

Un equipo de usuario 1 divide su mensaje en dos partes y la codifica en dos tramas, $s_{1,1}$ y $s_{1,2}$ asignando a cada trama una potencia $P_{1,1}$ y $P_{1,2}$ respectivamente. Se superponen las tramas y se envía la señal del usuario 1:

$$x_1 = \sqrt{P_{1,1}} s_{1,1} + \sqrt{P_{1,2}} s_{1,2}$$

El usuario 2 codifica su mensaje en una sola trama s_2 a la que asigna una potencia P_2 , de forma que:

$$x_2 = \sqrt{P_2} s_2$$

La señal recibida en la estación base es:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_1 x_1 + \mathbf{h}_2 x_2 + \mathbf{n}$$

$$\mathbf{y} = \sqrt{P_{1,1}} \mathbf{h}_1 s_{1,1} + \sqrt{P_{1,2}} \mathbf{h}_1 s_{1,2} + \sqrt{P_2} \mathbf{h}_2 s_2 + \mathbf{n}$$

Donde \mathbf{h}_1 y \mathbf{h}_2 son los vectores que definen el canal y \mathbf{n} es un vector AWGN. El receptor puede emplear SIC o decodificación conjunta para decodificar las tres tramas $s_{1,1}$, $s_{1,2}$, s_2 . Si se utiliza SIC se necesitan dos capas en el receptor.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

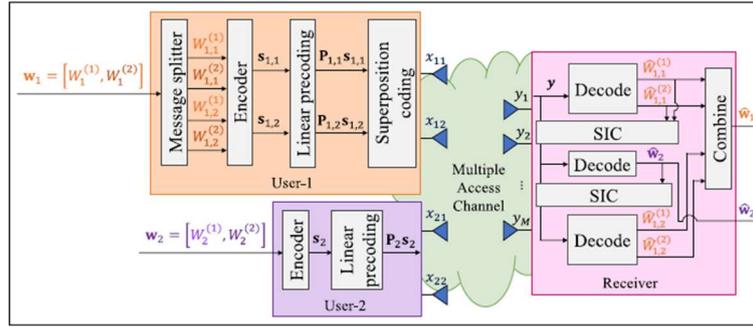


Figura 10.85. Enlace ascendente MIMO RSMA para dos usuarios [44].

En definitiva, el sistema crea dos usuarios virtuales al dividir el mensaje de uno de ellos en dos y envía tres tramas al receptor, necesitando dos capas de SIC para obtener el mensaje privado enviado. Este caso engloba los casos OMA y MOMA para dos usuarios.

El siguiente ejemplo es el enlace ascendente MIMO RSMA para dos usuarios, de tal manera que cada usuario dispone de N antenas y el receptor de M antenas. Así cada usuario k transmite un vector N dimensional de mensajes:

$$\mathbf{w}_k = [W_k^{(1)}, W_k^{(2)}, \dots, W_k^{(N)}]$$

Cada uno de los N mensajes del usuario 1, $\mathbf{w}_1 = [W_1^{(1)}, W_1^{(2)}, \dots, W_1^{(N)}]$ es dividido en dos, por ejemplo $W_1^{(1)}$ se divide en $W_{1,1}^{(1)}$ y $W_{1,2}^{(1)}$ y codificado en dos tramas $s_{1,1}^{(1)}$ y $s_{1,2}^{(1)}$. Al final se obtienen dos vectores N -dimensionales:

$$\mathbf{s}_{1,1} = [s_{1,1}^{(1)}, s_{1,1}^{(2)}, \dots, s_{1,1}^{(N)}]^T$$

$$\mathbf{s}_{1,2} = [s_{1,2}^{(1)}, s_{1,2}^{(2)}, \dots, s_{1,2}^{(N)}]^T$$

Que son codificados linealmente y superpuestos para la transmisión por el canal radio. Así la señal enviada por el usuario 1 vendrá dada por:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{P}_{1,1}\mathbf{s}_{1,1} + \mathbf{P}_{1,2}\mathbf{s}_{1,2}$$

En donde $\mathbf{P}_{1,1}$ y $\mathbf{P}_{1,2}$ son los vectores de codificación. Para el usuario 2, la señal transmitida es:

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}_2\mathbf{s}_2$$

Cada mensaje del vector \mathbf{w}_1 correspondiente al usuario 1, es dividido en dos partes:

$$W_1^{(1)} = [W_{1,1}^{(1)}, W_{1,2}^{(1)}]$$

$$W_1^{(2)} = [W_{1,1}^{(2)}, W_{1,2}^{(2)}]$$

Los cuatro submensajes son codificados en cuatro tramas y se crean dos vectores trama de 2-dimensiones:

$$\mathbf{s}_{1,1} = [s_{1,1}^{(1)}, s_{1,1}^{(2)}]^T$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$\mathbf{s}_{1,2} = [s_{1,2}^{(1)}, s_{1,2}^{(2)}]^T$$

Que son linealmente codificados y superpuestos para formar la señal x_1 . Para el usuario 2, el mensaje w_2 se codifica directamente en dos tramas:

$$\mathbf{s}_2 = [s_2^{(1)}, s_2^{(2)}]^T$$

Al igual que x_1 , s_2 se codifica linealmente para obtener x .

A continuación, se generalizan los resultados expuestos para 2 usuarios a un número indeterminado de K usuarios.

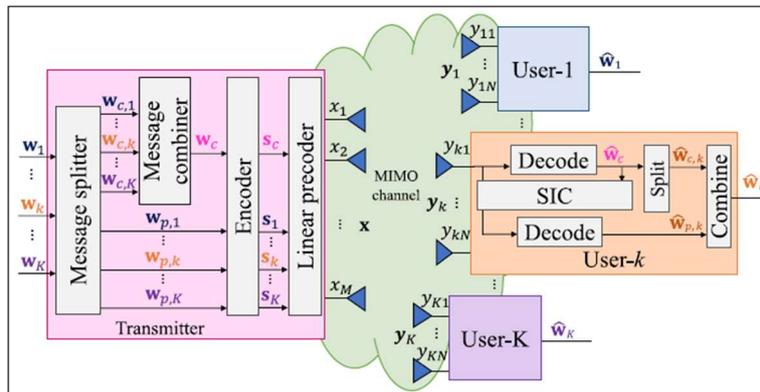


Figura 10.86. Enlace descendente MIMO RSMA de una capa para K usuarios [44].

En primer lugar, se considera un canal de radio MIMO con M antenas que dan servicio a K usuarios, cada uno equipado con N antenas. Suponemos que un vector de mensajes de dimensión Q_k es enviado al usuario k, p.e.

$$\mathbf{w}_k = [W_k^{(1)}, W_k^{(2)}, \dots, W_k^{(Q_k)}]$$

La dimensión del mensaje ha de cumplir:

$$Q_k \leq \text{mín}(M, N)$$

La señal transmitida a través del canal radio, llega al usuario k:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k^H \mathbf{x} + \mathbf{n}_k$$

Donde \mathbf{H} es la matriz respuesta del canal y \mathbf{n} es la potencia ruido blanco gaussiano aditivo. En una configuración de 1 sola capa, el mensaje original se descompone en una parte común y otra privada:

$$\mathbf{w}_{c,k} = [W_{c,k}^{(1)}, W_{c,k}^{(2)}, \dots, W_{c,k}^{(Q_k)}]$$

$$\mathbf{w}_{p,k} = [W_{p,k}^{(1)}, W_{p,k}^{(2)}, \dots, W_{p,k}^{(Q_k)}]$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El conjunto de todas las partes comunes de todos los usuarios se codifica como un solo vector mensaje:

$$\mathbf{w}_c = [W_{c,1}, W_{c,2}, \dots, W_{c,K}]$$

Que se codifica en una trama:

$$\mathbf{s}_c = [s_c^{(1)}, s_c^{(2)}, \dots, s_c^{(Q_k)}]^T$$

Esta trama es decodificada por todos los usuarios. El vector mensaje privado para el usuario k, $\mathbf{w}_{p,k}$ se codifica en una trama:

$$\mathbf{s}_k = [s_k^{(1)}, s_k^{(2)}, \dots, s_k^{(Q_k)}]^T$$

Los K+1 vectores trama de datos se codifican en el transmisor $\mathbf{s}_c, \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_k$ y son superpuestos, resultando una señal transmitida:

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}_c \mathbf{s}_c + \sum_{k=1}^K \mathbf{P}_k \mathbf{s}_k$$

Siendo $\mathbf{P}_c \dots \mathbf{P}_k$ los vectores de codificación y la señal recibida por el usuario k:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_k^H \mathbf{P}_c \mathbf{s}_c + \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_k^H \mathbf{P}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_k$$

El usuario k utiliza una sola capa de SIC o decodificación conjunta para los dos vectores trama \mathbf{s}_c y \mathbf{s}_k .

Cuando los sistemas son MISO es decir el transmisor tiene múltiples antenas y el receptor una sola, se propone la denominada configuración jerárquica. Existe también una configuración generalizada y otra DPC (Dirty Paper Coding).

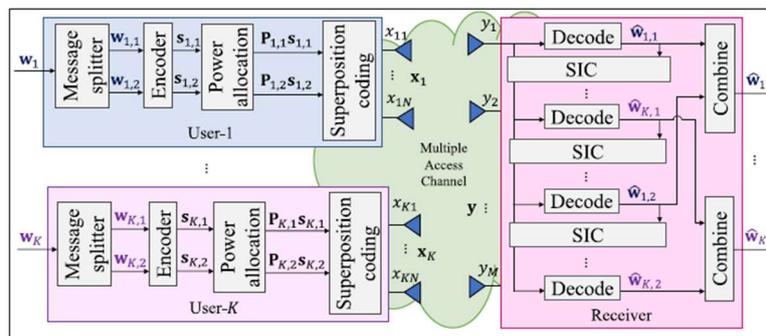


Figura 10.87. Enlace ascendente MIMO RSMA de una capa para K usuarios [44].

Un vector mensaje de dimensión Q_k :

$$\mathbf{w}_k = [W_k^{(1)}, W_k^{(2)}, \dots, W_k^{(Q_k)}]^T$$

Se transmite desde el usuario k al receptor, con $Q_k \leq \min(M, N)$. Cada mensaje de usuario $W_k^{(i)}$ se divide en dos submensajes $W_{k,1}^{(i)}$ y $W_{k,2}^{(i)}$ que dan lugar a dos vectores $\mathbf{w}_{k,1}$ y $\mathbf{w}_{k,2}$ y son codificados de forma independiente en $\mathbf{s}_{k,1}$ y $\mathbf{s}_{k,2}$. Utilizando los precódigos $\mathbf{P}_{k,1}$ y $\mathbf{P}_{k,2}$ para los vectores trama y superponiendo en el transmisor los dos bloques:

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{P}_{k,1}\mathbf{s}_{k,1} + \mathbf{P}_{k,2}\mathbf{s}_{k,2}$$

Las señales de todos los usuarios transmitidas vía MIMO que llegan al receptor vendrán dadas por la expresión:

$$\mathbf{y} = \sum_k \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}$$

En la transmisión coordinada, los datos de cada usuario son enviados por una de las celdas, pero la potencia transmitida, la forma del haz de radiación y la programación de usuarios dependen de la coordinación entre las celdas. Utilizando RSMA, la interferencia entre celdas puede ser codificada parcialmente o tratada como ruido, lo que mejora la gestión de la interferencia entre celdas.

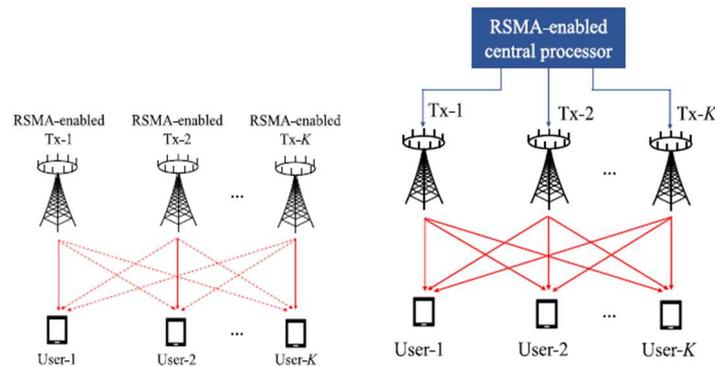


Figura 10.88. Funcionamiento coordinado y cooperativo^[45].

La transmisión cooperativa, también conocida como transmisión MIMO conjunta, está causada por el canal radio MIMO. Requiere que los datos destinados a los usuarios y la información sobre el estado del canal (CSI) estén distribuidos entre varias estaciones base o puntos de acceso. En una red MIMO con posibilidad de dar servicio a K usuarios de manera conjunta, los K transmisores están conectados a un procesador central con acceso a todos los mensajes destinados a los usuarios y a la información del estado de cada uno de los canales utilizados por los usuarios. La transmisión cooperativa permite a todos los transmisores funcionar de manera conjunta como si se tratara de un solo transmisor, aplicándose las estrategias RSMA para el enlace descendente. En comparación con un sistema MIMO de un solo punto de acceso, el funcionamiento cooperativo presenta limitaciones en la potencia transmitida y la capacidad del enlace vía radio. Hay que pensar que un punto de acceso incluido en un sistema cooperativo cubre equipos de usuario en principio asignados a otros puntos de acceso diferentes, lo que significa que se necesita una mayor potencia y mayor capacidad del canal.

