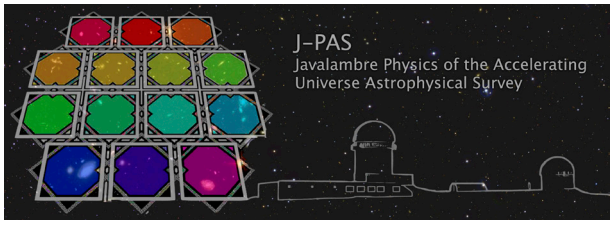
J-PAS EN MARCHA: EL CIELO EN 57 COLORES

J-PAS ha comenzado a observar el cielo desde Javalambre con 54+3 filtros en el óptico produciendo foto-espectros de resolución R~60 para cada objeto detectado. Estos espectros permiten medir foto-zs con un error menor de 0.3% para la mitad de las galaxias y cuásares, así como determinar la gravedad en superficie, temperatura efectiva, y metalicidad para las estrellas de nuestra Galaxia, como demuestran los cartografiados piloto miniJPAS y J-NEP.



Antonio Marín-Franch
amarin@cefca.es

Carlos López Sanjuan
clsj@cefca.es

Centro de Estudios de
Física del Cosmos de Aragón

José M. Vílchez
Instituto de Astrofísica de Andalucía - CSIC
jvm@iaa.es

Silvia Bonoli
Donostia International Physics Center
silvia.bonoli@dipc.org

Carlos Hernández Monteagudo
Instituto de Astrofísica de Canarias
carlos.hernandez.monteagudo@iac.es

En representación de la Colaboración J-PAS

El Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ, https://oajweb.cefca.es) ha comenzado a tomar los primeros datos del proyecto J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey, https://www.j-pas.org), un ambicioso cartografiado fotométrico sin precedentes planificado para llevarse a cabo a lo largo de esta década. Este proyecto, liderado por el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA), el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), el Observatorio Nacional de Río de Janeiro y la Universidad de Sao Paulo, tiene como objetivo observar miles de grados cuadrados del cielo visible desde Javalambre empleando un novedoso conjunto de 54 filtros estrechos contiguos complementados con 3 filtros de banda intermedia y ancha.

Definido y optimizado para poder avanzar en nuestro conocimiento de la estructura a gran escala del Universo, se espera que J-PAS contribuya a la comprensión de la energía oscura, permitiendo el estudio, a su vez, de cientos de millones de estrellas, galaxias, supernovas, cuásares, objetos de nuestro Sistema Solar, etc., con una técnica observacional única. De hecho, J-PAS proporcionará un espectro de baja resolución para cada píxel observado del cielo. En este sentido, J-PAS se plantea como un proyecto de legado para la comunidad científica internacional, que ofrece múltiples sinergias y una visión única del Universo.

El proyecto J-PAS y sus motivaciones científicas probablemente les resulten familiares a los lectores habituales del boletín de la SEA, ya que en el invierno de 2019 le dedicó un artículo a J-PAS. En aquel momento el proyecto contaba con un grado cuadrado observado en las 54+3 bandas cubriendo la *Extended Groth Strip*, llamado miniJPAS, cuyos datos se hicieron públicos a la comunidad internacional en diciembre de 2019 (https://archive.cefca.es/catalogues/minijpas-pdr201912) en una reunión abierta auspiciada por la RIA. Desde entonces hemos seguido avanzando y el presente artículo presenta las novedades principales del proyecto J-PAS en los últimos cuatro años. Presentamos la puesta en marcha de JPCam, instrumento diseñado y optimizado para llevar a cabo J-PAS, así como la explotación científica con más de 20 artículos publicados de los datos de miniJPAS y de J-NEP, un segundo campo de 0.25 grados cuadrados cerca del *North Ecliptic Pole* observado con idéntico sistema de filtros y, finalmente el comienzo de las observaciones de J-PAS, con unos 30 grados cuadrados cubiertos hasta la fecha y avanzando ya a velocidad de crucero.

JPCAM, UNA CÁMARA DE GRAN CAMPO DE VISIÓN Y 1.2 GIGAPÍXELES PARA EL JST250

J-PAS se está llevando a cabo con el *Javalambre Survey Telescope* (JST250) del OAJ, un telescopio de gran *etendue* de 2.55 metros de apertura y 3 grados (diámetro) de campo visión que ha sido concebido para llevar a cabo grandes cartografiados. El JST250 (imagen 1) es un telescopio altazimutal con una configuración tipo Ritchey-Chrétien y una relación focal de *f*/3.5. El plano focal corresponde a un diseño Cassegrain. El telescopio está equipado con un corrector de campo complejo de 3 lentes de diámetros en el rango de 500–600 mm y con 4 de las superficies ópticas asféricas. Los dos espejos y las tres lentes están diseñados para optimizar la calidad de imagen policromática y mantener una baja distorsión en todo el campo de visión.

El instrumento científico principal del JST250 es JPCam, una cámara de 1.2 gigapíxeles concebida especialmente para llevar a cabo el cartografiado J-PAS, maximizando el campo de visión, cobertura espectral y calidad de imagen en todo el plano focal. Se trata de una cámara de imagen directa y gran campo de visión equipada con un mosaico de 14 detectores de gran formato y bajo ruido electrónico CCD290 de Teledyne-e2v, de 9.2k por 9.2k píxeles. Integrada en el foco Cassegrain del JST250, JPCam proporciona un campo de visión efectivo de 4.1 grados cuadrados con una escala de placa de 0.23 segundos de arco por pixel. Cada detector científico se lee de manera sincronizada por 16 puertos lo que permite, en su modo nominal, una lectura de todo el plano focal en 10.9 segundos (*full frame*) o 6.1 segundos (*binning* 2x2), con un

Figura 1. El *Javalambre Survey Telescope* (JST250) del Observatorio Astrofísico de Javalambre y su instrumento científico principal JPCam, integrado en el foco Cassegrain.