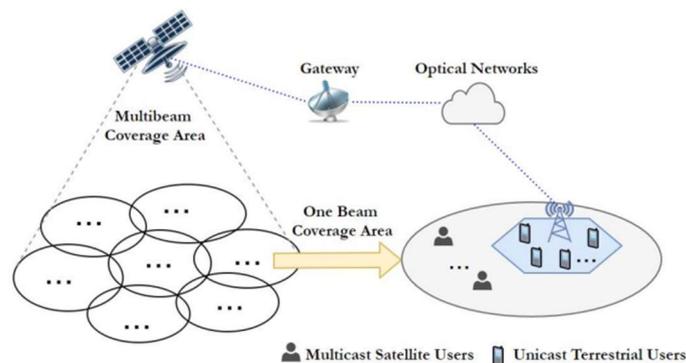


Figura 10.89. Modelo de red integrada satélite-terrestre con utilización de RSMA para reducir interferencias^[46].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Se trata de un sistema de cobertura vía satélite, por un lado, hay cobertura directa para usuarios en zonas donde la implantación de la cobertura terrestre no es posible o es muy difícil. Por otra parte, la misma información es enviada a la estación-hub terrestre y desde allí, a una o varias estaciones base desde donde se podría dar servicio también a usuarios de telefonía móvil celular. La Gateway (GW) terrena actúa como un centro de control de toda la red. Los dos subsistemas, terrestre y aeroespacial, pueden compartir recursos, y funcionar de forma coordinada. El acceso múltiple RSMA se utiliza tanto en el satélite como en la estación base con el objeto de reducir el nivel de interferencia tanto intracelda como entre los dos subsistemas. Para un funcionamiento coordinado, el satélite (GW) y la estación base intercambian información sobre el estado del canal en los enlaces interferentes tratando de conformar los haces de radiación para evitar interferencias. En el funcionamiento cooperativo, satélite y estación base intercambian información del estado del canal y también datos que serán transmitidos por el canal más adecuado entre todos los enlaces radio, sean interferentes o no, para que la información llegue al usuario con la mejor calidad posible.

Algunos resultados prácticos muestran la capacidad del sistema de acuerdo con el criterio de Shannon para RSMA, SDMA y NOMA para un canal radio MISO con CSI imperfecto en el transmisor.

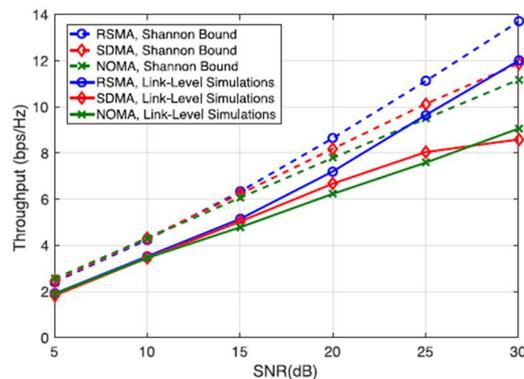


Figura 10.90. Capacidad del canal con respecto a la relación señal-ruido^[45].

El transmisor con $M=2$ antenas y $K=2$ usuarios de una sola antena. También, las simulaciones del canal a nivel de enlace utilizando el método de Monte Carlo, puede verse como con niveles de señal ruido altos el sistema de acceso SDMA satura y el mejor comportamiento corresponde a RSMA.

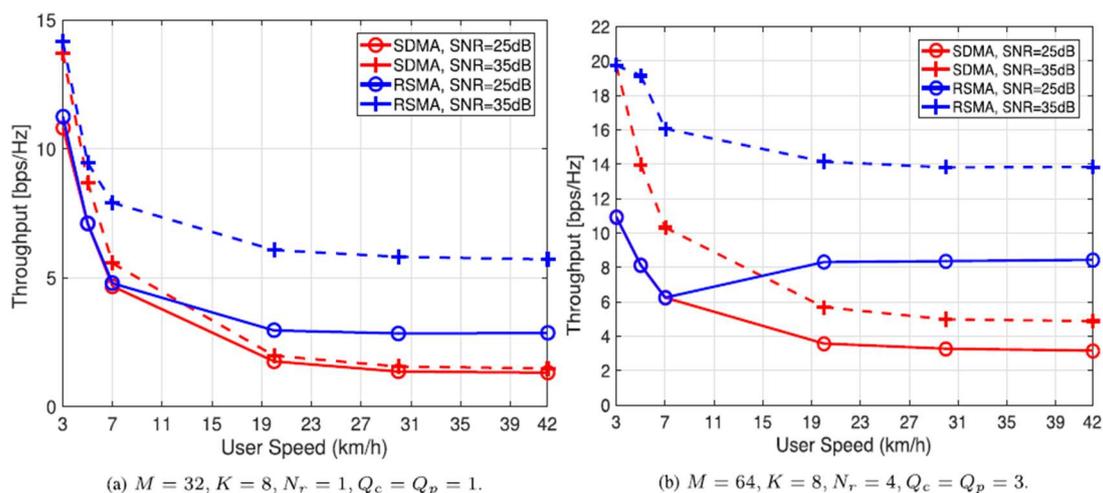


Figura 10.91. Capacidad del canal con respecto a la velocidad del móvil y un valor S/R ^[45].

La figura anterior representa el comportamiento del canal para un canal radio MIMO con CSIT imperfecto, para los casos de $M=32$ y 64 , número de usuarios $K=8$ y mensajes de la trama común

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

y de la trama privada igual a 1 en un caso y 3 en el otro. El estudio comprueba la variación de la capacidad del canal con la velocidad de desplazamiento del usuario y el retardo producido en la información del estado del canal. Las gráficas demuestran que la capacidad del canal disminuye con la velocidad en gran medida con acceso SDMA y se comporta mejor con RSMA.

Con carácter general puede reseñarse que el sistema de acceso múltiple RSMA tiene las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas

Universalidad: El sistema RSMA es integral, abarcando OMA, SDMS, NOMA y sistemas multiusuario, eliminando la necesidad de un sistema que conmute entre cada uno de los mencionados OMA, SDMS, NOMA y multiusuario.

Flexibilidad: RSMA es fácilmente adaptable a las variaciones de la carga de tráfico, tanto si crece el número de usuarios como si disminuye.

Fortaleza: El crecimiento en la utilización de los sistemas RSMA en redes vía radio multiantena, se atribuye en principio a su capacidad para conseguir una ganancia óptima en el multiplexado espacial con una información del estado del canal en transmisión (CSIT) incompleto.

Mejora la eficiencia espectral: RSMA supera a otros sistemas de acceso múltiple en eficiencia espectral tanto con CSIT completo como incompleto.

Mejora la eficiencia energética: Se ha demostrado a través de diferentes estudios que RSMA supera a otros sistemas de acceso múltiple en eficiencia energética.

Bajo nivel de complejidad: RSMA destaca por su simplicidad tanto en su diseño en transmisión como en la recepción. Cada usuario sólo necesita una capa de cancelación sucesiva de interferencias para decodificar y cancelar la trama común de los mensajes.

Extensión de cobertura: El RSMA cooperativo está considerado como un método para aumentar las tasas de transmisión en el límite de la cobertura de la celda, proporcionando una extensión de cobertura e incluyendo el funcionamiento en colaboración entre UE que posibilita que un usuario decodifique y retransmita a otros usuarios la parte común de la trama.

Baja latencia: RSMA alcanza la misma tasa de transmisión que NOMA y SDMA, pero con tramas de menor longitud, lo que se traduce en una menor latencia.

Mejora de la seguridad: Se puede ajustar el nivel de confidencialidad de los mensajes y, en consecuencia, variar la eficiencia espectral de manera anónima.

Inconvenientes:

Requisitos SIC en el receptor: Algunos esquemas RSMA, como el RS generalizado GRS, tienen la característica de que el número de capas SIC para cada usuario aumenta con el número de usuarios, lo que aumenta la complejidad del receptor y también da lugar a la propagación de errores.

Alta complejidad de codificación: Comparado con el resto de los esquemas de MA ya mencionados, RSMA necesita una parte común de la trama obtenida del troceado y recombinación del mensaje.

Alta optimización de la carga computacional: En términos de asignación de recursos y de diseño del precodificador, necesita precodificadores para la parte común y la parte privada de los mensajes que han de optimizarse conjuntamente, lo que implica una carga computacional mayor que la necesaria para el resto de los esquemas de AM.

10.7.4. Momento Angular Orbital (OAM)

El momento angular de una componente espectral de una señal que se propaga es:

$$\mathbf{J} = \varepsilon_0 \int \mathbf{r} \times \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{B}^*\} dV$$

Donde \mathbf{r} es el vector de posición, ε_0 es la permitividad del espacio libre y $\mathbf{E} \times \mathbf{B}^*$ es el vector de Poynting de la señal que se propaga. Si el vector de Poynting tiene una componente en un plano transversal a la dirección de propagación, se obtienen dos componentes del momento angular:

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$$

Que se conoce como descomposición de Humblet, siendo \mathbf{L} el momento angular orbital (OAM) y \mathbf{S} el momento angular de spin (SAM). Las expresiones de OAM y SAM son:

$$\mathbf{L} = \varepsilon_0 \int \text{Re}\{j\mathbf{E}^* (\hat{\mathbf{L}} \cdot \mathbf{A})\} dV$$

$$\mathbf{S} = \varepsilon_0 \int \text{Re}\{\mathbf{E}^* \times \mathbf{A}\} dV$$

En la expresión correspondiente al OAM se ha utilizado el operador $\hat{\mathbf{L}} = -j(\mathbf{r} \times \nabla)$, con j el indicador de parte imaginaria y \mathbf{A} el potencial vector magnético. El momento angular de spin SAM, describe la polarización de la señal, de forma que $\mathbf{S} = \mp \mathbf{1}$ corresponde a ondas con polarización circular a derechas y a izquierdas y $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ está asociado a una onda con polarización lineal. El momento angular orbital OAM, es el que caracteriza la fase en el frente de onda, pudiendo caracterizarse como una señal electromagnética afectada de un factor de fase:

$$\mathbf{L}(\mathbf{r}, \varphi) = A(\mathbf{r}) \cdot e^{jl\varphi}$$

Siendo $A(\mathbf{r})$ es la amplitud de la señal electromagnética, \mathbf{r} el vector de posición y l el número de modo OAM que determina la forma de la fase en el frente de onda.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

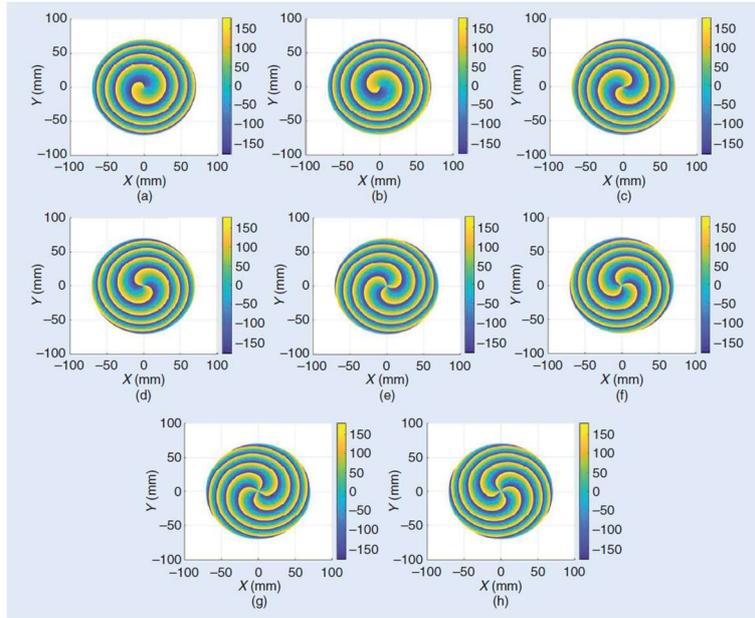


Figura 10.92. Distribución de fases para diferentes modos OAM: (a) $l = 1$, (b) $l = -1$, (c) $l = 2$, (d) $l = -2$, (e) $l = 3$, (f) $l = -3$, (g) $l = 4$, y (h) $l = -4$ ^[52].

El modo $l = 0$ se corresponde con una onda plana. Cada modo es ortogonal a los demás, de forma que la señal transmitida a través de un modo no interfiere con otra señal transmitida utilizando un modo distinto.

a) Generación de modos OAM.