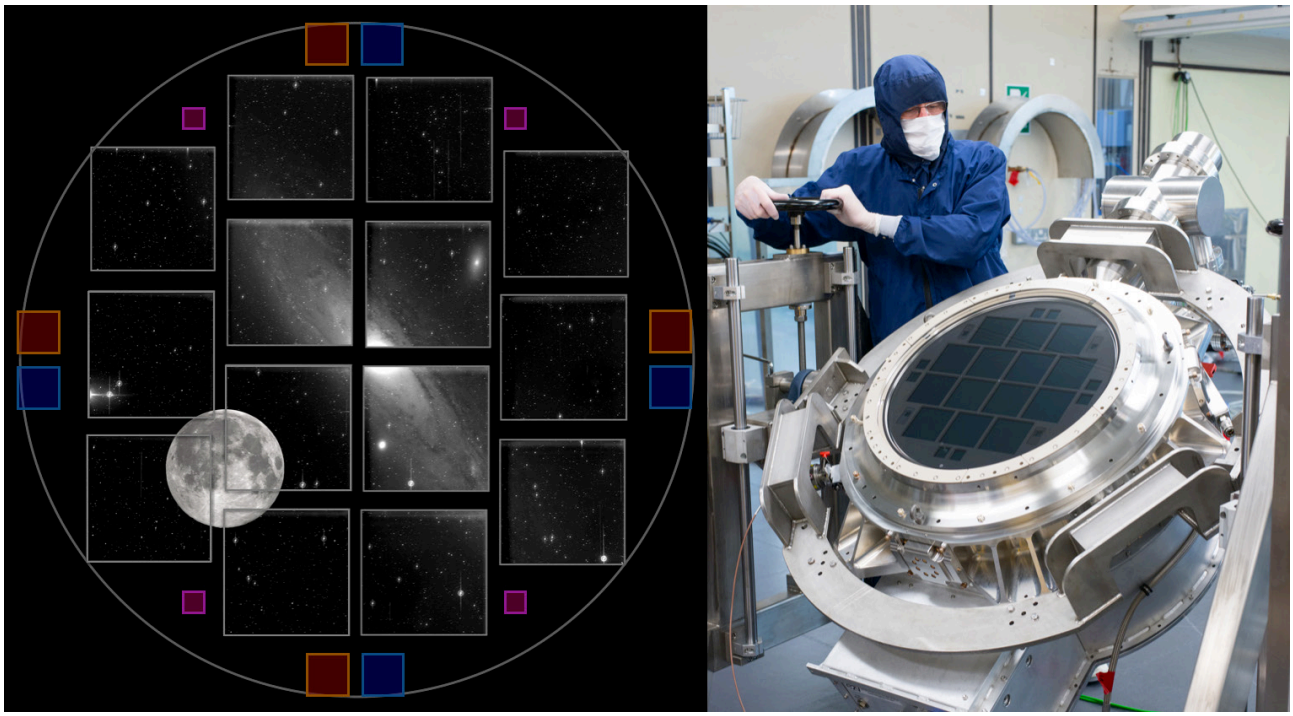
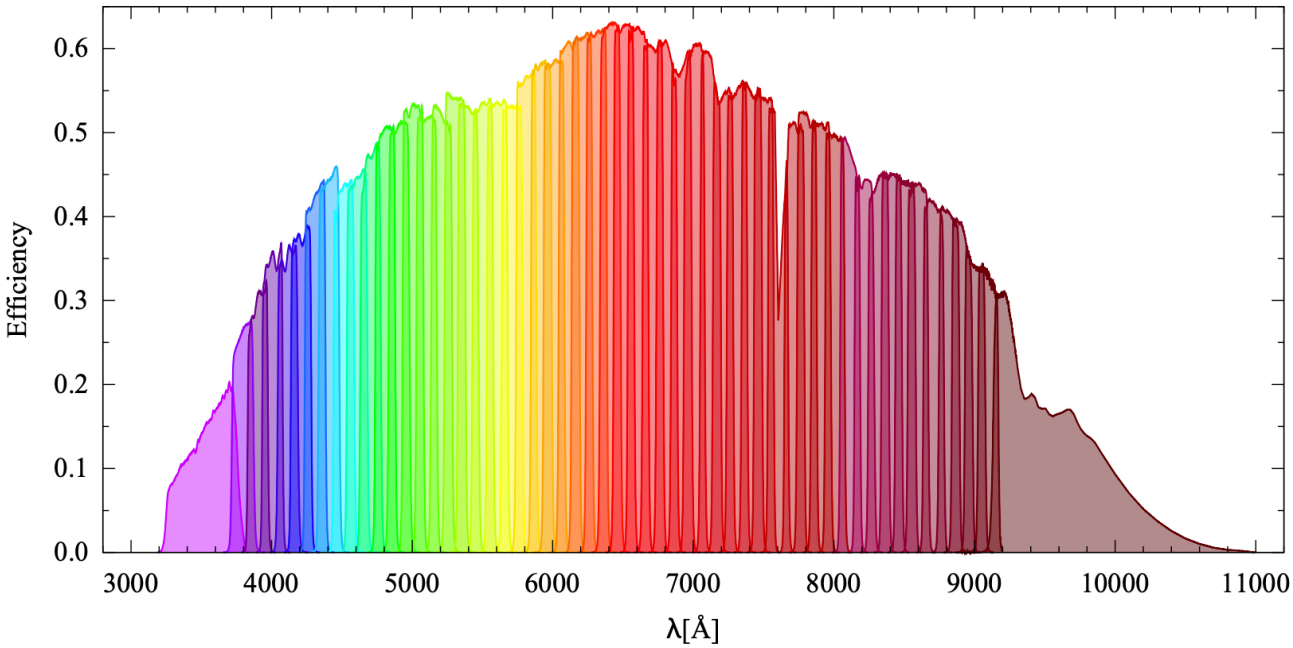


Figura 2. Derecha: cámara criogénica de JPCam en las instalaciones de Teledyne-e2v durante la fase de verificación en fábrica. Izquierda: Imagen de M31 tomada con JPCam y JST250 durante las primeras pruebas de observación. Esta imagen muestra la proyección del campo de visión observado por JST250 (círculo gris). La imagen a escala de la Luna se ha añadido con el objetivo de ilustrar el gran campo de visión del tándem JST250-JPCam.