Las señales OAM son muy diferentes de las ondas planas con las que tratamos habitualmente y vienen afectadas de un factor de rotación de fase $e^{jl\varphi}$. No obstante, existen dispositivos que podrían calificarse sencillos y de bajo coste para la generación de modos OAM como son las superficies SPP (Spiral Phase Plate), los arrays circulares UCA (Uniform Circular Antenna) y las Meta-superficies.

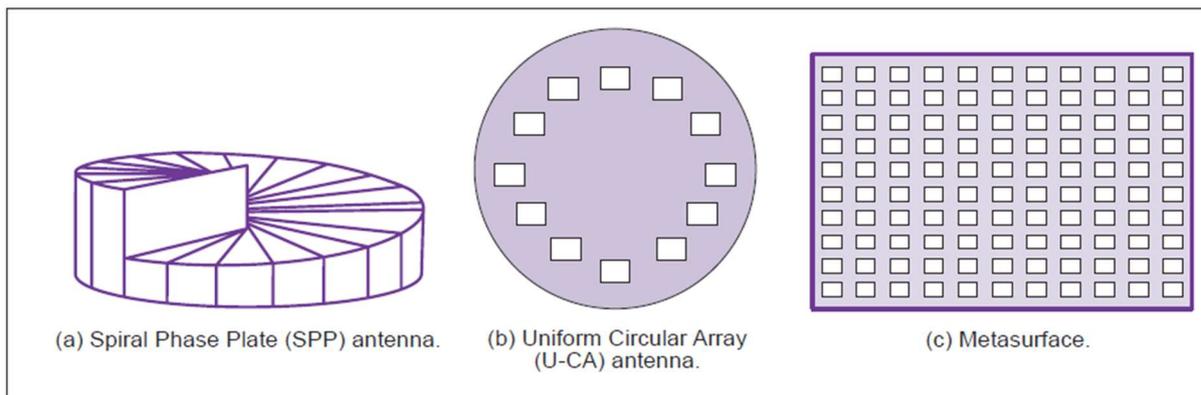


Figura 10.93. Formas de generación de modos OAM: SPP, UCA y Meta superficie^[53].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Array circular de dipolos cortos (UCA).

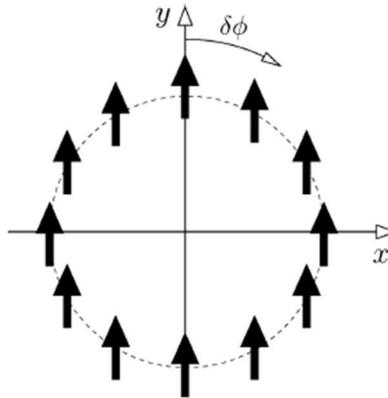


Figura 10.94. Configuración típica de un array circular de antenas para generar modos OAM^[51].

Los desplazamientos de fase de un array circular vienen dados por:

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{N} \cdot l$$

Siendo la fase de excitación del elemento n-simo:

$$\varphi_n = (n - 1) \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot l$$

El factor de array de una configuración de este tipo viene dado por:

$$G = e^{jl\varphi} J_l(kD \text{ sen } \theta)$$

Donde J_l es la función de Bessel, D es el diámetro del array, θ es el ángulo que forma la normal al plano del array con el vector de posición y k la constante de propagación. El número de modos que se propagan está acotado según la expresión:

$$-\frac{N}{2} < l < \frac{N}{2}$$

Es decir que el número de elementos del array es el que establece el modo más alto que se propaga, también puede expresarse como:

$$|l| \geq \frac{N}{2}$$

Y el número total de modos que pueden propagarse es igual al orden del array N .

Por otra parte, cuando el diámetro del array D aumenta de forma significativa, el modo que se propaga es $l = 1$. En el caso de que los dipolos no sean cortos, por ejemplo, dipolos de $\frac{\lambda}{2}$, el modo que se propaga es el

$$l = \frac{N}{2} - 1$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Para $N = 4$, $l = 1$, en este caso el diagrama de radiación que se obtiene es el que se muestra a continuación:

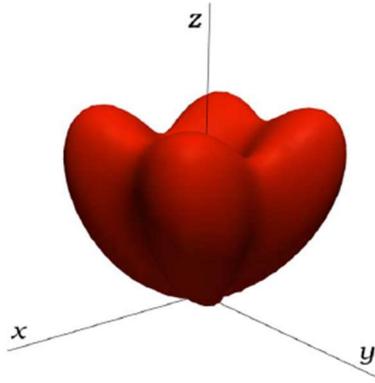


Figura 10.95. Diagrama de radiación de un array circular de orden $N=4$ ^[51].

Lo que implica que se puede enviar una información en cuatro direcciones diferentes, entroncando con los sistemas MIMO, dado que realiza funciones de multiplexado espacial y por tanto de acceso múltiple.

Antena spiral phase plate (SPP).

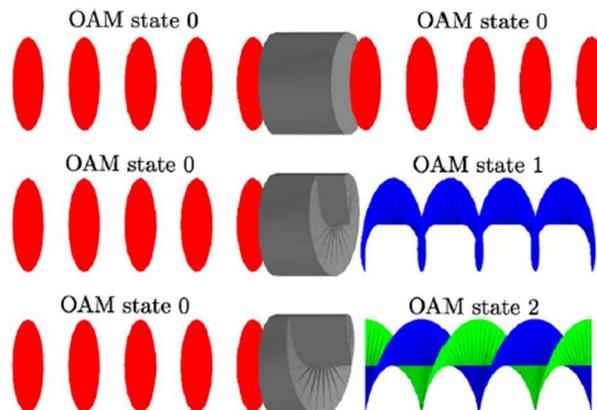


Figura 10.96. Generación de modos OAM a partir de superficies SPP y frentes de ondas planas^[54].

Una pletina de este tipo permite fijar la geometría del frente de onda y por tanto el modo que se propaga. El retardo de fase que origina la SPP en una onda que incide sobre la superficie y la atraviesa, es:

$$\Delta\theta(\theta, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(n - n_0)h_s\theta}{2\pi} + nh_0 \right]$$

Siendo el número de modo que se propaga después del paso por la SPP:

$$l = h_s(n - n_0)\lambda$$

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

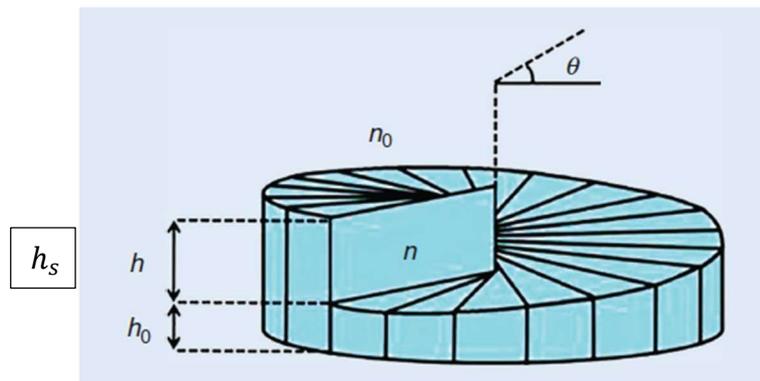


Figura 10.97. Representación esquemática de una SPP ideal^[52].

Donde n es el índice de refracción de material con el que se ha fabricado la SPP, n_0 el índice de refracción del medio en el que está inmersa la SPP, λ es la longitud de onda de la señal incidente en la SPP, h_s es la altura del paso de la SPP, h_0 es la altura del sustrato con el que está fabricada la SPP, cumpliéndose:

$$h = h_0 + h_s \left(\frac{\theta}{2\pi} \right)$$

De acuerdo con la fórmula del retardo de fase originado por una SPP, cuando el ángulo de rotación θ varía de 0 a 2π , el incremento $\Delta\theta$ es $2\pi l$.

b) Acceso múltiple OAM.

De acuerdo con lo reseñado hasta ahora, el diagrama de radiación de un array circular presentaría un aspecto como el de la figura, con un número de haces de radiación igual al orden o al número de dipolos del array.

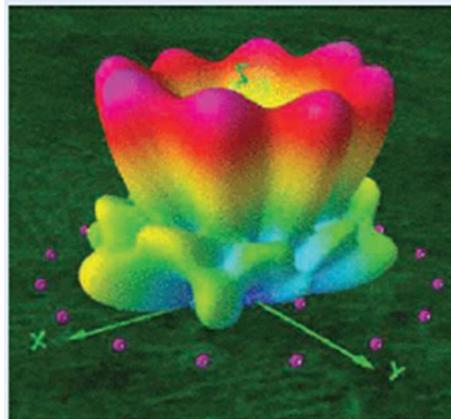


Figura 10.98. Diagrama de radiación en 3-D de un array circular de orden 8 ^[52].

Además, el número posible de modos de propagación OAM también es de 8:

$$-4 < l < 4$$

De forma que habría un multiplexado espacial por el número de haces y un multiplexado en fase del frente de onda, que también podría ser espacial, y los dos del mismo orden. Este último, implicaría la detección de fase en la recepción de las señales. En consecuencia, la

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

modulación/multiplexación OAM encajaría como un sistema MIMO, de hecho, en la figura se muestra un trabajo sobre ancho de banda de funcionamiento para 1Tbps en el año 2023 donde la señal modulada OFDM-QAM 1024, se distribuye espacialmente en un determinado número de canales que viene fijado por el orden de la matriz MIMO. En 2024, un trabajo similar sustituye la matriz MIMO por los modos OAM.

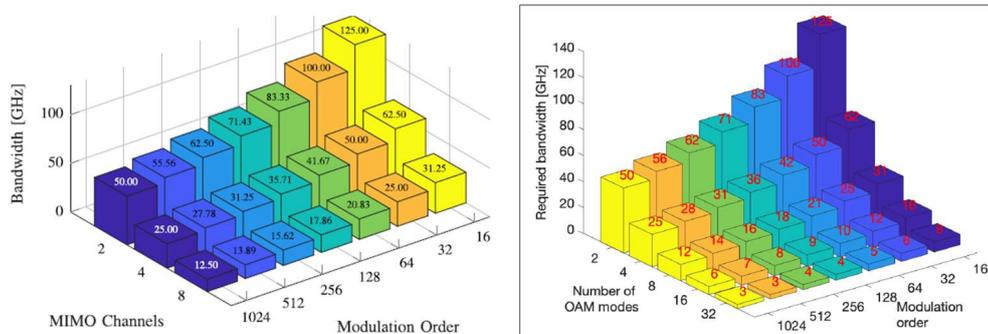


Figura 10.99. Distribución espacial de canales para transmitir 1Tbps en 2023^[6] (i) y en 2024^[55] (d).

El sistema necesita detección coherente y relación señal ruido por encima de los 8 ó 10 dB para obtener una buena señal en la recepción.

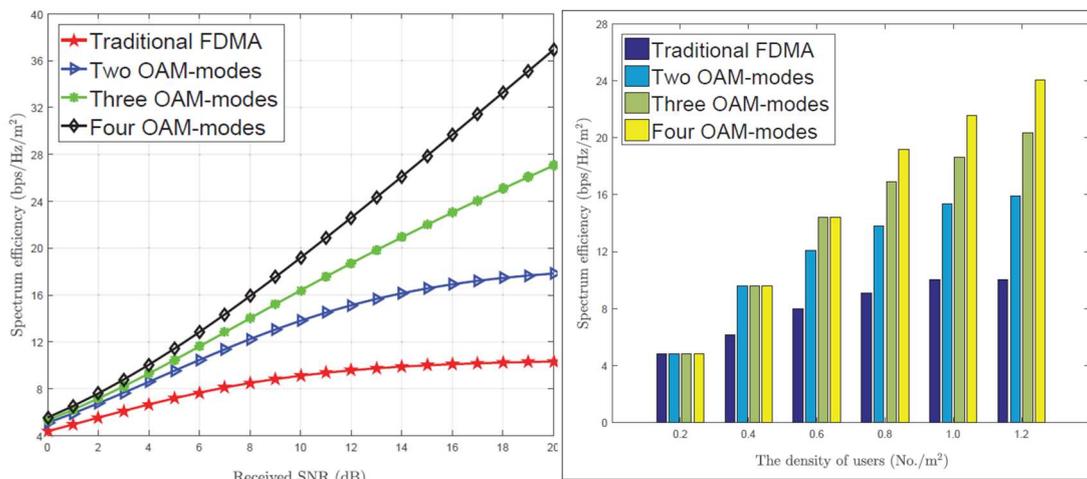


Figura 10.100. Eficiencia espectral en función de la relación señal ruido y la densidad de usuarios^[53].

Por otra parte, se estima que la eficiencia espectral del multiplexado OAM, para un mismo número de usuarios por metro cuadrado, casi puede triplicar a la eficiencia del OFDMA para los casos en que se propague más de un modo. También se observa como la eficiencia espectral para el caso de propagación de más de un modo, varía más con el incremento de la relación señal ruido para los modos OAM que para el OFDMA.

10.8. Detección de gases

La actividad humana, la expansión industrial, el transporte y la expansión de la actividad agrícola han contribuido al incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Todas estas actividades emiten GEI como anhídrido carbónico (CO_2), metano CH_4 , anhídrido nitroso N_2H , entre otros. Estos gases permiten que la luz del sol atraviese la atmósfera terrestre, pero atrapan el calor en una zona próxima a la superficie de nuestro planeta, contribuyendo al calentamiento global. La teledetección de estos gases GEI y otros también nocivos para nuestra salud como el ozono, permitirá establecer una política para reducir las emisiones de gases perjudiciales para la salud humana. La aparición de nuevas técnicas de teledetección permitirá reducir los costes de implantación y mantenimiento, así como del uso masivo de recursos en forma de una infraestructura específica de teledetección. La 6G podrá integrar de manera novedosa los sistemas de teledetección y de comunicaciones, recolectando datos que permitan monitorizar la concentración en la atmósfera de gases nocivos para la salud. La utilización de un array de nanoantenas que trabajen a diferentes bandas de frecuencia es lo que se necesita para llevar a cabo esta función de teledetección. Esto es porque los transceptores de radio utilizados en comunicaciones suelen evitar las bandas de frecuencias en torno a los THz debido a los altos niveles de absorción molecular que atenúan en gran medida las señales radiadas. Sin embargo, estas frecuencias son las necesarias para la teledetección de los GEI y otros gases nocivos. El objetivo es utilizar aquellos rangos de frecuencias que no pueden emplearse en comunicaciones pero que son de utilidad para la detección y medida de ciertos gases que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Aunque la mayoría de los sistemas de teledetección de gases utilizan señales chirp, sin embargo, para frecuencias en el rango de los THz es probable que los sistemas de una sola portadora sean los más apropiados debido al elevado coeficiente entre el valor medio y el valor de pico de las señales multiportadora.

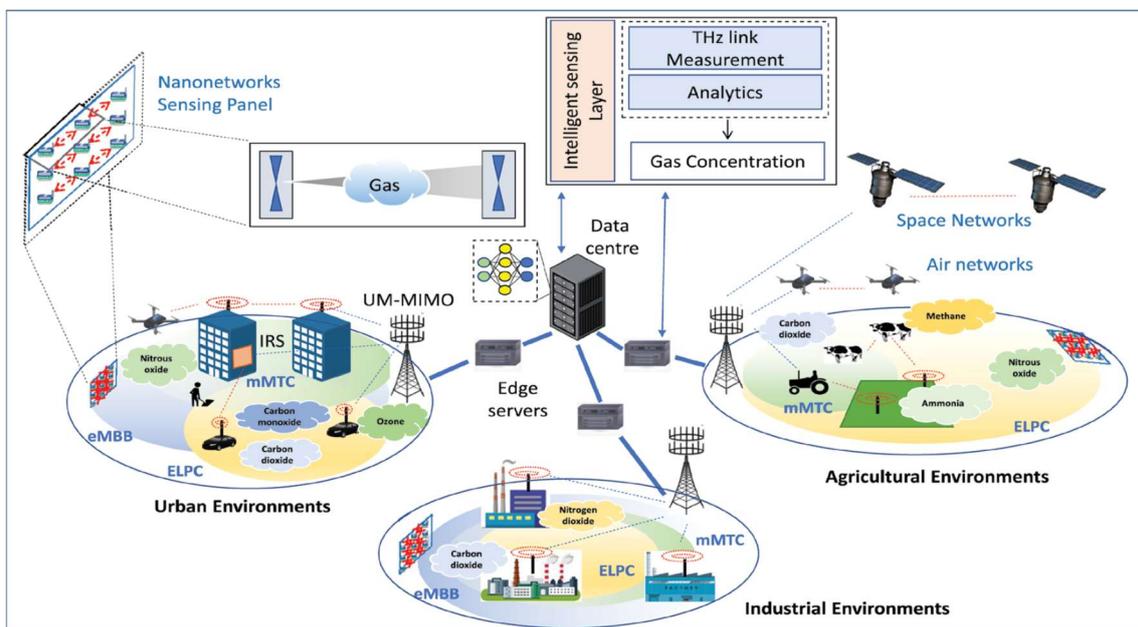


Figura 10.101. Arquitectura de red para comunicaciones y teledetección de gases^[48].

La espectroscopía en la banda de los THz es una técnica consistente en emitir una señal electromagnética y medir la transmisión, reflexión y la absorción en ese rango de frecuencias. Una de las mayores ventajas de esta técnica es que puede aportar información sobre el comportamiento de muestras con un gran número de moléculas sobre los modos de vibración y de rotación del sistema molecular. A frecuencias de sub-THz y más bajas, los niveles de señal tanto para comunicaciones como para teledetección son suficientes para propagarse varios cientos de metros. Sin embargo, frecuencias más altas, que sólo pueden ser utilizadas en comunicaciones a muy corta

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

distancia, sirven para detectar gases como el amoníaco NH_3 o el metano CH_4 , utilizando una red de nanodispositivos que funciona con frecuencias de THz y que estará integrada en la infraestructura de comunicaciones vía radio. Se van a repasar las tecnologías que permiten detectar gases polucionantes, tóxicos y de efecto invernadero.

10.8.1. Detección en entornos agrícolas

El amoníaco NH_3 , es frecuente que se encuentre en granjas animales, liberado por la descomposición de fertilizantes artificiales y del estiércol originado por los animales. Una exposición excesiva al amoníaco puede ser nociva para la salud y para el medio ambiente. Frecuencias dentro de la banda sub-THz, hasta 10 THz, se han utilizado para realizar espectroscopía en el dominio tiempo y llevar a cabo medidas de detección de amoníaco y agua.

Los vegetales y las plantas emiten a través de las hojas compuestos orgánicos volátiles (VOC) que son gases como el acetonitrilo $\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$, etanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ y metanol CH_3OH . Estos gases pueden afectar al organismo, por ejemplo, el acetonitrilo puede convertirse en cianuro dentro del cuerpo humano. La espectrografía ha sido utilizada para la detección de estos gases VOC.

10.8.2. Detección en entornos industriales y urbanos

Los dióxidos de azufre (SO_2) y de nitrógeno (NO_2) y el monóxido de carbono (CO) son los gases más polucionantes que se encuentran en la atmósfera debido a la combustión de la gasolina o el gasóleo en los motores de los automóviles.

Gas	Proposed technique using path loss				Techniques developed using spectroscopy	
	Atmospheric concentration (ppm)	Considered frequency range	Gaussian noise level	Possibility of detection	Frequency range	Detection techniques
H_2O	10000	6-8 THz	1 %	Yes	0.1-2.25 THz	THz-TDS
O_2	209460	0.5-2.5 THz	0.01 %	Yes		
SO_2	1	0.5-2.5 THz	0.01 %	Yes	0.21-0.27 THz	Electronic SMM/THz gas sensor
NH_3	0.01	3-5.5 THz	0.01 %	Yes	0.1-2.25 THz	THz-TDS
O_3	0.07	1-3 THz	0.001 %	Yes	0.575-0.625 THz	THz-TDS
NO_2	0.02	1-3 THz	0.001 %	Yes	0.22-0.33 THz	Continuous-wave electronic THz spectrometer
HCN	0.01	1-3 THz	0.001 %	Yes	1.1-1.3 THz	Photonic crystal cavity
CO	0.01	0.5-3 THz	0.0001 %	Yes	0.3-1.1 THz	THz-GPS
CH_4	1.8	3-4.5 THz	0.00001 %	Yes	2-2.7 THz	THz-TDS
N_2	780840	3-5 THz	Reduced until 0.000001 %	No		
CO_2	410	8-10 THz	Reduced until 0.000001 %	No		
N_2O	0.5	0.1-1.5 THz	Reduced until 0.000001 %	No	0.575-0.625 THz	THz-TDS
CH_3OH	0.01	0.1-1 THz	Reduced until 0.000001 %	No	0.22-0.33 THz	THz wave electronics

Cuadro 10.12. Impacto del nivel de ruido gaussiano en las medidas de gases en la atmósfera^[48].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

El dióxido de azufre SO_2 contribuye a la polución a través de la lluvia ácida y provoca la irritación de las vías respiratorias que origina un aumento del riesgo de infecciones, segregación de mucus y tos. Se detecta utilizando sensores de gas de Surface Molecularly Modified (SMM) a frecuencias del orden del THz.

El dióxido de nitrógeno NO_2 también, a través de la lluvia ácida forma ácido nítrico HNO_3 . Una exposición prolongada al NO_2 puede provocar enfermedades crónicas de pulmón. Igualmente daña la vegetación y los campos de cultivo. Espectrómetros de onda continua pueden detectar NO_2 en la banda de 220/230 GHz.

El monóxido de carbono CO , es peligroso pues produce falta de oxígeno en el torrente sanguíneo y puede provocar asfixia. La detección es por medio de espectrometría de gas-fase (GPS) en la banda 0,1 – 1,1 THz.

Las plantas pueden producir cianuro de hidrógeno HCN , e industrias como la minería lo liberan como un producto de desecho de las aguas residuales, que puede estar también en forma gaseosa. Puede detectarse a frecuencias entre 1,1 y 1,3 THz, utilizando técnicas de detección de cavidad fotónica de cristal.

El CO_2 emitido por procesos industriales y el quemado de combustibles fósiles es el gas dominante en los GEI. Otros gases que contribuyen al efecto invernadero son el metano CH_4 , N_2O , ozono O_3 , y gases fluorinados como el tetrafluorometano CF_4 . Estos gases pueden ser detectados en el laboratorio con espectrometría THz en una cámara de simulación a frecuencias de 2-2,7 THz y 0,575-0,625 THz para CH_4 , CF_4 y O_3 respectivamente .

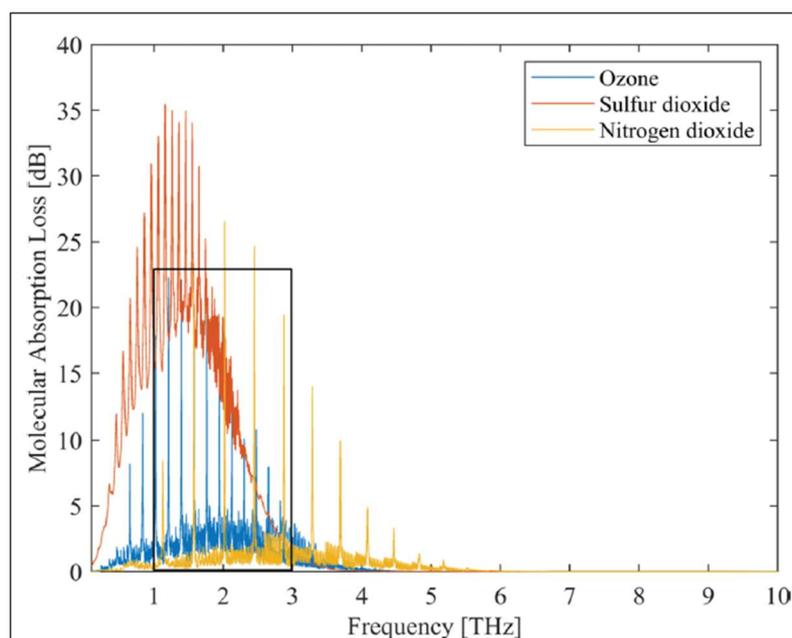


Figura 10.102. Pérdidas de absorción molecular simuladas para el ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno a frecuencias de THz, utilizando datos HITRAN^[48].

10.8.3. La absorción molecular a frecuencias sub-THz

Las elevadas pérdidas de dispersión resultantes de las longitudes de onda tan pequeñas de las señales en la banda de los THz, que requiere la utilización de antenas direccionales de alta ganancia con haces muy estrechos, las señales THz están afectadas también por la absorción molecular y en menor medida por la dispersión de partículas de polvo, niebla, copos de nieve o gotas de agua. La mayor absorción de una señal a frecuencia de THz la produce el vapor de agua que tiene varias frecuencias de resonancia que encabezan la absorción extremadamente alta. De igual manera, la radiación a frecuencias de THz presenta una absorción elevada debido a la presencia de numerosos gases SO_2 , NO_2 , NH_3 y CH_4 y cada gas tiene un perfil de absorción único que presenta nuevas oportunidades para la detección utilizando señales THz. El concepto de teledetección está basado en los perfiles de absorción molecular, según la frecuencia, que es único para cada gas.

La Figura 10.102 representa las pérdidas de absorción molecular simuladas usando datos de la base de datos molecular espectroscópica de transmisión de alta resolución HITRAN, a una temperatura estándar de 296 K y presión de 1 atm a 5cm de distancia para O_3 , SO_2 y NO_2 cuando están mezclados con otros gases en sus respectivas concentraciones atmosféricas. En este modelo de medida, cada perfil de absorción estandarizado identifica a un solo gas y el nivel de absorción aumenta con la concentración de ese gas. Así, la figura muestra que el mayor nivel de absorción es para SO_2 y necesita menor sensibilidad de medida que NO_2 ó O_3 en este rango de frecuencias. La sensibilidad de las medidas del sistema propuesto está inversamente relacionada con su ruido gaussiano. El ruido gaussiano es función de la potencia transmitida, frecuencia y la capacidad del transmisor y del receptor. Un nivel de ruido gaussiano más bajo indica una capacidad de medida mayor. Por ejemplo, en el Cuadro 10.11, si el nivel de ruido gaussiano es de 0,01%, los gases de interés como NH_3 y SO_2 pueden detectarse de manera fiable, pero no otros gases como O_3 , que requiere una mayor capacidad de medida del sistema o lo que es igual, menor nivel de ruido gaussiano.