Figura 3. Representación de la eficiencia del conjunto de filtros J-PAS a lo largo del espectro óptico.



ruido de lectura de solo 5.5 electrones (rms). JPCam representa tecnológicamente el *estado del arte* y hasta la fecha se constituye como la segunda cámara más grande del mundo en número de píxeles.

Garantizar una calidad de imagen óptima en todo el plano focal es siempre un reto, y especialmente en sistemas de gran campo de visión. En este sentido, el espejo secundario M2 del JST250 y el plano focal de JPCam están controlados activamente con dos actuadores del tipo hexápodo, lo que permite realizar correcciones finas en la posición del espejo secundario y del instrumento para compensar cambios de temperatura y/o flexiones mecánicas para diferentes orientaciones del telescopio, manteniendo la óptica permanentemente alineada en cualquier condición de operación.

El sistema de control de calidad de imagen que controla ambos hexápodos se basa en una técnica de detección y análisis de las aberraciones ópticas que afectan al sistema y, a partir de estas, calcula la posición óptima de ambos hexápodos para unas condiciones de temperatura y orientación del telescopio dadas. Para la medida de aberraciones en tiempo real JPCam incluye un conjunto de 8 detectores en la periferia de su plano focal, el cual se completa con 4 detectores adicionales dedicados a tareas de autoguiado. En la figura 2 se muestra el plano focal de JPCam en detalle (derecha), así como su proyección en cielo (izquierda).

En su conjunto, el sistema JST250-JPCam ha sido diseñado y optimizado para realizar grandes cartografiados fotométricos de manera eficiente, aportando un gran campo de visión, calidad de imagen y capacidad multifiltro.

SISTEMA DE FILTROS J-PAS

Una de las claves del proyecto J-PAS es su sistema de filtros sin precedentes (imagen 3), un conjunto de 54 filtros ópticos contiguos de banda estrecha (cada uno con un ancho de 145 Å), y con una separación de 100 Å de distancia entre sí, además de dos filtros de banda ancha en los extremos azul y rojo del rango óptico que proporcionan efectivamente un espectro de baja resolución ($R \sim 60$) para cada objeto observado. El sistema de filtros se ha diseñado y optimizado para medir desplazamientos al rojo fotométricos (foto-z) con un error relativo del 0.3%.

El instrumento JPCam se ha diseñado para admitir 5 bandejas de filtros, con 14 filtros cada una. Esto permite instalar simultáneamente todos los filtros de J-PAS en el instrumento, eliminando así la necesidad de cambiar los filtros de una noche a otra.