10.8.4. La agricultura industrial

Los futuros entornos agrícolas con granjas tendrán múltiples dispositivos de teledetección bajo el manto de Internet of Everything (IoE), conectado a 6G a través de mMTC y un centro de política y normativa medio ambiental ELPC para IoBioNanoTech e IoNanoTech. La conectividad de estos dispositivos puede establecerse a través de ultra celdas, que han sido propuestas para transmitir señales a frecuencias de THz de corta duración.

Mientras la conexión entre ultraceldas y macroceldas puede ser un problema en zonas rurales como granjas, las ultraceldas pueden proporcionar conectividad a dispositivos locales, llevar a cabo una computación edge-based y enviar datos a las macroceldas (p.e. vía UAVs).

Para redireccionar los haces de radiación dentro de las naves de la granja, donde los equipos y las instalaciones causan obstrucción, superficies reflectoras inteligentes pasivas pueden utilizarse. Ultraceldas adecuadas pueden emplazarse en las naves de ordeño para detectar emisiones de CH_4 cuando las vacas están siendo alimentadas, y detectar NH_3 y SO_2 en los orines del ganado. El ganado contribuye, particularmente con CH_4 , a los GEI cuando digieren su comida. Una sola vaca puede emitir 200 libras de CH_4 por año. Las granjas de ganado también producen gases de efecto invernadero como CO_2 y N_2O . Las superficies IRS pasivas conectadas a ultraceldas pueden emitir señales de frecuencias entre 0,5 y 1,0 THz para detectar gas a distancias mayores de 1 metro, y nano dispositivos en la misma IRS pueden ser utilizados para detectar gases como CH_4 y SO_2 a distancias menores de 1 metro. Las superficies IRS pasivas pueden transmitir la información a un

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

vehículo móvil como un tractor o un dron, para enviar la información de concentración de gas fuera de las naves.

10.8.5. Industria y entornos urbanos

Los entornos industriales y urbanos producen GEI como CO₂ y N₂O, principalmente como resultado de la actividad humana. El CO₂ es uno de los mayores contribuyentes a la alarma social medioambiental. Los sectores industriales que producen un mayor nivel de CO₂ son la generación de energía eléctrica (54%), producción de cemento (15%), procesado de gas (12%), siderúrgicas (6%), refinería de petróleo (5%) y plantas químicas productoras de C₂H₅OH y NH₃ (3%). Adicionalmente, grandes cantidades de CO₂ se emiten desde áreas residenciales en entornos urbanos, cuando consumen energía. Así pues, para la detección de gases, lo más apropiado parece ser infraestructuras en espacios exteriores. Estructuras MIMO ultra masivas en macroceldas, comunicadas con picoceldas y femtoceldas a 0,1-5 THz, pueden ser la solución adecuada para detectar gases en entornos urbanos e industriales. También, utilizando estaciones base con UM-MIMO a frecuencias de 0,3 THz y 1 THz y enlaces multi Tbps. Sin embargo, el despliegue de femtoceldas y picoceldas bajo la zona de cobertura de una macro estación base, reduce la distancia entre los dispositivos de medida y ayuda a mantener un coeficiente SINR alto durante la detección. Además, las picoceldas suelen instalarse en edificios o estructuras de gran altura en áreas urbanas densas debido a su reducida área de cobertura. De nuevo, las IRS pasivas pueden jugar un papel significativo en redireccionar los haces entre celdas y en las comunicaciones entre vehículos e infraestructura V2I utilizando enlaces a frecuencias de THz que no son empleadas en comunicaciones para la teledetección lateral en carretera. Esta utilización dual de la infraestructura facilita la detección de gases a nivel de suelo en entornos urbanos.

Tanto en el entorno agrícola como industrial, puede proponerse una red privada para comunicaciones y teledetección. Sin embargo, en zonas urbanas, el objetivo final podría ser integrar los dos sistemas en la arquitectura RAN, que es lo que se propone a continuación.

10.8.6. Técnicas de detección

Al igual que la 5G, la 6G utilizará machine learning (ML) para analizar y procesar grandes conjuntos de datos para la propia gestión de red y para dar soporte a sus aplicaciones. Aquí, se propone cómo la ML puede usarse para determinar las concentraciones de gas a partir de las medidas de pérdidas de propagación y de la densidad espectral de potencia (PSD).

10.8.7. Análisis de las pérdidas de propagación

El análisis de las pérdidas de propagación mide el factor de atenuación y aprovecha la información para obtener el dato de la concentración de gas. Las pérdidas por absorción molecular son debidas a la frecuencia utilizada más que a la distancia de propagación o a las pérdidas de dispersión. Estas últimas, se deben a la distancia y a las características de las antenas transmisora y receptora a la frecuencia de trabajo y no se ven afectadas por el medio de propagación. La precisión en la detección se obtiene del coeficiente entre la potencia de ruido gaussiano N y las pérdidas de absorción en la señal recibida. El Cuadro 11.12 resume para diferentes gases un coeficiente correspondiente a una concentración atmosférica, donde puede apreciarse que cada gas tiene asociado un valor máximo tolerable de potencia de ruido que limita la exactitud de la medida. También, se compara el rango de frecuencia de este estudio con el rango de frecuencia utilizado

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

en técnicas de teledetección basadas en espectroscopía. Este análisis aprovecha la base de datos espectroscópicos molecular HITRAN establecidos controlando el nivel de ruido P y reduciéndolo paso a paso cuando se resuelve el problema de regresión lineal múltiple de la siguiente ecuación:

$$Total_{Abs} = \sum_{i=1}^n C_{g_i} Abs_{g_i} + PN$$

Donde el primer término representa las pérdidas totales de absorción molecular, C_{g_i} y Abs_{g_i} son los perfiles de concentraciones y pérdidas de absorción medibles respectivamente, de cada gas. Se emplea la técnica lineal de los mínimos cuadrados que incluye las siguientes restricciones: a) la concentración de cada gas ha de ser menor de un millón de ppm, y b) la suma de concentraciones ha de ser igual a un millón de ppm. Los resultados en la tabla están basados en 1000 simulaciones del método del método Monte Carlo para estimar los efectos aleatorios. La simulación disminuye gradualmente el nivel de ruido gaussiano hasta un 0,000001 % y la mayoría de los gases en la mezcla fueron detectados y medidos para este umbral de 0,000001 %. Las concentraciones esperadas de gas atmosférico (en ppm) del Cuadro 11.12 se emplean para generar perfiles de pérdidas d absorción para mezclas típicas de gases en la atmósfera. Se añade ruido gaussiano a las pérdidas de absorción generadas de forma controlada, como se ha descrito antes, y entonces, se intenta estimar cada gas en la presencia de este ruido. Algunos gases, como H_2O , pueden medirse incluso con un 1 % de ruido añadido, pero la sensibilidad es mucho menor en el caso de gases como el N_2O .

Como ejemplo, la Figura 10.103 muestra la utilización del modelo de regresión múltiple lineal para predecir la concentración de O_3 y CH_4 a 5 cm de distancia para un rango de frecuencia de 1,0 a 3,0 THz y 3,0 a 4,5 THz respectivamente. De igual manera, para otros gases detectables se podría estimar con precisión la concentración en los rangos de frecuencias reseñados en el Cuadro 10.11. Para cada gas específico se elige el rango de frecuencias con la absorción molecular más alta (ver el área rectangular marcada en la Figura 10.102 para el ozono O_3). Las curvas de medida de la sensibilidad para O_3 y CH_4 se generaron con niveles de ruido gaussiano de 0,001 % y 0,00001 % respectivamente. Los resultados en la Figura 10.103 muestran que se pueden lograr intervalos de confianza del 95% para las concentraciones de gas estimadas que sólo difieren de la concentración actual en un pequeño porcentaje que viene dado por la diferencia entre el UCL y el LCL.

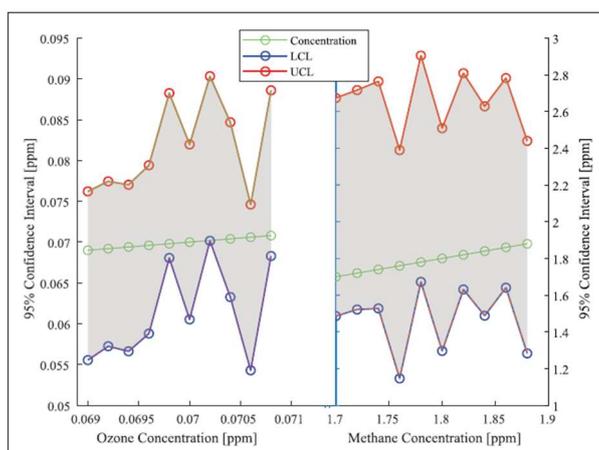


Figura 10.103. Curva de medida de sensibilidad para el ozono y el metano con la medidas de concentración esperada y el intervalo de confianza entre los niveles bajo LCL y alto UCL de las concentraciones de gas estimadas.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Otros gases como el nitrógeno molecular N_2 , anhídrido carbónico CO_2 , óxido nitroso N_2O y metanol CH_3OH , no es posible medirlos utilizando datos de pérdidas de propagación para cualquier frecuencia del orden de THz porque la sensibilidad de la medida es demasiado baja.

10.8.8. Análisis de la densidad espectral de potencia

Se va a analizar una medida de PSD para detectar un gas en una mezcla. La Figura 10.104 representa la densidad espectral de potencia del ozono O_3 entre 0,59 – 0,69 THz y N_2O y CH_3OH entre 0,8 – 0,9 THz. Se emite una señal chirp pulsada de 0,05 nanosegundos a través de una mezcla de gas con y sin vapor de agua, mientras se va variando la distancia entre el transmisor y el receptor. Una señal chirp pulsada puede hacer un barrido de frecuencias dentro de cada banda de medidas. Se analiza la absorción molecular de gases que mezclados con vapor de agua, oxígeno molecular o nitrógeno molecular para seleccionar los rangos de frecuencia más estrechos que resultará en pérdidas de absorción muy bajas por el vapor de agua y altas por el gas en observación. Los resultados indican que existe un impacto significativo del vapor de agua en la medida de la densidad espectral de potencia correspondiente al ruido de absorción molecular, así como al efecto de atenuación con la distancia. Este impacto sobre la medida total de la PSD se suma a la PSD de la señal chirp en el dominio de la frecuencia. La Figura 10.104 indica que es posible estimar las concentraciones de gas aplicando señales chirp con ensanchamiento espectral con técnicas de aprendizaje supervisado.

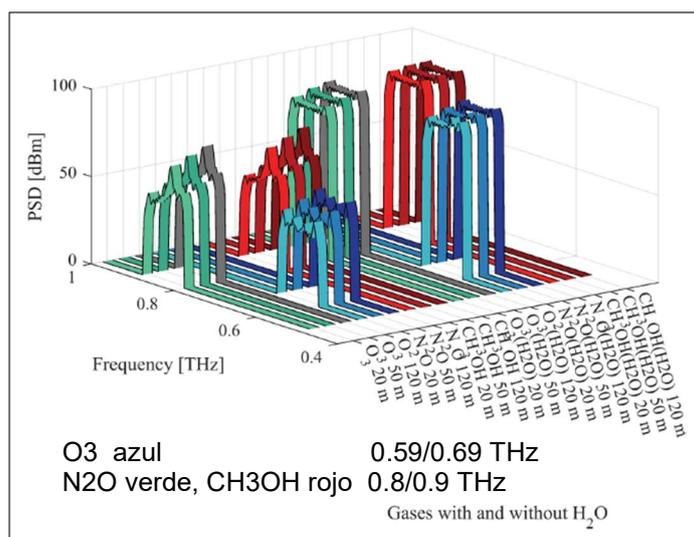


Figura 10.104. Densidad espectral de potencia para el ozono, óxido nitroso y metano considerando una mezcla con y sin vapor de agua y variando la distancia entre transmisor y receptor.

El análisis de la PSD también considera la posibilidad de que la concentración del gas en la atmósfera pueda variar 0,5, 0,75, 1,25 y 1,5 veces sobre el nivel esperado. Este análisis es necesario porque los mamíferos también necesitan respirar una mezcla determinada de gases para sobrevivir y puede ser peligroso, incluso tóxico si ciertas concentraciones de gas están por encima o por debajo de lo normal. La variación típica en la concentración atmosférica de un gas es relativamente pequeña, así las diferencias que se esperan en las medidas de PSD son mínimas. Sin embargo, no se pretende detectar las diferencias directamente sino procesar la PSD medida para el gas objeto de la medida al nivel alterado. Después, la capa inteligente de detección propuesta detectará pequeñas variaciones de en las concentraciones de gas relativas a datos previos obtenidos. Además, debido a cambios en la red como alteraciones en la alimentación, humedad, etc, pueden ocurrir fluctuaciones en los valores medidos que originan medidas de

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

concentración de gas imprecisas. Con este fin, integrando ML y AI en la capa inteligente de detección, el proceso de limpieza de datos puede ser configurado para manejar anomalías que den lugar a fluctuaciones de señal, antes de que el dato sea utilizado para hacer predicciones.

Para una distancia fija de 100 metros entre transmisor y receptor, se calcularon las diferencias en la medida de la PSD de los gases en función de los valores de concentración atmosférica más habituales. La Figura 10.105 representa las diferencias en las medidas de PSD para los gases O_3 , SO_2 y CH_4 cuando se espera que sus concentraciones varíen. Los rangos de frecuencia que corresponden a cada gas fueron seleccionados mediante el estudio de las medidas de PSD. En la Figura 10.105, puede verse una diferencia significativa en la PSD para todas las concentraciones en 0.8424, 1.2951, y 1.4930 THz para el ozono, dióxido de sulfuro y metano, respectivamente. Adicionalmente, como caso especial, pueden verse diferencias máximas a otras frecuencias 1,3431 THz para el dióxido de sulfuro. De igual manera, señalar grandes diferencias en las medidas de PSD para determinadas frecuencias en el caso de otros gases incluidos en este estudio. Esto implica que pueden utilizarse técnicas ML para localizar los cambios en el tamaño de la PSD para determinar los diferentes niveles de gas a determinadas frecuencias cuando analizando la colección de datos de la red propuesta. En trabajos futuros, este análisis puede extenderse para estimar una cierta concentración de gas y localizarla utilizando técnicas ML.

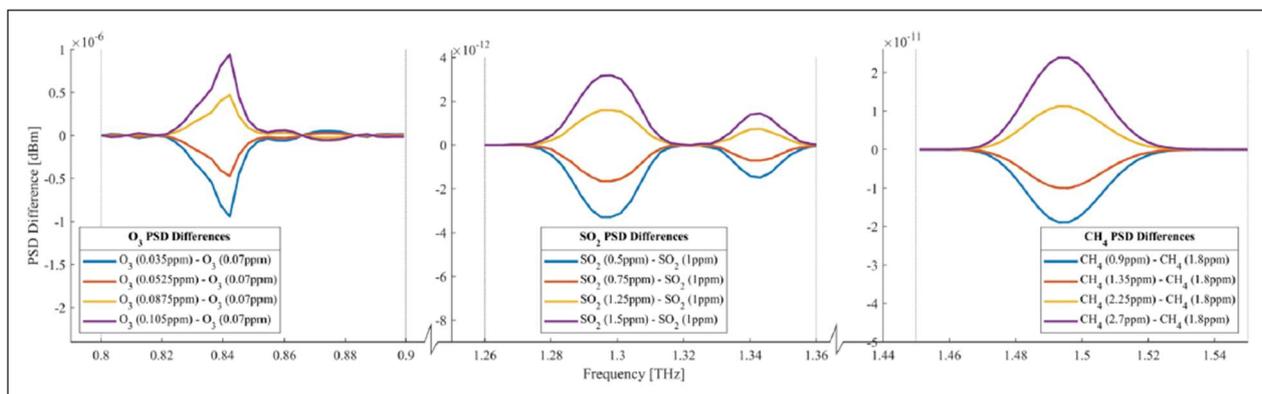


Figura 10.105. Comparación entre las diferencias en las medidas de PSD para ozono, dióxido de azufre, y metano en relación con sus concentraciones atmosféricas estándar.

10.8.9. Retos

Detección de señales ultradensas

Dada la dispersión espacial de los gases en el entorno ambiental, un requisito esencial es la creación de un conjunto de señales a frecuencias de THz que cubra un área con el suficiente nivel de detalle espacial. Para cubrir áreas específicas, se puede aumentar la densidad de la infraestructura con IRS pasivos y estaciones base con sistemas UM-MIMO. Aunque los drones pueden transportar paneles de detección de nanoredes, no pueden cubrir un área por un periodo de tiempo suficientemente largo para detectar cambios en la concentración de gas. Por lo tanto, protocolos que consideren las compensaciones entre una cobertura espacial máxima y un consumo de energía mínimo serán necesarios para desarrollar un sistema de detección de gran granularidad. Esto puede originar interferencia entre haces, especialmente si el número de haces simultáneos es grande. Sin embargo, los problemas de este tipo podrían subsanarse utilizando antenas de muy alta ganancia.

Análisis de los datos

Se propone utilizar las pérdidas de propagación, que son función de la frecuencia, para la teledetección, pero la localización de la zona para llevar a cabo la teledetección sigue siendo una incógnita. Se propone también, el empleo de ML para triangular señales de fuentes diferentes, lo que dará lugar a una gran cantidad de datos para formación y mejora de la precisión en la detección. Este análisis de datos es de gran utilidad debido a los numerosos factores que pueden alterar las señales y llevar a conclusiones erróneas, dificultando el proceso de medida. El análisis de datos puede ser una ayuda para minimizar el consumo energético de cada dispositivo, variando los ciclos de reposo de los tiempos de detección en relación con los cambios en las concentraciones de gas. Además, el procesado de una gran cantidad de datos es muy caro desde el punto de vista computacional y consume mucho tiempo. Así, una monitorización en tiempo real de la concentración de un determinado gas atmosférico puede plantear algunas incógnitas: a) predecir qué cantidad de datos se van a recoger y necesitar y b) gestionar el hardware y otros requisitos tecnológicos para el procesado de los datos. También, desde que el principal objetivo de cualquier arquitectura de red es proporcionar conectividad continua y fiable, se propone el acopio de datos de detección de gases durante intervalos de tiempo en los que el canal de transmisión no este ocupado para comunicaciones. La teledetección intermitente es suficiente porque las concentraciones de gas cambian de forma lenta, lo que reduce la cantidad de datos para el análisis. Por último, otro reto es la precisión en las medidas de concentración de gas en presencia de vapor de agua. La concentración de vapor de agua en la atmósfera varía de forma impredecible debido a los continuos cambios en las condiciones ambientales. La absorción molecular del vapor de agua es mucho mayor que la de otros gases lo que dificulta la detección de otros gases cuando el porcentaje de vapor de agua es elevado (mayor del 1%). Las concentraciones atmosféricas de algunos gases usados en este estudio son generalmente muy pequeñas, es decir son difíciles de detectar, y los cambios en su concentración pueden ser incluso más difíciles de estimar.

Detección de gases en viviendas

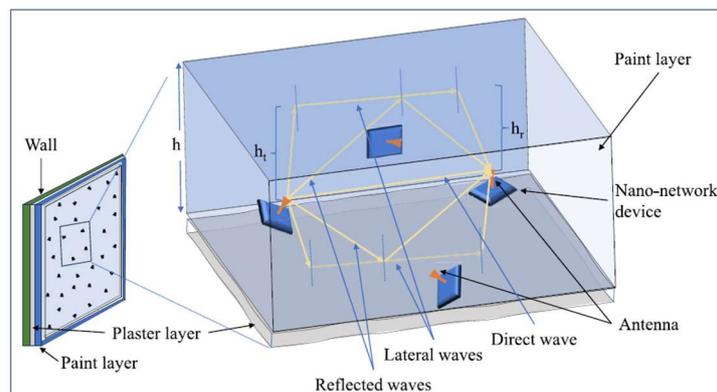


Figura 10.106. El Internet de la Pintura (IoP) sugiere diluir en la pintura de las paredes los elementos de una red de nano-dispositivos de forma que cuando se pinte, quede instalada la red de detección de gases^[62].

El trabajo propone obtener la concentración de los diferentes gases atmosféricos en las viviendas a partir de datos como el coeficiente de absorción molecular de los gases, el ángulo crítico de reflexión en los interfaces de la capa de pintura con el aire y con la pared en la que se aplica y las pérdidas de propagación en el medio utilizando, además, la base de datos HITRAN.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Gas	Composition
N ₂	78.084%
O ₂	20.946%
Ar	0.93%
H ₂ O	1-3%
CO ₂	0.003%
CH ₄	1.5 ppm
SO ₂	1 ppm
O ₃	0.05 ppm
N ₂ O	0.02 ppm
CO	0.01 ppm
NH ₃	0.01 ppm

Cuadro 10.13. Gases en suspensión en la atmósfera y su proporción en porcentaje y partes por millón^[62].

El trabajo ha supuesto frecuencias de funcionamiento en la banda de 200 a 300 GHz, la potencia de transmisión de cada dispositivo de la red es de 10 mw (10 dBm), con ganancias de 2,15 dBi en el transmisor y en el receptor.

Paint type	Refractive index (n_p)	Main pigment
Brilliant Blue	1.91	PB15
Titanium White	2.13	PW6
Oxide Black	2.74	PBk11

Cuadro 11.14. Tipos de pintura empleados con sus correspondientes índices de refracción calculados^[62].

Se han utilizado tres tipos de pintura en el estudio: Azul Brillante, Blanco Titanio y Negro Óxido. El índice de refracción de la pared se ha estimado en 1,6. Todos los índices de refracción se han supuesto constantes con la frecuencia y la distancia mínima entre transmisor y receptor se ha fijado en 4 mm. El espesor de la capa de pintura del estudio varía entre 1mm y 3 mm.

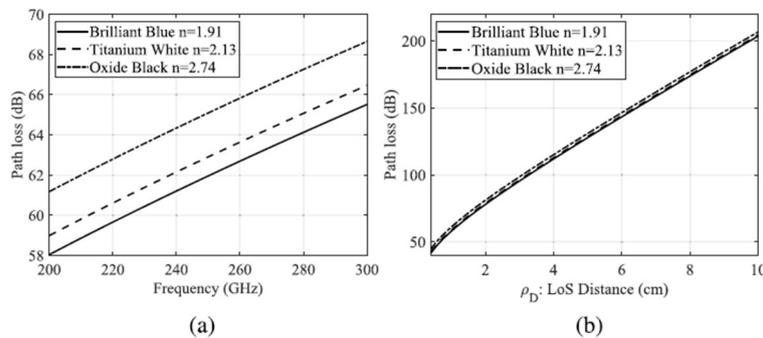


Figura 10.107. Pérdidas de propagación para el caso de onda directa en función de la frecuencia y de la distancia según el tipo de pintura ^[62].

Las pérdidas de propagación en función de la distancia para el caso de onda directa son prácticamente idénticas para cada uno de los tipos de pintura, sin embargo, en función de la frecuencia, el azul brillante presenta menos atenuación que el blanco, 2 dB mayor y el negro óxido, 4 dB más que el azul. Para las señales reflejadas en las interfaces pared-pintura y pintura-aire, las gráficas son muy parecidas a las de la Figura 10.107. Para la variación de las pérdidas en función de la frecuencia en las señales reflejadas en las interfaces, hay que añadir aproximadamente 1 dB en cada interfaz, a los resultados de onda directa, pero la variación tiene las mismas pendientes para cada uno de los colores.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

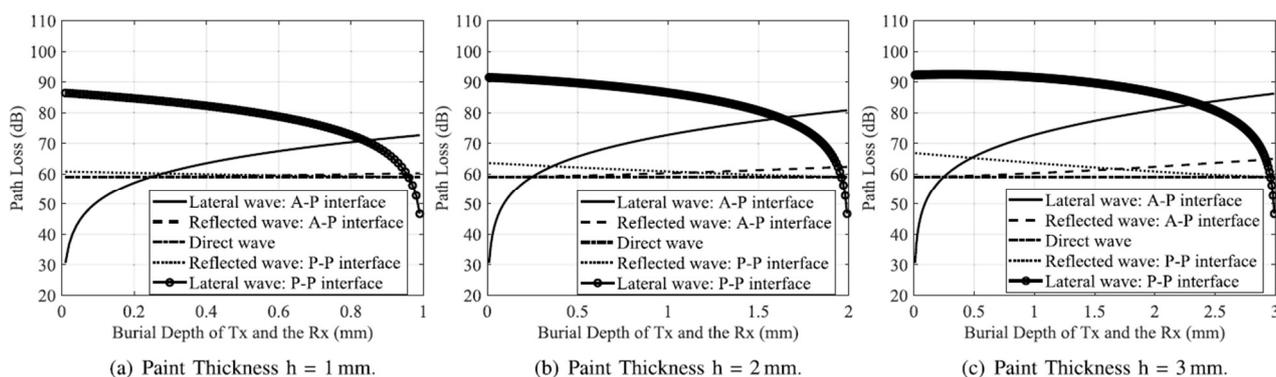


Figura 10.108. Pérdidas de propagación en función de la profundidad a la que se sitúan los transceptores y para distintos espesores de la capa de pintura, según se trate de onda directa, interfaz pintura pared (P-P) o pintura aire (A-P) [62].