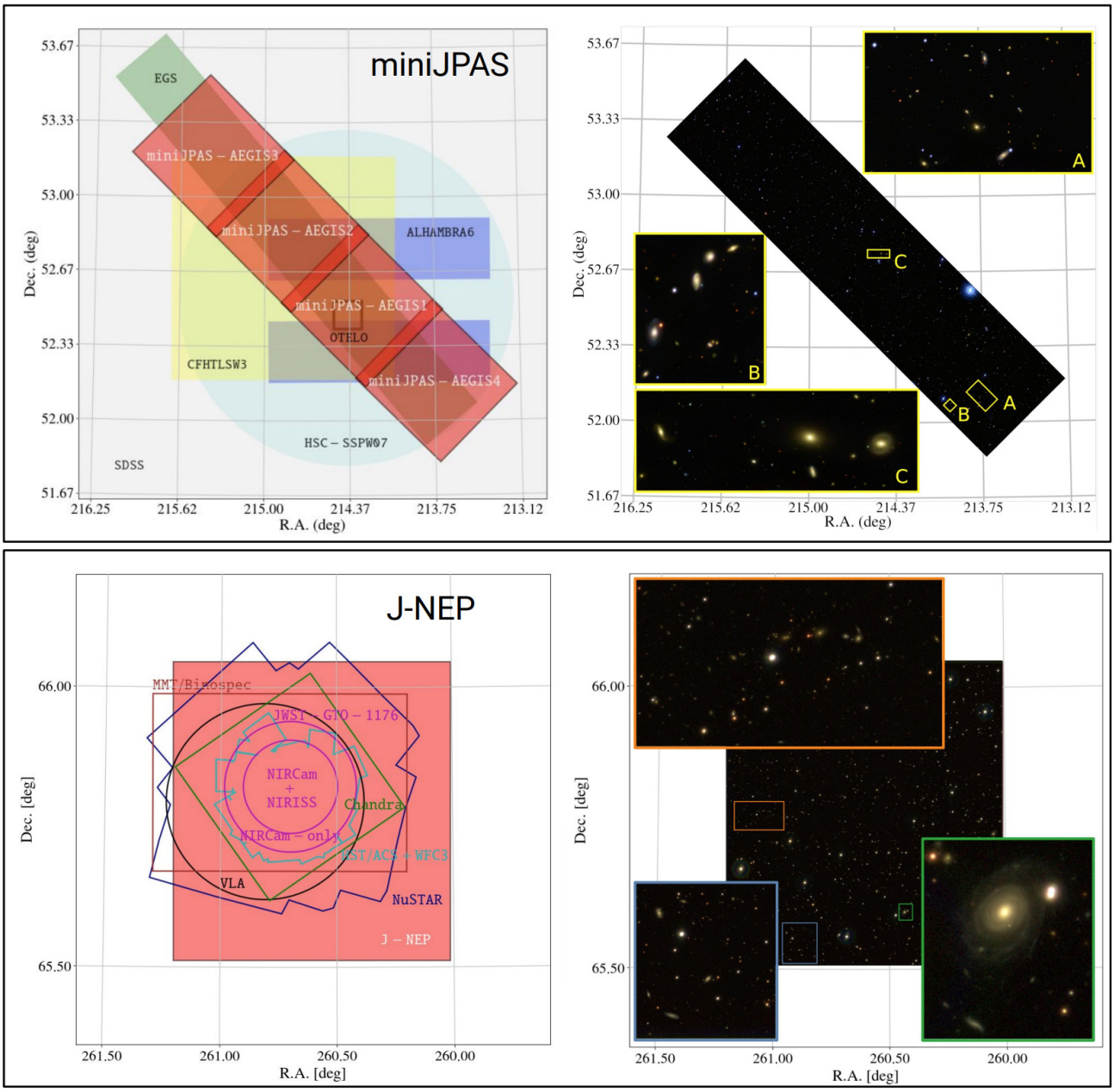
PRIMERA CIENCIA CON J-PAS

Mientras desde el OAJ se realizaba el comisionado de JPCam, la colaboración J-PAS se centró en la explotación científica de los datos de miniJPAS (Bonoli et al. 2021) y de J-NEP (Hernán-Caballero et al. 2023), adquiridos con la cámara *Pathfinder*, precursora de JPCam. En la figura 4 se muestran los campos miniJPAS y J-NEP, así como los campos de otros proyectos que cubren regiones del cielo que se solapan. En particular, parte del campo de J-NEP está siendo actualmente observado por JWST y cubre un área de 0.25 grados cuadrados sobre el cielo para la que disponemos de una amplia cobertura de observaciones multi-frecuencia.

En efecto, los datos de miniJPAS y J-NEP ya han dado lugar a una veintena de publicaciones en las cuales se demuestran, cualitativa y cuantitativamente, las capacidades de J-PAS en un amplio rango de problemas astrofísicos. Quizás el resultado más significativo sea la capacidad demostrada de medir desplazamientos al rojo (foto-zs) con una precisión del 0.3%, o incluso mejor, para un 50% de las galaxias catalogadas (Hernán-Caballero et al. 2021, 2023 - ver figura 5 para el caso de J-NEP). Este requerimiento *fundacional* del cartografiado permite caracterizar la estructura a gran escala con alta precisión para decenas de millones de galaxias y cuásares, lo que se traduce, más allá del estudio de las oscilaciones acústicas bariónicas (BAOs), en la posibilidad de construir catálogos de cúmulos y grupos de galaxias con una masa mínima del orden de $\sim 10^{13}$ masas solares (con una densidad de unos 100 grupos/cúmulos por grado cuadrado, Maturi et al. 2023 - ver figura 6, izquierda), así como en la identificación de una gran población ($\sim$150 por grado cuadrado) de cuásares con foto-zs de alta precisión para $z \in [1.5,3.5]$ (Queiroz et al. 2023, Rodrigues et al. 2023, Martínez-Solaeche et al. 2023, Pérez-Ràfols et al. 2023). Ambos catálogos se verán complementados por los datos de las colaboraciones eROSITA/DE (rayos X) y WEAVE-QSO (espectroscopía en el óptico para el estudio del bosque Lyman-α, Pieri et al. 2016), otorgándoles un valor de legado muy significativo. Se destaca también la posibilidad de

trabajar en la emisión difusa asociada tanto a galaxias y a cúmulos como a cuásares. En la figura 6 (derecha) se muestran imágenes de miniJPAS en el filtro J0520 centradas en dos cuásares a z∼3.2. Para este desplazamiento al rojo, el filtro J0520 corresponde a la longitud de onda de la emisión Lyman-α. Se puede apreciar la emisión difusa de Lyman-α y la presencia de dos núcleos (no presentes en otros filtros), probablemente indicadores de enormes regiones extendidas con emisión Lyman-α (Rahna et al. 2022)

Figura 4. Izquierda: coordenadas de los campos de miniJPAS (arriba) y J-NEP (abajo). Derecha: imágenes de los campos y zoom alrededor de cúmulos de galaxias y galaxias cercanas.