Respecto a la propagación en función del espesor de la capa de pintura y de la profundidad a la que se sitúan los transceptores, puede observarse que para las ondas laterales de la interfaz P-P disminuyen con la profundidad, lo que es lógico puesto que los transceptores se acercan a la línea de dicha interfaz. El efecto en la interfaz opuesta P-A es el contrario, a mayor profundidad mayores pérdidas para las ondas laterales en esa interfaz. Para la onda directa no existe ninguna variación con la profundidad, lo que igualmente, resulta coherente. Para las ondas reflejadas en la interfaz P-P disminuyen hasta un máximo de 8 dB con la profundidad, mientras que para las ondas reflejadas en la interfaz P-A aumentan hasta 5 dB.

10.9. Descarbonización de las redes móviles

La 6G tiene abiertos de antemano varios frentes en relación con la descarbonización: El número de estaciones base se multiplica debido a la corta distancia que habrá entre puntos de acceso y los procesos industriales para la fabricación de equipamiento dependen exclusivamente del suministro energía de red. El consumo total del ciclo de vida de los equipos e infraestructuras de telecomunicaciones se reparte en un 57 % para la fabricación y un 43 % para el mantenimiento y funcionamiento de las instalaciones.

Category	Device	Life (yr)	Manufacture (kg CO ₂)	Transport (kg CO ₂)	Annual Use (kg CO ₂)	EoL Activities (kg CO ₂)	Annual Total (kg CO ₂)	Source
Energy Supply	Diesel Generator and Battery	15	18900	4300	262000	-2400	263386.67	ETSI TR 102 532 V1.2.1 (2012-11)
	Photovoltaic Panel and Battery	15	35820	6180	0	-2750	2616.67	ETSI TR 102 532 V1.2.1 (2012-11)
	Wind Farm (132 Turbines)	20	85050	3050	12750	-16250	104890	Ecoinvent v2.1, RCEES 2012
Cellular Network	Base Stations (eNodeB)	10	3586	59.29	3176	153.51	3555	Ecoinvent 3.7, Hischer et al. (2020), Streicher-Porte et al. (2015), Aleksic (2013)
	IP Core Network	10	1654	26.4	11647	67.82	11822	Technical specifications from equipment factsheets. (Huawei, 2011)
User Device	Smart Phones	2	60	0.088	4.432	0.0496	34.5	Belkhir and Elmehri, 2018
	Modem/Router	5	5.84	0.165	38.22	0.42	39.51	Malmodin et al., 2014

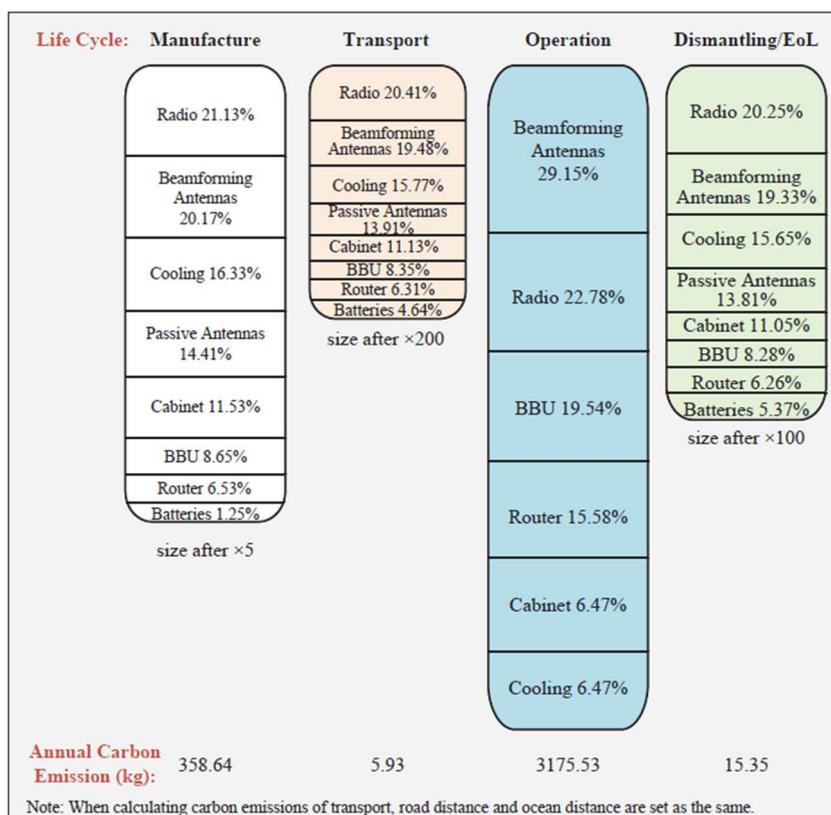
Cuadro 10.15. Emisiones de carbono a nivel de sistema^[50].

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Las energías renovables, básicamente solar y turbinas de viento, ya reducen el coste del KWh correspondiente a las centrales térmicas y tienen mucho margen de mejora para seguir incorporando nuevos avances tecnológicos. La huella de carbono de la energía solar es de 6gr equivalentes de CO₂ y la de la energía eólica es de 4gr equivalentes de CO₂, por KWh generado. No obstante, todavía presentan grandes limitaciones por lo que la reducción de la huella de carbono de los equipos de telecomunicaciones es actualmente, una cuestión más teórica que de implantación de un sistema capaz reducir las emisiones de carbono. Las grandes extensiones de terreno necesarias para obtener un cierto rendimiento de energía solar no son un ejemplo de sostenibilidad. Igual ocurre con las estructuras que soportan la turbinas de aire, cada día más cuestionadas por los ruidos que generan, su incompatibilidad con algunas especies de aves y en general con el paisaje.

A todo esto, hay que añadir el carácter volátil de este tipo de energías. Presentan una gran dificultad para el almacenamiento. Hace algún tiempo, ya se indicó en este mismo foro, la existencia de equipos que generaban hidrógeno por medio de electrolizadores cuando la energía solar de fotovoltaica carecía de consumo. Esa podría ser una vía de alimentación para equipos de comunicaciones en zonas rurales. El empleo de baterías de hidrógeno durante las horas nocturnas o los días no soleados para sustituir a la energía solar debería empezar a considerarse.

Los estudios de eficiencia energética y de eficiencia espectral, suelen llevarse a cabo durante la etapa de funcionamiento de los equipos, sin embargo, la eficiencia de carbono ha de evaluarse a lo largo de todo el ciclo de vida: fabricación, transporte, funcionamiento y desconexión y desmontaje.



Cuadro 10.16. Evaluación de las emisiones de carbono para el ciclo de vida de las estaciones base^[50].

El suministro y la distribución de energía eléctrica por métodos convencionales se realiza y gestiona de una manera centralizada y continua, mientras que la energía solar y la eólica constituyen un

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

sistema distribuido en el que la energía eléctrica es gestionada y mantenida a través de protocolos que corren en la mismas estaciones base. No se puede decir que se trate de un tipo de suministro estable.

10.10. Conclusiones

Con la evolución de las redes móviles el cuello de botella para el trasiego de la información se ha trasladado de la red de acceso vía radio RAN a la capa de transporte. Al asimilar las redes NTN, aeroespacial y aérea, parece que debiera haber un cierto aumento en la capacidad de la capa de transporte, no obstante, convendría confirmarlo.

Las potencia necesaria para obtener tasas de error en transmisión muy bajas, está muy por encima de los valores comerciales que hay actualmente en el mercado.

Con los problemas de propagación existentes a muy alta frecuencia es necesario desplegar una red de acceso RAN mucho más tupida que las correspondientes a anteriores generaciones, para evitar vanos muy grandes y obstáculos que impidan una comunicación con bajas tasas de error. Nacen la nuevas redes cell free, actualmente en desarrollo, sin celdas.

El umbral de sensibilidad 5G son aproximadamente -140 dBm mientras que un nivel de señal que pudiera considerarse como bueno en 5G pueden ser -44 dBm. En 6G, según lo calculado, alcanzar un nivel umbral de -110 dBm, teniendo en cuenta valores de ganancia en transmisión alrededor de 8 dBi, sería posible con los componentes comerciales fabricados actualmente. De igual manera, podrían asumirse las potencias PIRE necesarias para un nivel en la recepción de -100 dBm, con las citadas ganancias en transmisión, hasta la ventana 5. Para señales de -90 dBm parece más complicado por los elevados niveles de potencia que entran en juego, salvo casos de muy alta ganancia que no son para dar servicio de manera habitual a dispositivos tipo UE.

Habría que reconsiderar el concepto de **handover** ya que las redes móviles han pasado de gestionar los recursos a adaptarse a las decisiones de los usuarios a través de sus UE. La 6G supone una nueva forma de enfocar las situaciones, siendo el tipo de usuario, UE, MTC, etc. el que orienta el tipo de red a desplegar.

En espacios cerrados: viviendas, naves industriales, estadios deportivos, etc. hay que tener en cuenta a la hora de estimar el Nivel de Referencia que los campos de distintas fuentes podrían estar correlados espacial y temporalmente. Por tanto, la densidad de potencia total se calcularía sumando los valores de campo correspondientes a las distintas antenas y elevando la suma al cuadrado, que es diferente a considerar una suma de densidades de potencia.

La 6G utilizará un ancho de banda de 100 GHz para funcionar con velocidades de transmisión de 1Tbps. Si bien el límite de Nyquist se sitúa en los 500 GHz, la modulación OFDM-QAM permite reducir el ancho de banda en un factor de 5. La multiplexación espacial realizada con sistemas MIMO masivos, podrá implementarse con la generación de modos OAM (Orbital Angular Momentum).

La creación de una plataforma conjunta para comunicaciones y teledetección permitiría obtener las señales transmitidas vía satélite desde cualquier punto de acceso de la RAN, reduciendo el

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

elevado coste de instalar un hub en cada estación base y llevando la información al punto más cercano al usuario para conseguir una latencia mínima. La plataforma ISAC (Integrated Sensing and Communication), auspiciada por la ITU-R, necesita de nuevos métodos de acceso múltiple y nuevos tipos de modulación que puedan adaptarse a las dos tecnologías, facilitando los procesos de generación, detección y tratamiento de cualquier señal dentro del ámbito de la detección y de las comunicaciones.

La detección de gases con nano sensores abre nuevas perspectivas para la agricultura industrial y la vivienda, en general para todos aquellos compuestos químicos que se encuentran en suspensión en la atmósfera. La monitorización y control de las concentraciones de gas en suspensión en la atmósfera podrá llevarse a cabo mediante la mencionada plataforma conjunta para comunicaciones y teledetección, obteniendo los datos en el punto de acceso más próximo al usuario final.

La utilización de superficies reflectoras inteligentes (RIS) constituye una solución energéticamente eficiente y de bajo coste que permitiría mejorar las prestaciones de las redes móviles 5G y 6G de ondas milimétricas. Estas superficies cuentan con la capacidad de redirigir y conformar el haz reflejado, permitiendo la operación simultánea en varias bandas de frecuencia y/o en distintas polarizaciones. Además, la superficie plana y peso ligero de las RIS facilita su instalación en fachadas, paredes o techos, minimizando el impacto visual en el entorno.

El empleo de baterías de hidrógeno durante las horas nocturnas o los días no soleados para sustituir a la energía solar debería empezar a considerarse para reducir la huella de carbono de las instalaciones de telefonía móvil.

10.11. Referencias bibliográficas

- [1] M. Corici, F. Eichhorn, R. Bless, M. Gundall, D. Lindenschmitt, B. Bloessl, M. Petrova, L. Wimmer, R. Kreuch, T. Magedanz and H. D. Schotten. Organic 6G Networks: Vision, Requirements, and Research Approaches. IEEE Access, Vol. 11 July 2023.
- [2] Giordani, Polese, Mezzavilla, Rangan y Zorzi. Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies. IEEE Communications Magazine. Marzo de 2020.
- [3] Inomata, Yamada, Kuno, Sasaki, Kitao, Nakamura, Ishikawa y Oda. Terahertz Propagation Characteristics for 6G Mobile Communication Systems. 15th European Conference on Antennas and Propagation.
- [4] M. Ozger, I. Godor, A. Nordlow, T. Heyn, S. Pandi, I. Peterson, A. Viseras, J. Holis, C. Raffelsberger, A. Kercek, B. Molleryd, L. Toka, G. Biczok, R. de Candido, F. Laimer, U. Tarmann, D. Schupke, and C. Cavdar. 6G for Connected Sky: A Vision for Integrating Terrestrial and Non-Terrestrial Networks. 2023 European Conference on Networks and Communications &

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

6G Summit (EuCNC/6G Summit): 6G Visions and Sustainability (6VS). Gothenburg, Sweden, June 2023.