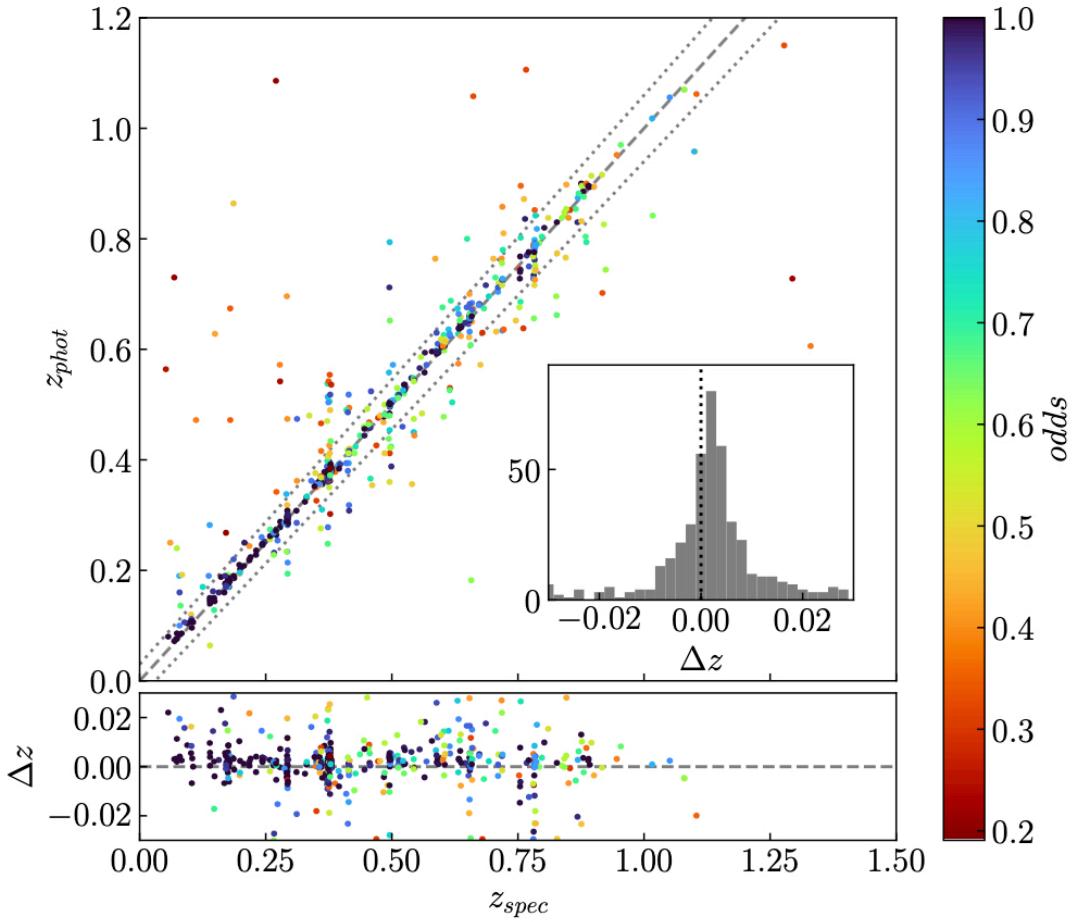


Figura 5. Foto-zs obtenidos en el campo de J-NEP comparados a desplazamientos al rojo espectroscópicos. Se puede apreciar el aumento de precisión al aumentar del parámetro de fidelidad "odds" (Hernán-Caballero et al. 2023).

Con varias decenas de miles de galaxias catalogadas en los 54+3 filtros, los estudios sobre formación y evolución de galaxias han confirmado el potencial de J-PAS en este ámbito. Se ha avanzado en la comprensión y el descubrimiento de nuevas galaxias con líneas de emisión (Martínez-Solaeche et al. 2022, Iglesias-Páramo et al. 2022), en el estudio de la evolución de las poblaciones estelares desde z = 1 (González Delgado et al. 2021), en la influencia del entorno (Rodríguez-Martín et al. 2022, González Delgado et al. 2022), así como en el impacto de los núcleos activos en la evolución galáctica (López et al. 2023). Se ha estudiado también cómo los filtros estrechos de J-PAS se pueden utilizar incluso para estimaciones estadísticas de las masas de agujeros negros supermasivos (Chaves-Montero et al. 2022).

Todos estos resultados se han obtenido de la observación de apenas un grado cuadrado, y es por tanto de esperar un número relevante de estudios en este ámbito a medida que el cartografiado avance y se estudien regiones dispares en el universo.

El cartografiado J-PAS ofrece también una oportunidad única para estudiar, de forma totalmente indiscriminada, los diferentes tipos de estrellas que conforman nuestra galaxia. Los datos existentes ya han demostrado la sensibilidad del sistema de filtros del cartografiado J-PAS a pequeñas *muescas* presentes en los espectros estelares que le permiten determinar con precisión parámetros atmosféricos como la gravedad en superficie, la temperatura efectiva o la metalicidad (esta última con una precisión cercana

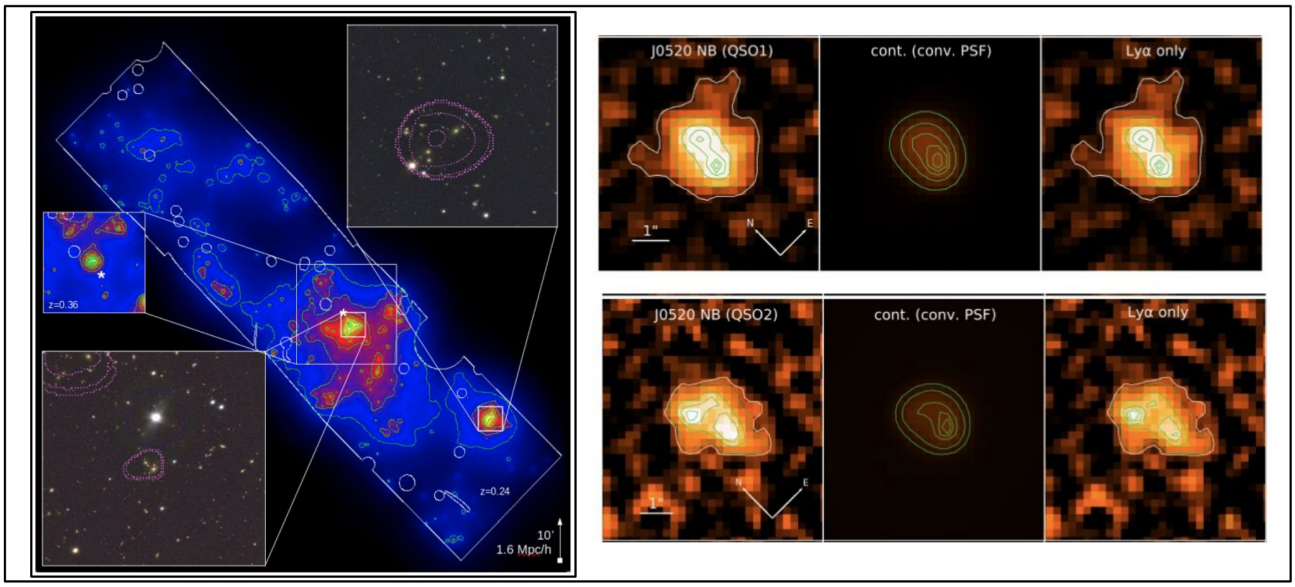


Figura 6. Izquierda: Ilustración de la detección de grupos y cúmulos de galaxias por el software AMICO a z∼0.24. Las densidades se indican con colores y trazan la presencia de estructuras. Las dos imágenes ampliadas de los datos de miniJPAS están centradas en las detecciónes más significativas a este desplazamiento al rojo (Maturi et al. 2023)- Derecha: Emisión en el filtro J0520 centrada en dos cuásares a z∼3.2 (paneles de la izquierda), convolución de la imagen de Lyman-α con el flujo del continuo (paneles centrales), imagenes de J0520 con el continuo sustraído (paneles de la derecha; Rhana et al. 2022).