- [5] J. R. Bhat, S. A. Alqahtani. 6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective. IEEE Access. March 2021.
- [6] M. Polese, A. Singh, X. Cantos-Roman, M. J. Marcus, T.J. Maccarone, T. Melodia y J.M. Jornet. Coexistence and Spectrum Sharing Above 100 GHz. Proceedings of the IEEE. Vol. 111, N° 8, Agosto 2023. Pags. 928-954.
- [7] Carlson, A. B. Communication Systems. Mc Graw Hill. 1986. 3rd Ed.
- [8] A. Taneja, A. Alhudhaif, S. Alsubai y A. Alqahtani. A Novel Multiple Access Scheme for 6G Assisted Massive Machine Type Communication. IEEE Access. Vol.10 2022.
- [9] F. Shen, H. Shi, Y. Yang. A Comprehensive Study of 5G and 6G Networks. 2021 Internacional Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG). Agosto de 2021. Hangzhou, China.
- [10] M. Ndiaye, A.M. Saley, K. Niane, A. Raimy. Future 6G communication networks: Typical IoT network topology and Terahertz frequency challenges and research issues. 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET). Marzo 2022. Moulay Ismail, Marruecos.
- [11] A. Dogra, R. K. Jha, K. R. Jha. Intelligent Routing for Enabling Haptic Communication in 6G Network. 15th. International Conference on Communications & Networks, COMSNETS 2023. Bangalore, India September 2023.
- [12] M. Elshreay, E. Serag, H. M. Elattar, H. Elbadawy. Efficient Matching Technique for D2MD Radio Resource Allocations in B5G/6G Heterogeneous Networks. 39 th Radio Science Conference, December 2022. Cairo, Egypt.
- [13] N. Wang, E. Hossain, and V. K. Bhargava. Backhauling 5G Small Cells: A Radio Resource Management Perspective. IEEE Wireless Communications. October 2015.
- [14] Directiva 2013/35/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de 2013 sobre las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (campos electromagnéticos) (vigésima Directiva específica con arreglo al artículo 16, apartado 1, de la Directiva 89/391/CEE), y por la que se deroga la Directiva 2004/40/CE.
- [15] Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.
- [16] Real Decreto 299/2016, de 22 de julio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a campos electromagnéticos.
- [17] C 95.1. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. Rev. 2019.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [18] A. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, L. Galati-Giordano and D. López-Pérez. Massive MIMO for High-performance Ultra-dense Networks in the Unlicensed Spectrum. *Ultra-dense Networks for 5G and Beyond: Modelling, Analysis, and Applications*. 2019 John Wiley & Sons Ltd.
- [19] B. Xu, C. Di Paola. A Preliminary Investigation of EMF Exposure from Access Points in a Distributed MIMO System. 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Florence, Italy. March 2023.
- [20] Eduardo Noboro Tominaga, Onel Luiz Alcaraz López, Hirley Alves, Richard Demo Souza, Leonardo Tercas. Performance Analysis of Centralized and Distributed Massive MIMO for MTC. 2023 European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit): Physical Layer and Fundamentals (PHY). Gothenburg, Sweden. June 2023.
- [21] Wanshi Chen, Xingqin Lin, Juho Lee, Antti Toskala, Shu Sun, Carla Fabiana Chiasserini, and Lingjia Liu. 5G-Advanced Toward 6G: Past, Present, and Future. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 41, No. 6. June 2023.
- [22] Seiamak Vahid, Rahim Tafazolli and Marcin Filo. *5G Innovation Centre, Institute for Communication Systems (ICS), University of Surrey, UK*. Small Cells for 5G Mobile Networks. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*, First Edition. 2015 John Wiley & Sons, Ltd.
- [23] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten. The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey. *IEEE Journal of the Communications Society*. February 2021.
- [24] Harsh Tataria, Mansoor Shafi, Andreas F. Molisch, Mischa Dohler, Henrik Sjöland and Fredrik Tufvesson. 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities. *PROCEEDINGS OF THE IEEE* | Vol. 109, No. 7, July 2021.
- [25] Attenuation by Atmospheric Gasses and Related Effects, document ITU-R P.676-12, Aug. 2019.
- [26] M. Zubair Islam, R. Ali, A. Haider, and H. Seok Kim. QoS Provisioning: Key Drivers and Enablers. *IEEE Access*. 10 August 2022.
- [27] Giovanni Interdonato, Emil Björnson, Hien Quoc Ngo, Pål Frenger and Erik G. Larsson. Ubiquitous cell-free Massive MIMO communications. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. Springer Open Access. 2019.
- [28] Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G.K. Karagiannidis and P. Fan. 6G Wireless Networks: Visions, Requirements, Architecture and Key Technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. September 2019.
- [29] Huanxi Cui, Jun Zhang, Yuhui Geng, Zhenyu Xiao, Tao Sun, Ning Zhang, Jiajia Liu, QihuiWu, Xianbin Cao. Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN) for 6G: Requirements, Architecture and Challenges. *China Communications Magazine Co., Ltd.* · February 2022.
- [30] J. Sachs, L. A. A. Andersson, J. Araújo, C. Curescu, J. Lundsjo, G. Rune, E. Steinbach and G. Wikström. Adaptive 5G Low-Latency Communication for Tactile Internet Services. Vol. 107, No. 2, February 2019. *Proceedings of the IEEE*.
- [31] S. Deng, H. Zhao, B. Huang, C. Zhang, F. Cheng, Y. Deng, J. Yin, S. Dustdar, A. Y. Zomaya. Cloud Native Computing: A Survey from the Perspective of Services. Vol. 112, January 2024. *Proceedings of the IEEE*.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [32] H. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao, and K. Wu. Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks. IEEE Network. November/December 2020.
- [33] Parikshit Hegde and Meena S.M. A survey on 5G Network Slicing-epitome and opportunities for a novice. 12th International Conference on Computing Communications and Networking Technologies. Kharagpur, India. July 2021.
- [34] E.Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. Van Herwegen, and W. Vantomme. The Industrial Indoor Channel: Large-Scale and Temporal Fading at 900, 2400, and 5200 MHz. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7 N° 7 July 2008.
- [35] Qixun Zhang, Kejia Ji, Zhiqing Wei, Zhiyong Feng, and Ping Zhang. Joint Communication and Sensing System Performance Evaluation and Testbed: A Communication-Centric Approach. IEEE Network. September/October 2024.
- [36] Zhiqing Wei, Wangjun Jiang, Zhiyong Feng, Huici Wu, Ning Zhang, Kaifeng Han, Ruizhong Xu, and Ping Zhang. Integrated Sensing and Communication Enabled Multiple Base Stations Cooperative Sensing Towards 6G. IEEE Networks. October 2023.
- [37] Longfei Yin, Ziang Liu, Bhavani Shankar M. R., Mohammad Alaae-Kerahroodi, and Bruno Clerckx. Integrated Sensing and Communications Enabled Low Earth Orbit Satellite Systems. IEEE Network. Early access, 2024.
- [38] Kecheng Zhang, Zhongjie Li, Weijie Yuan, Yunlong Cai, Feifei Gao. Radar Sensing via OTFS Signaling. China Communications Magazine Co., Ltd. September 2023.
- [39] Weijie Yuan, Shuangyang Li, ZhiqiangWei, Yuanhao Cui, Jiamo Jiang, Haijun Zhang, Pingzhi Fan. New Delay Doppler Communication Paradigm in 6G Era: A Survey of Orthogonal Time Frequency Space (OTFS). China Communications Magazine Co., Ltd. June 2023.
- [40] Saif Khan Mohammed, Ronny Hadani, Ananthanarayanan Chockalingam, Robert Calderbank. OTFS—A Mathematical Foundation for Communication and Radar Sensing in the Delay-Doppler Domain. IEEE Bits. November 2022.
- [41] Zhiqiang Wei, Weijie Yuan, Shuangyang Li, Jinhong Yuan, Ganesh Bharatula, Ronny Hadani, and Lajos Hanzo. Orthogonal Time-Frequency Space Modulation: A Promising Next-Generation Waveform. IEEE Wireless Communications. August 2021.
- [42] Mohamed Bechir, Belgace Chibani Rehami. Performance of downlink MIMO-NOMA system in 5G Networks. 2023 IEEE International Workshop on Mechatronic System Supervision. November 2023. Hammamet, Túnez.
- [43] Xueyun He, Ziqi Huang, Hong Wang and Rongfang Song. Sum Rate Analysis for Massive MIMO-NOMA Uplink System with Group-Level Successive Interference Cancellation. IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 12, No. 7, July 2023.
- [44] Bruno Clerckx, Yijie Mao, Eduard A. Jorswieck, Jinhong Yuan, David J. Love, Elza Erkip and usit Niyato. A Primer on Rate-Splitting Multiple Access: Tutorial, Myths, and Frequently Asked Questions. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 41, No. 5, May 2023.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [45] Yijie Mao, Onur Dizdar, Bruno Clerckx, Robert Schober, Petar Popovski and H. Vincent Poor. RateSplitting Multiple Access: Fundamentals, Survey, and Future Research Trends. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 24, No. 4, Fourth Quarter 2022.
- [46] Hien Quoc Ngo, Giovanni Interdonato, Erik G. Larsson, Giuseppe Caire, and Jeffrey G. Andrews. Ultradense Cell-Free Massive MIMO for 6G: Technical Overview and Open Questions. Proceedings of the IEEE. July 2024.
- [47] Wei Feng, Yanmin Wang, Yunfei Chen, Ning Ge, and Cheng-Xiang Wang. Structured Satellite UAV-Terrestrial Networks for 6G Internet of Things. IEEE Network. July/August 2024.
- [48] Yun Hu, Binqun Guo, Chungang Yang, and Zhu Han. Time-Deterministic Networking for Satellite-Based Internet-of-Things Services: Architecture, Key Technologies, and Future Directions. IEEE Network. July/August 2024.
- [49] Yongkang Gong, Haipeng Yao, and Arumugam Nallanathan. Intelligent Sensing, Communication, Computation, and Caching for Satellite-Ground Integrated Networks. IEEE Network. July/August 2024.
- [50] Felipe Fenoll Recio y otros. Telecomunicaciones Móviles. Editorial Marcombo, 1993.
- [51] Comunicaciones móviles. GSM y GPRS. Editado por la Fundación Vodafone España, 2007.
- [52] Hernando Rábanos. Transmisión por radio. Editado por Fundación Ramón Areces, 1993.
- [53] Hernando Rábanos. Comunicaciones móviles. 2ª Edición, Fundación Ramón Areces, 2004.
- [54] Cardama, Jofre, Rius, Romeu y Blanch. Antenas. Edicions UPC, 1993.
- [55] ITT Corporation. Reference Data for Radio Engineers. Howard w. Sams & Co. 5ª Edición 1968.
- [56] Clerckx, Mao, Yang, Chen, Alkhateeb, Liu, Qiu, Yuan, Wong and Montojo. Multiple Access Techniques for Intelligent and Functional 6G: Tutorial, Survey and Outlook. Proceedings of the IEEE, July 2024.
- [57] Liu , Dingyou Ma, Huangfu, Liu, and Y. C. Eldar. Next-Generation Multiple Access for Integrated Sensing and Communications. Proceedings of the IEEE, September 2024.
- [58] E. Martinez-de-Rioja, A. Arboleya, F. R. Varela, and C. Fontá, "Dual-Band Electromagnetic Skin with Independent Reflection Performance at 28 and 39 GHz for 5G Millimeter-Wave Communications". IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, early access, July 2024.
- [59] E. Martinez-de-Rioja, A. Feito, J. Palací, A. Arboleya, J. Laviada, and F. Las-Heras, "Dual-Coverage Electromagnetic Skin with Independent Shaped Beams for Sub-THz 6G Communications". IEEE Access, early access, Sept. 2024.
- [60] Á. F. Vaquero, E. Martinez-de-Rioja, M. Arrebola, J. A. Encinar, and M. Achour. "Smart Electromagnetic Skin to Enhance Near-Field Coverage in mm-Wave 5G Indoor Scenarios". IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 72, np. 5, pp. 4311- 4326, May 2024.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

- [61] Á. F. Vaquero, E. Martinez-de-Rioja, S. M. Feito, M. R. Pino, and M. Arrebola, “Dual-Band Dual-Polarized Smart Electromagnetic Skin Supporting Dual mm-Wave Channel Deployment in Near Field”, submitted to IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Aug. 2024.
- [62] Lasantha Thakshila Wedage, Mehmet Can Vuran, Bernard Butler, Yevgeni Koucheryavy and Sasitharan Balasubramaniam. Internet of Paint (IoP): Channel Modeling and Capacity Analysis for Terahertz Electromagnetic Nanonetworks Embedded in Paint. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 42, No. 8, August 2024.
- [63] By C. Ouyang, Y. Chen, Z. Wang, X. Mu, and P. Zhu. A Primer on Near-Field Communications for Next-Generation Multiple Access. Proceedings of the IEEE, Vol. 112, N° 9, september 2024.

ACTIVIDAD ESPECIAL 6. TELEDETECCIÓN Y SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Fundación Conama
María de Molina 5, 1ºD
+34 91 310 73 50
conama@conama.org

#CONAMA2024