a 0.1 dex, Yuan et al. 2023, figura 7, izquierda). De esta forma, J-PAS abre la posibilidad de *aislar*, de una muestra total de millones de estrellas, aquellos pocos objetos con muy baja metalicidad ([Fe/H]< –3.5) que permiten estudiar el origen de la Vía Láctea. Asimismo, el mismo sistema de filtros de J-PAS también permite caracterizar, con gran precisión y para un amplio rango de temperatura efectiva, la presencia de calcio en enanas blancas, aparte de clasificarlas como dominadas por hidrógeno o por helio (López-Sanjuan et al. 2022, figura 7, derecha). Se da la circunstancia que los datos de J-PAS complementan óptimamente la información astrométrica y fotométrica proporcionada por el satélite *Gaia*, ya que J-PAS es unas dos magnitudes más profundo con una resolución espectral similar.

J-PAS COMO PROYECTO DE LEGADO

Los datos obtenidos no solo serán útiles para los objetivos específicos del proyecto J-PAS, sino que también dejarán un impacto duradero en la investigación astronómica en general. J-PAS proporcionará foto-espectros de resolución R∼60 para todos y cada uno de los objetos detectados, y permitirá medir foto-zs con un error menor de 0.3% para unos 100 millones de galaxias y cuásares. El conjunto de datos producido tendrá por tanto un evidente valor de legado para la comunidad científica internacional, permitiendo abarcar una amplia variedad de estudios en diversas ramas de la astrofísica.

El manifiesto carácter transversal de J-PAS, demostrado con los datos de miniJPAS y J-NEP, ha motivado un notable número de acuerdos con otras colaboraciones internacionales, como el *Memorandum of Understanding* (*MoU*) que se ha suscrito con la colaboración eROSITA/DE para el estudio conjunto de la población de cúmulos y grupos de galaxias y de núcleos activos. Para estos últimos los foto-zs de J-PAS añaden un ingrediente crítico para analizar la evolución cosmológica de estas fuentes. Al mismo tiempo, la estimación del flujo en rayos X por eROSITA/DE de los grupos y cúmulos J-PAS derivará en una estimación independiente de su masa, muy valiosa en el contexto de la interpretación cosmológica de este catálogo de superestructuras. Por otro lado, con WEAVE-QSO la colaboración J-PAS tiene el compromiso de proporcionar catálogos de cuásares hasta *r*∼22.5–23 para

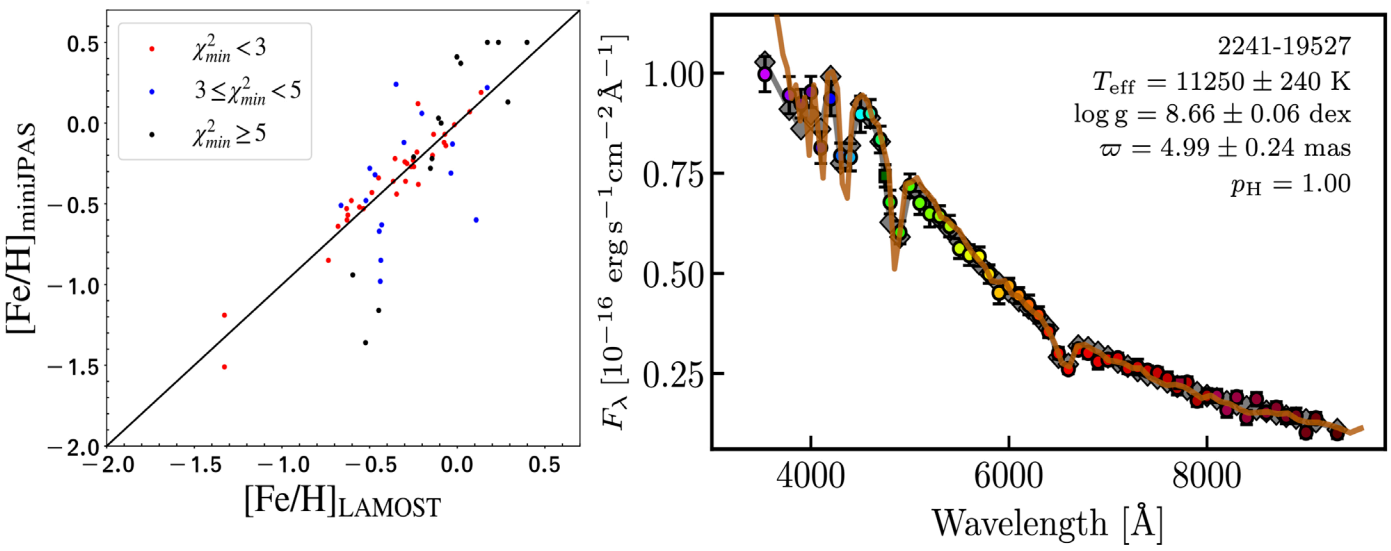


Figura 7. Izquierda: comparación entre las metalicidades de una muestra de estrellas dentro del campo de miniJPAS derivadas con los datos de miniJPAS y con los datos espectroscópicos de LAMOST - Derecha: ejemplo del foto-espectro de una enana blanca observada en miniJPAS (puntos en color) comparado con el espectro de SDSS (línea marrón continua) y el mejor ajuste teórico (línea gris continua). Los parámetros atmosféricos derivados de la fotometría de miniJPAS se presentan en el panel, incluyendo su clasificación como enana blanca con atmósfera de hidrógeno.

su posterior seguimiento espectroscópico, añadiendo así el estudio de la física del bosque de Lyman-α a la de la propia muestra de cuásares de J-PAS, que ya de por sí será una de las más profundas y extensas. De la misma forma, J-PAS también trabaja conjuntamente con JWST en la variabilidad en el óptico de fuentes en el campo J-NEP. Finalmente, es de señalar el *MoU* existente entre el CEFCA y el consorcio *Euclid*, consistente en el apoyo con observaciones de JPCam a dicha misión espacial de la ESA. En los próximos años seguiremos encontrando nichos de interés común y colaboración con otros grandes cartografiados en el panorama internacional.

PRIMERAS OBSERVACIONES DE J-PAS

Las primeras observaciones de J-PAS han comenzado después de un extenso proceso de verificación y optimización de JPCam en el JST250, realizado por el personal técnico y de investigación del CEFCA. La última fase del comisionado, concluida recientemente, confirmó que el sistema JPCam-JST250 cumple con todos los requisitos científico-técnicos previstos inicialmente, destacando su excelente calidad de imagen en todo el campo de visión.

Hasta el momento, se han completado los primeros 30 grados cuadrados (equivalentes a un área de 120 lunas llenas) con los 54+3 filtros de J-PAS, proporcionando la primera información sobre más de un millón de estrellas y galaxias. En la figura 8 se muestran, a título de ejemplo, algunos de los primeros datos J-PAS obtenidos con JST250-JPCam.

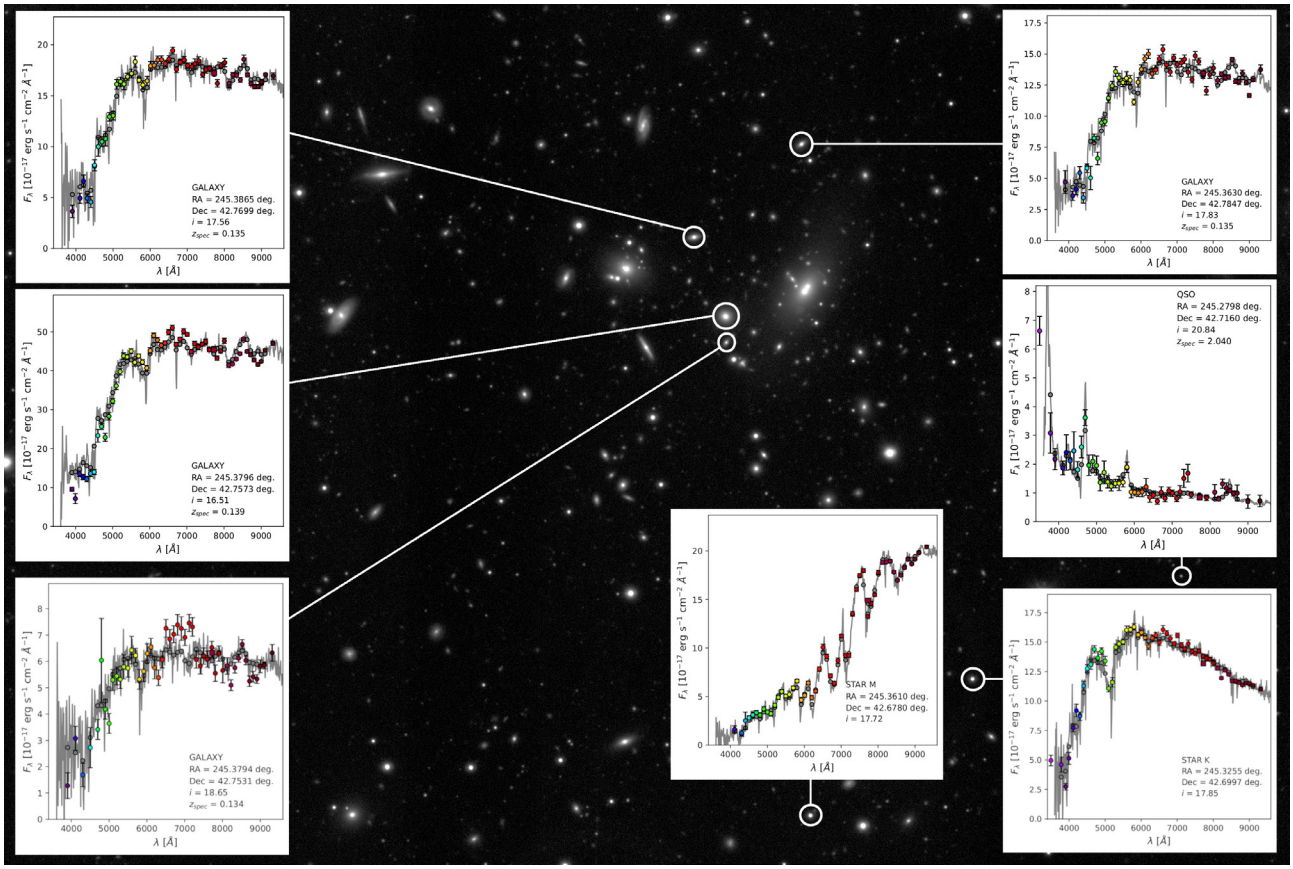
La gran cantidad de datos que genera J-PAS requiere de una infraestructura que permita la gestión, análisis y almacenamiento de esta información. Con este fin, CEFCA ha desplegado la Unidad de Procesado y Archivo de Datos (UPAD), un centro de datos diseñado para recibir, procesar, archivar y ofrecer a la comunidad científica internacional los datos de los telescopios del OAJ reducidos y calibrados. El centro de datos tiene una capacidad de almacenamiento total de unos 5.4PB y capacidad de cómputo gracias a sus más de 17 nodos con más de 544 cores usables en total. En la UPAD las imágenes son procesadas empleando una *pipeline* específicamente implementada en CEFCA para los proyectos del OAJ y, en particular para J-PAS, que está en continuo desarrollo y mejora desde hace

ya más de 10 años. Para la distribución de los productos de J-PAS (imágenes, catálogos, catálogos de valor añadido, etc.) se han desarrollado portales web específicos que permiten un acceso rápido y ágil a los mismos (https://archive.cefca.es/catalogues), ofreciendo además diferentes servicios del Observatorio Virtual; todo ello aplicando los principios *FAIR* (*Findable Accessible*, *Interoperable and Reusable*, Civera 2021).

PERSPECTIVAS FUTURAS

Durante la próxima década JPCam seguirá cartografiando el cielo visible desde Javalambre, evitando las zonas de alta extinción de la Vía Láctea. El objetivo final es cubrir unos 8500 grados cuadrados, proporcionando foto-espectros con resolución R∼60 para cientos de millones de objetos entre estrellas, galaxias y cuásares. Tanto el área como la estrategia multi-filtro de observación es única en el panorama actual, dando lugar a un conjunto de datos con un alto valor de legado para la comunidad internacional, que seguro trascenderán los objetivos científicos presentes y futuros de la colaboración J-PAS. Comienza pues una nueva fase de intensa actividad en Javalambre, cuya ventana multicolor al universo proporcionará nueva ciencia y nuevos resultados, que con gusto compartiremos en próximos boletines de la SEA.

Figura 8. Imagen comparativa de los primeros datos de J-PAS con espectros públicos disponibles. La imagen de fondo es una pequeña región de una de las exposiciones de J-PAS. Las gráficas presentan los foto-espectros (puntos en color) en comparación con los espectros de la colaboración Sloan SDSS (líneas en gris tenue), para cuatro galaxias, un cuásar y dos estrellas.



Los autores del artículo. De izquierda a derecha: Antonio Marín-Franch, Carlos López Sanjuan, José M. Vílchez, Silvia Bonoli y Carlos Hernández Monteagudo.

REFERENCIAS

- Maturi, M., et al.; The miniJPAS survey. Cluster and galaxy group detections with AMICO; 2023; A&A 678; A145
- Pérez-Ràfols, I., et al.; The miniJPAS survey quasar selection. IV. Classification and redshift estimation with SQUEzE; 2023; A&A 678; A144
- Martínez-Solaeche, G., et al.; The miniJPAS survey quasar selection. III. Classification with artificial neural networks and hybridisation; 2023; A&A 673; A103
- Rodrigues, N. V. N., et al.; The miniJPAS survey quasar selection - II. Machine learning classification with photometric measurements and uncertainties; 2023; MNRAS 520; 3494-3509
- Queiroz, C., et al.; The miniJPAS survey quasar selection - I. Mock catalogues for classification; 2023; MNRAS 520; 3476-3493
- López, I. E., et al.; The miniJPAS survey: AGN and host galaxy coevolution of X-ray-selected sources; 2023; A&A 672; A137
- Hernán-Caballero, A., et al.; J-NEP: 60-band photometry and photometric redshifts for the James Webb Space Telescope North Ecliptic Pole Time-Domain Field; 2023; A&A 671; A71
- Yuan, H.-B., et al.; The miniJPAS survey: stellar atmospheric parameters from 56 optical filters; 2023; MNRAS 518; 2018-2033
- Rahna, P. T., et al.; The miniJPAS Survey: Detection of the double-core Lyα morphology for two high-redshift QSOs; 2022; A&A 668; A148
- Rodríguez-Martín, J. E., et al.; The miniJPAS survey. Galaxy populations in the most massive cluster in miniJPAS: mJPC2470-1771; 2022; A&A 666; A160
- González Delgado, R. M., et al.; The miniJPAS survey. The role of group environment in quenching star formation; 2022; A&A 666; A84
- López-Sanjuan, C., et al.; The miniJPAS survey: White dwarf science with 56 optical filters; 2022; A&A 665; A151
- Iglesias-Páramo, J., et al.; The miniJPAS survey: A search for extreme emission-line galaxies; 2022; A&A 665; A95
- Martínez-Solaeche, G., et al.; The miniJPAS survey: Identification and characterization of the emission line galaxies down to $z < 0.35$ in the AEGIS field; 2022; A&A 661; A99
- Chaves-Montero, J., et al.; Black hole virial masses from single-epoch photometry. The miniJPAS test case; 2022; A&A 660; A95
- Hernán-Caballero, A., et al.; The miniJPAS survey: Photometric redshift catalogue; 2021; A&A 654; A101
- Bonoli, S., et al.; The miniJPAS survey: A preview of the Universe in 56 colors; 2021; A&A 653; A31
- González Delgado, R. M., et al.; The miniJPAS survey. Identification and characterization of galaxy populations with the J-PAS photometric system; 2021; A&A 649; A79
- Pieri, M., et al.; WEAVE-QSO: A Massive Intergalactic Medium Survey for the William Herschel Telescope, 2016; SF2A-2016, Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics.
- Merloni, A., et al.; eROSITA Science Book: Mapping the Structure of the Energetic Universe, 2012; arXiv e-prints, arXiv:1209.3114
- Civera, T., CEFCA Catalogues Portal towards FAIR principles. Proceedings ADASS XXXI (2021). https://arxiv.org/abs/2208.05272